



Publisher: Soil Science Society of Iran

Journal of Soil Research
(Soil and Water Sci.)

<https://srjournal.areeo.ir/>


Analysis of Global Trends and Research Innovations in Saline Soil Improvement: Trends and Key Studies

Parisa Mashayekhi^{a*}

^a Soil and Water Research Department, Isfahan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Isfahan, Iran.

Article Info

Article Type

Review Article

Received

May 12, 2026

Revised

July 11, 2026

Accepted

July 18, 2026

Published online

September 06, 2026

Keywords

Biochar,
Bibliometric analysis,
Soil improvements,
Saline soil.

*Corresponding author's email

p.mashayekhi@areeo.ac.ir

Extended Abstract

Background and Objectives: Soil salinization is one of the most serious environmental challenges threatening agricultural productivity and soil sustainability worldwide, particularly in arid and semi-arid regions. Increasing soil salinity negatively affects soil structure, nutrient availability, plant growth, and the activity of soil microbial communities. In recent years, numerous studies have focused on sustainable strategies to mitigate salinity stress and restore salt-affected soils. Among these strategies, the application of organic amendments, biochar, halophyte plants, improved irrigation management, and beneficial soil microorganisms such as mycorrhizal fungi have received significant attention. Despite the growing body of literature, a comprehensive overview of research trends, influential journals, and major research themes in soil salinization improvement remains necessary. Therefore, the present study aimed to analyze the global research landscape related to soil salinization improvement and to identify major scientific directions, influential publications, and key research topics in this field.

Methodology: A bibliometric analysis was conducted using publications related to soil salinization improvement. Relevant scientific articles were retrieved from major academic databases and analyzed using bibliometric indicators. The analysis included annual publication trends, disciplinary distribution, leading journals, and highly cited research articles. Additionally, the top journals publishing studies on soil salinity improvement were identified based on publication counts, citation indicators, and impact factors. The content of highly cited articles was also examined to determine the main research approaches used for saline soil remediation, such as the application of biochar, organic amendments, microbial inoculation, and innovative soil and water management strategies.

Results: The results revealed a steady increase in the number of scientific publications related to soil salinization improvement over recent years, indicating growing global attention to this issue. The disciplinary distribution showed that most studies are concentrated in soil science, environmental science, agriculture, and ecology. Several leading journals play a major role in disseminating research findings in this field. Analysis of the most cited publications indicated that the application of biochar and organic amendments is among the most widely studied strategies for improving saline soils due to their ability to enhance soil physical, chemical, and biological properties. Biochar has been shown to reduce nutrient leaching, improve nitrogen retention, and mitigate the negative effects of salinity on plant growth. In addition, studies highlighted the important role of soil microbial communities and mycorrhizal fungi in improving plant tolerance to salt stress by enhancing nutrient uptake and increasing the accumulation of osmoprotective compounds such as soluble sugars. Research has also emphasized the use of halophyte plants for the restoration of saline lands and the adoption of improved irrigation techniques, including drip irrigation, as

effective management strategies. Overall, the findings demonstrate that integrated biological and soil management approaches are increasingly recognized as sustainable solutions for saline soil remediation.

Conclusion: The bibliometric assessment indicates that research on soil salinization improvement has expanded rapidly and continues to evolve toward more sustainable and environmentally friendly remediation strategies. The combined use of biochar, organic amendments, beneficial microorganisms, and improved soil and water management practices shows considerable potential for restoring salt-affected soils and enhancing agricultural productivity. Future research should focus on long-term field evaluations, the optimization of amendment application rates, and the integration of biological and management practices to develop efficient and scalable solutions for saline soil rehabilitation.

Cite this article: Mashayekhi, P., 2026. Analysis of Global Trends and Research Innovations in Saline Soil Improvement: Trends and Key Studies. Review Article, *Journal of Soil Research*, 40 (2), pp 167-191.



DOI: <https://doi.org/10.22092/IJSR.2026.372752.817>

Publisher: Soil Science Society of Iran



بررسی روندهای جهانی و نوآوری‌های تحقیقاتی در اصلاح خاک‌های شور: تحلیل روندها و پژوهش‌های کلیدی

پریسا مشایخی^{۱*} 

^۱ بخش تحقیقات خاک و آب، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی اصفهان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، اصفهان ایران.

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله مروری	
تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۲/۲۲	
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۰۴/۲۰	
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۴/۲۷	
تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۶/۱۵	
واژه‌های کلیدی بیوجار، بهبود دهنده خاک، تحلیل علم‌سنجی، خاک شور.	شوری خاک یکی از چالش‌های اساسی در مناطق خشک و نیمه‌خشک جهان به‌شمار می‌رود و مدیریت آن به یکی از محورهای اصلی پژوهش‌های علمی تبدیل شده است. به‌منظور بررسی وضعیت موجود، شناسایی کانون‌های پژوهشی و تحلیل روندهای نوظهور در حوزه اصلاح شوری خاک، در این مطالعه تعداد ۲۵۶۱ مقاله منتشرشده در بازه زمانی ۱۹۹۰ تا ۲۰۲۴ از پایگاه داده Web of Science Core Collection (WoSCC) مورد تحلیل قرار گرفت. با استفاده از ابزارهای کتاب‌سنجی و بصری‌سازی شامل Bibliometrix و VOSviewer شاخص‌هایی نظیر روند سالانه انتشار مقالات، میزان استنادها، مشارکت‌کنندگان اصلی (کشورها، مؤسسات و نویسندگان)، نشریات تأثیرگذار و واژگان کلیدی مورد ارزیابی قرار گرفتند. نتایج نشان‌دهنده روندی افزایشی در تولیدات علمی این حوزه بود که در سه مرحله شامل دوره اکتشافی اولیه، دوره توسعه‌کند و دوره رشد سریع قابل تقسیم است. رشته‌های «علوم محیط‌زیست»، «علوم خاک» و «علوم گیاهی» بیشترین سهم را در این حوزه داشته‌اند و رویکردهای میان‌رشته‌ای نقش مهمی در گسترش و تعمیق مطالعات ایفا کرده‌اند. چین به‌عنوان پیشروترین کشور در تولید مقالات علمی شناخته شد و جایگاه برجسته‌ای در شبکه همکاری‌های بین‌المللی داشت. تحلیل هم‌رخدادی و جهش واژگان کلیدی نشان داد که تمرکز اصلی پژوهش‌های اخیر بر راهبردهای فیزیکی، شیمیایی و زیستی برای اصلاح خاک‌های شور بود. بر اساس روندهای شناسایی‌شده، تلفیق اصلاح‌کننده‌های شیمیایی، توسعه ارقام گیاهی متحمل به شوری و کاربرد نانومواد نوین به‌عنوان جهت‌گیری‌های اصلی پژوهش‌های آینده در حوزه مدیریت و اصلاح شوری خاک پیش‌بینی می‌شود.

استناد: مشایخی، پ.، ۱۴۰۵. بررسی روندهای جهانی و نوآوری‌های تحقیقاتی در اصلاح خاک‌های شور: تحلیل روندها و پژوهش‌های کلیدی. مقاله

مروری، نشریه پژوهش‌های خاک، (۲) ۴۰، ص ۱۶۷-۱۹۱.

DOI: <https://doi.org/10.22092/IJSR.2026.372752.817>



مقدمه

شوری خاک با تأثیرات شدید ناشی از تغییرات اقلیمی جهانی و فعالیت‌های انسانی، به یکی از مهم‌ترین و فراگیرترین مشکلات تخریب سرزمین در مناطق خشک، نیمه‌خشک و ساحلی در سراسر جهان تبدیل شده است (Ondrasek & Rengel, 2021). خاک شور با انباشت نمک‌ها شناخته می‌شود؛ جایی که هم میزان نمک‌های محلول و هم غلظت کاتیون‌ها از مقادیر طبیعی فراتر رفته و در نتیجه رشد عادی اغلب گونه‌های گیاهی را مختل می‌کند (Zhao et al., 2020). خاک شور تحت تأثیر دو گروه عوامل طبیعی مانند تبخیر سطحی بیشتر از بارندگی و بالا آمدن سطح آب زیرزمینی و عوامل انسانی مانند آبیاری و کوددهی نامناسب، ضعف سامانه‌های زهکشی و تخریب پوشش گیاهی ایجاد می‌شود. این عوامل در مجموع موجب تجمع نمک در لایه‌های سطحی خاک و اختلال در فرایندهای طبیعی نمک‌زدایی می‌شوند (Wang et al., 2022). بر اساس گزارش سازمان خواربار و کشاورزی ملل متحد (FAO)، خاک‌های متأثر از شوری در سطح جهان مساحتی برابر با ۱/۳۸۱ میلیارد هکتار را پوشش می‌دهند که ۱۰/۷ درصد کل سطح خشکی‌های کره زمین را شامل می‌شود. بیشترین سهم این پدیده با ۴۲/۱ درصد مربوط به منطقه اقیانوس آرام و عمدتاً در کشورهایی مانند استرالیا، آرژانتین، قزاقستان و روسیه است. علاوه بر این، ۱/۰۳۸ میلیارد هکتار از خاک‌های جهان در معرض خطر بالقوه شوری قرار دارند (FAO, 2024). در حال حاضر حدود ۲۰ درصد از اراضی کشاورزی و ۳۳ درصد از اراضی آبی دنیا تحت تأثیر شوری هستند. این مشکل در بسیاری از مناطق جهان سالانه با نرخ رشد حدود ۱۰ درصد در حال تشدید است؛ و پیش‌بینی می‌شود تا سال ۲۰۵۰ بیش از ۵۰ درصد اراضی زراعی جهان تحت تأثیر شوری قرار گیرند (Singh, 2021).

خاک‌های متأثر از نمک^۱ شامل سه گروه اصلی خاک‌های شور^۲، سدیمی^۳ و شور-سدیمی^۴ هستند که از نظر ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و مدیریتی تفاوت‌های اساسی با یکدیگر دارند. خاک‌های شور به دلیل دارا بودن مقادیر بالای یون‌های محلول (مانند Na^+ ، Ca^{2+} ، Cl^- و SO_4^{2-}) و در برخی موارد قلیائیت شدید یا نسبت‌های نامتوازن یونی، از ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی نامطلوبی برخوردارند که به کاهش تولید اولیه، افت حاصلخیزی خاک و تضعیف عملکردهای اکولوژیک منجر می‌شود (Zhang et al., 2023b). با افزایش

غلظت نمک، پتانسیل اسمزی محلول خاک کاهش یافته و دسترسی گیاه به آب محدود می‌شود و این امر توانایی ریشه گیاه را برای جذب مؤثر آب و عناصر غذایی تضعیف می‌کند. افزون بر این، حضور این یون‌ها معمولاً موجب کاهش تعداد و فعالیت موجودات زنده خاک شده و در نتیجه رشد طبیعی محصولات زراعی را بیشتر مختل می‌کند (Xie et al., 2024). خاک‌های سدیمی عمدتاً با درصد بالای سدیم تبادلی (ESP) مشخص می‌شوند که موجب تخریب ساختمان خاک، کاهش نفوذپذیری و افت شدید کیفیت فیزیکی خاک می‌گردد. در خاک‌های شور-سدیمی هر دو مشکل به‌طور هم‌زمان وجود دارد و بنابراین نیازمند راهبردهای مدیریتی ویژه هستند.

اصلاح خاک برای دستیابی به عملکرد پایدار و بالای محصولات زراعی ضروری بوده و بخش بنیادی تأمین امنیت غذایی جهانی را تشکیل می‌دهد. همچنین از طریق افزایش توان ذخیره‌سازی کربن، بهبود کارایی مدیریت خاک و ارتقای تولید زیست‌توده نقش مهمی در کاهش تغییرات اقلیمی ایفا می‌کند؛ بنابراین، توسعه فناوری‌های سازگار با محیط‌زیست که متناسب با درجات و انواع مختلف شوری طراحی شده باشند، برای مدیریت پایدار و سازگار با محیط زیست شوری خاک اهمیت اساسی دارد.

در حال حاضر، راهکارهای اصلاح خاک‌های متأثر از نمک عمدتاً بر اقدامات فیزیکی، شیمیایی و زیستی متمرکز هستند. به‌کارگیری اقدامات فیزیکی، شیمیایی و مهندسی برای اصلاح شوری خاک می‌تواند منجر به هزینه‌های بالای ساخت‌وساز، آسیب احتمالی به ساختمان خاک و حتی خطر بروز آلودگی ثانویه شود (Zhang et al., 2023a)؛ در مقابل، اقدامات زیستی نه تنها موجب کاهش شوری خاک و بهبود ساختمان آن می‌شوند، بلکه از مزایای قابل‌توجهی همچون صرفه‌جویی در مصرف آب، نیاز پایین به نهاده‌ها و پایداری زیست‌محیطی برخوردارند (Zhao et al., 2020).

پژوهشگران از زوایای مختلف و به‌طور گسترده به بررسی اصلاح شوری خاک پرداخته‌اند که این امر به انتشار تعداد زیادی مقاله پژوهشی و مروری در این زمینه منجر شده است. مطالعات کلاسیک پژوهشگران برجسته‌ای نظیر Maas and Hoffman, Rhoades, Szabolcs, Van Genuchten و Qadir نقش مهمی در توسعه دانش مربوط به شوری خاک، تحمل گیاهان به شوری و روش‌های اصلاح خاک‌های متأثر از نمک داشته است. در دهه‌های اخیر نیز توجه پژوهشگران به توسعه راهکارهای پایدار شامل کاربرد بیوجار، اصلاح‌کننده‌های آلی و معدنی، میکروآرگانیزم‌های مفید، گیاهان هالوفیت و مدیریت بهینه آب افزایش یافته است. برای مثال، Bello و

^۱ Salt-affected soils^۲ Saline soils^۳ Sodic soils^۴ Saline-sodic soils

خلاصه کرده و جهت‌گیری‌های توسعه آینده را آشکار سازند؛ بنابراین، در این مقاله از روش‌های علم‌سنجی و ترسیم نقشه دانش علمی برای تحلیل ادبیات مربوط به اصلاح شوری خاک استفاده شد. مهم‌ترین دستاوردهای این پژوهش عبارتند از:

(۱) مرور و جمع‌بندی پیشرفت‌های پژوهشی موجود در حوزه اصلاح شوری خاک و بررسی محدودیت‌ها و چالش‌های مرتبط با روش‌های اصلاحی فعلی.

(۲) با استفاده از نرم‌افزارهای علم‌سنجی مانند Bibliometrix و VOSviewer این مطالعه تحلیل جامعی از روند و حجم انتشار مقالات، نویسندگان و نهادهای اثرگذار (کشورها/مناطق، مؤسسات و نویسندگان)، نشریات تأثیرگذار و واژه‌های کلیدی انجام داده است تا تصویری دقیق از چشم‌انداز پژوهشی این حوزه ارائه دهد.

از طریق تحلیل هم‌رخدادی واژگان کلیدی و تحلیل جهش^۲، این مقاله کانون‌های داغ پژوهشی در زمینه اصلاح شوری خاک را شناسایی کرده و روندهای بالقوه آینده در این حوزه را تبیین می‌کند.

داده‌ها و روش‌ها

منابع داده و راهبردهای جست‌وجو

داده‌های مورد استفاده در این مقاله از پایگاه Web of Science Core Collection (WoSCC) استخراج شد. پایگاه WoSCC شامل مهم‌ترین و اثرگذارترین دستاوردهای پژوهشی جهان است و به عنوان برترین پلتفرم جست‌وجو در علوم طبیعی شناخته می‌شود (Rezende et al., 2021).

راهبرد جست‌وجو بر مبنای ترکیبی از کلیدواژه‌های زیر انجام شد: "salinity" OR "soil salinization" OR "salt-affected soil" OR "saline soil" OR "saline-sodic soil" OR "sodic soil") AND ("reclamation" OR "remediation" OR "amelioration" OR "rehabilitation") طراحی شد که هم شامل عنوان و هم متن مقالات بود. محدوده زمانی جست‌وجو سال‌های ۱۹۹۰ تا ۲۰۲۴ بود. نوع اسناد نیز به Article محدود شد. تمام رکوردهای مرتبط به صورت نظام‌مند به Excel وارد شدند و عنوان، چکیده و کلیدواژه‌ها برای حذف موارد تکراری و منابع نامرتبط با موضوع اصلاح خاک شور با دقت بررسی شدند. این فرایند موجب شد که صرفاً منابع مرتبط و دقیق انتخاب شوند و در نهایت ۲۵۶۱ رکورد پس از پالایش کامل حفظ شد. پس از حذف مدارک نامرتبط، اسناد باقی‌مانده در قالب فایل متنی ساده صادر شدند.

همکاران، اثرات و مکانیسم‌های گچ و اصلاح‌کننده‌های زیستی-آلی (کمپوست، کاه و کلش و سایر مواد آلی همراه با تلقیح میکروارگانیسم‌های مفید) را بر ویژگی‌های زیستی، فیزیکی و شیمیایی خاک‌های متأثر از نمک مرور کردند (Bello et al., 2021). Li و همکاران مکانیسمی را که طی آن بیوجار کاه و کلش با تغییر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک، پایداری خاک‌دانه‌ها، محتوای اسیدهای آلی، فعالیت آنزیمی، ژن‌های عملکردی کلیدی و ساختار جامعه میکروبی، قابلیت زیست‌فراهمی فسفر را در خاک شور بهبود می‌بخشد، مورد بررسی مروری قرار دادند (Li & Li, 2022).

Wang و همکاران، سازوکارهای سازگاری گیاهان هالوفیت با شوری را در سطوح مورفولوژیک، فیزیولوژیک و مولکولی مرور کرده و پتانسیل هالوفیت‌ها را برای بازسازی خاک شور از طریق نمک‌زدایی و تقویت فرآیند شست‌وشوی نمک ارزیابی کردند (Wang et al., 2023f). همچنین، Dey و همکاران اثرات شوری خاک بر دسترس‌پذیری فسفر و نقش باکتری‌های مقاوم به شوری حل‌کننده فسفات را در کاهش تنش شوری در گیاهان مرور نمودند (Dey et al., 2021).

با وجود انتشار مرورهای تخصصی متعدد در زمینه‌هایی نظیر بیوجار، گیاهان شورپسند، مدیریت آبیاری، اصلاح‌کننده‌های آلی و میکروبی، هنوز مطالعات علم‌سنجی جامعی که روندهای جهانی تولید دانش، شبکه‌های همکاری علمی، ساختار استنادی و تحول موضوعات پژوهشی در کل حوزه اصلاح خاک‌های متأثر از نمک را بررسی کرده باشند محدود هستند. علم‌سنجی^۱ با بهره‌گیری از روش‌های ریاضی و آماری به تحلیل ادبیات علمی در یک حوزه مشخص می‌پردازد و ابزاری ارزشمند برای بررسی وضعیت پژوهش، شناسایی کانون‌های داغ پژوهشی و تبیین روندهای تکاملی در رشته‌های مرتبط به شمار می‌رود. در سال‌های اخیر، علم‌سنجی به طور گسترده در حوزه‌های مختلف پژوهشی مانند اصلاح خاک‌های آلوده به فلزات سنگین (Rajeswari et al., 2022)، اصلاح آب زیرزمینی (Zhang et al., 2017) و تصفیه پساب‌های صنعتی (Müller et al., 2023) به کار گرفته شده است؛ با وجود این، همچنان کمبود مقالات علمی احساس می‌شود که به طور نظام‌مند به بررسی سیر تحول، کانون‌های پژوهشی و تکامل راهبردهای کاهش شوری و مدیریت شوری خاک بپردازند.

در حال حاضر، پژوهش‌های مرتبط با اصلاح شوری خاک بسیار پیچیده بوده و دامنه گسترده‌ای از رشته‌های علمی از جمله زراعت، علوم خاک و مهندسی محیط‌زیست را دربر می‌گیرد. روش‌های علم‌سنجی می‌توانند به طور مؤثر نتایج پژوهشی را

^۲ burst analysis

^۱ Bibliometrics

روش‌های تحلیلی و تجسم داده‌ها

در این پژوهش برای تحلیل داده‌ها و ترسیم نقشه علم از نرم‌افزار Bibliometrix برای استخراج اطلاعات کلیدی از جمله موضوع تحقیق، عنوان مقاله، کلیدواژه‌ها، فراوانی استناد و نشریه منتشرکننده استفاده شد. همچنین نرم‌افزار VOSviewer برای خوشه‌بندی و تحلیل نقاط داغ پژوهشی مرتبط با روش‌های اصلاح خاک شور به کار رفت.

نتایج و تحلیل علم‌سنجی

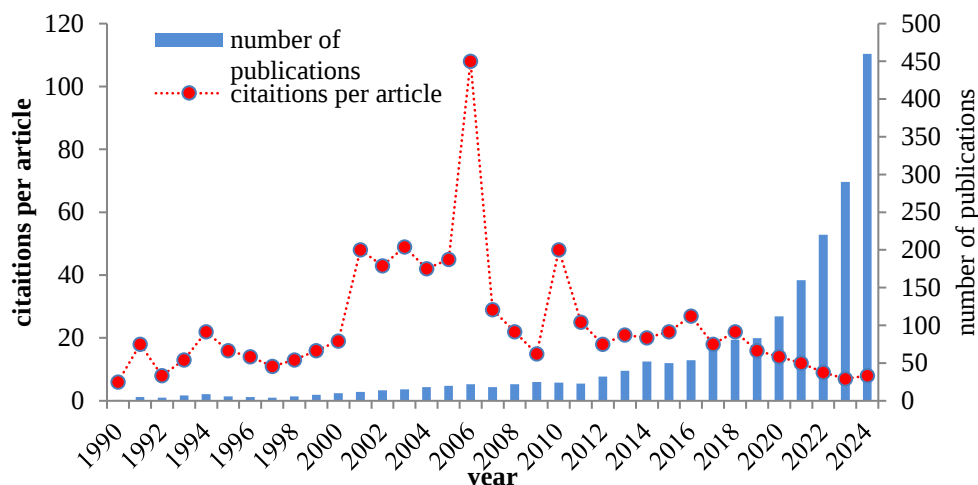
برونداد سالانه و حوزه‌های مرتبط

توزیع سالانه تعداد مقالات می‌تواند روند توسعه پژوهش در این حوزه را نشان دهد و بسامد استنادها نیز میزان پذیرش و اعتبار جهت‌گیری‌های پژوهشی را بازتاب می‌دهد (Wang et al., 2023d). همان‌گونه که در (شکل ۱) مشاهده می‌شود، از سال ۱۹۹۰ تا ۲۰۲۴ تعداد انتشارات مرتبط با پژوهش‌های اصلاح شوری خاک روندی افزایشی داشته و این روند را می‌توان به‌طور تقریبی به سه مرحله تقسیم کرد: (۱) دوره کاوش اولیه (۱۹۹۰-۲۰۱۰): این مرحله، دوره آغازین پژوهش در این حوزه بوده و کمتر از ۳۰ مقاله در سال منتشر شده است؛ از این‌رو روند توسعه نسبتاً ملایم بود. میانگین بالای استنادها به ازای هر مقاله در سال ۲۰۰۶ ناشی از تعداد محدودی مقاله شاخص بود؛ از جمله: "شوری خاک در جهان با تأکید بر استرالیا"^۱ با ۹۵۶ استناد و "استفاده از مواد آلی به عنوان راهبردی برای اصلاح خاک‌های شور: تأثیر بر ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک"^۲ با ۳۹۴ استناد. (۲) دوره توسعه کند (۲۰۱۱-۲۰۱۸): در این مرحله، تعداد مقالات نسبت به دوره پیشین افزایش یافت؛ به‌طوری‌که از ۳۶ مقاله در سال ۲۰۱۱ به ۱۱۲ مقاله در سال ۲۰۱۸ رسید.

نرخ انتشار مقالات طی این دوره با نوساناتی همراه بود، اما روند کلی افزایش تدریجی را نشان می‌داد. (۳) دوره رشد سریع (۲۰۱۹-۲۰۲۴): از سال ۲۰۱۹ تا ۲۰۲۴، تعداد انتشارات رشد ناگهانی و نوسانی داشته و میانگین سالانه تعداد مقالات به ۲۹۸ مقاله رسیده است. در سال‌های اخیر، افزایش قابل‌توجه مقالات مرتبط با شوری خاک بیانگر توجه روزافزون جامعه علمی و اهمیت فزاینده این موضوع است؛ چنان‌که در شعار «روز جهانی خاک ۲۰۲۱» نیز با عنوان «جلوگیری از شوری خاک و ارتقای بهره‌وری خاک» بر آن تأکید شد.

¹ World salinization with emphasis on Australia

² Use of organic amendment as a strategy for saline soil remediation: Influence on the physical, chemical and biological properties of soil



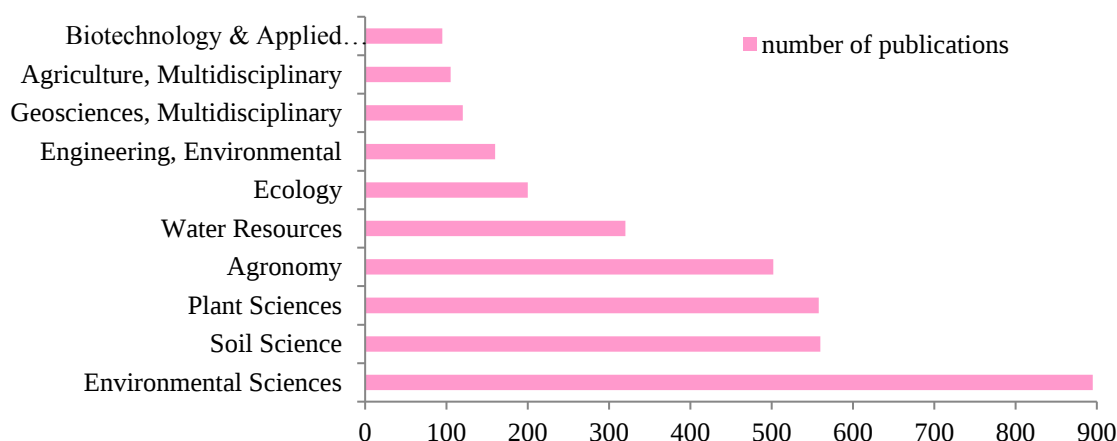
شکل ۱- روند سالانه انتشار مقالات مرتبط با پژوهش‌های اصلاح شوری خاک.

Figure1. Annual publication output in soil salinity improvement research.

کرد (Rashidi et al., 2021). بر اساس آمار، رشته‌های مرتبط با اصلاح شوری خاک، پژوهش‌ها مجموعاً ۹۳ رشته علمی را در بر می‌گیرند. این گستره وسیع نشان می‌دهد که موضوع اصلاح شوری خاک توجه پژوهشگران در حوزه‌های مختلف را به خود جلب کرده و بر اهمیت و پیچیدگی آن تأکید دارد. در میان این رشته‌ها، ۱۰ رشته برتر از نظر تعداد مقالات منتشرشده در شکل ۳ نشان داده شده‌اند. رشته‌ای که بیشترین تعداد مقالات را به خود اختصاص داده، «علوم محیط‌زیست» با ۸۹۵ مقاله است. «علوم خاک» با ۵۶۰ مقاله در رتبه دوم قرار دارد و «علوم گیاهی»، «زراعت» و «منابع آب» با ۵۵۸، ۵۰۲ و ۳۲۰ مقاله به ترتیب در رتبه‌های سوم، چهارم و پنجم قرار گرفته‌اند.

افزایش فعالیت پژوهشی با تشدید سیاست‌گذاری‌های بین‌المللی و ملی نیز هم‌زمان بوده است. سازمان‌هایی مانند FAO و شراکت جهانی خاک (GSP) ابتکارهایی نظیر «طرح شراکت جهانی خاک» را برای مقابله با شوری از طریق ارتقای مدیریت علمی و عملی خاک در سال ۲۰۱۲ ارائه کردند (FAO, 2012). به همین ترتیب، سیاست‌های ملی مانند «طرح اقدام برای پیشگیری و کنترل آلودگی خاک» در چین که شامل راهکارهایی برای بهبود و اصلاح خاک‌های شور است، همراه با مشوق‌های منطقه‌ای نظیر یارانه‌ها و حمایت‌های فنی، به ترویج مدیریت پایدار اراضی کمک کرده‌اند. این چارچوب‌های سیاستی با افزایش آگاهی سیاست‌گذاران و عموم درباره چالش شوری خاک و نیز تقویت انگیزه‌های پژوهشی، نشان می‌دهند که این حوزه در سال‌های آینده نیز توجه قابل‌توجهی را به خود جلب خواهد کرد و در پاسخ به تلاش‌های هم‌زمان علمی و دولتی، رشد و تحول بیشتری خواهد یافت.

داغ‌ترین موضوعات پژوهشی در حوزه‌های مختلف را می‌توان از طریق آمار مربوط به انواع رشته‌های علمی مقالات شناسایی



شکل ۲- توزیع رشته‌ای پژوهش‌های مرتبط با بهبود شوری خاک.

Figure2. Disciplinary distribution of research on soil salinity improvement.

فدراسیون روسیه (۷۷ میلیون هکتار)، ایالات متحده (۷۳/۴ میلیون هکتار)، ایران (۵۵/۶ میلیون هکتار)، سودان (۴۳/۶ میلیون هکتار)، ازبکستان (۴۰/۹ میلیون هکتار)، افغانستان (۳۸/۲ میلیون هکتار) و چین (۳۶ میلیون هکتار). در مجموع، این کشورها ۷۰ درصد از کل مساحت خاک‌های شور جهان را تشکیل می‌دهند (FAO, 2024).

به دلیل شیوع گسترده پدیده شوری خاک و تأثیر مستقیم آن بر عملکرد محصولات کشاورزی و سلامت اکوسیستم‌ها، سرمایه‌گذاری در پژوهش‌های مربوط به اصلاح و احیای خاک‌های شور برای این کشورها اهمیتی ویژه و فوری یافته است. دولت‌ها اقداماتی نظیر تدوین راهبردهای ملی، ارائه مشوق‌های مالی و ایجاد صندوق‌های پژوهشی را برای ارتقای تحقیق و توسعه فناوری‌های اصلاح شوری خاک در دستور کار قرار داده‌اند؛ به عنوان نمونه هند طرح «کارت سلامت خاک» را اجرا کرده و با بهبود فناوری‌های آبیاری، کارایی مصرف آب را از طریق سیستم‌های قطره‌ای و بارانی افزایش داده است (Fitzpatrick et al., 2022). استرالیا اقداماتی مانند جنگل‌کاری مجدد، بهبود مدیریت اراضی و استفاده از گیاهان متحمل به شوری و ارقام اصلاح‌شده زراعی را برای سازگاری با محیط‌های شور به کار گرفته است (Clarke et al., 2002).

بررسی آماری رشته‌های مرتبط با مقالات حوزه اصلاح شوری خاک نشان داد که این موضوع در رشته‌هایی مانند علوم محیط‌زیست، علوم خاک، علوم گیاهی، کشاورزی و علوم آب توجه گسترده‌ای را به خود جلب کرده است. نفوذ متقابل و تعامل میان رشته‌ها باعث شده است که جریان دانش و مفاهیم بین حوزه‌های مختلف تبادل و ادغام شود. رویکردهایی از علوم محیط‌زیست، بوم‌شناسی و علوم زیستی به‌طور فزاینده‌ای وارد مطالعات مرتبط با اصلاح شوری خاک شده‌اند و این مسئله به توسعه سریع‌تر این حوزه کمک کرده است.

مشارکت‌کنندگان اصلی و تحلیل همکاری‌ها عملکرد کشورها

تحلیل تعداد مقالات منتشرشده توسط کشورهای مختلف نشان‌دهنده میزان اهمیت و نفوذ آن‌ها در این حوزه پژوهشی است (Jiang et al., 2018). جدول (۱)، ده کشور برتر در حوزه مقالات مرتبط با اصلاح شوری خاک طی سال‌های ۱۹۹۰ تا ۲۰۲۴ را نشان می‌دهد. این ده کشور در مجموع ۲۰۱۴ مقاله منتشر کرده‌اند که ۷۸٫۶۴ درصد از کل انتشارات جهانی را تشکیل می‌دهد. در میان آن‌ها، چین با انتشار بیش از ۵۰ درصد کل مقالات، رتبه نخست را دارد. با وجود حجم بالای انتشارات، میانگین استناد به ازای هر مقاله در چین ۱۲٫۵۸ است. کشور دوم از نظر تعداد مقالات هند است (۱۲۲ مقاله؛ ۴/۷۶ درصد). کشورهای مصر (۸۶ مقاله)، ایالات‌متحده (۸۵ مقاله) و پاکستان (۶۶ مقاله) به ترتیب با سهم‌های ۳/۳۶ درصد، ۳/۳۲ درصد و ۲/۵۸ درصد در رتبه‌های سوم تا پنجم قرار دارند.

بر اساس گزارش فائو، ده کشور دارای بیشترین وسعت خاک‌های شور عبارت‌اند از: استرالیا (۳۵۷ میلیون هکتار)، آرژانتین (۱۵۳ میلیون هکتار)، قزاقستان (۹۴ میلیون هکتار)،

جدول ۱- ده کشور برتر در پژوهش‌های مرتبط با اصلاح شوری خاک

Table1. Top 10 countries related to soil salinization improvement research.

رتبه Rank	کشور Country	تعداد مقالات Counts	سهم (%) Proportion	SCP*	MCP**	نسبت MCP (%) MCP Ratio***	مجموع استنادات Total citations	استناد به‌ازای هر مقاله Citations per article
1	چین China	1430	55.84	1151	279	19.51	17992	12.58
2	هند India	122	4.76	104	18	14.75	2674	21.92
3	مصر Egypt	86	3.36	46	40	46.51	1588	18.47
4	آمریکا USA	85	3.32	58	27	31.76	2492	29.32
5	پاکستان Pakistan	66	2.58	37	29	43.94	1084	16.42
6	استرالیا Australia	54	2.11	34	20	37.04	2113	39.13
7	ایران Iran	51	1.99	35	16	31.37	662	12.98
8	روسیه Russia	43	1.68	39	4	9.30	146	3.40
9	اسپانیا Spain	39	1.52	30	9	23.08	1329	34.08
10	کانادا canada	38	1.48	35	3	7.89	720	18.95

* SCP¹: تعداد مقالاتی که تمام نویسندگان از یک کشور بوده‌اند.

SCP^{1*}: Number of publications in which all authors were from the same country

** MCP²: تعداد مقالاتی که با همکاری بین‌المللی نوشته شده‌اند.

MCP^{2**}: Number of publications written through international collaboration

*** MCP Ratio: نسبت مقالات مشترک بین‌المللی به کل مقالات یک کشور.

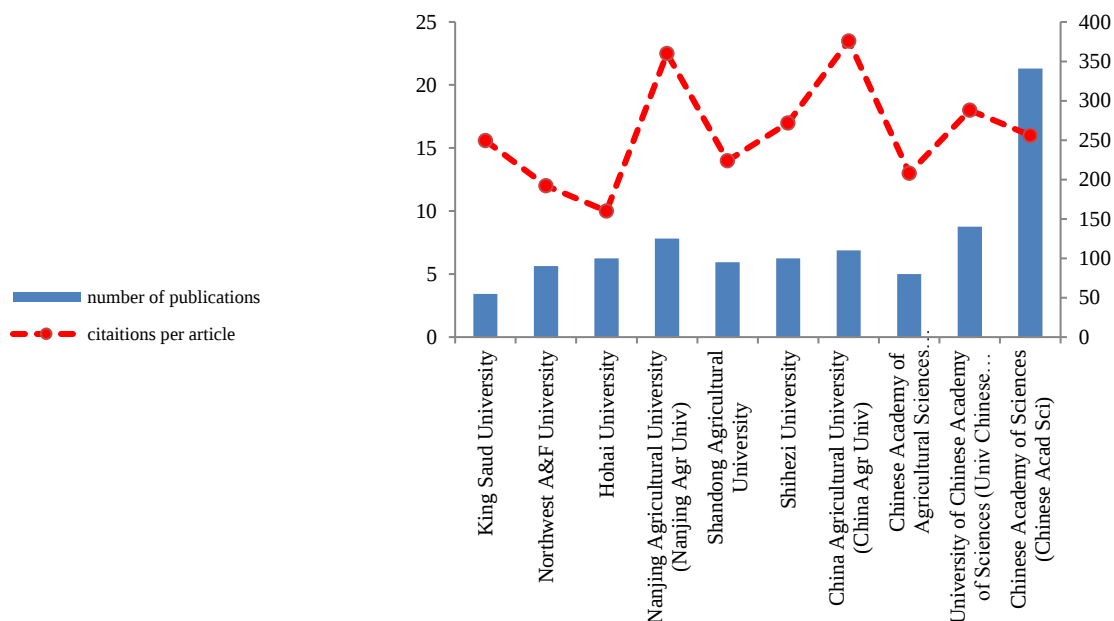
MCP Ratio^{***}: Proportion of internationally collaborative publications to a country's total publications

¹ Single Country Publications

² Multiple Country Publications

به شوری تمرکز دارد (Luo et al., 2020). این سیاست‌ها نه تنها نشان‌دهنده اهمیت و توجه ویژه کشورها به مسئله شوری خاک است بلکه بیانگر روند جهانی سازگاری و کاهش اثرات شوری از طریق نوآوری فناورانه و مدیریت پایدار منابع می‌باشد.

ایالات متحده مدیریت منابع آب را بهبود داده و از توسعه فناوری‌های آبیاری به‌ویژه در کالیفرنیا و سایر مناطق خشک غرب کشور حمایت کرده است (Gleick, 2003). مصر سیاست‌های سختگیرانه‌ای برای مدیریت منابع آب اجرا کرده، فناوری‌های نوین آبیاری را ترویج داده و هم‌زمان بر توسعه گیاهان متحمل



شکل ۳- ده مؤسسه برتر فعال در پژوهش‌های مربوط به اصلاح شوری خاک.
Figure 3. Top 10 institutions involved in research on soil salinization improvement.

هر مقاله نیز برای تفسیر جایگاه علمی کشورها مورد توجه قرار گرفتند.

باید توجه داشت که فهرست مؤسسات ارائه‌شده صرفاً بر اساس تعداد انتشارات موجود در پایگاه داده مورد مطالعه استخراج شده است و لزوماً بیانگر جایگاه تاریخی یا مرجعیت علمی مؤسسات تخصصی شوری خاک در سطح جهان نیست. مراکز شناخته‌شده‌ای IWMI⁴, ICARDA⁵, ICBA⁶, UCR⁷, WUR⁸, USSR⁹ و CSIRO¹⁰ نقش مهمی در توسعه دانش بنیادی شوری خاک ایفا کرده‌اند، هرچند ممکن است به دلیل محدودیت‌های راهبرد جستجو یا نوع داده‌های نمایه‌شده در بین مؤسسات دارای بیشترین تعداد مقالات این مجموعه قرار نگرفته باشند.

عملکرد مؤسسات پژوهشی

مؤسسات پژوهشی، بدنه اصلی تولیدکننده خروجی‌های تحقیقات علمی محسوب می‌شوند. تحلیل آماری مؤسسات پژوهشی که مقالاتی در حوزه اصلاح شوری خاک منتشر کرده‌اند، نشان می‌دهد که ۲۴۹۱ مؤسسه در این حوزه فعالیت داشته‌اند. ده مؤسسه برتر در شکل ۳ ارائه شده‌اند. در میان این ۱۰ مؤسسه، ۹ مؤسسه از کشور چین هستند. آکادمی علوم چین^۱ با انتشار ۳۴۱ مقاله، رتبه نخست را به خود اختصاص داده و با سهم ۱۳٫۳۲ درصد از کل انتشارات، پیش‌تاز این حوزه است. دانشگاه آکادمی علوم چین^۲ با ۱۴۰ مقاله و آکادمی علوم کشاورزی چین^۳ با ۸۴ مقاله، به ترتیب در رتبه‌های دوم و سوم قرار گرفته و سهم ۵/۴۷ درصد و ۳/۲۸ درصد را به خود اختصاص داده‌اند. اگرچه چین از نظر تعداد انتشارات علمی بیشترین سهم را در مجموعه داده مورد بررسی داشته است، اما تعداد مقالات به تنهایی شاخص کاملی برای سنجش اثرگذاری علمی محسوب نمی‌شود؛ بنابراین علاوه بر تعداد انتشارات، شاخص‌هایی نظیر مجموع استنادات و میانگین استناد به ازای

⁴ US Salinity Laboratory

⁵ Wageningen University & Research

⁶ University of California (Davis and Riverside)

⁷ International Center for Biosaline Agriculture

⁸ International Center of Agricultural Research in Dryland Areas

⁹ International Water Management Institute

¹⁰ Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization ...

¹ Chinese Academy of Sciences

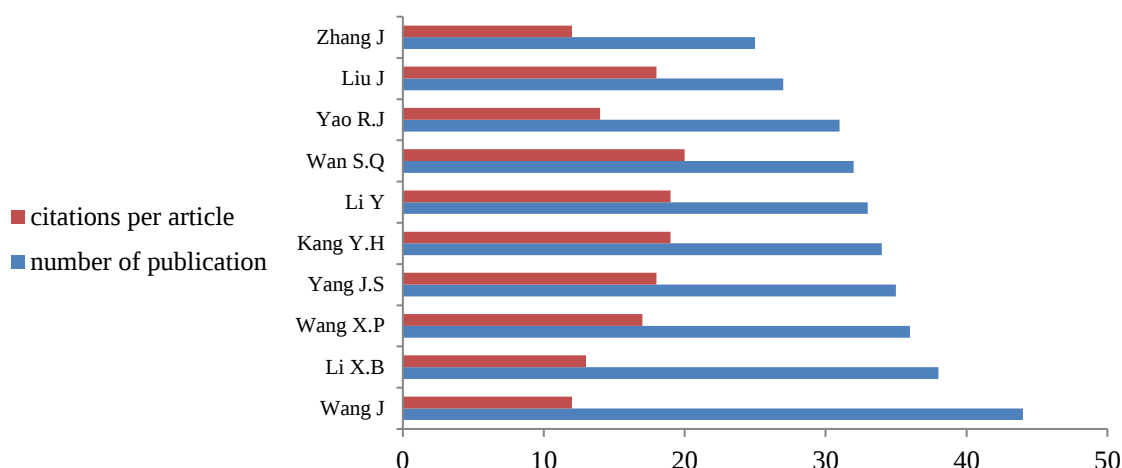
² Univ Chinese Acad Sci

³ Chinese Acad Agr Sci

عملکرد نویسندگان

نویسندگان نقش محوری در تولید دانش علمی ایفا می‌کنند و تحلیل الگوی نویسندگی می‌تواند گروه هسته‌ای پژوهشگران فعال در یک حوزه تخصصی را شناسایی کند (Cao

et al., 2023). بر اساس آمار مربوط به تعداد نویسندگان فعال در حوزه بهبود شوری خاک، در مجموع ۸۷۸۷ پژوهشگر در این زمینه مشارکت داشته‌اند. شکل ۴، ده نویسنده برتر از نظر تعداد مقالات منتشرشده را نشان می‌دهد.



شکل ۴- ده نویسنده برتر در پژوهش‌های اصلاح شوری خاک
Figure4. Top 10 authors related to soil salinization improvement research

انتشارات از ۵۸۲ نشریه علمی استخراج شده است که در میان آن‌ها، ۲۷ نشریه هر یک بیش از ۲۰ مقاله منتشر کرده‌اند. این نشریات طیف گسترده‌ای از حوزه‌ها از جمله آلودگی محیط‌زیست، کشاورزی، علوم خاک، منابع آب، علوم گیاهی و توسعه پایدار را پوشش می‌دهند.

جدول (۲) فهرست ده نشریه برتر از نظر تعداد انتشارات در زمینه اصلاح شوری خاک را ارائه می‌دهد. در بین آن‌ها نشریه Agronomy Basel با ضریب تأثیر سال ۲۰۲۴ برابر با ۳/۴، رتبه نخست را دارد و تاکنون ۱۱۲ مقاله منتشر کرده است. این نشریه در مجموع ۶۲۲ استناد دریافت کرده و میانگین استناد به‌ازای هر مقاله ۵/۵۵ بوده است. در رتبه دوم، نشریه Science of the Total Environment با ضریب تأثیر ۸ قرار دارد که با انتشار ۹۲ مقاله و ۲۵۸۰ استناد، میانگین ۲۸/۰۴ استناد به‌ازای هر مقاله را به خود اختصاص داده است. پس از آن، نشریه‌های Agricultural Water Management (IF2024 = 6.5) و Land Degradation and development (IF2024 = 3.7) به‌ترتیب در جایگاه سوم و چهارم هستند و به ترتیب ۸۸ و ۷۲ مقاله منتشر کرده‌اند. این نتایج صرفاً مجلاتی را نشان می‌دهد که در مجموعه داده استخراج‌شده بیشترین تعداد انتشارات را داشته‌اند و نباید به‌عنوان رتبه‌بندی نهایی معتبرترین یا مرجع‌ترین مجلات تخصصی شوری خاک تفسیر شوند.

بر اساس نتایج این مطالعه، پُرکارترین نویسنده Wang, J از آکادمی علوم چین است که تاکنون ۴۴ مقاله منتشر کرده است. تمرکز اصلی پژوهش‌های وی بر کاربرد نوآورانه مواد اصلاحی شیمیایی اصلاح‌شده برای بهسازی خاک‌های شور بوده است (Wang et al., 2020; Wang et al., 2023b; Wang et al., 2023c). پس از وی، Li, X.B. از آکادمی علوم کشاورزی چین با انتشار ۴۰ مقاله سهم قابل توجهی در این حوزه داشته است. تحقیقات او عمدتاً بر استفاده از آب لب‌شور و شور در سامانه‌های آبیاری قطره‌ای و نیز استقرار پوشش گیاهی در خاک‌های شور متمرکز بوده است (Li and Wang, 2021; Li and Kang, 2020; Li, 2019). در ادامه، Wang, X.P از آکادمی علوم چین با انتشار ۳۹ مقاله در رتبه بعدی قرار دارد. پژوهش‌های وی عمدتاً بر تأثیر اصلاح‌کننده‌های خاک بر محصولات متحمل به شوری متمرکز داشته است (Wang et al., 2023a; Wang et al., 2024; Sun et al., 2024).

منابع اصلی نشریات

با تحلیل منابع انتشارات علمی مرتبط با اصلاح خاک‌های شور، پژوهشگران می‌توانند به نشریات با ضریب تأثیر بالا مراجعه کرده و جدیدترین دستاوردها در این حوزه را به دست آورند (Xu and Feng, 2021). در این مطالعه، داده‌های

جدول ۲- ده مجله برتر منتشرکننده پژوهش‌های مرتبط با اصلاح شوری خاک.

Table2. Top 10 leading journals publishing on soil salinization improvement

رتبه Rank	نشریه journal	تعداد مقالات Count	درصد Proportion	ضریب تأثیر ۲۰۲۴ IF2024	کل استنادها Total citation	استناد به ازای هر مقاله Citations per article
1	Agronomy-Basel	112	4.37	3.4	622	5.55
2	Science of the Total Environment	92	3.59	8	2580	28.04
3	Agricultural Water Management	88	3.44	6.5	2269	25.78
4	Land Degradation and Development	72	2.81	3.7	1366	18.97
5	Plants-Basel	53	2.07	4.1	456	8.60
6	Sustainability	49	1.91	3.3	1002	20.45
7	Water	44	1.72	3	164	3.73
8	Frontiers in Plant Science	43	1.68	4.8	475	11.05
9	Journal of Soil Science and Plant Nutrition	38	1.48	3.1	117	3.08
10	Applied Soil Ecology	35	1.37	5	1009	29.68

مقالات کلیدی

دومین مقاله پراستناد با عنوان " کاربرد بیوپار برای اصلاح خاک‌های آسیب‌دیده از شوری: چالش‌ها و فرصت‌ها"^۲ به قلم Dahlawi, S در مجله Science of the Total Environment منتشر شده است. این مقاله مروری، اثرات کاربرد بیوپار بر بهبود ویژگی‌های خاک و رشد گیاهان در خاک‌های شور را بررسی کرده و چالش‌ها و فرصت‌های استفاده از این ماده اصلاحی را تحلیل کرده است (Saifullah et al., 2018). سومین مقاله پراستناد با عنوان " شوری عامل تعیین‌کننده کلیدی برای جوامع میکروبی خاک در یک اکوسیستم بیابانی"^۳ در سال ۲۰۱۹ در مجله Msystems منتشر شد. این پژوهش نشان داد که افزایش شوری خاک در بیابان گوربانتونگوت^۴ نه تنها موجب کاهش تنوع میکروبی و تغییر در ساختار جوامع میکروبی می‌شود، بلکه به نفع گروه‌هایی مانند Halobacteria عمل می‌کند. همچنین نتایج نشان داد که غربالگری محیطی^۵ نقش تعیین‌کننده‌ای در این تغییرات دارد و بدین ترتیب، اهمیت شوری به عنوان یک عامل کلیدی در پویایی اکوسیستم‌های بیابانی را برجسته ساخت (Zhang et al., 2019).

شناخت مقالات پراستناد در هر حوزه علمی، به پژوهشگران کمک می‌کند تا روندهای توسعه، الگوهای دانشی و قوانین حاکم بر آن رشته را درک کنند. این مقالات، افزون بر ارائه نظریه‌ها و روش‌های نوآورانه، از جایگاه مرجعیت علمی برخوردارند، انتقال دانش را تسهیل می‌کنند، معیارهای سنجش پژوهشی فراهم می‌آورند و می‌توانند دارای پیامدهای بالقوه اجتماعی و اقتصادی باشند؛ از این رو، نقشی اساسی در پیشبرد تحقیقات علمی و توسعه فناوری ایفا می‌کنند (Koley et al., 2024). جدول (۳)، ده مقاله پراستناد برتر در حوزه پژوهش‌های مربوط به اصلاح شوری خاک را نشان می‌دهد. پراستنادترین مقاله متعلق به Tejada, M با عنوان " استفاده از مواد آلی به عنوان راهبردی برای اصلاح خاک‌های شور: تأثیر آن بر ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک"^۱ است که در سال ۲۰۰۶ در مجله Soil Biology and Biochemistry منتشر شد. این پژوهش اثر بهبوددهندگی دو نوع پسماند آلی شامل کمپوست بقایای پنبه و کود مرغی را بر خاک شور بررسی کرد. نتایج نشان داد کاربرد این ترکیبات موجب افزایش معنی‌دار فعالیت‌های آنزیمی خاک شد؛ به طوری که افزایش‌هایی به میزان ۷۰ درصد کربوهیدرات‌های محلول در آب، ۳۴ درصد در اوره‌آز، ۱۸ درصد در پروتئاز، ۳۷ درصد در β -گلوکوزیداز، ۳۹ درصد در فسفاتاز، ۴۰ درصد در آریل سولفاتاز و ۳۰ درصد در دهیدروژناز مشاهده گردید (Tejada et al., 2006). این یافته‌ها نقش مهم اصلاح‌کننده‌های آلی را در بهبود ویژگی‌های زیستی و بیوشیمیایی خاک‌های شور برجسته می‌کند.

² Biochar application for the remediation of salt-affected soils: Challenges and opportunities

³ Salinity is a key determinant for soil microbial communities in a desert ecosystem

⁴ Gurbantunggut

⁵ environmental filtering

¹ Use of organic amendment as a strategy for saline soil remediation: influence on the physical, chemical and biological properties of soil

بالا و بارش کم در مناطق ساحلی، فرایند تجمع نمک در خاک سطحی را تشدید می‌کند (Li et al., 2024). جدول (۳)، ده مقاله برتر از نظر تعداد استناد در حوزه اصلاح خاک‌های شور را نشان می‌دهد. مقاله (Tejada, 2006) که در مجله Soil Biology and Biochemistry منتشر شد، با ۴۲۷ استناد در رتبه نخست قرار دارد. این مقاله نشان داد که اصلاح‌کننده‌های آلی مانند کمپوست بقایای پنبه و کود مرغی تأثیرات قابل‌توجهی بر فعالیت‌های آنزیمی و ویژگی‌های فیزیکی-شیمیایی خاک‌های شور دارند. در رتبه دوم، مقاله (Dahlawi, 2018) با ۳۵۳ استناد قرار گرفته است که یک مرور جامع بر کاربرد بیوپار در بهبود ویژگی‌های خاک و رشد گیاهان در خاک‌های متأثر از شوری ارائه می‌دهد. مقاله Zhang, (2019) که در Msystems منتشر شده، با ۲۹۰ استناد در رتبه سوم قرار دارد و نقش تعیین‌کننده شوری خاک را در شکل‌دهی به جوامع میکروبی بیابانی نشان می‌دهد. سایر مقالات عمدتاً در سه محور کلیدی متمرکز هستند: بهبود زیستی خاک (mycorrhiza)، کاربرد بیوپار و اصلاح‌کننده‌های پایدار و مدیریت تنش شوری و آلودگی‌های هم‌زمان (مانند کادمیوم).

تحلیل کلیدواژه‌ها

تحلیل کلیدواژه‌های پربسامد

کلیدواژه‌ها نقشی اساسی در مقالات علمی ایفا می‌کنند؛ زیرا خلاصه‌ای دقیق از محتوای اصلی ارائه می‌دهند و به شناسایی موضوعات پژوهش و کانون‌های داغ علمی کمک می‌کنند (Wang et al., 2021). افزون بر کلیدواژه‌های مرتبط با موضوع اصلی مانند «salinity» و «salinization» که به‌طور مکرر مشاهده می‌شوند، کلیدواژه‌های مربوط به فناوری‌های بهبود شیمیایی شامل «biochar» و «amendments» نیز فراوان به چشم می‌خورند. بیوپار به دلیل پایداری زیست‌محیطی و دوست‌دار محیط‌زیست بودن و همچنین توانایی آن در بهبود ساختمان خاک و ارتقای نفوذپذیری خاک، به‌طور گسترده مورد مطالعه قرار گرفته است.

علاوه بر این، کلیدواژه‌های مرتبط با مدیریت آب، از جمله «irrigation»، نیز دارای فراوانی بالایی بودند که نشان‌دهنده اهمیت راهبردهای آبیاری در مدیریت و اصلاح خاک‌های متأثر از نمک است. در این میان، فناوری آبیاری قطره‌ای به دلیل امکان کاربرد دقیق آب، افزایش بهره‌وری مصرف آب و مدیریت بهتر توزیع نمک در ناحیه ریشه، مورد توجه بسیاری از پژوهشگران قرار گرفته است. با این حال، تأثیر آن بر الگوی تجمع نمک به عواملی نظیر کیفیت آب آبیاری، ویژگی‌های خاک و شیوه مدیریت مزرعه وابسته است.

کلیدواژه‌های مرتبط با فناوری‌های زیست‌پالایی (bioremediation) همچون «tolerance»، «yield»، «salt stress» و «salt tolerance» نیز به‌طور مکرر مشاهده شدند. در این روش‌ها، از گونه‌های مقاوم به شوری از جمله برخی گیاهان علفی، بوته‌ای و درختی استفاده می‌شود. این گیاهان با توانایی جذب، تجمع و دفع نمک از طریق فرایندهای رشد خود، نقش مهمی در کاهش غلظت نمک خاک ایفا می‌کنند. در مجموع، بسامد بالای این کلیدواژه‌ها نشان‌دهنده تنوع و پیچیدگی روش‌های اصلاح شوری خاک است و همچنین جهت‌گیری‌های بالقوه پژوهش‌های آینده را برجسته می‌سازد.

علاوه بر این، کلیدواژه‌هایی مانند «coastal saline soil» و «Yellow River Delta» نیز بارها مشاهده شدند که بیانگر تمرکز پژوهشگران بر خاک‌های شور با ویژگی‌های جغرافیایی و محیطی منحصربه‌فرد است. خاک شور ساحلی عمدتاً در نواحی ساحلی جهان یافت می‌شود و شوری آن معمولاً تحت تأثیر مستقیم یا غیرمستقیم آب دریا است. تحت اثرات جزرومدی، این خاک‌ها در زمان مد با نفوذ آب دریا مواجه می‌شوند و مقادیر قابل توجهی نمک وارد خاک می‌شود؛ بخشی از این املاح پس از عقب‌نشینی آب دریا در خاک باقی می‌مانند. همچنین تبخیر

جدول ۳- مقالات پراستناد مرتبط با پژوهش‌های اصلاح شوری خاک.

Table 3. Highly cited publications on soil salinization improvement research.

رتبه Rank	عنوان مقاله Title	نویسنده Author	منبع انتشار Source	سال Year	تعداد کل استنادات Total citations
1	استفاده از مواد آلی به‌عنوان راهبردی برای اصلاح خاک‌های شور: تأثیر بر ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک Use of organic amendment as a strategy for saline soil remediation: influence on the physical, chemical and biological properties of soil	Tejada, M	Soil Biology and Biochemistry	2006	427
2	کاربرد بیوجار برای اصلاح خاک‌های آسیب‌دیده از شوری: چالش‌ها و فرصت‌ها Biochar application for the remediation of salt-affected soils: Challenges and opportunities	Dahlawi, S	Science of the Total Environment	2018	353
3	شوری، عامل تعیین‌کننده اصلی جوامع میکروبی خاک در یک اکوسیستم بیابانی Salinity is a key determinant for soil microbial communities in a desert ecosystem	Zhang, K	mSystems	2019	290
4	ارتباط بین بهبود تحمل گیاهان ذرت در برابر تنش شوری توسط قارچ‌های میکوریزی آربوسکولار با تجمع بیشتر قندهای محلول در ریشه‌ها Improved tolerance of maize plants to salt stress by arbuscular mycorrhiza is related to higher accumulation of soluble sugars in roots	Feng, G	Mycorrhiza	2002	285
5	تأثیر بیوجار بر کاهش سمیت کادمیم در گیاه گندم (<i>Triticum aestivum</i> L.) در خاک شور Effect of biochar on alleviation of cadmium toxicity in wheat (<i>Triticum aestivum</i> L.) grown on Cd-contaminated saline soil	Abbas, T	Environmental Science and Pollution Research	2018	282
6	کاربرد بیوجار با نرخ‌های مناسب می‌تواند موجب کاهش شست‌وشوی نیتروژن، حفظ آن در خاک و عدم افزایش تبخیر آمونیاک (NH_3) در خاک‌های شور ساحلی شود Biochar applied with appropriate rates can reduce N leaching, keep N retention and not increase NH_3 volatilization in a coastal saline soil	Sun, H	Science of the Total Environment	2017	242
7	تأثیر بیوجار بر کاهش اثرات منفی افزودن نمک بر دو گونه گیاه علفی Biochar mitigates negative effects of salt additions on two herbaceous plant species	Thomas, S.C	Journal of Environmental Management	2013	233
8	تحت <i>Sesbania grandiflora</i> و <i>Sesbania aegyptiaca</i> تلقیح میکوریزا تنش شوری را در شرایط مزرعه کاهش می‌دهد: شواهدی از کاهش جذب سدیم و بهبود جذب منیزیم Mycorrhizal inoculant alleviates salt stress in <i>Sesbania aegyptiaca</i> and <i>Sesbania grandiflora</i> under field conditions: evidence for reduced sodium and improved magnesium uptake	Giri, B	Mycorrhiza	2004	228
9	بازسازی اراضی شور توسط گیاهان شورپسند در خاک‌های هند Restoration of saline land by halophytes for Indian soils	Ravindran, K. C	Soil Biology and Biochemistry	2007	209
10	تلقیح اولیه کاهو و پیاز با قارچ‌های میکوریزی VA باعث کاهش ... Preinoculation of lettuce and onion with VA mycorrhizal fungi reduces ...	Cantrell, I.C	Plant and Soil	2001	205

تحلیل هم‌رخدادی کلیدواژه‌ها

تحلیل شبکه هم‌رخدادی کلیدواژه‌ها ابزاری مؤثر برای شناسایی کانون‌های داغ پژوهشی و درک مضامین اصلی تحقیقات در یک حوزه علمی به‌شمار می‌رود و می‌تواند دیدگاه‌های تازه‌ای برای پژوهش‌های آینده فراهم سازد. در این تحلیل با استفاده از نرم‌افزار VOSviewer، چهار خوشه اصلی برای کلیدواژه‌ها شناسایی و داده‌های آن به‌صورت آماری جمع‌بندی شدند.

خوشه (I) راهبردهای اصلاح و مدیریتی خاک‌های متأثر از نمک: این خوشه شامل کلیدواژه‌هایی مانند reclamation، drip irrigation و management است و پژوهش‌های آن عمدتاً بر فنون فیزیکی اصلاح خاک شور متمرکزند. هدف این

روش‌ها کاهش شوری خاک از طریق اصلاح ساختار خاک و بهبود تنظیم رطوبت است؛ بدین‌صورت که با شکستن لایه‌های سخت خاک، افزایش تخلخل و بهبود تهویه و زهکشی، شرایط مطلوب‌تری برای آبشویی نمک و رشد گیاه فراهم می‌شود (Singh, 2021).

روش‌های فیزیکی شامل اقداماتی مانند شخم عمیق^۱ برای از بین بردن لایه سخت فشرده و تسهیل فرایند شست‌وشوی نمک‌ها از خاک، استفاده از تجهیزات مکانیکی برای خرد کردن خاک و افزایش تخلخل و تهویه، پوشش‌دهی سطح خاک به‌منظور کاهش تبخیر رطوبت، ایجاد سیستم‌های زهکشی گسترده و هوشمند برای تخلیه بهتر آب و نمک و

^۱ Deep plowing

استفاده از موجودات زنده دارای تحمل بالا نسبت به شوری یا توانایی بهبود ویژگی‌های خاک، موجب ارتقای محیط اکولوژیک و ساختار خاک‌های شور می‌شود. این موجودات شامل گیاهان هالوفیت، قارچ‌های میکوریزایی و باکتری‌های هالوتولرانت (متحمل به نمک) هستند.

این ارگانیسم‌ها با تنظیم غلظت نمک درون سلولی خود قادرند با شرایط شوری بالا سازگار شوند. همچنین از طریق گسترش سیستم‌های ریشه‌ای موجب بهبود تهویه خاک و ظرفیت نگهداری رطوبت می‌شوند. افزون‌براین، آن‌ها می‌توانند ترکیب نمک‌های خاک را تغییر دهند. این فرایند تا حد زیادی به واسطه ترکیبات ترشح‌شده توسط قارچ‌های میکوریزایی و میکروارگانیسم‌های مفید خاک انجام می‌شود که در عین حال جذب عناصر غذایی توسط گیاهان را نیز تحت تأثیر قرار می‌دهد. افزایش تحمل گیاهان به شوری از طریق انتخاب گونه‌های طبیعی مقاوم به نمک و نیز به‌کارگیری راهبردهای نوین زیست‌فناوری، از جمله مهندسی ژنتیک، به‌طور فزاینده‌ای مورد توجه قرار گرفته است. پژوهش‌ها طیف گسترده‌ای از گیاهان را در بر گرفته‌اند؛ از گونه‌های ساحلی مانند نی (Reeds)، اسپارتینا (Spartina) و فراگمیتس (Phragmites) گرفته تا محصولات مهم کشاورزی مانند گندم زمستانه، برنج، ذرت و پنبه. این مطالعات علاوه بر ارزیابی توان بقا و رشد این گیاهان در محیط‌های با شوری بالا، به بررسی سازوکارهای تحمل شوری در خاک نیز پرداخته‌اند.

میکروارگانیسم‌های خاک نقش بنیادینی در اکوسیستم‌ها، به‌ویژه در کارکردهای غیرقابل‌جایگزین چرخه عناصر غذایی و جریان انرژی ایفا می‌کنند. این اجتماعات میکروبی با تجزیه ماده آلی و تبدیل عناصر غذایی، حاصلخیزی خاک و تنوع زیستی را حفظ می‌کنند (You et al., 2022). در چارچوب بهبود زیستی شوری خاک، بهره‌گیری از میکروارگانیسم‌های پروبیوتیک راهبردی بسیار مؤثر به‌شمار می‌رود. شوری معمولاً موجب تخریب ساختار خاک، کاهش تنوع میکروبی و افت فعالیت زیستی می‌شود که در نهایت بهره‌وری خاک را محدود می‌سازد. با معرفی میکروارگانیسم‌های مفید خاص شامل باکتری‌ها و قارچ‌های دارای تحمل بالای شوری یا توانایی تجزیه و تعدیل نمک (نظیر باکتری‌های متحمل به نمک مانند *Bacillus*، *Spirillum*، *Actinobacteria*، *alkalophilus*، *Burkholderia*، *Enterobacter*، *Pseudomonas* و *Rhizobium*) می‌توان فرایندهای زیستی سودمند را در این محیط‌های خاکی احیا کرد.

برای مثال، Kapadia و همکاران (۲۰۲۲) از سواحل دندیناوساری مجموعه‌ای از میکروارگانیسم‌های متحمل به

مدیریت تراکم خاک جهت کنترل مؤثر تجمع نمک در عمق‌های سطحی و میانی خاک است. در برخی شرایط خاص و در مقیاس محدود، افزودن خاک غیر شور به لایه‌های سطحی برای بهبود شرایط ناحیه ریشه گزارش شده است، اما به دلیل محدودیت‌های اقتصادی و اجرایی، این روش کاربرد گسترده‌ای در برنامه‌های اصلاح خاک‌های شور ندارد. همچنین به‌کارگیری فناوری تراز لیزری^۱ موجب توزیع یکنواخت آب در مزرعه می‌شود (Yang et al., 2019).

از مزایای اصلی فنون فیزیکی می‌توان به اثر آبی و سریع آن‌ها بر بهبود شرایط خاک و رشد گیاه اشاره کرد. افزون بر این، این روش‌ها زیست‌سازگار و فاقد اثرات آلاینده شیمیایی هستند، زیرا از مصرف ترکیبات شیمیایی اجتناب می‌کنند و بنابراین باعث ورود مواد مضر جدید به خاک نمی‌شوند. پژوهش‌های اخیر در زمینه فنون فیزیکی بهبود خاک عمدتاً بر مقایسه اثر روش‌های مختلف فیزیکی و تأثیر متقابل آن‌ها با ویژگی‌های خاک، اقلیم و نوع محصول زراعی متمرکز بوده است؛ برای نمونه Meng و همکاران (۲۰۱۶) نشان دادند که کاربرد توأمان کود دامی و شخم عمیق در خاک سولنتزیک نسبت به روش‌های معمول زراعی، منجر به افزایش قابل‌توجه عملکرد ذرت و همچنین بهبود ویژگی‌های فیزیکی-شیمیایی و فعالیت‌های آنزیمی خاک شد. همچنین Sun و همکاران (۲۰۱۳) گزارش دادند که نصب یک لایه شن-ریگ به ضخامت ۲۰ سانتی‌متر در عمق ۸۰ سانتی‌متری خاک به‌طور مؤثری از تجمع نمک در لایه سطحی خاک جلوگیری کرده و کارایی فرایند نمک‌زدایی خاک را افزایش داده است، به‌گونه‌ای که مانع از صعود آب زیرزمینی شور به سمت بالا شد.

با وجود مزایای قابل‌توجه روش‌های فیزیکی بهبود خاک، این تکنیک‌ها اغلب به ماشین‌آلات پرهزینه و سرمایه‌گذاری اولیه قابل توجه نیاز دارند. علاوه بر این، کارایی این روش‌ها ممکن است تحت تأثیر نوع خاک شور، شرایط اقلیمی و ویژگی‌های توپوگرافی منطقه محدود شود؛ از این‌رو، استفاده از آن‌ها برای همه انواع خاک‌های شور مناسب نیست. همچنین تضمین اثربخشی بلندمدت این روش‌ها در برخی موارد دشوار بوده و ممکن است نیازمند اجرای دوره‌ای مجدد اقدامات اصلاحی باشد.

خوشه (II) رویکردهای زیستی در اصلاح خاک‌های متأثر از نمک: خوشه دوم شامل کلیدواژه‌هایی مانند «salt stress»، «growth»، «halophytes» و «tolerance» است و عمدتاً بر فنون زیستی اصلاح خاک‌های شور متمرکز دارد. زیست‌پالایی^۲ با

۱. Laser leveling

۲. Bioremediation

حاصلخیزی، شرایط برای رشد طبیعی گیاهان فراهم می‌شود (Smaoui-Jardak et al., 2017).

مواد اسیدی مانند دی‌هیدروژن فسفات پتاسیم و دی‌هیدروژن فسفات سدیم با کاهش pH خاک، ویژگی‌های شیمیایی خاک شور را تنظیم می‌کنند. این مواد با آزادسازی یون H^+ در خاک، با ترکیبات قلیایی مانند کربنات‌ها و هیدروکسیدها واکنش داده و به خنثی‌سازی قلیائیت خاک کمک می‌کنند. علاوه بر این، کاهش pH موجب افزایش قابلیت دسترسی برخی عناصر ریزمغذی مانند آهن، منگنز، مس و روی در خاک می‌شود که برای رشد گیاهان ضروری هستند (Lv et al., 2023).

اصلاح‌کننده‌های آلی نیز علاوه بر بهبود ساختار خاک و افزایش حاصلخیزی، نقش مهمی در کنترل تحرک یون‌های محلول نمکی دارند و می‌توانند به‌طور مؤثری حرکت رو به بالای نمک‌ها را مهار کرده و فرایند نمک‌زدایی خاک را تسهیل کنند (Zhang et al., 2022). در میان این مواد، اسیدهای هیومیک با بهبود ساختمان خاک و افزایش ظرفیت نگهداری عناصر غذایی، به توسعه سیستم ریشه و افزایش مقاومت گیاه در برابر تنش‌ها کمک می‌کنند (Motojima et al., 2012). بیوپار نیز ماده‌ای پایدار و غنی از کربن است که از طریق پیرولیز زیست‌توده در شرایط کمبود اکسیژن و در دمای کمتر از ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد تولید می‌شود و دارای سطح ویژه زیاد، ساختار متخلخل توسعه‌یافته و گروه‌های عاملی سطحی فراوان است (Zhu et al., 2023). مطالعات نشان داده‌اند که کاربرد بیوپار می‌تواند تشکیل و پایداری خاکدانه‌ها در خاک‌های شور را افزایش دهد (Zheng et al., 2018b)، تخلخل خاک را بهبود بخشد (Zhang et al., 2020)، چگالی ظاهری خاک را کاهش دهد (Edeh et al., 2020)، شوری و قلیائیت خاک را کاهش دهد (Sadegh-Zadeh et al., 2018)، ظرفیت تبادل کاتیونی خاک را افزایش دهد (Zheng et al., 2018a)، مواد غذایی لازم برای رشد گیاه را فراهم کند (Dai et al., 2020) و ساختار جامعه میکروبی خاک‌های شور را بهبود بخشد (Nguyen et al., 2020).

در مجموع، روش‌های شیمیایی اصلاح خاک با استفاده از مواد معدنی و آلی، نقش مهمی در بهبود ساختار، کاهش شوری و افزایش حاصلخیزی خاک‌های شور ایفا می‌کنند و اغلب به‌عنوان بخشی از مدیریت یکپارچه اصلاح خاک در کنار روش‌های فیزیکی و زیستی مورد استفاده قرار می‌گیرند. ویژگی اصلی این روش‌ها اثرگذاری سریع و انعطاف‌پذیری در ترکیب مواد اصلاحی است.

خوشه (IV) اصلاح خاک‌های شور آلوده به فلزات سنگین: خوشه چهارم با کلیدواژه‌هایی مانند «heavy metals»

شوری را جداسازی کردند و ۱۲ گونه میکروبی با ویژگی‌های محرک رشد گیاه در شرایط شوری بالا را شناسایی نمودند. در میان آن‌ها، سویه *Bacillus halotolerans* AD9 توانایی قابل‌توجهی در تولید آمونیاک و انحلال فسفات در محیط شور نشان داد. این باکتری‌ها از طریق سازوکارهای متعددی سازگاری گیاه با محیط شور را تسهیل می‌کنند، از جمله افزایش فراهمی نیتروژن خاک از طریق تثبیت زیستی نیتروژن، تحریک رشد ریشه با ترشح هورمون‌های رشد مانند ایندول-۳-استیک اسید (IAA) و کاهش تنش شوری از طریق تولید ترکیبات مقاوم کننده به تنش.

افزون بر این، این میکروارگانیسم‌ها می‌توانند با بهبود ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک، افزایش ماده آلی خاک، ارتقای ظرفیت نگهداری آب و بهبود تهویه خاک، محیطی سالم‌تر و پایدارتر برای رشد گیاهان فراهم آورند. در مجموع، بهره‌گیری از میکروارگانیسم‌های مفید، یکی از امیدبخش‌ترین رویکردهای پایدار در مدیریت و احیای خاک‌های شور محسوب می‌شود.

خوشه (III) اصلاح شیمیایی خاک‌های متأثر از نمک: خوشه سوم عمدتاً بر روش‌های شیمیایی اصلاح شوری خاک تمرکز دارد و شامل کلیدواژه‌هایی مانند amendments, Organic matter, biochar, Biomass است. روش‌های اصلاح شیمیایی عمدتاً شامل افزودن مواد اصلاح‌کننده به خاک هستند که با جایگزینی یون سدیم در کلونیدهای خاک و تسهیل شست‌وشوی آن با آب از لایه‌های شخم‌خورده، به کاهش شوری کمک می‌کنند. این مواد با کاهش چگالی ظاهری خاک، افزایش تخلخل و بهبود نفوذپذیری آب، ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک را بهبود می‌بخشند. همچنین با کاهش تبخیر و تعرق سطحی خاک از صعود نمک‌ها همراه با جریان آب به لایه‌های سطحی جلوگیری می‌کنند (Mao et al., 2016).

مواد اصلاح‌کننده شیمیایی بر اساس ترکیب عناصر خود به سه دسته اصلی تقسیم می‌شوند: مواد حاوی کلسیم (مانند ژپس و فسفوژپس)، مواد اسیدی (از جمله دی‌هیدروژن فسفات پتاسیم و دی‌هیدروژن فسفات سدیم) و اصلاح‌کننده‌های آلی (مانند بیوپار و اسیدهای هیومیک). در میان این مواد، اصلاح‌کننده‌های حاوی کلسیم عمدتاً از طریق مکانیسم تبادل یونی عمل می‌کنند؛ به‌گونه‌ای که یون Ca^{2+} جایگزین یون Na^+ در سطح کلونیدهای خاک می‌شود. این فرایند موجب آزاد شدن سدیم از کلونیدهای خاک شده و سپس سدیم آزاد شده به‌وسیله آب از خاک شسته می‌شود. در نتیجه، غلظت Na^+ در خاک شور کاهش یافته و با بهبود ساختار خاک و افزایش

شیمیایی نیاز دارد و در نتیجه خطر آلودگی ثانویه را به‌طور قابل‌توجهی کاهش می‌دهد.

در سال‌های اخیر، پژوهشگران با بهینه‌سازی جنس و آرایش الکترودها و نیز تنظیم پارامترهای الکتریکی، کارایی و اثربخشی الکتروپالایی را ارتقا داده‌اند. برای نمونه، Li و همکاران نشان دادند که تحت یک میدان الکتریکی یکنواخت با شدت یک ولت بر سانتی‌متر، یون‌های کلرید با نرخ $1/36$ سانتی‌متر بر ساعت مهاجرت می‌کنند؛ درحالی‌که میدان‌های الکتریکی غیریکنواخت پایداری pH خاک را بهتر حفظ کرده و از نظر مصرف انرژی کارآمدتر هستند (Li et al., 2019b). با وجود این مزایا، مصرف بالای انرژی در کاربرد الکتروپالایی در سطوح وسیع یا لایه‌های عمیق خاک همچنان یکی از چالش‌های اصلی این فناوری به‌شمار می‌رود. برای غلبه بر این محدودیت، پژوهش‌های آینده باید بر توسعه مواد الکترودی نوین با راندمان بالا و مقاومت مناسب در برابر خوردگی متمرکز شوند. افزون بر آن، بهینه‌سازی پارامترهای الکتریکی و شرایط بهره‌برداری از طریق شبیه‌سازی‌های عددی و آزمایش‌های میدانی می‌تواند به‌طور مؤثری کارایی فرایند را افزایش داده و هزینه‌های اجرایی را کاهش دهد.

دیدگاه‌ها و چالش‌های کنونی

توسعه روش‌های نوین اصلاح شوری خاک

در مواجهه با پدیده شور شدن خاک‌ها، پژوهشگران مجموعه‌ای از راهکارهای اصلاحی و بهبود دهنده را توسعه داده‌اند که هر یک دارای مزایا و محدودیت‌های خاص در کاربردهای عملی هستند. با وجود پیشرفت‌های به‌دست‌آمده، این روش‌ها همچنان با چالش‌هایی جدی روبه‌رو هستند که دامنه کاربرد و کارایی گسترده آن‌ها را محدود می‌کند.

روش‌های فیزیکی اصلاح خاک مانند شخم عمیق و آبیاری زهکشی شور می‌توانند در کوتاه‌مدت موجب بهبود نفوذپذیری و تهویه خاک شوند و بدین‌ترتیب فرایند شست‌وشوی نمک‌ها را تسهیل کنند. با این حال، اجرای این روش‌ها در مقیاس وسیع نیازمند تجهیزات حجیم و مصرف زیاد انرژی است که به هزینه‌های اقتصادی بالا و افزایش مصرف انرژی منجر می‌شود. علاوه بر این، تکرار مداوم شخم خاک ممکن است به تخریب ساختار خاک و کاهش مواد آلی بینجامد که در نهایت حیات و بهره‌وری بلندمدت خاک را کاهش می‌دهد (Singh, 2021).

روش‌های شیمیایی اصلاح خاک همچون کاربرد اصلاح‌کننده‌ها و افزودنی‌های خاک قادر به کاهش سریع نمک‌های تبدلی و بهبود خصوصیات شیمیایی خاک شور هستند. با این حال، کاربرد نادرست مواد شیمیایی اصلاحی نه تنها

«bioremediation»، «biostimulation»، «electrokinetic» و «remediation» و «biodegradation» عمدتاً بر اصلاح خاک‌های شور آلوده به فلزات سنگین تمرکز دارد. تحت تأثیر تغییرات اقلیمی، شرایط محیطی و فعالیت‌های انسانی، برهم‌کنش میان آلودگی فلزات سنگین و تجمع نمک منجر به شکل‌گیری خاک‌های شور آلوده به فلزات سنگین شده است (Ren et al., 2018).

راهبردهای کنونی برای اصلاح این نوع خاک‌ها عمدتاً شامل سه دسته اصلی هستند. (۱) اقدامات مهندسی، مانند جایگزینی یا احیای خاک با خاک مهمان، شست‌وشوی خاک برای حذف نمک‌ها و ایزوله‌سازی با موانع، (۲) اقدامات زراعی، مانند شخم عمیق و آبیاری صرفه‌جویانه و (۳) روش‌های زیستی مانند گیاه‌پالایی و استفاده از اصلاح‌کننده‌های میکروبی (Liu et al., 2023). این روش‌ها در مجموع توانسته‌اند کیفیت خاک شور را بهبود بخشند، تنوع زیستی را بازیابی کنند، عملکرد محصول را افزایش دهند و خطرات زیست‌محیطی را به‌طور قابل‌توجهی کاهش دهند.

برای مثال Desoky و همکاران اثربخشی استفاده از عصاره ریشه شیرین‌بیان و عصاره بذر مورینگا را از طریق آب آبیاری و محلول‌پاشی برگی در خاک شور آلوده به فلزات سنگین بررسی کردند. نتایج مطالعه آن‌ها نشان داد که این تیمارها به‌طور معنی‌داری موجب بهبود رشد گیاه فلفل، افزایش محتوای رنگیزه‌های فتوسنتزی در برگ‌ها، افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی و کاهش غلظت سدیم و فلزات سنگین در گیاه شدند. نکته قابل‌توجه اینکه استفاده توأمان از عصاره ریشه شیرین‌بیان و عصاره بذر مورینگا اثرات بسیار بارزتری نشان داد (Desoky et al., 2019). علاوه بر این، Li و همکاران گزارش کردند که گیاه شورپسند *Halogeton glomeratus* توانایی بالایی در انباشت نمک‌ها و فلزات سنگین دارد و می‌تواند غلظت این آلاینده‌ها را در خاک به‌طور مؤثری کاهش دهد (Li et al., 2019a).

الکتروپالایی با به‌کارگیری میدان‌های الکتریکی بر ذرات باردار موجود در خاک از جمله یون‌های فلزات سنگین و یون‌های نمکی عمل می‌کند و از سازوکارهایی مانند الکترواسمز (electroosmosis)، الکتروفورز (electrophoresis) و الکترومایگریشن (electromigration) برای جداسازی و انتقال آلاینده‌ها از ماتریس خاک بهره می‌گیرد (Wen et al., 2021). این فناوری قادر است سطوح وسیعی از خاک آلوده را در مدت‌زمان نسبتاً کوتاه تیمار کند و از این‌رو به‌ویژه برای خاک‌های عمیق و کم‌نفوذپذیر مناسب است. در مقایسه با روش‌های شیمیایی، الکتروپالایی به حداقل مصرف مواد

روش‌های اصلاح نباتات سنتی با انتخاب و تلاقی ژنوتیپ‌هایی که به‌طور طبیعی دارای تحمل به شوری هستند، به‌تدریج منجر به توسعه ارقام زراعی سازگار با خاک‌های شور شده‌اند. هرچند این رویکرد از نظر عملی مؤثر بوده است، اما سرعت پیشرفت آن کند بوده و به‌طور قابل‌توجهی توسط محدودیت تنوع ژنتیکی مقید می‌شود.

در مقابل، پیشرفت‌های سریع زیست‌شناسی مولکولی ابزارهایی را فراهم کرده‌اند که امکان حل دقیق‌تر و هدفمندتر این چالش را فراهم می‌سازند. پژوهشگران با استفاده از انتخاب به کمک نشانگر (MAS) و کلون‌سازی ژن، موفق به شناسایی و بهره‌برداری از ژن‌های کلیدی کنترل‌کننده صفات تحمل به شوری شده‌اند؛ علاوه بر این، ظهور فناوری ویرایش ژنومی فرصت‌های بی‌سابقه‌ای را برای مهندسی دقیق ژنوم گیاهان زراعی فراهم کرده است. با بهره‌گیری از این فناوری، پژوهشگران قادرند ژن‌های مؤثر بر تحمل به شوری را به‌طور هدفمند حذف، اصلاح یا جایگزین کنند و در نتیجه، ارقام جدیدی با مقاومت بالاتر به شوری طراحی نمایند.

در مجموع، ادغام روش‌های اصلاح سنتی با فناوری‌های نوین زیست‌مولکولی می‌تواند به‌طور چشمگیری روند توسعه ارقام زراعی متحمل به شوری را تسریع کند و نقشی اساسی در تأمین امنیت غذایی جهانی و توسعه پایدار کشاورزی ایفا نماید. در مدیریت شورشدگی خاک، استفاده از راهبردهای منفرد معمولاً کارایی محدودی دارد، زیرا شرایط خاک و فرایندهای مؤثر بر شوری آن بسیار پیچیده‌اند. در مقابل، رویکردهای تلفیقی و جامع مدیریت خاک که چندین فن و روش بهسازی را به‌طور هم‌زمان ترکیب می‌کنند، می‌توانند چالش‌های ناشی از شوری را به شکل مؤثرتری برطرف سازند و در نتیجه نتایج بهسازی خاک را به‌طور چشمگیری بهبود دهند.

علاوه بر این، راهبردهای مدیریت تلفیقی تعاملات موجود در سامانه خاک-آب-گیاه را نیز مدنظر قرار می‌دهند و با بهینه‌سازی روابط میان این اجزاء، پایداری و تاب‌آوری کلی سامانه را افزایش می‌دهند. به‌کارگیری فناوری مالچ پلاستیکی در اصلاح خاک‌های شور نه تنها موجب کاهش تبخیر آب و افزایش کارایی مصرف آب می‌شود، بلکه از طریق تغییر شرایط دما و رطوبت خاک به‌طور غیرمستقیم بر مهاجرت و توزیع نمک‌های خاک نیز تأثیر می‌گذارد (Zhao et al., 2021).

توسعه مواد برای اصلاح شیمیایی خاک

علاوه بر اصلاح‌کننده‌های متداول، در سال‌های اخیر استفاده از نانومواد و فناوری نانو نیز به‌عنوان یکی از حوزه‌های نوظهور در مدیریت خاک‌های متأثر از نمک مورد توجه قرار

ممکن است به بی‌ثباتی بیشتر ترکیبات شیمیایی خاک منجر شود، بلکه خطر آلودگی محیط‌زیست را نیز در پی دارد (Meena et al., 2019). در مقابل، روش‌های زیستی اصلاح شوری به‌ویژه با کشت گیاهان مقاوم به شوری رویکردی سازگار با محیط‌زیست به شمار می‌روند. این روش‌ها با بهبود ساختار خاک و کاهش غلظت نمک‌ها، به پایداری اکولوژیکی خاک کمک می‌کنند. با این حال، تنوع محدود گونه‌های مقاوم به شوری، دوره رشد طولانی آن‌ها و وابستگی شدید به عوامل اقلیمی سبب می‌شود که نتایج این روش در برخی مناطق ناپایدار یا دیر هنگام ظاهر شوند (Kumar et al., 2021).

با توجه به این محدودیت‌های موجود در روش‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی، نیاز فوری به نوآوری فناوریانه و تحقیق و توسعه برای ارتقای اثربخشی کلی فرایند اصلاح شوری خاک وجود دارد. جهت‌گیری پژوهش‌های آتی باید بر ترکیب روش‌های چندگانه و توسعه فناوری‌های هوشمند و کم‌مصرف متمرکز باشد تا بتوان به مدیریت پایدار شوری خاک در مقیاس‌های وسیع‌تر دست یافت.

پژوهش‌های متعدد نشان داده‌اند که استفاده هم‌زمان از مواد اصلاح‌کننده مختلف می‌تواند به‌طور قابل‌توجهی کارایی بهبود خصوصیات قلیایی و شور خاک‌ها را افزایش دهد. مواد اصلاحی مانند مواد آلی، تبادل‌گرهای یونی و جاذب‌ها را می‌توان به‌صورت ترکیبی به‌کار برد تا شوری خاک کاهش یابد و حاصلخیزی آن تقویت شود. مواد آلی (از جمله ضایعات کشاورزی و کمپوست) قادرند به‌طور چشمگیری مقدار ماده آلی خاک را افزایش دهند. این مواد علاوه بر تأمین عناصر غذایی ضروری برای رشد گیاهان، به بهبود ساختار فیزیکی خاک کمک می‌کنند (An et al., 2022). تبادل‌گرهای یونی (مانند زئولیت‌های طبیعی یا سنتزی و رس‌های اصلاح‌شده) به دلیل ظرفیت تبادل یونی بالا می‌توانند سدیم اضافی (Na^+) و سایر یون‌های مضر را به‌طور مؤثر از محلول خاک حذف کنند (Ferretti et al., 2018). جاذب‌ها (مانند بیوپار و برخی مواد معدنی اصلاح‌شده) نیز از طریق فرایندهای جذب فیزیکی و شیمیایی به‌طور مؤثر غلظت نمک‌های محلول در خاک را کاهش می‌دهند (Ma et al., 2023). به‌کارگیری ترکیبی این مواد می‌تواند مزایای هرکدام را به‌شکل هم‌افزا ادغام کند و اصلاح خاک شور - قلیایی را جامع‌تر و مؤثرتر سازد. پژوهش‌های آینده باید به بهینه‌سازی نسبت‌ها و ترکیب‌های مختلف و ارزیابی کارایی آنها در شرایط اقلیمی و خاکی متفاوت بپردازند تا پایداری و سازگاری زیست‌محیطی این رویکرد تضمین شود.

فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک و افزایش تحمل گیاهان به تنش شوری است.

در حال حاضر، بخش عمده‌ای از پژوهش‌های موجود بر تأثیر افزودن مواد خارجی (اصلاح‌کننده‌ها) بر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک‌های شور متمرکز است و نقش آن‌ها در فعالیت میکروبی خاک و ساختار و کارکرد جوامع میکروبی کمتر مورد توجه قرار گرفته است. از این رو، مطالعات آینده باید به‌طور نظام‌مند تأثیر انواع مختلف مواد اصلاحی بر ویژگی‌های میکروبی خاک‌های شور را نیز مورد ارزیابی قرار دهند.

نتیجه‌گیری

این مطالعه با بهره‌گیری از روش‌های علم‌سنجی، تصویری جامع از روندهای پژوهشی جهانی در زمینه اصلاح و مدیریت خاک‌های متأثر از نمک ارائه کرد. نتایج نشان داد که در دهه‌های اخیر، همزمان با افزایش نگرانی‌ها درباره گسترش شوری خاک، کاهش کیفیت اراضی کشاورزی و تهدید امنیت غذایی، حجم تولیدات علمی در این حوزه به‌طور چشمگیری افزایش یافته است. این روند بیانگر اهمیت روزافزون شوری خاک به‌عنوان یکی از مهم‌ترین چالش‌های زیست‌محیطی و کشاورزی در سطح جهان است.

تحلیل شبکه‌های علمی و موضوعی نشان داد که تمرکز پژوهش‌ها به‌تدریج از روش‌های سنتی اصلاح خاک به سمت راهکارهای پایدارتر و سازگار با محیط زیست، از جمله کاربرد بیوجار، اصلاح‌کننده‌های آلی و معدنی، میکروارگانیزم‌های مفید، گیاهان شورپسند و مدیریت بهینه منابع آب تغییر یافته است. همچنین، تحلیل هم‌رخدادی کلیدواژه‌ها و الگوهای استنادی، روند تکامل موضوعات پژوهشی و شکل‌گیری محورهای نوظهور تحقیقاتی در حوزه مدیریت خاک‌های متأثر از نمک را آشکار ساخت.

نتایج این پژوهش علاوه بر شناسایی روندهای اصلی تولید دانش، اطلاعات ارزشمندی درباره ساختار همکاری‌های علمی، موضوعات پرکاربرد و جهت‌گیری‌های آینده تحقیقات ارائه می‌دهد که می‌تواند برای پژوهشگران، مدیران منابع طبیعی و سیاست‌گذاران بخش کشاورزی مفید باشد. با این حال، باید توجه داشت که نتایج این مطالعه تحت تأثیر پایگاه داده مورد استفاده، راهبرد جستجو، معیارهای انتخاب اسناد و شاخص‌های علم‌سنجی قرار دارد. از این رو، کشورها، مؤسسات، نویسندگان و مجلات شناسایی‌شده در این پژوهش، بیانگر فعال‌ترین بازیگران موجود در مجموعه داده مورد بررسی هستند و لزوماً نشان‌دهنده برتری علمی مطلق یا جایگاه تاریخی آن‌ها در حوزه شوری خاک نیستند. همچنین ممکن است برخی مراکز تحقیقاتی،

گرفته است. در سال‌های اخیر، کاربرد فناوری نانو در کشاورزی توجه گسترده‌ای را به خود جلب کرده است، به‌ویژه به دلیل پتانسیل بالای آن در بهبود خاک و تحقق تولید پایدار کشاورزی. سطح ویژه بالا و فعالیت واکنشی زیاد نانومواد امکان بهبود چشمگیر ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی خاک، فعالیت میکروبی و رشد گیاه را فراهم می‌سازد. در این راستا، بررسی توان بالقوه نانومواد در کاهش تنش شوری خاک، افزایش ظرفیت نگهداشت آب و بهبود کارایی جذب عناصر غذایی به یکی از محورهای مهم پژوهشی در علوم خاک و فناوری‌های نوین کشاورزی تبدیل شده است.

در گام نخست، نانومواد می‌توانند با اصلاح ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی خاک، ظرفیت آن را در تنظیم آب و عناصر غذایی افزایش دهند؛ امری که به‌طور مستقیم موجب بهینه‌سازی ساختار و عملکرد خاک شده و در نهایت سازگاری گیاهان با محیط‌های شور-قلیایی را ارتقا می‌دهد. برای مثال، Zuo و همکاران (۲۰۲۳) نشان دادند که نانولوله‌های کربنی چنددیواره عاملی‌شده (MWCNT-OH) به‌طور معنی‌داری مقدار نیتروژن معدنی خاک را افزایش داده و موجب افزایش زیست‌توده میکروبی خاک می‌شوند. به‌طور مشابه، Chen و همکاران (۲۰۲۲) گزارش کردند که کاربرد نقاط کوانتومی کربنی عاملی‌شده (FCNs) با بهبود خصوصیات فیزیکوشیمیایی و حاصلخیزی خاک، به کاهش شوری و قلیائیت خاک کمک می‌کند.

علاوه بر اثرات غیرمستقیم بر خاک، برخی نانومواد می‌توانند به‌طور مستقیم بر گیاه تأثیر گذاشته و از طریق تحریک تولید هورمون‌های رشد و افزایش تحمل به تنش‌های محیطی، عملکرد گیاه را بهبود بخشند. به‌عنوان نمونه، Tao و همکاران (۲۰۲۳) گزارش کردند که نانوذرات حاصل از بیوجار کاه برنج موجب افزایش معنی‌دار زیست‌توده و محتوای کلروفیل نهال‌های گوجه‌فرنگی شده و هم‌زمان انتقال سدیم از ریشه به ساقه را به‌طور مؤثری کاهش داده است. همچنین، Zhong و همکاران (۲۰۲۳) راهبردی نوین برای افزایش مقاومت گیاه به تنش شوری ارائه کردند که در آن نانوذرات سیلیس مزوحفره‌ای با اسید سالیسیلیک عاملی‌سازی و با اتیل‌آمینونزوات بارگذاری شدند. این نانوافت‌کش نه‌تنها جذب و انتقال آفت‌کش در گیاه خیار را تا ۱۴۵ درصد افزایش داد، بلکه با افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی، موجب کاهش معنی‌دار پراکسیداسیون و آسیب‌های سلولی شد. هرچند کلیدواژه‌های مرتبط با نانومواد در تحلیل هم‌رخدادی حاضر به‌صورت یک خوشه مستقل ظاهر نشدند، اما افزایش تدریجی فراوانی آن‌ها نشان‌دهنده رشد علاقه پژوهشگران به بررسی نقش نانوذرات در بهبود ویژگی‌های

تشکر و قدردانی

بدین‌وسیله از تمامی افرادی که در تهیه و تدوین این مقاله مروری همکاری و حمایت علمی داشته‌اند، قدردانی می‌شود.

تعارض منافع

نویسندگان اعلام می‌دارند هیچ‌گونه تضاد منافی در رابطه با انتشار این مقاله وجود ندارد.

پژوهشگران یا منابع علمی اثرگذار به دلیل محدودیت‌های نمایه‌سازی یا انتخاب کلیدواژه‌ها در تحلیل حاضر کمتر نمایان شده باشند. علاوه بر محدودیت‌های مرتبط با پایگاه داده و روش‌های علم‌سنجی، باید توجه داشت که موفقیت بسیاری از راهبردهای اصلاح خاک‌های متأثر از نمک به شرایط محیطی و مدیریتی منطقه، به‌ویژه کیفیت و کمیت منابع آب در دسترس، وابسته است. در عمل، کارایی روش‌هایی نظیر آبشویی، اصلاح شیمیایی، مدیریت زهکشی و سایر راهکارهای اصلاحی تحت تأثیر ویژگی‌های آب آبیاری از جمله شوری، سدیمی بودن و حجم آب قابل دسترس قرار می‌گیرد. از آنجا که مطالعه حاضر بر تحلیل روندهای انتشارات علمی متمرکز بوده است، بررسی تفصیلی نقش کیفیت آب در اثربخشی روش‌های مختلف اصلاحی در دامنه پژوهش قرار نداشت؛ بنابراین، پیشنهاد می‌شود مطالعات آینده به‌طور ویژه تعامل میان کیفیت منابع آب و کارایی راهکارهای اصلاح خاک‌های متأثر از نمک را مورد بررسی قرار دهند.

در مجموع، این مطالعه چارچوبی مناسب برای درک وضعیت کنونی و مسیرهای آینده پژوهش در زمینه اصلاح خاک‌های متأثر از نمک فراهم می‌کند و می‌تواند به شناسایی شکاف‌های دانشی، تقویت همکاری‌های بین‌المللی و توسعه راهکارهای پایدار برای مدیریت و احیای این خاک‌ها کمک نماید. پیشنهاد می‌شود پژوهش‌های آینده با استفاده از چندین پایگاه داده بین‌المللی و تلفیق روش‌های علم‌سنجی با مرور نظام‌مند، تصویری جامع‌تر از تحولات علمی این حوزه ارائه دهند.

References

1. Bello, S.K., Alayafi, A.H., Al-Solaimani, S.G. and Abo-Elyousr, K.A.M. 2021. Mitigating soil salinity stress with gypsum and bio-organic amendments: a review. *Agronomy* 11, 1735. <https://doi.org/10.3390/agronomy11091735>.
2. Cao, Y.Q., Qi, F.L. and Cui, H.Y. 2023. Toward carbon neutrality: a bibliometric analysis of technological innovation and global emission reductions. *Environmental Science Pollution*. 30, pp. 73989–74005. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-27684-w>.
3. Chen, Q., Cao, X.F., Li, Y.Y., Sun, Q., Dai, L.N., Li, J.W., Guo, Z.J., Zhang, L. and Ci, L.J. 2022. Functional carbon nanodots improve soil quality and tomato tolerance in saline-alkali soils. *Science of the Total Environment*. 830, 154817. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.154817>.
4. Clarke, C.J., George, R.J., Bell, R.W. and Hatton, T.J. 2002. Dryland salinity in south- Western Australia: its origins, remedies, and future research directions. *Australian journal of soil research*. 40, pp. 93–113. <https://doi.org/10.1071/SR01028>.
5. Dai, Y.H., Zheng, H., Jiang, Z.X. and Xing, B.S. 2020. Combined effects of biochar properties and soil conditions on plant growth: a meta-analysis. *Science of the Total Environment*. 713, pp.11–26. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.136635>.
6. Desoky, E.M., Elrys, A.S. and Rady, M.M. 2019. Integrative moringa and licorice extracts application improves capsicum annum fruit yield and declines its contaminant contents on a heavy metals-contaminated saline soil. *Ecotoxicol. Environment*. 169, pp.50–60. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2018.10.117>.
7. Dey, G., Banerjee, P., Sharma, R.K., Maity, J.P., Etesami, H., Shaw, A.K., Huang, Y.H., Huang, H.B. and Chen, C.Y. 2021. Management of phosphorus in salinity-stressed agriculture for sustainable crop production by salt-tolerant phosphate-solubilizing bacteria—a review. *Agronomy* 11, 1552. <https://doi.org/10.3390/agronomy11081552>.
8. Edeh, I.G., Masek, O. and Buss, W. 2020. A meta-analysis on biochar's effects on soil water properties - new insights and future research challenges. *Science of the Total Environment*. 714, 136857. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.136857>.
9. FAO. 2012. Terms of Reference of the Global Soil Partnership (GSP) (CL 145/LIM/7 Rev.1). FAO Council, 145th Session. Rome, Italy. <https://www.fao.org/4/mf277e/mf277e.pdf>.
10. FAO, 2024. Global Status of Salt-affected Soils - Main Report. Rome. <https://doi.org/10.4060/cd3044en>.
11. Ferretti, G., Di Giuseppe, D., Faccini, B. and Coltorti, M. 2018. Mitigation of sodium risk in a sandy agricultural soil by the use of natural zeolites. *Environmental Monitoring and Assessment*. 190, pp. 1–12. <https://doi.org/10.1007/s10661-018-7027-2>.
12. Fitzpatrick, I.C., Millner, N. and Ginn, F. 2022. Governing the soil: natural farming and bionationalism in India. *Agriculture and Human Values*. 39, pp. 1391–1406. <https://doi.org/10.1007/s10460-022-10327-0>.
13. Gleick, P.H., 2003. Water use. *Annu. Rev. Environmental Resources Research*. 28, pp. 275–314. <https://doi.org/10.1146/annurev.energy.28.040202.122849>.
14. Jiang, S.X., Hagesteijn, K.F.L., Ni, J. and Ladewig, B.P. 2018. A scientometric study of the research on ion exchange membranes. *RSC Advances*. 8, pp. 24036–24048. <https://doi.org/10.1039/c8ra04686g>.
15. Kapadia, C., Patel, N., Rana, A., Vaidya, H., Alfarraj, S., Ansari, M.J., Gafur, A., Pocza, P. and Sayyed, R.Z. 2022. Evaluation of plant growth-promoting and salinity ameliorating potential of halophilic bacteria isolated from saline soil. *Frontiers in Plant Science*. 13, pp. 946217. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.946217>.
16. Koley, S., Dash, S., Khwairakpam, M. and Kalamdhad, A.S. 2024. Perspectives and understanding on the occurrence, toxicity and abatement technologies of disinfection by-products in drinking water. *Journal of Environmental Management*. 351, 119770. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.119770>.
17. Kumar, A., Singh, S., Mukherjee, A., Rastogi, R.P. and Verma, J.P. 2021. Salt-tolerant plant growth-promoting *bacillus pumilus* strain JPVS11 to enhance plant growth attributes of rice and improve soil health under salinity stress. *Microbiological Research*. 242, 126616.

- <https://doi.org/10.1016/j.micres.2020.126616>.
18. Li, X.B. 2019. Vegetation establishment in coastal salt-affected wasteland using drip-irrigation with saline water. *Land Degradation & Development*. 30, pp. 1423–1436. <https://doi.org/10.1002/ldr.3324>.
19. Li, X.B. and Kang, Y.H. 2020. Agricultural utilization and vegetation establishment on saline-sodic soils using a water-salt regulation method for scheduled drip irrigation. *Agricultural Water Management*. 231, 105995. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.105995>.
20. Li, Y.F. and Li, G.H. 2022. Mechanisms of straw biochar's improvement of phosphorus bioavailability in soda saline-alkali soil. *Environmental Science and Pollution Research*. 29, pp. 47867–47872. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-20489-3>.
21. Li, G.J., Ma, Z., Wei, L., Wu, C.Y., Chen, H., Guo, B., Ge, T.D., Wang, J.M. and Li, J.W. 2024. Long-term agricultural cultivation decreases microbial nutrient limitation in coastal saline soils. *Science of the Total Environment*. 949, 175005. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.175005>.
22. Li, X.J., Wang, L.G., Sun, X.M. and Cong, Y.S. 2019b. Analysis of mobilization of inorganic ions in soil by electrokinetic remediation. *Frontiers of Structural and Civil Engineering*. 13, pp. 1463–1473. <https://doi.org/10.1007/s11709-019-0569-8>.
23. Li, B.C., Wang, J.C., Yao, L.R., Meng, Y.X., Ma, X.L., Si, E.J., Ren, P.R., Yang, K., Shang, X. W. and Wang, H.J. 2019a. *halophyte halogeton glomeratus*, a promising candidate for phytoremediation of heavy metal-contaminated saline soils. *Plant and Soil*. 442, pp.323–331. <https://doi.org/10.1007/s1104-019-0452-4>.
24. Li, M.N., Yu, A.D., Sun, Y., Hu, Q.A., Kang, J.M., Chen, L., Zhu, X.X., Yang, Q.C. and Long, R. C. 2023. Lipid composition remodeling and storage lipid conversion play a critical role in salt tolerance in alfalfa (*medicago sativa* L.) leaves. *Environmental and Experimental Botany*. 205, 105144. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2022.105144>.
25. Li, X.B. and Zhang, C. 2021. Effect of natural and artificial afforestation reclamation on soil properties and vegetation in coastal saline silt soils. *Catena*. 198, 105066. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.105066>.
26. Li, Y.H., Zhao, L., Huang, M.L., Chen, L. and Jin, S. 2022. Application of a vertical 'electric sieve' to mitigate and prevent salinization in coastal soil. *Land Degradation & Development*. 33, pp. 2477–2486. <https://doi.org/10.1002/ldr.4325>.
27. Liu, T., Wang, S.S., Chen, Y.N., Luo, J.Q., Hao, B.H., Zhang, Z.C., Yang, B. and Guo, W. 2023. Bio-organic fertilizer promoted phytoremediation using native plant *leymus chinensis* in heavy Metal (loid)s contaminated saline soil. *Environmental Pollution*. 327, 121599. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2023.121599>.
28. Luo, P., Sun, Y., Wang, S., Wang, S., Lyu, J., Zhou, M., Nakagami, K., Takara, K. and Nover, D. 2020. Historical assessment and future sustainability challenges of Egyptian water resources management. *Journal Of Cleaner Production*. 263, pp. 121154. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121154>.
29. Lv, D.Q., Zheng, W.K., Feng, H.J., Qiu, T.Y., Bao, X.Y., Liu, Y.L. and Li, C.L. 2023. Combined application of controlled-release phosphate and triple superphosphate improved cotton yield and phosphorus supply in saline-alkali land: a short-term trial. *Land Degradation & Development*. 34, pp. 3350–3363. <https://doi.org/10.1002/ldr.4688>.
30. Ma, L., Song, Y.J., Wang, J., Shan, Y., Mao, T.T., Liang, X.Y., Zhang, H.Y., Fu, R., Li, J.L., Nie, W.J., Li, M., Li, J.J., Yi, K.H., Wang, L., Wang, X.Y. and Zhang, H.X. 2023. Porous minerals improve wheat shoot growth and grain yield through affecting soil properties and microbial community in coastal saline land. *Agronomy* 13, 2380. <https://doi.org/10.3390/agronomy13092380>.
31. Mao, Y.M., Li, X.P., Dick, W.A. and Chen, L.M. 2016. Remediation of saline-sodic soil with flue gas desulfurization gypsum in a reclaimed tidal flat of southeast China. *Journal of Environmental Science*. 45, pp. 224–232. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2016.01.006>.
32. Meena, M.D., Yadav, R.K., Narjary, B., Yadav, G., Jat, H.S., Sheoran, P., Meena, M.K., Antil, R.S., Meena, B.L., Singh, H.V., Meena, V.S., Rai, P.K., Ghosh, A. and Moharana, P. C. 2019. Municipal solid waste (MSW): strategies to improve salt affected soil sustainability: a review.

- Waste Management. 84, pp. 38–53.
<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.11.020>.
33. Meng, Q.F., Li, D.W., Zhang, J., Zhou, L.R., Ma, X.F., Wang, H.Y. and Wang, G.C. 2016. Soil properties and corn (*zea mays* L) production under manure application combined with deep tillage management in solonchic soils of songnen plain, northeast China. *Journal Of Integrative Agriculture*. 15, pp. 879–890. [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(15\)61196-0](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(15)61196-0).
34. Motojima, H., Yamada, P., Irie, M., Ozaki, M., Shigemori, H. and Isoda, H. 2012. Amelioration effect of humic acid extracted from solubilized excess sludge on saline- alkali soil. *J. Mater. journal of material cycles and waste management*. 14, pp.169–180. <https://doi.org/10.1007/s10163-012-0056-y>.
35. Müller, F.M., de Oliveira, D. and Michels, C. 2023. Current status, gaps and challenges of rendering industries wastewater. *Journal of Water Process Engineering*. 52, 103480. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2022.103480>.
36. Nguyen, B.T., Trinh, N.N. and Bach, Q.V. 2020. Methane emissions and associated microbial activities from paddy salt-affected soil as influenced by biochar and cow manure addition. *Applied Soil Ecology*. 152, 103531. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2020.103531>.
37. Ondrasek, G. and Rengel, Z. 2021. Environmental salinization processes: detection, implications & solutions. *Science of Total Environment*. 754, 142432. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142432>.
38. Rajeswari, S., Saravanan, P., Linkesver, M., Rajeshkannan, R. and Rajasimman, M. 2022. Identifying global status and research hotspots of heavy metal remediation: a phase upgrade study. *Journal of Environmental Management*. 324, 116265. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.116265>.
39. Rashidi, S., Bakhshi, N. and Rafee, R. 2021. Progress and challenges of helical-shaped geothermal heat exchangers. *Environmental Science and Pollution Research*. 28, pp. 28965–28992. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-13766-0>.
40. Ren, J., Chen, J., Han, L., Wang, M., Yang, B., Du, P. and Li, F.S. 2018. Spatial distribution of heavy metals, salinity and alkalinity in soils around bauxite residue disposal area. *Science of the Total Environment*. 628-629, pp.1200–1208. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.02.149>.
41. Rezende, E.C.N., Carneiro, F.M., de Moraes, J.B. and Wastowski, I.J. 2021. Trends in science on glyphosate toxicity: a scientometric study. *Environmental Science and Pollution Research*. 28, pp. 56432–56448. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-14556-4>.
42. Sadegh-Zadeh, F., Parichehreh, M., Jalili, B. and Bahmanyar, M.A. 2018. Rehabilitation of calcareous saline-sodic soil by means of biochars and acidified biochars. *Land Degradation & Developement*. 29, pp. 3262–3271. <https://doi.org/10.1002/ldr.3079>.
43. Saifullah, Dahlawi, S., Naeem, A., Rengel, Z. and Naidu, R. 2018. Biochar application for the remediation of salt-affected soils: challenges and opportunities. *Science of the Total Environment*. 625, pp. 320–335. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.12.257>.
44. Singh, A. 2021. Soil salinization management for sustainable development: a review. *Journal of Environmental Management*. 277, 111383. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111383>.
45. Smaoui-Jardak, M., Kriaa, W., Maalej, M., Zouari, M., Kamoun, L., Trabelsi, W., Ben Abdallah, F. and Elloumi, N. 2017. Effect of the phosphogypsum amendment of saline and agricultural soils on growth, productivity and antioxidant enzyme activities of tomato (*solanum lycopersicum* L.). *Ecotoxicology*. 26, pp.1089–1104. <https://doi.org/10.1007/s10646-017-1836-x>.
46. Sun, J.X., Kang, Y.H. and Wan, S.Q. 2013. Effects of an imbedded gravel-sand layer on reclamation of coastal saline soils under drip irrigation and on plant growth. *Agricultural Water Management*. 123, pp. 12–19. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2013.03.004>.
47. Sun, Y., Wang, X., Yao, R. and Xie, W. 2024. Increasing sunflower productivity by mitigating soil salt stress through biochar-based amendments. *Archives of Agronomy and Soil Science*. 70, pp. 1–16. <https://doi.org/10.1080/03650340.2024.2373163>.
48. Tao, R., Zhang, Y.L., Yang, J., Yang, T.X., White, J.C. and Shen, Y. 2023. Biochar nanoparticles alleviate salt stress

- in tomato (*solanum lycopersicum*) seedlings. *Environmental Science: Nano*. 10, pp. 1800–1811. <https://doi.org/10.1039/d2en00816e>.
49. Tejada, M., Garcia, C., Gonzalez, J.L. and Hernandez, M.T. 2006. Use of organic amendment as a strategy for saline soil remediation: influence on the physical, chemical and biological properties of soil. *Soil Biology & Biochemistry*. 38, pp. 1413–1421. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2005.10.017>.
50. Wang, Z.M., Li, Z.F., Zhan, H.B. and Yang, S.F. 2022. Effect of long-term saline mulched drip irrigation on soil-groundwater environment in arid northwest China. *Science of Total Environment*. 820, 153222. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.153222>.
51. Wang, G., Liu, Q., Chen, C., Zhou, H., Wang, X., Zhu, H., Xie, Q. and Zhang, C. 2023a. Rhamnolipids combined with drip irrigation as a novel strategy for promoting cotton growth by reducing salinity stress and optimizing rhizosphere microbial communities. *Rhizosphere*, 28, 100802. <https://doi.org/10.1016/j.rhisph.2023.100802>.
52. Wang, P.L., Nie, X., Ye, Y.L., Abid, M.A., Liang, C.Z., Zhang, R., Wang, Y., Wei, Y.X., Zhang, J.K., Meng, Z.G., 2023e. Forskolin improves salt tolerance of *Gossypium hirsutum* L. By upregulation of GhLTI65. *Indiann Crop Production*. 201, 116900. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2023.116900>.
53. Wang, J., Shi, D., Huang, C., Zhai, B. and Feng, S. 2023b. Effects of common biochar and acid-modified biochar on growth and quality of spinach in coastal saline soils. *Plants*, 12, 3232. <https://doi.org/10.3390/plants12183232>.
54. Wang, M., Sun, C.H. and Zhang, D.Q. 2023d. Opportunities and challenges in Green stormwater infrastructure (GSI): a comprehensive and bibliometric review of ecosystem services from 2000 to 2021. *Environmental Research*. 236, 116701. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.116701>.
55. Wang, X., Sun, Y., Liu, Y., Li, X., Gao, Q., Yang, J., Xie, W. and Yao, R. 2024. Effects of environmentally friendly materials on saline soil improvement and sunflower yields in the hetao irrigation region, China. *Land*, 13, 870. <https://doi.org/10.3390/land13060870>.
56. Wang, Y.Y., Wang, S.Q., Zhao, Z.Y., Zhang, K., Tian, C.Y., Mai, W.X., 2023f. Progress of euhalophyte adaptation to arid areas to remediate salinized soil. *Agriculture* 13, 704. <https://doi.org/10.3390/agriculture13030704>.
57. Wang, J., Yuan, G., Lu, J., Wu, J. and Wei, J. 2020. Effects of biochar and peat on salt-affected soil extract solution and wheat seedling germination in the Yellow River delta. *Arid Land Research And Management*. 34, pp. 287–305. <https://doi.org/10.1080/15324982.2019.1696423>.
58. Wang, J., Zhao, A., Ma, F., Liu, J., Xiao, G. and Xu, X. 2023c. Amendment of saline-alkaline soil with flue-gas desulfurization gypsum in the yinchuan plain, northwest China. *Sustainability*, 15, 8658. <https://doi.org/10.3390/su15118658>.
59. Wang, Z.Q., Zhou, Z.Y., Xu, W.C., Yang, D., Xu, Y., Yang, L.H., Ren, J., Li, Y.T. and Huang, Y. L. 2021. Research status and development trends in the field of marine environment corrosion: a new perspective. *Environmental Science and Pollution Research*. 28, pp.54403–54428. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-15974-0>.
60. Wen, D.D., Fu, R.B. and Li, Q. 2021. Removal of inorganic contaminants in soil by electrokinetic remediation technologies: a review. *Journal Of Hazardous Materials*. 401, 123345. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.123345>.
61. Xie, X., Gan, L.Z., Wang, C.Y. and He, T.X. 2024. Salt-tolerant plant growth-promoting bacteria as a versatile tool for combating salt stress in crop plants. *Archives of Microbiology*. 206, 341. <https://doi.org/10.1007/s00203-024-04071-8>.
62. Xu, X.M. and Feng, C., 2021. Mapping the knowledge domain of the evolution of emergy theory: a bibliometric approach. *Environmental Science and Pollution Research*. 28, pp. 43114–43142. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-14959-3>.
63. Yang, H.C., Chen, Y. and Zhang, F.H. 2019. Evaluation of comprehensive improvement for mild and moderate soil salinization in arid zone. *PLoS One* 14, e0224790. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0224790>.
64. You, X.X., Wang, S., Du, L.N., Wu, H. and Wei, Y. 2022. Effects of organic fertilization on functional microbial communities associated with greenhouse gas emissions in paddy soils. *Environmental Research*. 213, 113706.

- <https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.113706>.
65. Zhang, K.Y., Chang, L., Li, G.H. and Li, Y.F. 2023a. Advances and future research in ecological stoichiometry under saline-alkali stress. *Environmental Science and Pollution Research*. 30, pp.5475–5486. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-24293-x>.
66. Zhang, Y.T., Hou, K., Qian, H., Gao, Y.Y., Fang, Y., Tang, S.Q., Xiao, S., Ren, W.H., Qu, W. G. and Zhang, Q.Y. 2023b. Natural-human driving factors of groundwater salinization in a long-term irrigation area. *Environmental Research*. 220, 115178. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.115178>.
67. Zhang, S., Mao, G.Z., Crittenden, J., Liu, X. and Du, H.B. 2017. Groundwater remediation from the past to the future: a bibliometric analysis. *Water Resources Research*. 119, pp. 114–125. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2017.01.029>.
68. Zhang, H.Y., Pang, H.C., Song, J.S., Chang, F.D., Wang, J., Wang, X., Zhang, Y.T., Peixoto, L. and Li, Y.Y. 2022. Subsurface organic ameliorant plus polyethylene mulching strengthened soil organic carbon by altering saline soil aggregate structure and regulating the fungal community. *Land Degradation & Development*. 33, pp. 2543–2553. <https://doi.org/10.1002/ldr.4330>.
69. Zhang, X., Qu, J.S., Li, H., La, S.K., Tian, Y.Q. and Gao, L.H. 2020a. Biochar addition combined with daily fertigation improves overall soil quality and enhances water- fertilizer productivity of cucumber in alkaline soils of a semi-arid region. *Geoderma*, 363, 114170. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.114170>.
70. Zhang, K.P., Shi, Y., Cui, X.Q., Yue, P., Li, K.H., Liu, X.J., Tripathi, B.M. and Chu, H.Y. 2019. Salinity is a key determinant for soil microbial communities in a desert ecosystem. *mSystems*, 4, 10–1128. <https://doi.org/10.1128/mSystems.00225-18>.
71. Zhao, L., Heng, T., Yang, L.L., Xu, X. and Feng, Y. 2021. Study on the farmland improvement effect of drainage measures under film mulch with drip irrigation in saline-alkali land in arid areas. *Sustainability*, 13, 4159. <https://doi.org/10.3390/su13084159>.
72. Zhao, W., Zhou, Q., Tian, Z.Z., Cui, Y.T., Liang, Y. and Wang, H.Y. 2020. Apply biochar to ameliorate soda saline-alkali land, improve soil function and increase corn nutrient availability in the songnen plain. *Science of Total Environment*. 722, 137428. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137428>.
73. Zheng, H., Wang, X., Chen, L., Wang, Z.Y., Xia, Y., Zhang, Y.P., Wang, H.F., Luo, X.X. and Xing, B.S. 2018a. Enhanced growth of halophyte plants in biochar-amended coastal soil: roles of nutrient availability and rhizosphere microbial modulation. *Plant Cell and Environment*. 41, pp. 517–532. <https://doi.org/10.1111/pce.12944>.
74. Zheng, H., Wang, X., Luo, X.X., Wang, Z.Y. and Xing, B.S. 2018b. Biochar-induced negative carbon mineralization priming effects in a coastal wetland soil: roles of soil aggregation and microbial modulation. *Science of Total Environment*. 610, pp. 951–960. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.08.166>.
75. Zhong, X.M., Su, G.F., Zeng, Q.Y., Li, G.Z., Xu, H., Wu, H.H., Zhou, H.J. and Zhou, X.H. 2023. Preparation of salicylic acid-functionalized nanopesticides and their applications in enhancing salt stress resistance. *Acs Applied Materials & Interfaces*. 15, pp. 43282–43293. <https://doi.org/10.1021/acsami.3c06398>.
76. Zhu, H., An, Q., Nasir, A.S.M., Babin, A., Saucedo, S.L., Vallenias, A., Li, L.R.T., Baldwin, S.A., Lau, A. and Bi, X.T. 2023. Emerging applications of biochar: a review on techno-environmental-economic aspects. *Bioresource Technology*. 388, 129745. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2023.129745>.
77. Zuo, Y.T., Wei, C.C., Hu, Y., Zeng, W.Z., Ao, C. and Huang, J.S. 2023. Effect of multi-walled carbon nanotubes on the carbon and nitrogen cycling processes in saline soil. *Agronomy*. 13, 2455. <https://doi.org/10.3390/agronomy13102455>.