环境科学
(HUANJING KEXUE)
ENVIRONMENTAL SCIENCE
第 45 卷　第 3 期
2024 年 3 月 15 日

目　次

中国省域差异化碳达峰评价方法与应用 ……刘润璞，彭栓，陈玉烁，陈民，张楠，Nihed Benani，吕连宏，阳平坚（1233）
全生命周期视角下中国建筑碳排放空间关联网络演化及影响因素分析 ……任晓松，李昭睿（1243）
京津冀地区城市三生空间碳代谢效率特征及演进模式……田超，程琳琳，邵盈钞（1254）
太原市“十四五”规划大气污染防治政策的CO_2协同效益评估 ……肖婷玉，束韫，李慧，王涵，李俊宏，严沁，张文杰，姜华（1265）
湖南省工业领域碳减排与空气质量改善协同……李楠，刘弯弯，朱书涵，邢晓雯，汤克勤，王松伟，白露（1274）
“双碳”背景下河南省电力行业中长期控煤降碳路径 ……张静，杨萌，张伟，曹东，赵静，李勃，薛英岚，蒋洪强（1285）
郑州市公交车队电动化减污降碳环境效益 ……邹超，汪亚男，吴琳，何敬，倪经纬，毛洪钧（1293）
长江中游城市群城市化对$PM_{2.5}$浓度的多尺度驱动机制 ……张政，周廷刚，周志衡，昌悦（1304）
天山北坡城市群$PM_{2.5}$浓度时空分布特征及影响因素分析 ……王相男，张喆，刘方青（1315）
天津市$PM_{2.5}$碳组分空间差异性及来源解析……武甫亮，吴建会，戴启立，肖致美，冯银厂（1328）
贵阳市花溪城区大气$PM_{2.5}$中碳质气溶胶的变化特征及来源解析 ……桂佳群，杨员，王显钦，李云武，闫广轩，徐鹏（1337）
新乡市大气$PM_{2.5}$中水溶性离子的污染特征、来源解析及气象影响分析
……刘桓嘉，李岚清，李焕莉，任言，许梦源，贾梦珂，刘恒志，杨莹，宋天颂，洪启航（1349）
2017~2018年冬季菏泽大气$PM_{2.5}$中金属元素特征及健康风险评估 ……杜虹萱，任丽红，赵明升，韩慧霞，徐义生（1361）
北京市臭氧污染跳变型特征及影响因素分析 ……潘锦秀，安欣欣，刘保献，李云婷，李倩，孙峰，张章，邱启鸿，陈阳（1371）
南京夏季大气臭氧光化学特征与敏感性分析 ……罗丽彤，章炎麟，林煜棋，Ahsan Mozaffar，曹梦瑶（1382）
苏州市初夏臭氧污染成因及年际变化 ……吴也正，张鑫，顾钧，缪青，魏恒，熊宇，杨倩，吴斌，沈文渊，马强（1392）
长江中游典型湖泊沉积物重金属分布特征、生态风险评估及溯源 ……卢洪斌，卢少勇，李响，张森霖，黄张根（1402）
基于PCA-APCS-MLR模型的乌梁素海表层沉积物重金属时空分布及来源解析
……崔志谋，史小红，赵胜男，卢俊平，张昊，刘莹慧，郭鑫，王彦隽（1415）
重庆市长寿湖水库表层水体重金属时空分布及风险评价……张瑞溪，刘娅君，罗泳楠，李杰芹，李彩霞，李佳佳，张成（1428）
长江流域微塑料污染特征及生态风险评价 ……李思琼，王华，储林佑，曾一川，闫雨婷（1439）
宜昌市东山运河微塑料污染评估及年排放量估算……丁爽，李卫明，张续同，刘子健，高雅坤，李映成，王芳炜（1448）
汜水河(荥阳段)入河排污口水体微塑料赋存特征及风险评估 ……赵长民，和兵，李和通，张瑞琪，李银月，张发文，桂新，马丽（1457）
宁夏入黄排水沟中药物和个人护理品的污染特征与生态风险评价 ……高礼，李凌云，郑兰香，吴海娟，陶红，刘邓超（1468）
浙南瓯江流域水体抗生素污染特征及风险评价 ……钟奕昕，李立湘，吴鑫，周施阳，姚飞延，董好刚（1480）
鄱阳湖沉积物中多环芳烃的时空分布及源解析 ……马妍，孙晨，毕笳乐，张波涛，刘艳，邵鹏，刘统，王圣瑞，钟文军（1492）
杭州湾南岸20 a水质净化功能变化及预测 ……王珊珊，曹公平，徐明伟，黄君宝，曾剑（1502）
不同缓冲区的土地利用方式对地表水水质的影响:以海河流域天津段为例 ……代孟均，张兵，杜倩倩，孙季珲，田蕾，王义东（1512）
长江流域安庆段浅层地下水水化学特征及控制因素……刘海，宋阳，李迎春，魏伟，赵国红，王旭东，黄健敏（1525）
富营养化湖泊藻华腐解产生的溶解性有机质动态变化及其环境效应 ……张瑾，陈明滢，郝智能，钟寰，何欢，雷沛（1539）
紫外光活化亚硫酸盐降解水中卡马西平 ……林涛，苑宇杰（1553）
再生水消毒副产物的检测、生成与控制 ……廖雨枫，王正，潘旸，李爱民（1561）
3种人工湿地基质材料对氨氮的吸附特性 ……何强，陈博文，杨雨静，周全，刘彦君，王志刚，程呈（1577）
基于改进遥感生态指数的青藏公路那(曲)安(多)段生态环境评估及驱动机制分析 ……傅楷翔，贾国栋，余新晓，王旭（1586）
基于AWRSEI的岱海流域生态环境质量时空演变及驱动因子分析……赵嘉丽，李兴，孙冰（1598）
定量评估气候变化对长江中下游地区植被GPP_{GS}变化的影响 ……徐勇，盘钰春，邹滨，郑志威，郭振东（1615）
基于Meta分析的煤矿区植被恢复对土壤有机碳储量的影响 ……李健明，康雨欣，蒋福祯，宋明丹，祁凯斌，卢素锦，李正鹏（1629）
连续周年轮作休耕对土壤团聚体稳定性及有机碳的影响 ……鲁泽让，李永梅，杨春怀，夏梓泰，程伟威，王自林，赵吉霞，范茂攀（1644）
4种改良剂对酸性紫色土肥力及活性有机碳组分的影响 ……丁馨茹，严宁珍，王子芳，李志琦，黄容，王洋，代文才，高明（1655）
不同植茶年限土壤氮素组分变化及其与环境因子关系 ……邵奇，吴涛，解雪峰，徐梓晴，李文琦，蒋国俊，张建珍，徐飞（1665）
黄河下游典型湿地土壤养分及其生态化学计量特征 ……王传盈，王凯月，王浩然，张梦迪，周云凯（1674）
覆膜年限和有机肥施用对花生田耕层土壤微塑料赋存特征的影响
……宋宁宁，李梦佳，王学霞，刘君，王芳丽，宗海英，黄小丽，王斌，梁丽娜（1684）
秸秆还田和添加生物炭对热带地区稻菜轮作体系中淹水后土壤温室气体排放的影响
……胡天怡，车佳玥，胡煜杰，陈绮琦，张冬明，雷菲，曾建华，汤水荣，伍延正，孟磊（1692）
耕作深度调控秸秆还田对农田土壤呼吸的影响 ……陈曦，张彦军，邹俊亮，李天姿，于媛，李晶（1702）
基于遥感时-空-谱特征及随机森林模型的土壤重金属空间分布预测 ……王泽强，张冬有，徐夕博，王兆鹏，杨东宇，宋晓宁（1713）
黄河流域农田土壤重金属污染特征及其优先控制源分析……李军，李旭，李开明，焦亮，台喜生，臧飞，曹素珍（1724）
广西贺州市典型矿区周边耕层土壤Cd通量特征 ……杨烨宇，李程，杨忠芳，张起钻，邹胜章，宋淑娥，蔡贺清（1739）
基于信息扩散模型的沣东新城区土壤重金属潜在生态风险评估……杨楠楠，韩玲，刘明（1749）
湘西地区土壤重金属污染溯源分析及环境质量评价 ……肖凯琦，徐宏根，甘杰，戴亮亮，李毅，李凯，许青阳，张俊，邓世民，李颖（1760）
典型行业再利用土壤重金属含量分布、来源解析及生态风险评价……沈城，王文娟，沙晨燕，谢雨晴，王敏，吴健（1769）
省级尺度土壤As迁移转化与水稻安全种植区划:以贵州省为例……董心月，吴勇，周子寒，王佛鹏，张云霞，宋波（1781）
谷壳灰硅肥改善土壤质量降低水稻镉砷累积的效应……易轩韬，欧阳坤，辜娇峰，李倩，游萍，周航，廖柏寒（1793）
EDDS对土壤铜镉有效性及蓖麻吸收转运的影响 ……刘文英，吴刚，胡红青（1803）
叶面调理剂对复合污染农田小麦籽粒Cd、As和Pb累积的阻控效应 …肖冰，王秋实，高培培，赵全利，杨威，王钊，刘文菊，薛培英（1812）
民勤绿洲退耕地土壤微生物群落结构与功能多样性特征 ……李常乐，张富，王理德，赵赫然，赵学成，张恒平（1821）
宏基因组揭示紫色土中邻苯二甲酸酯去除的微生物学机制 ……李雨桐，余海，刘坤，柏宏成，汪军，朱正杰（1830）
养鸡场空气微生物污染及工人呼吸暴露风险 ……白渔樵，孙兴滨，仇天雷，郭雅杰，高敏，王旭明（1840）
玛瑙河多环境介质和铜锈环棱螺体内微塑料的赋存特征 ……高雅坤，李卫明，张续同，刘子健，李映成，丁爽，王芳炜，刘流（1849）
不同官能团微塑料对斑马鱼胚胎菌群和代谢功能的胁迫效应 ……闫振华，张燕，包旭辉，朱培元，陈玉芳（1859）
《环境科学》征订启事（1427）　《环境科学》征稿简则（1576）　信息（1654）

基于Meta分析的煤矿区植被恢复对土壤有机碳储量的影响

李健明[1,2], 康雨欣[1], 蒋福祯[1], 宋明丹[1], 祁凯斌[1], 卢素锦[2], 李正鹏[1*]
(1. 青海大学农林科学院, 西宁 810016; 2. 青海大学生态环境工程学院, 西宁 810016)

摘要: 煤矿开采是全世界应对不断增加的能源需求的主要手段. 但随着煤矿开采,区域生态系统遭到不同程度的破坏,导致"碳汇"能力下降. 植被恢复是矿区退化的生态系统和固碳功能恢复的基础. 然而,目前尚未对全球范围内煤矿区植被恢复对土壤有机碳(SOC)的影响进行系统研究,因此无法准确预测全球SOC库对植被恢复的响应. 通过搜集同行评议的112篇文章中植被恢复的土壤理化性质,以评估煤矿区植被恢复类型、土壤深度、恢复年份、年均温、年降水量和海拔等对SOC的影响,并明确相关的关键驱动因素. 结果表明,受损煤矿区通过植被恢复能够显著改善土壤的理化性质,植被恢复后土壤相较于未恢复或自然恢复SOC储量提升了39.02%. 当不考虑环境因素时,利于SOC储量积累的植被恢复类型为:农田>林地>草地>灌木林. 4种类型的植被恢复对表层(0~20 cm)SOC储量均得到显著增加,草地和灌木能显著增加深层(>40 cm)的SOC储量,而林地和农田类型下深层的SOC储量与未恢复或自然恢复后的SOC储量无显著差异. 植被恢复后SOC储量的增加趋势会随着土壤深度的增加而降低. 具体的植被恢复策略应根据气候条件选择合适的植被类型. 受损煤矿区在年均温<0℃和年均降水<500 mm的环境下,固碳效应较高的植被恢复类型为草地和灌木林,而在年均温>15℃和年降水量>800 mm的环境下,林地和农田恢复类型能够更好地增加SOC储量. TN、BD、AN和AK是影响土壤固碳能力的主要因素. 研究可为量化受损煤矿区不同植被恢复措施的固碳效果和退化生态系统的恢复与重建提供理论参考.

关键词: 煤矿区; 植被恢复; 土壤有机碳储量; 土壤特性; 森林; 草地; 农田; 灌木林
中图分类号: X144 **文献标识码:** A **文章编号:** 0250-3301(2024)03-1629-15 **DOI:** 10.13227/j.hjkx.202305161

Effect of Vegetation Restoration on Soil Organic Carbon Storage in Coal Mining Areas Based on Meta-analysis

LI Jian-ming[1,2], KANG Yu-xin[1], JIANG Fu-zhen[1], SONG Ming-dan[1], QI Kai-bin[1], LU Su-jin[2], LI Zheng-peng[1*]
(1. Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Qinghai University, Xining 810016, China; 2. College of Eco-environmental Engineering, Qinghai University, Xining 810016, China)

Abstract: Coal mining is the world's primary means of coping with an increasing energy demand. However, with the mining of coal, the regional ecosystem has been damaged to varying degrees, resulting in a decrease in the "carbon sink" capacity. Vegetation restoration is the basis for the restoration of degraded ecosystems and carbon sequestration functions in mining areas. However, no systematic studies have been conducted on the effects of vegetation restoration on soil organic carbon in coal mining areas on a global scale. Therefore, it is not possible to accurately predict the response of the global SOC pool to vegetation restoration. In this study, soil physicochemical properties of vegetation restoration were collected from 112 peer-reviewed articles to assess the effects of vegetation restoration type, soil depth, restoration year, mean annual temperature, annual precipitation, and elevation on soil organic carbon in coal mining areas and to identify relevant key drivers. The results showed that the damaged coal mine area could significantly improve the physicochemical properties of the soil through vegetation restoration. The restored soils had 39.02% higher SOC reserves compared to that in unrestored or naturally restored soils. When environmental factors were not considered, the vegetation restoration types that were favorable for SOC stock accumulation were cropland > woodland > grassland > shrubland. All four types of vegetation restoration significantly increased the SOC storage in the surface layer (0-20 cm). Grassland and shrubs significantly increased SOC storage at depth (>40 cm), whereas SOC storage at depth under woodland and farmland types was not significantly different from SOC storage after unrestored or natural restoration. The increasing trend of SOC storage after vegetation restoration decreased with increasing soil depth. The specific vegetation restoration strategy should select the appropriate vegetation type according to the climatic conditions. The types of vegetation restoration with higher carbon sequestration effects in damaged coal mining areas with mean annual temperature <0°C and mean annual precipitation <500 mm were grassland or shrubland. In contrast, woodland and cropland restoration types could better increase SOC storage in environments with mean annual temperature >15°C and annual precipitation >800 mm. TN, BD, AN, and AK were the main factors influencing the ability to affect soil carbon sequestration. This study can provide a theoretical reference for quantifying the carbon sequestration effects of different vegetation restoration measures in damaged coal mining areas and the restoration and reconstruction of degraded ecosystems.

Key words: coal mine; vegetation restoration; soil organic carbon stocks; soil properties; woodland; grassland; cropland; shrubland

煤炭是世界储量最为丰富和分布最为广泛的能源之一[1,2],占全球能源消费总量的24%[3]. 随着全世

收稿日期: 2023-05-17; **修订日期:** 2023-06-07
基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFC3201605); 青海省重点研发与转化计划项目(2021-SF-170)
作者简介: 李健明(1999~),男,硕士研究生,主要研究方向为煤矿区生态恢复,E-mail: jianmlee@outlook.com
* 通信作者,E-mail: lipengzheng131@163.com

界经济的快速发展和不断增加的能源需求,煤炭的生产速度持续加快,开采煤矿成为了应对能源需求的主要手段之一[4,5]. 但煤矿开采会导致地表植被受到不同程度的破坏,从而出现表土流失、地表下沉和土壤退化等问题[6~8]. 以上问题会进一步导致土壤物理结构被损坏,如团聚体被破坏、容重增大以及孔隙度减小等,使区域生态系统的"碳汇"能力下降[9],温室气体排放量增加,从而促进全球变暖. 煤矿开采对生态环境造成的破坏导致区域的生态系统服务功能损失已成为世界严重的生态问题之一[10]. 目前主要采取人工干预(土地复垦)等措施来解决这一问题,其首要目标是为受损煤矿区进行植被恢复[11]. 植被恢复是矿区退化生态系统恢复的基础[12,13]. 受损煤矿区通过重建植被,能够有效恢复矿区生态系统的固碳功能,使矿区生态系统由采矿扰动后的"碳源"向"碳汇"转变,从而促进全球陆地生态系统碳库的积累[14].

在全球陆地生态系统碳库中,土壤有机碳(soil organic carbon, SOC)储量能够达到约67%[15]. 因此,SOC库的变化会对全球生态系统的碳平衡产生重要影响[16,17]. SOC能够影响土壤的质地和结构,其变化能够反映土壤健康的变化. 在具有丰富的SOC条件下,可以形成稳定的大量的有机-无机复合体,使土壤结构更有利于抵抗土壤侵蚀,也为植物的根系提供了理想的水分和养分条件[18]. 根据Akala等[19]和Ghose[20]估算,在煤矿开采过程中SOC的损失率高达80%,Zhang等[21]的研究也表明开采煤矿过程使表层土壤的SOC损失了69.8%. 因此,恢复SOC是煤矿区土壤复垦和生态重建的关键[22],也是衡量煤矿复垦和生态恢复程度的重要指标[23~25]. 但是目前,受损煤矿区植被恢复后对全球SOC储量的影响尚未进行系统研究,因此无法准确预测全球SOC库对植被恢复的响应.

煤矿区SOC的变化会受到土地利用类型(根据复垦后土地利用方向,主要分为4类:林地、草地、灌木、农田生态系统)、恢复年份和不同的气候因素等条件的影响[26,27]. 不同的环境条件下,植被恢复类型对生态系统的影响程度不同[28]. 由于不同植被恢复类型的凋落物和根际分泌物存在差异影响了土壤的理化性质、微生物的群落结构以及土壤酶活性等,导致侵蚀速率、沉积速率以及地上和地下凋落物的输入量不同[29,30],进而影响SOC储量的不同. 不同气候条件(温度和降水)下,温度的变化可影响土壤养分供应和植物代谢活动,进而调节微生物呼吸及凋落物分解速率[31],降水则会通过影响土壤水分和肥力状况来调控土壤碳的矿化速率[32],导致SOC储量存在差异. 因此,不同气候等环境条件下的植被恢复类型对SOC储量的固存能力不同. 不同的研究中不同的植被恢复类型对SOC固存能力的影响存在差异. 例如李俊超等[33]认为煤矿区SOC的固存能力表现为草地>林地, Zhang等[21]和Shrestha等[34]的实验结果也表明草地中积累SOC的潜力要高于林地,草地的SOC积累潜力能够比林地多72%[34]. 与此不同的是,刘伟红等[35]研究表明煤矿区植被类型对SOC固存能力的整体趋势为:林地>农田>草地. 显然,由于实验条件和外在环境等诸多因素的影响,限制了煤矿区植被恢复对土壤固碳策略方面的科学认识,因此需要对其进一步进行整合分析.

不同的自然因素对土壤固碳效应的影响差异很大,对影响因素进行综合评判会对科学预测生态系统的碳循环过程有着重要作用[36]. 目前,煤矿区植被恢复策略对土壤SOC影响的分析并不全面,科学证据仍然零散且不一致. 因此,本研究通过整合分析,量化煤矿区植被恢复对SOC的影响效果,明确环境因素和煤矿植被恢复措施中影响SOC的关键因子,以期为"碳中和"背景下明确植被恢复对受损煤矿区土壤碳汇变化的影响和制定合理的受损煤矿区植被恢复管理策略提供参考意义.

1 材料与方法

1.1 数据收集和筛选

通过使用以下数据库搜索相关论文:Web of science(WOS)、中国知网(CNKI)和谷歌学术(Google Scholar). 以"煤矿(mine lot, coal mine, mine area, mine site)""植被恢复(vegetation restoration, restoration, reclamation)""土壤理化性质(Soil physical and chemical properties)""土壤有机碳(soil organic carbon, SOC)""土壤有机质(soil organic matter, SOM)"为关键词. 检索结果经过过滤,包括2000年1月至2022年12月间发表的文章. 为最大努力保证每一项研究的完整性和科学性,严格剔除不合格的文献,最大可能地收集与研究主题相关的文献. 通过使用以下纳入和排除标准避免发表偏倚:①需要充分研究所检索文献的研究背景,文献需要具有明确的实验地点,以及实验研究矿区类型属于煤矿区而不是金属矿区;②文献中必须具有对照组和最少一个实验组,且保证每项研究独立;③文献必须明确采样深度. 如果文献只提供有机质含量,则用Van Bemmelen因数[37]进行有机碳含量换算;④文献中提供的实验组和对照组对应数值需有均值、标准差或标准误;⑤共分为2个对照组,植被恢复土壤与未损毁土壤对比;植被恢复后土壤与未恢复或自然

恢复土壤对比.

经筛选,共纳入来自不同区域的同行评议论文共112篇,其中有62篇为植被恢复后与未损毁土壤进行对比,有59篇植被恢复后与未恢复或自然恢复土壤进行对比.

1.2　数据分析

土壤容重(bulk density, BD)与SOC之间存在着一定的关系,采用Wu等[38]的方法来估计土壤容重.

当ω(SOC)<60 g·kg^{-1}:

$$BD = -0.122\,9 \times \ln SOC_{Content} + 1.290\,1 \quad (1)$$

当ω(SOC)≥60 g·kg^{-1}:

$$BD = 1.377\,4e^{-0.041\,3 \times SOC_{Content}} \quad (2)$$

式中,BD为土壤容重,g·cm^{-3};$SOC_{Content}$为SOC含量,g·kg^{-1}.

根据Shi等[39]的方法对不同土壤深度分类的SOC含量被调整为同一深度.

$$SOC\text{-}H_{Content} = \frac{1 - 0.992\,8^{H}}{1 - 0.992\,8^{h}} \times SOC\text{-}h_{Content} \quad (3)$$

式中,SOC-$H_{Content}$为调整土壤深度后的SOC含量,g·kg^{-1};H为调整后的土壤深度,cm. SOC-$h_{Content}$为已有研究中原始土壤深度的SOC含量,g·kg^{-1};h为已有研究中原始土壤深度,cm.

通过Getdata Graph Digitize(http://www.getdata-graph-digitizer.com)提取以图形表示的数据.数据提取算法都是在与图形的相应数值校准后使用的.收集植被恢复影响下的文献,收集生态系统中的土壤质量数据,土壤质量如土壤pH值、BD、土壤水分(soil moisture, SM)、土壤黏土含量(clay)、土壤有机碳(soil organic carbon, SOC)、有机质(soil organic matter, SOM)、全氮(total nitrogen, TN)、全磷(total phosphorus, TP)、全钾(total potassium, TK)、速效氮(available nitrogen, AN)、速效磷(available phosphorus, AP)、速效钾(available potassium, AK)和阳离子交换量(cation exchange capacity, CEC),并统一所有数据的单位.提取已有研究中描述的恢复年限,对照组数据中的所有恢复类型都被划分为林地、草地、农田和灌木.此外,还收集了研究区位置(经度和纬度);气候数据[(年平均气温(MAT)和年平均降水量(MAP)].当研究没有包括标准差(standard deviation, SD)或标准误(standard error, SE)时,SD被指定为平均值的1/10[40].如果已有研究报告了变量的SE,而不是SD,则使用以下公式确定SD.

$$SD = SE\sqrt{n} \quad (4)$$

式中,n为样本量.

比较数据中包括两个对照组.一个对照组是在植被恢复(处理组)和未损毁(对照组)之间进行比较,另一组是植被恢复(处理组)和未恢复或自然恢复的植被(对照组)进行比较.用自然对数反应比(RR)来量化采煤区植被恢复的效果.其公式如下[40]:

$$RR = \ln \bar{x}_t / \bar{x}_c \quad (5)$$

式中$\bar{x}_t$和$\bar{x}_c$分别为实验组和对照组的平均值.

与RR相对应的研究内方差(v)的计算方法如下[40]:

$$v = \frac{SD_t^{\,2}}{n_t \bar{x}_t^{\,2}} + \frac{SD_c^{\,2}}{n_c \bar{x}_c^{\,2}} \quad (6)$$

式中,$\bar{x}_t$和$\bar{x}_c$分别为实验组和对照组的平均值;n_t和n_c分别为实验组和对照组的样本量;SD_t和SD_c为相应的SD.

在随机效应模型中应用限制最大似然法(REML)来计算效应值.各项研究的权重按照Wang等[40]的方法计算:

$$w_i = \frac{1}{v_i + \tau^2} \quad (7)$$

式中,w_i为单个研究的权重,v_i为研究内方差,τ^2为研究间方差.

加权反应比($\overline{RR}$)的计算方法如下[40]:

$$\overline{RR} = \frac{\sum_{i=1}^{k} w_i RR_i}{\sum_{i=1}^{k} w_i} \quad (8)$$

式中,RR_i为单个研究的自然对数反应比,k为RR的数量.

($\overline{RR}$)的总体标准误差$S(\overline{RR})$计算方法如下[40]:

$$S\left(\overline{RR}\right) = \sqrt{\frac{1}{\sum_{i=1}^{k} w_i}} \quad (9)$$

式中,w_i为单个研究的权重,k为RR的数量.

($\overline{RR}$)的95%置信区间的计算公式如下[40]:

$$95\%CI = \overline{RR} \pm 1.96 \times S(\overline{RR}) \quad (10)$$

式中,CI为置信区间.

为了更直观地观察,效果值被转换为变化的百分数.$\overline{RR}$变化百分比的计算公式如下[40]:

$$\text{Effect size} = \left(e^{\overline{RR}} - 1\right) \times 100\% \quad (11)$$

式中Effect size为变化的百分数.

本研究使用失安全系数(fail-safe number)检验文献发表偏倚性.为研究煤矿区植被恢复后SOC储量是否受到海拔、气候因素和修复年限的影响,对恢复年限,土壤深度、气候因素和海拔进行了分类(表1).此外进行随机森林分析,以确定不同恢复类型中环境等因素在影响SOC对植被恢复效应的相对重要

性. 使用变量重要性指数(%IncMSE)对预测因子的重要性进行排序.

1.3 数据处理

通过 Excel 365 进行数据整理,数据均在 R 4.1.3 (https://www.r-project.org) 中进行分析. 使用了"metafor"和"randomforest"包进行 meta 分析和随机森林分析. 使用 GraphPad Prism 和 Origin 2023 进行绘图.

2 结果与分析

2.1 植被恢复对各土壤响应变量发表性偏倚检验

植被恢复与各土壤响应变量发表性偏倚检验表明(表 2 和表 3),失安全系数均大于临界值,表明所收集的数据集不存在偏倚.

2.2 植被恢复对土壤性质的影响

从数据集来看,除了 AP 和 CEC 的土壤性质指标与附近未损毁土壤性质差异不显著(P>0.05),其余土壤性质指标均与未损毁土壤之间存在明显的差异(P<0.01)[图 1(a)]. 对于土壤物理性质而言,植被恢复后的土壤 BD 要高于未损毁土壤的 8.32%,而 SM 和 clay 均低于未损毁土壤的 38.77% 和 22.44%. 土壤化学性质 TP 和 TK 相比于未损毁土壤提高了 19.85% 和 18.03%. SOC、TN 和 AN 含量均显著低于未损毁土壤的 66.07%、57.16% 和 110.92%. 植被恢复后的土壤 AN 和 SOC 是与未损毁土壤相差较大的指标. 植被恢复后的土壤与未损毁土壤性质相比后表明,受损煤矿区即使受到人为干预进行植被恢复,但仍不能恢复到未损毁生态系统中土壤的状态.

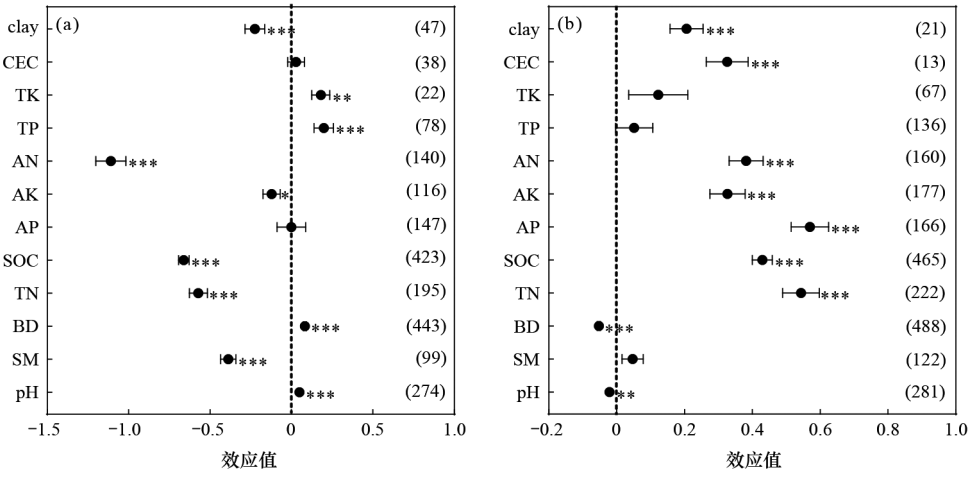
植被恢复后的土壤性质与原始土壤性质进行对比后表明,植被恢复能够有效恢复土壤的理化性质[图 1(b)]. 植被恢复后土壤的 BD 要低于未恢复或自然恢复土壤的 5.25%,孔隙度增加,土壤的通气性增强,clay 相比于未恢复或自然恢复土壤增加了 20.61%,土壤保水、保肥的能力得到增强. SM 相比于未恢复或自然恢复增加了 4.69%,但增加并不显著(P>0.05). 植被恢复后土壤的化学性质得到大幅提升. AP 相较于未恢复或自然恢复土壤增加 57.02%,是土壤性质中恢复最好的指标. TN、SOC、AK 和 AN 均得到显著提高,分别提高了 54.34%、42.96%、32.69% 和 38.17%. TK 和 TP 比未恢复土壤提高了 12.25% 和 5.19%,但无显著差异(P>0.05).

表 1 数据分类依据[1)]

Table 1 Data classification basis

项目	分类情况			
植被恢复类型	林地	农田	草地	灌木林
土壤深度/cm	0~20(表层)	20~40(中层)	>40(深层)	—
植被恢复年限/a	<5(短期恢复)	5~15(中期恢复)	15~30(长期恢复)	—
年均温/℃	<0	0~10	10~15	>15
年降水/mm	<500	500~800	>800	—
海拔/m	<500	500~2 000	2 000~3 500	>3 500

1)"—"表示本研究中没有相关分类变量;括号内数值表示本研究中相关分类变量范围



(a)植被恢复后土壤性质与未损毁土壤性质的比较;(b)植被恢复后土壤性质与未恢复或自然恢复土壤性质的比较;*表示 P<0.05,**表示 P<0.01,***表示 P<0.001;误差线表示 95% 的置信区间;水平虚线表示无效线,误差线与无效线有交点时差异不显著(P>0.05);括号中数值表示研究变量的样本量

图 1 植被恢复对土壤性质的影响

Fig. 1 Effect of vegetation restoration on soil properties

表2　各响应变量及其失安全系数(与未损毁土壤比较)[1)]

Table 2　Each response variable and its group fail-safe number (comparison with undamaged soil)

响应变量	*n*	临界值	失安全系数
pH	274	1 380	327 765
SOM	160	810	7 655 616
TP	78	400	563
TN	195	985	2 736 101
TK	22	120	12 238
AN	140	710	2 573 869
AP	147	745	166 172
AK	116	590	43 239
CEC	38	200	7 722
SM	99	505	290 684
BD	443	2 225	109 636
SOC	423	2 125	22 872 175
clay	47	245	3 092

1)*n*表示各个响应变量的数量,失安全系数大于临界值则表明数据不存在偏倚,下同

表3　各响应变量及其失安全系数(与未恢复/自然恢复土壤的比较)

Table 3　Each response variable and its group fail-safe number (comparison with uncultivated/natural recovery soil)

响应变量	*n*	临界值	失安全系数
pH	281	1 415	199 825
SOM	183	925	7 655 616
TP	136	690	563
TN	222	1 120	2 587 414
TK	67	345	12 238
AN	160	810	2 511 318
AP	166	840	184 854
AK	177	895	57 944
CEC	13	75	6 663
SM	122	620	262 897
BD	488	2 450	161 467
SOC	465	2 335	22 415 170
clay	21	115	1 344
SOC储量	463	2 325	959 668 092

2.3　不同植被恢复类型对土壤性质的影响

当考虑到植被恢复类型对土壤性质的差异时,将植被恢复后的土壤性质与未恢复或自然恢复土壤性质进行对比后发现(图2),植被修复后SOC均显著提高($P<0.01$),尤其是农田类型下SOC相较于未恢复或自然恢复土壤增加了71.61%,其次为林地增加了44.56%,草地和灌木林也分别增加了36.44%和28.78%. 林地相较于草地能够多增加8.12%的SOC. 有利于SOC固存的植被恢复类型为:农田>林地>草地>灌木林. TN和AN提升最显著的为农田类型,分别提高了70.12%和75.96%. AP、AK和AN这类速效养分均提升明显的是林地,并且林地的CEC和clay也显著增加. 农田对BD的改善效果是4种类型中最好的,其次为林地. 相比于未恢复或自然恢复土壤,林地类型能够使土壤水分增加24.1%($P<0.01$). 因此综合来看,林地是对土壤物理和化学指标改善最多的植被恢复类型,对土壤的物理结构和营养物质的恢复较为均衡.

2.4　植被恢复对SOC储量的影响

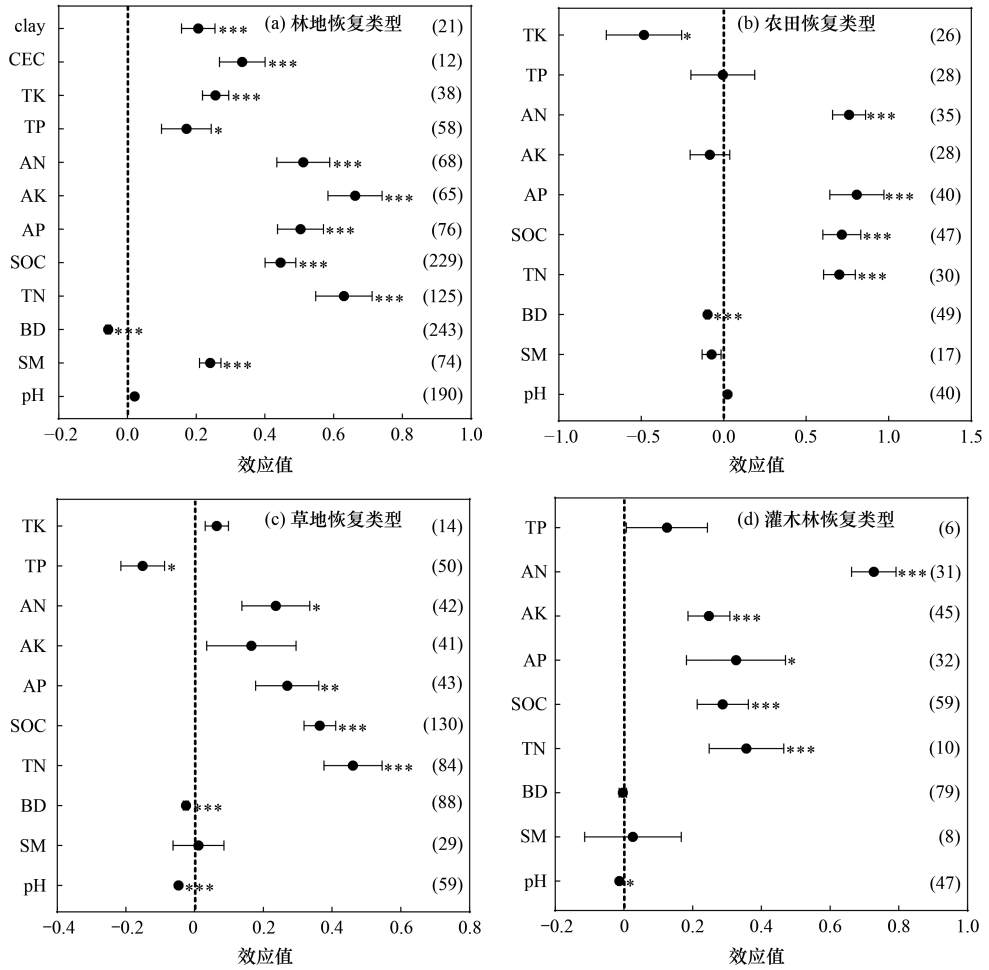
SOC储量会受到土壤深度的影响. 根据数据集,将土壤深度划分为3类:表层土壤SOC储量(0~20 cm);中层SOC储量(20~40 cm)和深层SOC储量(>40 cm). 结果表明植被恢复是恢复受损煤矿区土SOC储量的有效措施. 植被恢复后SOC储量显著增加,相较于未恢复或自然恢复下SOC储量提升了39.02%. 在不同深度下SOC储量均提升显著,但不同深度SOC储量增加趋势会随着土壤深度增加而减少. 植被恢复使土壤表层的SOC储量提高了41.77%,中层提高了30.19%,而深层SOC储量只增加了23.35%,低于表层18.42%.

将数据集中的不同植被恢复类型下SOC储量的变化趋势进行分析(图3). 相比于未恢复或自然恢复下的SOC储量,农田类型下的SOC储量增加了60.93%,相比于其他3种建植类型,农田类型的SOC储量增加最多. 4种不同类型SOC储量增加排序为:农田(60.93%)> 林地(40.99%)>草地(33.61%)>灌木林(26.29%). 草地和灌木能显著增加深层的SOC储量($P<0.05$). 而林地和农田植被恢复后和对深层的SOC储量的影响较小,与未恢复或自然恢复的SOC储量之间无差异. 4种类型的植被恢复对表层SOC储量均得到显著增加,农田对于表层SOC储量的增加效果最为明显,林地和草地类型下表层SOC储量的增加趋势接近,但林地要略优于草地. 林地、灌木林和草地均显著提升了中层的SOC储量,但增加趋势要低于表层的SOC储量.

2.5　植被恢复下影响SOC储量的因素

为进一步探究植被恢复后影响SOC储量的因素,将对不同条件下SOC储量变化趋势进行分析. 对恢复年份、年均温、年降水量和海拔进行了分类(表1).

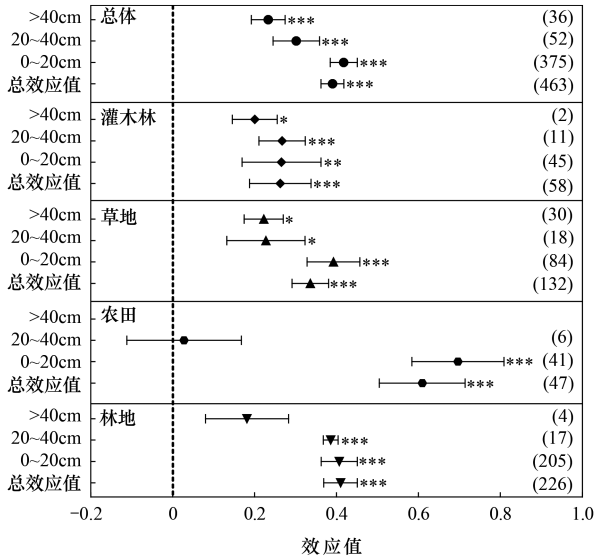
不同恢复年份对于SOC储量影响的整体表现为:长期恢复>中期恢复>短期恢复[图4(a)]. 在长期恢复下可以恢复55.99%的SOC储量,相比于短期恢复的SOC储量增加了26.23%. 林地和草地类型下的SOC储量在一定时间内会随着恢复年份的增加而增加. 灌木林在短期恢复和中期恢复下的SOC储量基本一致,且恢复后与未恢复或自然恢复相比并无差异($P>0.05$),但是在长期恢复下SOC储量得到显著提升($P<0.01$). 农田类型下的SOC储量呈现一个高-



*表示 $P < 0.05$，**表示 $P < 0.01$，***表示 $P < 0.001$；误差线表示 95% 的置信区间；水平虚线表示无效线，误差线与无效线有交点时差异不显著（$P > 0.05$）；括号中数值表示研究变量的样本量

图 2 植被恢复类型对土壤性质的影响（与未恢复或自然恢复土壤性质比较）

Fig. 2 Effect of vegetation restoration type on soil properties (compared to unrestored or naturally restored soil properties)



*表示 $P<0.05$，**表示 $P<0.01$，***表示 $P<0.001$；误差线表示 95% 的置信区间；水平虚线表示无效线，误差线与无效线有交点时差异不显著（$P > 0.05$）；括号中数值表示研究变量的样本量

图 3 植被恢复类型和土壤深度对 SOC 储量的影响

Fig. 3 Effect of vegetation restoration type and soil depth on SOC storage

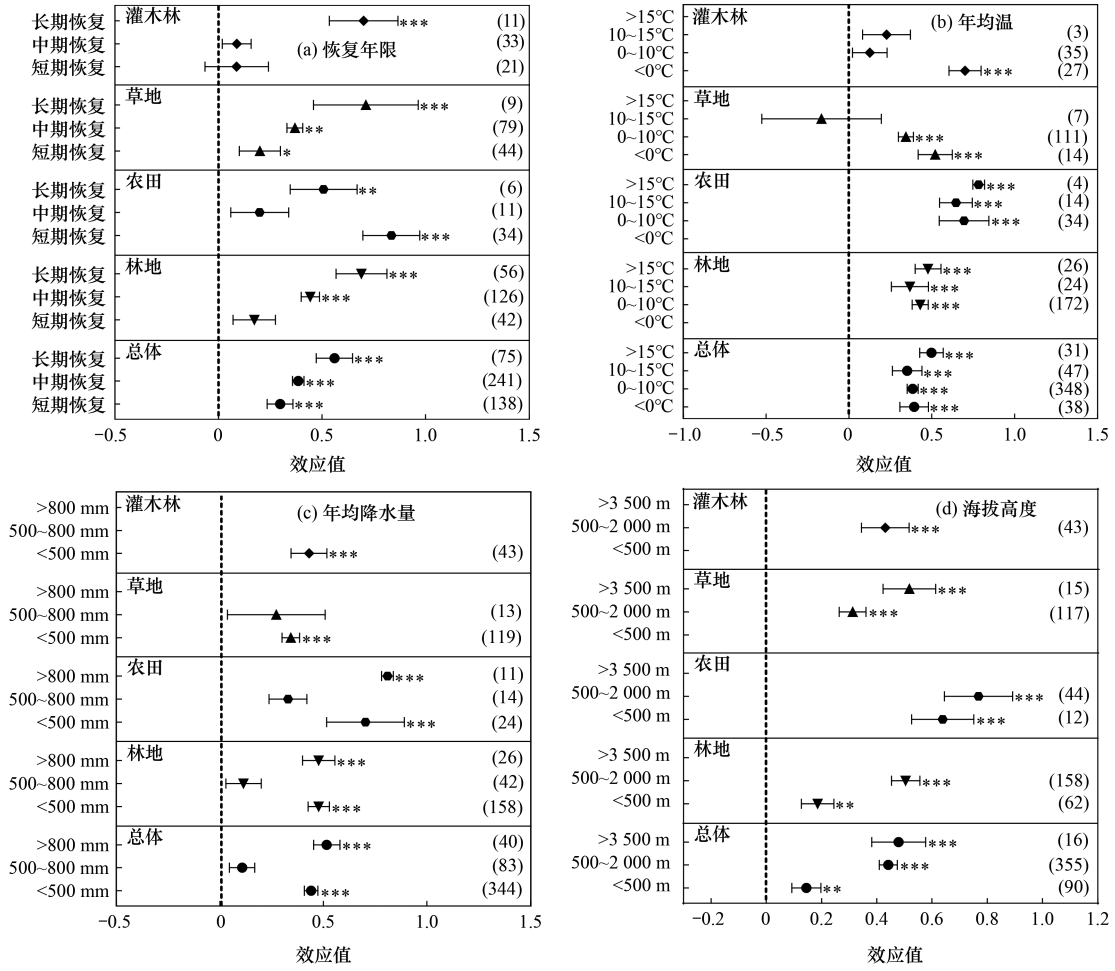
低-中的趋势，在短期恢复下达到最高，为 83.47%，但在中期恢复下 SOC 储量降低，在长期恢复下 SOC 储量得到恢复，相比于中期恢复增加了 30.84%.

在>15℃时，SOC 储量的提升幅度最大[图 4(b)]. 林地和农田的 SOC 储量的增加趋势均表现出>(15℃)>(0~10℃)>(10~15℃)，草地和灌木林的 SOC 储量增加趋势在年均温<0℃时要高于 0~10℃，分别高出 17.66% 和 57.49%. 因此，农田和林地恢复类型在年均温>15℃的环境条件下固碳效应最好，草地和灌木林恢复类型在年均温<0℃的环境条件下更有利于 SOC 的积累.

年降水量在>800 mm 或<500 mm 时，更有利于 SOC 的积累[图 4(c)]. 年均降水在>800 mm 时 SOC 储量要高于<500 mm 时的 7.56%. 林地、农田和草地类型中年均降水量<500 mm 的 SOC 储量均高于 500~800 mm，分别增加了 32.29%、46.73% 和 7.01%. 农田和林地在年降水量>800 mm 时 SOC 储量均高于年降水量<500 mm，因此农田和林地类型在降水量>800

mm时更有利于SOC库的积累.

在海拔分类变量中有海拔越高,其增加的SOC储量越高的趋势[图4(d)]. 这一趋势可能与年均温度具有一定的关系. 在数据集中显示,高海拔地区的年均温通常在0℃以下. 在>3 500 m的海拔时,相比于未恢复和自然恢复,有机碳储量增加了47.92%. 在500~2 000 m时,SOC储量增加了44.16%.



*表示P<0.05,**表示P<0.01,***表示P<0.001;误差线表示95%的置信区间;水平虚线表示无效线,误差线与无效线有交点时差异不显著(P>0.05);括号中数值表示研究变量的样本量

图4　影响SOC储量的因素

Fig. 4　Factors affecting SOC storage

2.6　影响SOC储量的关键因素

通过随机森林模型来分析影响SOC含量和SOC储量对植被恢复响应的主要因素. SOC含量的随机森林模型的R^2为77.94, P<0.01;SOC储量的随机森林模型的R^2为67.06, P<0.01;RR-SOC(SOC含量的自然对数反应比)的随机森林模型的R^2为82.82, P<0.01;RR-SOC储量(SOC储量的自然对数反应比)的随机森林模型的R^2为82.01, P<0.01.

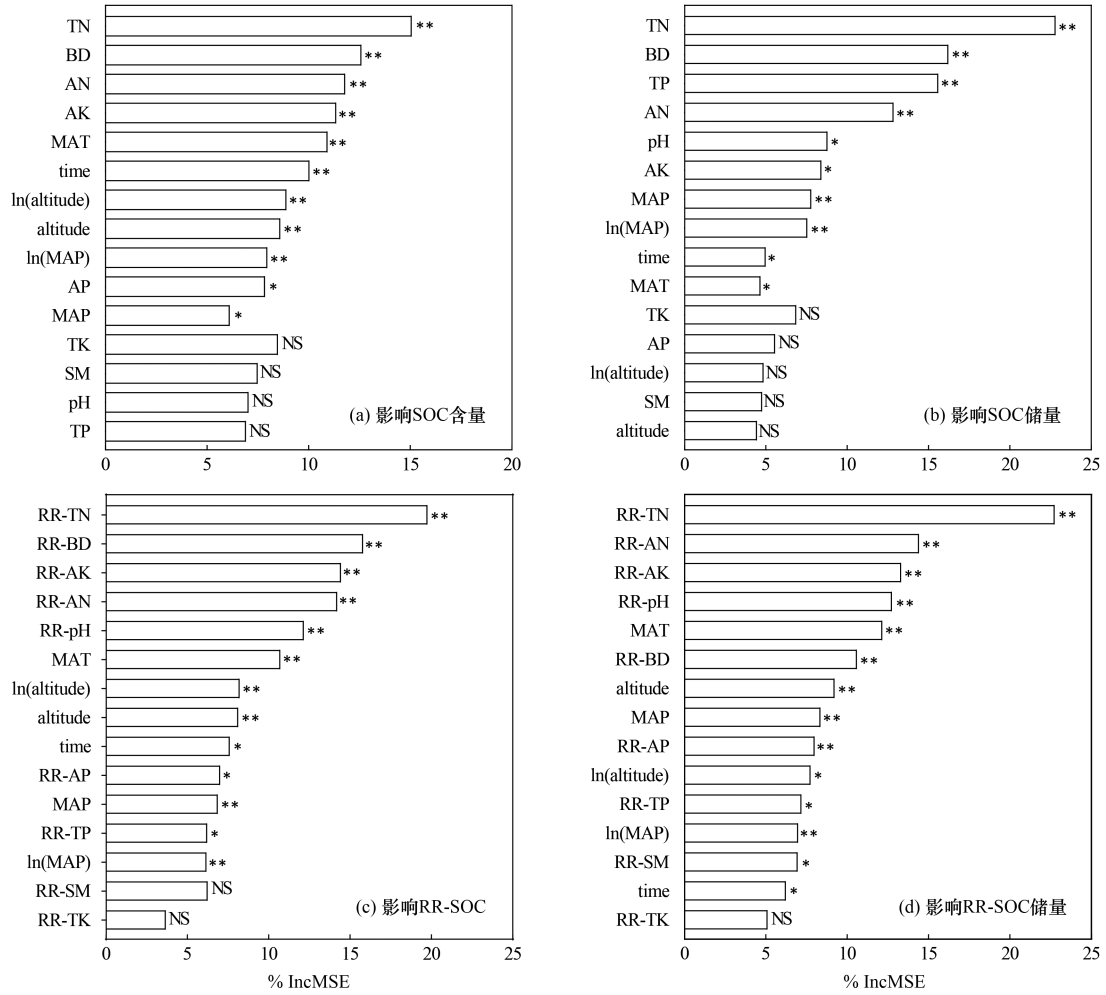
随机森林分析表明(图5),影响SOC含量的主要因素有:TN、BD、AN、AK、MAT(年均温)、time(恢复时间)、ln(altitude)(海拔的对数值)、altitude(海拔)、ln(MAP)、AP和MAP(年均降水),其中除了AP和MAP的显著性为P<0.05,其余均达到P<0.01水平. 影响SOC储量的主要因素有TN、BD、TP、AN、pH、AK、MAP、ln(MAP)、MAT和time. 其中pH、AK、MAT和time在0.05水平上显著. 影响RR-SOC和RR-SOC储量的主要因素有RR-TN(TN的自然对数反应比)、RR-AN(AN的自然对数反应比)、RR-AK(AK的自然对数反应比)、RR-BD(BD的自然对数反应比)和MAT.

综合来看,影响受损煤矿区土壤固碳能力的主要因素为TN、BD、AN和AK.

3　讨论

3.1　植被恢复对土壤性质的影响

受损煤矿区进行植被恢复后,土壤的理化性质显著提升,但是还未达到天然植被或未损毁土壤理化性质的标准. 这种差异可能是因为植被恢复后的



*表示 $P<0.05$,**表示 $P<0.01$;% IncMSE 表示相对重要性值;NS 表示不显著;RR-表示自然对数反应比

图 5 影响 SOC 含量和 SOC 储量的主要因素分析

Fig. 5 Analysis of the main factors affecting SOC content and SOC storage

生态系统过程(植物凋落、微生物生长和腐殖质形成等)以及环境因素引起的SOC变化要远小于采矿活动对SOC损失的影响. 一般来说,土壤有机质含量高、结构性好和更适宜植物生长的土壤的容重小[41]. 本研究结果显示,植被恢复后土壤容重显著降低,这主要是因为重建植物的根系生长和枯落物分解改善了土壤孔隙结构,并且随着SOC含量的增加,土壤颗粒的胶结状况改变,从而导致土壤容重的降低[42]. CEC可以理解为土壤的保肥性,植被恢复后与天然或未损毁土壤对比时无明显差异,这是由于土壤容重降低和土壤黏粒含量得到增加,土壤保水和保肥的能力得到增强[43]. 植被恢复后,土壤的AP相较于原始或自然恢复土壤提升最大,与天然草地的含量差异并不显著. 于学胜等[44]和李鹏飞等[45]的研究表明在短期煤矿区植被恢复下AP含量会提高至原地貌的水平,刘军等[46]的研究认为土壤AP含量随着土壤恢复年限增加而升高. 植被恢复后的AN虽然得到了一定的增加,但是与自然或未损毁的土壤性质相比,差距仍然较大. 可能存在两个原因,一是因为重新建植的植被主要是吸收土壤中的大量养分来维持自身生长发育以及构成活的生命有机体[47],而植物所吸收的主要是来自于土壤中的AN,且归还给土壤的枯枝落叶和营养物质较少[48,49]. 二是因为土壤氮素主要取决于生物量的积累和土壤有机质分解的强度[50],而受损煤矿区植被恢复与天然或未损毁土壤相比生物量的积累和有机质的分解强度差距仍然较大,因此导致AN含量与天然或未损毁的差距较大. TP含量与未恢复、未损毁对比存在差异. 植被恢复后的TP含量相比于未恢复有所增加,但在与未损毁土壤相比时,要高于未损毁土壤中的含量. 从数据集发现,未损毁土壤的TP含量与未恢复土壤的TP平均值相差仅约0.211 8 $g \cdot kg^{-1}$,并且固定在母质中的磷素不易释放,导致未损毁土壤中的TP含量存在偏低的情况[51]. 植被恢复后土壤中的AK含量提升显著,是由于AK在母质释放与植物枯落物和有机质返还的共同作用下含量不断升高.

不同植被恢复类型下土壤理化性质存在差异. 本研究表明，林地和灌木林的恢复类型下的速效的N、P、K均得到显著提高. 农田类型对于氮素的提升效果最为显著. 这是由于农田管理下，会对土壤中施用缓释氮、尿素等氮肥，这就导致了受损煤矿区土壤中AN含量提升明显. 灌木林下的AN的提升仅次于农田，要高于林地和草地. 这是因为大部分建植的灌木为固氮植物（沙棘、刺槐和紫穗槐等）[52,53]，以上植物的根系固着的根瘤菌可以吸收大气中的氮，进而转化成能被植物吸收的氮素[54]，且硝化细菌的含量也较多[55]，从而使灌木林的土壤中AN含量增加较多.

3.2　植被恢复对SOC储量的影响

受损煤矿区由于表土流失，团聚体破坏和土壤侵蚀等，表层的土壤有机碳的损失率约高达69.8%[21]. 与原始或自然恢复相比，植被恢复可显著提高受损煤矿区土壤的SOC含量和SOC储量. 这也充分表明在矿区采矿活动时排放或流失的碳能通过合理的植被恢复措施而被重新吸收到土壤中，使土壤中的碳汇量得到一定程度的恢复. 植被恢复后会显著提高SOC和SOC储量可以认为是SOC的输入和输出的通量大小不同所导致. 植被恢复后地上植被凋落物、根系残留物和分泌物以及其细根周转所产生的碎屑等[56]都成为了土壤中碳的输入源，增加了SOC的输入通量. 煤矿区开采时，会造成地表损坏，土壤的团聚体等物理结构受到破坏，土壤紧实、保水和透气性非常差，从而加剧土壤侵蚀，并且碳周转基本处于平衡状态[57]，而植被恢复后有效地恢复了土壤的物理性质，例如降低BD，增加clay等，因此减少了土壤侵蚀和机械扰动等降低土壤碳矿化率，避免了碳流失，减少了碳输出通量[58]. 生物的差异也是植被恢复后SOC储量增加的原因. 植被恢复后，土壤微生物能够通过胞外酶分泌来调控土壤中的部分酶活性，例如过氧化氢酶（catalase，CAT）等的酶活性能够得到大幅度提高，表明植被恢复有利于SOC加速积累. 因此微生物之间的差异可以通过调控酶活性进而反馈调控土壤碳循环的过程[59]. 微生物群落结构之间的差异也能够调整SOC的固存能力. 植被恢复后自养微生物物种多样性增加，真菌（子囊菌门等）也会得到增加，而自养微生物以及子囊菌门等能够促进SOC的稳定，对土壤SOC的固定和积累具有正向作用，并且植被恢复后土壤中微生物CO_2同化功能基因受到影响，能够提升表层微生物的碳同化能力[59,60]. 因此，植被恢复后具有更高的碳固持效应，进而有利于碳积累.

3.3　植被恢复后SOC储量的影响因素

3.3.1　不同植被恢复类型对SOC储量的影响

不同的植被能够通过影响植被的生产力和微生物群落结构等，进而能够改变土壤碳的输入量. 4种不同植被恢复类型下，农田提升的SOC储量最多，与Sperow等[61]对美国中东部7个州的碳固存能力研究结果一致. 可能是由于母质熟化时能够使土壤中大于0.25 mm的大团聚体含量增加，特别是大团聚体内的颗粒有机质含量增加[62]，而农田类型对土壤熟化过程中的贡献相较于其他3种类型最大，因此有机碳含量最高，土壤的固碳功能最好[63,64]. 农田类型下还能够通过田间管理措施，例如耕作、施肥和农作物秸秆还田等方式来补充土壤中的养分含量[65]. 以上田间管理措施还能够通过改变SOM在不同粒径团聚体中的转运效率[63]，对土壤的次级团聚化过程产生影响，从而促进了土壤团聚体周转以及其内部保护的土壤SOM的稳定化过程[63~65]，进而增加SOC储量. 上述结果表明农田类型下土壤TN和AN提升最显著，而土壤N的富集也能正向促进土壤SOC的积累. 农田由于在松耕、翻耕等措施下土壤BD也得到有效改善，有利于SOC的储存. 以上因素最终使耕地SOC储量高于其他3种植被恢复类型. 一般认为受人类活动干扰较少的草地和森林生态系统SOC提升幅度更大，这与本研究结果存在差异，是因为煤矿区植被恢复与退耕还林还草并不相同. 受损煤矿区受到高度干扰，相较于其他环境下进行植被恢复的环境条件更为恶劣. 如要恢复为农田，使农作物正常生长，就需要在初期中施入大量的有机肥等肥料，且农田恢复类型需要每年种植作物时都需要重新进行施肥，而草地和林地可能并不是每年都需要进行施肥，因此笔者认为在煤矿区植被恢复条件下，农田类型下的SOC的提升幅度要高于草地和森林生态系统的SOC. 林地，草地和灌木的SOC储量表现为：林地>草地>灌木林，这与上述数据所反映的SOC含量的增加趋势一致. 对此，可能是由于SOC主要取决于植被每年的归还量和分解速率，而林地相比于草地和灌木有更多的凋落物，以上凋落物会腐解形成腐殖质而增加了土壤碳源的输入[66,67]. 凋落物在矿区植被恢复中是土壤最重要的养分输入途径[68]，通过凋落物分解后腐殖质的增加，丰富了微生物的食物源，为微生物群落生长、增殖提供额外的养分. 功能微生物类群数量增加，影响了土壤碳循环过程[69]，进而调控了碳循环相关微生物群落结构和功能[70,71]. 总体来说，在不考虑其他因素时，林地SOC储量要高于草地和灌木.

Zhang等[21]、李俊超等[33]和Shrestha等[34]的研究

结果表明,草地比林地更有利于土壤有机碳的积累,且草地要比林地有机碳含量高99%[34],与本文的结论存在差异. 这种差异发生的原因可能是由于在不同植被类型下土壤SOM数量和形态的变化不同,从而导致土壤有机碳存储能力存在差异[72]. 林地类型主要依靠凋落物向土壤中补充外源碳[73],而草地主要碳源的输入是通过植物地下根系的分解[74,75]. 不同类型下SOC积累的差异原因还与当地气候条件相关. 在较为干旱的矿区,草地恢复模式较林地更有利于土壤有机碳累积[76,77]. 因为在土壤水分的限制条件下更适合草本植物的生长发育. 草地类型下植物主要依赖其发达的地下细根网络来在根际区域固定大量的SOC. 草地类型下植物的地下根系网络发达且密集,在干旱条件下,会导致土壤中的水分和气体的交换量减少,降低SOC的周转率[75],从而有利于SOC的积累. 以上草本植物的细根在死亡后,经过微生物的转化也会向土壤提供大量外源碳[68]. 因此干旱条件下草地的SOC储量会高于林地. 对于降水条件较好的矿区,林地恢复模式较草地有利于SOC累积[78]. 这是由于降水量是土壤水分的主要来源,充足的土壤水分更适合乔木生长[79]. 土壤水分能够调控地下的生物化学循环,也会影响植被的净初级生产力,土壤水分对微生物生长具有限制作用. 充足的土壤水分条件下,能够促进功能微生物群的繁殖和生长,林地类型下的微生物功能类群比草地更加丰富,而林地相较于草地能够产生较多的地上生物量,从而促进凋落物的腐解作用[80],形成腐殖质,进而影响SOC的输入[81]. 土壤水分充足条件下,土壤通气性、土壤呼吸以及底物扩散等也会促进土壤微生物量碳的积累[82],因此在年降水量较多的受损煤矿区,林地类型下比草地类型更有利于SOC储量的积累.

3.3.2 恢复年份对SOC储量的影响

植被恢复年限对植被恢复下SOC储量影响显著. 数据集分析结果表明受损煤矿区植被恢复的SOC储量会在一定时间内随着恢复年限的增加而逐渐增加. 这与Ahirwal等[8]、Zhang等[21]和Tripathi等[83]的研究表明植被恢复下煤矿区SOC含量以及储量会随着修复年限增加而增加,并且SOC在很长一段时间内会显著增加的结论一致. 林地、草地和灌木的SOC储量均表现出会随着植被恢复年限的增加而增加的趋势. 但在农田类型下,SOC储量随着恢复年份的增加,其增加趋势表现为U型(高-低-中),这与丁青坡等[84]的结论相似,认为SOC储量在增加到一定时期会有下降的趋势. 农田类型下短期恢复下SOC储量增加较多,这可能是由于煤矿区复垦时,由于煤矸石填充的矿坑或者是煤矸石山通常具有较差的化学、物理和生物特性,如营养水平低、土壤结构差和微生物活性低等,因此需要在刚开始复垦时大量投入有机肥等肥料,导致在短时间内明显改善了土壤质量[85]. 在中期恢复时SOC储量减小,这可能是由于中期在农田正常生产过程中肥料的施用量明显减少,一些农业管理措施也会加剧土壤侵蚀过程,土壤的碳矿化速率增加[64,85],且作物收获后会损失一部分碳源,导致SOC储量减小[86]. 在长期恢复下SOC储量又得到增加但并不能够恢复到短期的水平. 这可能是长期和短期的耕作模式不同所导致,耕作时间较长,其发展的耕作管理措施更精细化,且一些秸秆还田等农田管理措施会使SOC缓慢积累,因此SOC储量相比于中期又会有一个上升的趋势. 上述的结果能够反映一个现象,虽然在受损煤矿区地进行植被恢复能够显著提升SOC,但是仍然不能恢复到原地貌水平. 因此受损的SOC储量并不能够随着时间的增加而一直增长,当生态系统恢复到一定阶段时,又会建立新的碳库平衡状态,这与Anderson等[76]、Shrestha等[87]和Šourková等[88]的研究结果相似,这也与原野等[9]和Ussiri等[89]的观点一致.

3.3.3 气候及海拔条件对SOC储量的影响

煤矿区的气候条件也会显著影响植被恢复的土壤的固碳能力. 结果表明,草地和灌木林在MAT 0℃以下时,对于SOC储量的提升较明显. 而在林地和农田类型下,MAT在>15℃的情况下对有机碳储量的影响是较大的. 草地在MAP<500 mm时对SOC积累影响较大,林地和农田在MAP>800 mm时有利于SOC储量的积累. 在收集的数据中高海拔矿区(海拔>3 500 m)只有草地类型,在高海拔地区MAT基本为0℃以下. 因此受损煤矿区在低年均温<0℃,年均降水量<500 mm和高海拔(>3 500 m)等恶劣的环境下,草地是固碳能力最好的植被恢复类型. 受损煤矿区低年均温<0℃,年均降水量<500 mm时,草地和灌木的植被类型能够更好地积累SOC,而在年均降水量>800 mm,年均温>15℃的环境条件下,林地和农田能够有最大的固碳效应. 这与之前提到对于降水条件较好的矿区,林地恢复模式较草地更有利于土壤有机碳累积[78],在较为干旱的矿区,草地恢复模式较林地更有利于SOC累积相符合[76,77]. 不同气候条件下的林地恢复和草地恢复对SOC储量的固定和积累不同. 温度能够调节微生物呼吸及凋落物分解速率[31],降水则通过影响着植物的生理过程以及影响土壤水分和肥力状况来调控土壤的气体交换、微生物养分供应与温度,进而影响土壤中碳的矿化速率[32],影响SOC的积累. 相比林地和农田,草地的SOC储量对MAT的变化更敏感. 具体而言,草地恢复对SOC储量

的正向效应随MAT升高而降低，这与Yang等[90]和Tian等[91]的研究结果一致. MAT的升高会限制植物的生长发育[71]，加快微生物的呼吸速率[72]，从而提高土壤碳的矿化速率. 此外，微生物残体也是SOC的主要来源之一，草地在高MAT下的土壤微生物残体积累量显著小于低MAT累积量[92,93]，造成SOC输入量减少. 林地的固碳效应对于气候的适应能力较强，在MAP<500 mm或者MAP>800 mm，MAT>15℃或MAT在0~10℃的气候条件下SOC储量仍然能够显著提高，但在MAP>800 mm和MAT>15℃的矿区条件下更有利于SOC储量的积累，这与Yang等[90]和Laganière等[94]的研究结果一致. 其最大的原因可能是林地植被具有较深的根系以及茂密的林冠层，在区域内形成小气候，小气候可减少干旱和高温对林地固碳的负面影响[21,72]. 因此，根据受损煤矿区环境条件选择合适的植被类型更有利于SOC的积累.

3.3.4　不同土壤深度对SOC储量的影响

土壤有机碳储量受到土壤深度的影响. 对不同深度的SOC储量进行分析表明，植被恢复后对于SOC储量的恢复效果显著，且地表(0~20 cm)相较于中层(20~40 cm)和深层(>40 cm)的SOC储量增加趋势更为明显. 也就是说，植被恢复后的SOC储量主要垂直分布于0~20 cm的土层，且SOC储量随着深度的增加呈减少趋势[80]. 不同植被模式下深层SOC含量变化较小，这可能是因为细根主要分布在0~40 cm(占1 m区间的72%~94%)[72]，深层土壤下细根形式的残渣输入量减少而导致深层SOC储量增加趋势减小. 地表枯落物是SOC输入的重要来源，经过人工复垦建植以后，表层土壤的通气性、结构性要优于深层土壤，这也更有利于SOC的积累. 深层土壤相比于表层土壤的植物根系分布稀疏，土壤通气性明显下降，碳循环(碳降解、碳固定和甲烷代谢)等功能微生物类群的丰度要低于表层[51]，导致碳循环较慢，并且SOM等养分经淋溶作用向下迁移时随土壤深度的增加而减少，进而深层SOC储量要低于表层SOC输入量. 不同植被恢复类型对SOC储量也呈现随着深度的增加而减少的趋势. 农田，林地和草地均显著增加了表层的SOC储量，表层SOC储量的增加趋势与总体一致. 草地相比于林地能够增加深层SOC储量，这可能是由于草地有发达的细根网络，细根在深层能够分解提供碳源，而林地大部分为粗根，粗根多年都不会死亡和分解，根系产量和周转的重要性较小[21].

3.3.5　影响SOC含量和SOC储量的主要因素

通过随机森林对其重要性进行分析时表明，影响SOC和SOC储量主要的主导因素为土壤的BD、TN、AK和AN. 其中土壤氮素对于SOC和SOC储量呈显著的正相关关系[73]. 一般而言，较高的土壤氮含量可以促进植物的生长以及根系和微生物的活性，从而影响植物的生长速率和系统的生产力而影响土壤呼吸，进而增加生物代谢产物. 同时土壤中的AN能够直接调控植物生理过程，影响土壤有机质的分解，从而提高SOC. 而且有机质和AN之间也存在极强的线性相关关系，随着有机质水平的提升，土壤中的碱解氮含量也随之上升. 土壤容重则也可以通过影响土壤孔隙度、湿度、肥力和根系生长而影响土壤呼吸，从而增强土壤的碳汇能力. 容重与土壤的固碳能力呈现负相关关系[75,76]. 植被恢复会使容重显著降低，土壤中的团聚体含量和稳定性就会随之增加，土壤孔隙结构和水分通气条件得到改善，并且能够显著提升土壤中碳循环相关的酶活性[56]，从而使土壤中碳汇能力增强，进而增加SOC的储量. 对于煤矿区植被恢复后土壤中AK等速效养分与SOC存在的相关关系是通过植物来进行调控的，以上元素相应的土壤微生物群落以及酶活性均参与这个复杂的过程. 因此今后对于煤矿区植被恢复后，土壤中的速效养分与SOC之间的相关关系还需进一步进行实验研究.

4　结论

(1)受损煤矿区通过植被恢复能够显著改善土壤的理化性质，但未能恢复到未损毁土壤的标准. 其中AN和SOC含量仍然与未损毁土壤标准差距较大，今后需要关注受损煤矿区氮库和碳库的积累. 植被恢复后SOC储量相较于未恢复或自然恢复下土壤的SOC储量提升了39.02%. 植被恢复后的SOC储量的增加趋势会随着土壤深度的增加而降低. 4种类型的植被恢复对表层(0~20 cm)SOC储量均得到显著增加，草地和灌木能显著增加深层(>40 cm)的SOC储量，而林地和农田类型下深层的SOC储量与原始或自然恢复后的SOC储量无显著差异.

(2)不考虑环境因素时，利于煤矿区SOC储量积累的植被恢复类型排序为农田>林地>草地>灌木林. 当考虑环境因素时，受损煤矿区在年均温<0℃和年降水<500 mm的环境下，固碳效应较高的植被恢复类型为草地和灌木林，而在年均温>15℃和年降水量>800 mm的环境下，林地和农田恢复类型能够更好地增加SOC储量. TN、BD、AN和AK是影响土壤固碳能力的主要因素.

(3)在煤矿区受损环境内进行植被恢复是有效提升土壤有机碳汇量和改善土壤结构的策略，但是具体的植被恢复策略应根据气候条件选择合适的植被类型，以达到最大生态效益.

参考文献：

[1] Shen C C, Ma D W, Sun R B, *et al*. Long-term stacking coal promoted soil bacterial richness associated with increased soil organic matter in coal yards of power plants[J]. Journal of Soils and Sediments, 2019, **19**(10): 3442-3452.

[2] 李健明, 蒋福祯, 卢素锦, 等. 基于Cite Space可视化知识图谱矿区修复研究态势分析[J]. 青海农林科技, 2022, (4): 32-39.
Li J M, Jiang F Z, Lu S J, *et al*. Situation analysis of mining area restoration research based on cite space visual knowledge map[J]. Science and Technology of Qinghai Agriculture and Forestry, 2022, (4): 32-39.

[3] Ahirwal J, Maiti S K. Assessment of soil properties of different land uses generated due to surface coal mining activities in tropical Sal (*Shorea robusta*) forest, India [J]. CATENA, 2016, **140**: 155-163.

[4] 陈浮, 朱燕峰, 马静, 等. 黄土高原矿区生态修复固碳机制与增汇潜力及调控[J]. 煤炭科学技术, 2023, **51**(1): 502-513.
Chen F, Zhu Y F, Ma J, *et al*. Mechanism, potential and regulation of carbon sequestration and sink enhancement in ecological restoration of mining areas in the Loess Plateau[J]. Coal Science and Technology, 2023, **51**(1): 502-513.

[5] Kumar S, Maiti S K, Chaudhuri S. Soil development in 2-21 years old coalmine reclaimed spoil with trees: a case study from Sonepur-Bazari opencast project, Raniganj Coalfield, India[J]. Ecological Engineering, 2015, **84**: 311-324.

[6] Brooks J P, Adeli A, Smith R K, *et al*. Bacterial community structure recovery in reclaimed coal mined soil under two vegetative regimes[J]. Journal of Environmental Quality, 2019, **48**(4): 1029-1037.

[7] Barliza J C, Peláez J D L, Campo J. Recovery of biogeochemical processes in restored tropical dry forest on a coal mine spoil in La Guajira, Colombia[J]. Land Degradation & Development, 2018, **29**(9): 3174-3183.

[8] Ahirwal J, Kumar A, Maiti S K. Effect of fast-growing trees on soil properties and carbon storage in an afforested coal mine land (India) [J]. Minerals, 2020, **10** (10), doi: 10.3390/min10100840.

[9] 原野, 赵中秋, 白中科, 等. 露天煤矿复垦生态系统碳库研究进展[J]. 生态环境学报, 2016, **25**(5): 903-910.
Yuan Y, Zhao Z Q, Bai Z k, *et al*. Research advances in carbon sequestration of reclaimed ecosystems in opencast coal mining area [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2016, **25** (5): 903-910.

[10] Frouz J, Kalcík J. Accumulation of soil organic carbon in relation to other soil characteristic during spontaneous succession in non reclaimed colliery spoil heaps after brown coal mining near Sokolov (The Czech Republic)[J]. Ekológia Bratislava, 2006, **25**(4): 388-397.

[11] Huang C B, Zeng Y X, Wang L C, *et al*. Responses of soil nutrients to vegetation restoration in China [J]. Regional Environmental Change, 2020, **20**(3), doi: 10.1007/s10113-020-01679-6.

[12] Fettweis U, Bens O, Hüttl R F. Accumulation and properties of soil organic carbon at reclaimed sites in the Lusatian lignite mining district afforested with *Pinus* sp. [J]. Geoderma, 2005, **129**(1-2): 81-91.

[13] Li L, Li T L, Meng H S, *et al*. Effects of seven-year fertilization reclamation on bacterial community in a coal mining subsidence area in Shanxi, China[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2021, **18** (23), doi: 10.3390/ijerph182312504.

[14] Li Y Y, Wen H Y, Chen L Q, *et al*. Succession of bacterial community structure and diversity in soil along a chronosequence of reclamation and re-vegetation on coal mine spoils in China[J]. PLoS One, 2014, **9**(12), doi: 10.1371/journal.pone.0115024.

[15] Jobbágy E G, Jackson R B. The vertical distribution of soil organic carbon and its relation to climate and vegetation[J]. Ecological Applications, 2000, **10**(2): 423-436.

[16] Lehmann J, Hansel C M, Kaiser C, *et al*. Persistence of soil organic carbon caused by functional complexity [J]. Nature Geoscience, 2020, **13**(8): 529-534.

[17] Davidson E A, Janssens I A. Temperature sensitivity of soil carbon decomposition and feedbacks to climate change[J]. Nature, 2006, **440**(7081): 165-173.

[18] Ahirwal J, Kumar A, Pietrzykowski M, *et al*. Reclamation of coal mine spoil and its effect on Technosol quality and carbon sequestration: a case study from India[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2018, **25**(28): 27992-28003.

[19] Akala V A, Lal R. Soil organic carbon pools and sequestration rates in reclaimed minesoils in Ohio[J]. Journal of Environmental Quality, 2001, **30**(6): 2098-2104.

[20] Ghose M. Management of topsoil for geo-environmental reclamation of coal mining areas [J]. Environmental Geology, 2001, **40**(11): 1405-1410.

[21] Zhang P P, Zhang Y L, Jia J C, *et al*. Revegetation pattern affecting accumulation of organic carbon and total nitrogen in reclaimed mine soils[J]. PeerJ, 2020, **8**, doi: 10.7717/peerj.8563.

[22] Gilardelli F, Sgorbati S, Citterio S, *et al*. Restoring limestone quarries: hayseed, commercial seed mixture or spontaneous succession? [J]. Land Degradation & Development, 2016, **27**(2): 316-324.

[23] Bi Y L, Wang K, Du S Z, *et al*. Shifts in arbuscular mycorrhizal fungal community composition and edaphic variables during reclamation chronosequence of an open-cast coal mining dump[J]. CATENA, 2021, **203**, doi: 10.1016/j.catena.2021.105301.

[24] Kumari S, Maiti S K. Reclamation of coalmine spoils with topsoil, grass, and legume: a case study from India[J]. Environmental Earth Sciences, 2019, **78** (14), doi: 10.1007/s12665-019-8446-2.

[25] Mummey D L, Stahl P D, Buyer J S. Microbial biomarkers as an indicator of ecosystem recovery following surface mine reclamation [J]. Applied Soil Ecology, 2002, **21**(3): 251-259.

[26] Ma J, Bu R C, Liu M, *et al*. Ecosystem carbon storage distribution between plant and soil in different forest types in Northeastern China [J]. Ecological Engineering, 2015, **81**: 353-362.

[27] Pietrzykowski M, Krzaklewski W. Potential for carbon sequestration in reclaimed mine soil on reforested surface mining areas in Poland[J]. Natural Science, 2010, **2**(9): 1015-1021.

[28] 陈鹏娟. 干旱半干旱地区植被恢复类型对林地小气候的影响研究[J]. 中国水土保持, 2021, (5): 45-47.
Chen P J. Effects of vegetation restoration types on forest microclimate in arid and semi-arid areas [J]. Soil and Water Conservation in China, 2021, (5): 45-47.

[29] 刘洋, 黄懿梅, 曾全超. 黄土高原不同植被类型下土壤细菌群落特征研究[J]. 环境科学, 2016, **37**(10): 3931-3938.
Liu Y, Huang Y M, Zeng Q C. Soil bacterial communities under different vegetation types in the loess plateau[J]. Environmental Science, 2016, **37**(10): 3931-3938.

[30] 许小明，张晓萍，何亮，等. 黄土丘陵区不同恢复植被类型的固碳特征[J]. 环境科学，2022，**43**(11)：5263-5273.
Xu X M，Zhang X P，He L，*et al*. Carbon sequestration characteristics of different restored vegetation types in loess hilly region[J]. Environmental Science，2022，**43**(11)：5263-5273.

[31] 李响，袁志友，焦峰. 温度和降水对中国草本植物、灌木和乔木养分重吸收特征的影响[J]. 水土保持研究，2023，**30**(2)：87-92.
Li X，Yuan Z Y，Jiao F. Response of nutrient resorption of herbs，shrubs and trees to temperature and precipitation in China[J]. Research of Soil and Water Conservation，2023，**30**(2)：87-92.

[32] 方熊，刘菊秀，张德强，等. 降水变化、氮添加对鼎湖山主要森林土壤有机碳矿化和土壤微生物碳的影响[J]. 应用与环境生物学报，2012，**18**(4)：531-538.
Fang X，Liu J X，Zhang D Q，*et al*. Effects of precipitation change and nitrogen addition on organic carbon mineralization and soil microbial carbon of the forest soils in Dinghushan，southeastern China[J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology，2012，**18**(4)：531-538.

[33] 李俊超，党廷辉，薛江，等. 植被重建下露天煤矿排土场边坡土壤碳储量变化[J]. 土壤学报，2015，**52**(2)：453-460.
Li J C，Dang T H，Xue J，*et al*. Variability of soil organic carbon storage in dump slope of opencast coal mine under revegetation[J]. Acta Pedologica Sinica，2015，**52**(2)：453-460.

[34] Shrestha R K，Lal R. Soil carbon and nitrogen in 28-year-old land uses in reclaimed coal mine soils of Ohio[J]. Journal of Environmental Quality，2007，**36**(6)：1775-1783.

[35] 刘伟红，王金满，白中科，等. 露天煤矿排土场复垦土地土壤有机碳的动态变化[J]. 金属矿山，2014，(3)：141-146.
Liu W H，Wang J M，Bai Z K，*et al*. Soil organic carbon dynamics of reclaimed soils at an opencast coal mine[J]. Metal Mine，2014，(3)：141-146.

[36] Kosmas C，Gerontidis S，Marathianou M. The effect of land use change on soils and vegetation over various lithological formations on Lesvos (Greece)[J]. CATENA，2000，**40**(1)：51-68.

[37] 杨灵芳，孔东彦，刁静文，等. 氮沉降对陆地生态系统土壤有机碳含量影响的Meta分析[J]. 环境科学，2023，**44**(11)：6226-6234.
Yang L F，Kong D Y，Diao J W，*et al*. Meta-analysis on the effects of nitrogen addition on soil organic carbon content in terrestrial ecosystems[J]. Environmental Science，2023，**44**(11)：6226-6234.

[38] Wu H B，Guo Z T，Peng C H. Land use induced changes of organic carbon storage in soils of China[J]. Global Change Biology，2003，**9**(3)：305-315.

[39] Shi S W，Peng C H，Wang M，*et al*. A global meta-analysis of changes in soil carbon，nitrogen，phosphorus and sulfur，and stoichiometric shifts after forestation[J]. Plant and Soil，2016，**407**(1-2)：323-340.

[40] Wang Y G，Luo G P，Li C F，*et al*. Effects of land clearing for agriculture on soil organic carbon stocks in drylands：a meta-analysis[J]. Global Change Biology，2023，**29**(2)：547-562.

[41] Mukhopadhyay S，Masto R E，Yadav A，*et al*. Soil quality index for evaluation of reclaimed coal mine spoil[J]. Science of the Total Environment，2016，**542**：540-550.

[42] Du H D，Wang S M，Nie W J，*et al*. Soil properties and bacterial community dynamics in a coal mining subsidence area：active versus passive revegetation[J]. Journal of Soil Science and Plant Nutrition，2021，**21**(3)：2573-2585.

[43] Yuan Y，Zhao Z Q，Zhang P F，*et al*. Soil organic carbon and nitrogen pools in reclaimed mine soils under forest and cropland ecosystems in the Loess Plateau，China[J]. Ecological Engineering，2017，**102**：137-144.

[44] 于学胜，曹翠玲，叶婧，等. 农地利用对露天煤矿废弃地土壤质量的影响[J]. 环境科学与技术，2013，**36**(S1)：361-365.
Yu X S，Cao C L，Ye J，*et al*. Post-reclamation agricultural land use effects on properties in mine soils[J]. Environmental Science & Technology，2013，**36**(S1)：361-365.

[45] 李鹏飞，张兴昌，郝明德，等. 植被恢复对黄土高原矿区重构土壤理化性质、酶活性以及真菌群落的影响[J]. 水土保持通报，2019，**39**(5)：1-7.
Li P F，Zhang X C，Hao M D，*et al*. Effects of vegetation restoration on soil physicochemical properties，enzyme activities，and fungal community of reconstructed soil in a mining area on loess plateau[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation，2019，**39**(5)：1-7.

[46] 刘军，丁霞，张武文. 人工沙棘林对霍林河南露天煤矿排土场边坡土壤肥力的影响[J]. 干旱区资源与环境，2017，**31**(12)：150-154.
Liu J，Ding X，Zhang W W. Study on soil fertility of artificial sea-buckthorn woodlands in the waste dump of Huolinhe south-pit mine[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment，2017，**31**(12)：150-154.

[47] Ezeokoli O T，Bezuidenhout C C，Maboeta M S，*et al*. Structural and functional differentiation of bacterial communities in post-coal mining reclamation soils of South Africa：bioindicators of soil ecosystem restoration[J]. Scientific Reports，2020，**10**(1)，doi：10.1038/s41598-020-58576-5.

[48] 王丽丽，甄庆，王颖，等. 晋陕蒙矿区排土场不同改良模式下土壤养分效应研究[J]. 土壤学报，2018，**55**(6)：1525-1533.
Wang L L，Zhen Q，Wang Y，*et al*. Effect of soil amelioration on soil nutrients at mining dumps in the Shanxi-Shaanxi-inner mongolia region[J]. Acta Pedologica Sinica，2018，**55**(6)：1525-1533.

[49] 原野，高嫄，赵艺芳，等. 黄土丘陵区露天煤矿复垦土壤熟化过程中团聚体碳氮演变特征[J]. 农业工程学报，2022，**38**(11)：72-80.
Yuan Y，Gao Y，Zhao Y F，*et al*. Succession of soil aggregate associated carbon and nitrogen amid the reclaimed mine soils pedogenic process in an opencast coal mine within the Loess hilly region[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering，2022，**38**(11)：72-80.

[50] 胡宜刚，张鹏，赵洋，等. 植被配置对黑岱沟露天煤矿区土壤养分恢复的影响[J]. 草业科学，2015，**32**(10)：1561-1568.
Hu Y G，Zhang P，Zhao Y，*et al*. Effects of various vegetation patterns on soil nutrients recovery in Heidaigou coal mine[J]. Pratacultural Science，2015，**32**(10)：1561-1568.

[51] 宁岳伟，刘勇，张红，等. 煤矿矿区复垦植被类型对土壤微生物功能基因和酶活的影响[J]. 环境科学，2022，**43**(9)：4647-4654.
Ning Y W，Liu Y，Zhang H，*et al*. Effects of different vegetation types on soil microbial functional genes and enzyme activities in reclaimed coal mine[J]. Environmental Science，2022，**43**(9)：4647-4654.

[52] 王晓琳，王丽梅，张晓媛，等. 不同植被对晋陕蒙矿区排土场土壤养分16a恢复程度的影响[J]. 农业工程学报，2016，**32**(9)：198-203.
Wang X L，Wang L M，Zhang X Y，*et al*. Effects of different vegetation on soil nutrients remediation degree in earth disposal site after 16a in mining area of Shanxi-Shaanxi-Inner Monglia adjacent

region[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, **32**(9): 198-203.

[53] 王彦武, 廖超英, 孙长忠, 等. 毛乌素沙地固沙林土壤化学性质差异[J]. 土壤通报, 2009, **40**(4): 776-780.
Wang Y W, Liao C Y, Sun C Z, *et al*. Soil chemical properties of sand-fixing forests in Maowusu sandland[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2009, **40**(4): 776-780.

[54] 文月荣, 党廷辉, 唐骏, 等. 不同林地恢复模式下露天煤矿排土场土壤有机碳分布特征[J]. 应用生态学报, 2016, **27**(1): 83-90.
Wen Y R, Dang T H, Tang J, *et al*. Distribution characteristics of soil organic carbon under different forest restoration modes on opencast coal mine dump[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2016, **27**(1): 83-90.

[55] 杨喜田, 宁国华, 董惠英, 等. 太行山区不同植被群落土壤微生物学特征变化[J]. 应用生态学报, 2006, **17**(9): 1761-1764.
Yang X, Ning G H, Dong H Y, *et al*. Soil microbial characters under different vegetation communities in Taihang Mountain area[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2006, **17**(9): 1761-1764.

[56] 罗娜娜, 盛茂银, 王霖娇, 等. 长期植被恢复对中国西南喀斯特石漠化土壤活性有机碳组分含量和酶活性的影响[J]. 植物生态学报, 2023, **47**, doi: 10.17521/cjpe.2022.0216.
Luo N N, Sheng M Y, Wang L J, *et al*. Effects of long-term vegetation restoration on soil active organic carbon fractions content and enzyme activities in karst rocky desertification ecosystem of southwest China[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2023, **47**, doi: 10.17521/cjpe.2022.0216.

[57] Littlefield T, Barton C, Arthur M, *et al*. Factors controlling carbon distribution on reforested minelands and regenerating clearcuts in Appalachia, USA[J]. Science of the Total Environment, 2013, **465**: 240-247.

[58] 王金满, 郭凌俐, 白中科, 等. 黄土区露天煤矿排土场复垦后土壤与植被的演变规律[J]. 农业工程学报, 2013, **29**(21): 223-232.
Wang J M, Guo L L, Bai Z K, *et al*. Succession law of reclaimed soil and vegetation on opencast coal mine dump of loess area[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, **29**(21): 223-232.

[59] 马静, 董文雪, 朱燕峰, 等. 东部平原矿区复垦对土壤微生物固碳潜力的影响[J]. 煤炭学报, 2022, **47**(3): 1306-1317.
Ma J, Dong W X, Zhu Y F, *et al*. Impact of land reclamation on the carbon sequestration potential of soil microorganisms in the disturbed mining area of eastern plain[J]. Journal of China Coal Society, 2022, **47**(3): 1306-1317.

[60] 许敏. 植被恢复对自养微生物群落及其固碳能力的影响[D]. 武汉: 华中农业大学, 2022.
Xu M. Effects of vegetation restoration on autotrophic microbial communities and carbon sequestration capacity[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2022.

[61] Sperow M, Eve M, Paustian K. Potential soil C sequestration on U.S. agricultural soils[J]. Climatic Change, 2003, **57**(3): 319-339.

[62] Li N, You M Y, Zhang B, *et al*. Modeling soil aggregation at the early pedogenesis stage from the parent material of a Mollisol under different agricultural practices[J]. Advances in Agronomy, 2017, **142**: 181-214.

[63] Li N, Long J H, Han X Z, *et al*. Molecular characterization of soil organic carbon in water-stable aggregate fractions during the early pedogenesis from parent material of Mollisols[J]. Journal of Soils and Sediments, 2020, **20**(4): 1869-1880.

[64] 苑亚茹, 韩晓增, 李娜, 等. 不同熟化措施对黑土母质发育的新成土壤有机碳库的影响[J]. 生态学杂志, 2020, **39**(4): 1175-1182.
Yuan Y R, Han X Z, Li N, *et al*. Effects of different improvement regimes on organic carbon pools of soils newly developed from parent material of Mollisols[J]. Chinese Journal of Ecology, 2020, **39**(4): 1175-1182.

[65] 李娜, 韩晓增, 盛明, 等. 东北黑土成土母质培肥过程中土壤肥力变化特征[J]. 应用生态学报, 2020, **31**(4): 1155-1162.
Li N, Han X Z, Sheng M, *et al*. Characteristics of soil fertility during soil fertilization from parent material of a Mollisol in Northeast China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2020, **31**(4): 1155-1162.

[66] Bandyopadhyay S, Novo L A B, Pietrzykowski M, *et al*. Assessment of forest ecosystem development in coal mine degraded land by using integrated mine soil quality index (IMSQI): the evidence from India[J]. Forests, 2020, **11**(12), doi: 10.3390/f11121310.

[67] Zechmeister-Boltenstern S, Keiblinger K M, Mooshammer M, *et al*. The application of ecological stoichiometry to plant-microbial-soil organic matter transformations[J]. Ecological Monographs, 2015, **85**(2): 133-155.

[68] Prach K, Hobbs R J. Spontaneous succession versus technical reclamation in the restoration of disturbed sites[J]. Restoration Ecology, 2008, **16**(3): 363-366.

[69] Mastrogianni A, Papatheodorou E M, Monokrousos N, *et al*. Reclamation of lignite mine areas with *Triticum aestivum*: the dynamics of soil functions and microbial communities[J]. Applied Soil Ecology, 2014, **80**: 51-59.

[70] Wang H L, Deng N, Wu D Y, *et al*. Long-term net transformation and quantitative molecular mechanisms of soil nitrogen during natural vegetation recovery of abandoned farmland on the Loess Plateau of China[J]. Science of the Total Environment, 2017, **607-608**: 152-159.

[71] Yan B S, Sun L P, Li J J, *et al*. Change in composition and potential functional genes of soil bacterial and fungal communities with secondary succession in *Quercus liaotungensis* forests of the Loess Plateau, western China[J]. Geoderma, 2020, **364**, doi: 10.1016/j.geoderma.2020.114199.

[72] Wei X R, Shao M G, Fu X L, *et al*. Distribution of soil organic C, N and P in three adjacent land use patterns in the northern Loess Plateau, China[J]. Biogeochemistry, 2009, **96**(1): 149-162.

[73] Amichev B Y, Burger J A, Rodrigue J A. Carbon sequestration by forests and soils on mined land in the Midwestern and Appalachian coalfields of the U.S.[J]. Forest Ecology and Management, 2008, **256**(11): 1949-1959.

[74] Guo L B, Gifford R M. Soil carbon stocks and land use change: a meta analysis[J]. Global Change Biology, 2002, **8**(4): 345-360.

[75] Guo L B, Wang M B, Gifford R M. The change of soil carbon stocks and fine root dynamics after land use change from a native pasture to a pine plantation[J]. Plant and Soil, 2007, **299**(1-2): 251-262.

[76] Anderson J D, Ingram L J, Stahl P D. Influence of reclamation management practices on microbial biomass carbon and soil organic carbon accumulation in semiarid mined lands of Wyoming[J]. Applied Soil Ecology, 2008, **40**(2): 387-397.

[77] 李俊超, 党廷辉, 郭胜利, 等. 植被重建下煤矿排土场土壤熟化过程中碳储量变化[J]. 环境科学, 2014, **35**(10): 3842-

3850.
Li J C, Dang T H, Guo S L, *et al*. Soil organic carbon storage changes with land reclamation under vegetation reconstruction on opencast coal mine dump[J]. Environmental Science, 2014, **35**(10): 3842-3850.

[78] 方瑛, 马任甜, 安韶山, 等. 黑岱沟露天煤矿排土场不同植被复垦土壤酶活性及理化性质研究[J]. 环境科学, 2016, **37**(3): 1121-1127.
Fang Y, Ma R T, An S S, *et al*. Heidaigou opencast coal mine: soil enzyme activities and soil physical and chemical properties under different vegetation restoration[J]. Environmental Science, 2016, **37**(3): 1121-1127.

[79] Ahirwal J, Maiti S K. Development of Technosol properties and recovery of carbon stock after 16 years of revegetation on coal mine degraded lands, India[J]. CATENA, 2018, **166**: 114-123.

[80] Datta A, Basak N, Chaudhari S K, *et al*. Soil properties and organic carbon distribution under different land uses in reclaimed sodic soils of North-West India[J]. Geoderma Regional, 2015, **4**: 134-146.

[81] Bartuška M, Pawlett M, Frouz J. Particulate organic carbon at reclaimed and unreclaimed post-mining soils and its microbial community composition[J]. CATENA, 2015, **131**: 92-98.

[82] Fan L, Zhao W P, Feng W D, *et al*. Insight into the characteristics of soil microbial diversity during the ecological restoration of mines: a case study in Dabaoshan Mining area, China[J]. Sustainability, 2021, **13**(21), doi: 10.3390/su132111684.

[83] Tripathi N, Singh R S, Nathanail C P. Mine spoil acts as a sink of carbon dioxide in Indian dry tropical environment[J]. Science of the Total Environment, 2014, **468-469**: 1162-1171.

[84] 丁青坡, 王秋兵, 魏忠义, 等. 抚顺矿区不同复垦年限土壤的养分及有机碳特性研究[J]. 土壤通报, 2007, **38**(2): 262-267.
Ding Q P, Wang Q B, Wei Z Y, *et al*. Soil nutrients and organic carbon contents with different reclamation years in the colliery areas of Fushun City[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2007, **38**(2): 262-267.

[85] 高智挺, 王佳琪, 王改玲. 露天矿区复垦草地和耕地土壤肥力质量评价[J]. 天津农业科学, 2022, **28**(2): 77-82.
Gao Z T, Wang J Q, Wang G L. Soil quality evaluation on reclaimed grassland and farmland in Antaibao open-cast mine[J]. Tianjin Agricultural Sciences, 2022, **28**(2): 77-82.

[86] 杨睿哲, 杨世龙, 翁希哲, 等. 水蚀环境植被恢复对土壤有机碳固存和团聚体稳定的影响: Meta分析[J]. 环境科学, 2023, **44**(3): 1542-1552.
Yang R Z, Yang S L, Weng X Z, *et al*. Effects of vegetation restoration on soil organic carbon sequestration and aggregate stability in water-eroded environment: a meta-analysis [J]. Environmental Science, 2023, **44**(3): 1542-1552.

[87] Shrestha R K, Lal R, Jacinthe P A. Enhancing carbon and nitrogen sequestration in reclaimed soils through organic amendments and chiseling[J]. Soil Science Society of America Journal, 2009, **73**(3): 1004-1011.

[88] Šourková M, Frouz J, Šantrůčková H. Accumulation of carbon, nitrogen and phosphorus during soil formation on alder spoil heaps after brown-coal mining, near Sokolov (Czech Republic)[J]. Geoderma, 2005, **124**(1-2): 203-214.

[89] Ussiri D A N, Lal R. Carbon sequestration in reclaimed minesoils [J]. Critical Reviews in Plant Sciences, 2005, **24**(3): 151-165.

[90] Yang Z, Hao H M, Wang D, *et al*. Revegetation of artificial grassland improve soil organic and inorganic carbon and water of abandoned mine[J]. Journal of Soil Science and Plant Nutrition, 2015, **15**(3): 629-638.

[91] Tian H F, Shen X L, Qiu L P, *et al*. Responses of soil organic carbon and nitrogen to land-use changes in a semiarid region of northwest China[J]. Arid Land Research and Management, 2020, **34**(2): 188-206.

[92] Hou G L, Delang C O, Lu X X, *et al*. A meta-analysis of changes in soil organic carbon stocks after afforestation with deciduous broadleaved, sempervirent broadleaved, and conifer tree species [J]. Annals of Forest Science, 2020, **77**(4), doi: 10.1007/s13595-020-00997-3.

[93] Wang B R, An S S, Liang C, *et al*. Microbial necromass as the source of soil organic carbon in global ecosystems[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2021, **162**, doi: 10.1016/j.soilbio.2021.108422.

[94] Laganière J, Angers D A, Paré D. Carbon accumulation in agricultural soils after afforestation: a meta-analysis[J]. Global Change Biology, 2010, **16**(1): 439-453.

HUANJING KEXUE

Environmental Science (monthly)

Vol. 45 No. 3

Mar. 15, 2024

CONTENTS

Research on the Evaluation Method and Application of Provincial Differentiated Carbon Peaking in China ····· LIU Run-pu, PENG Shuan, CHEN Yu-shuo, *et al.* (1233)

Evolution and Influencing Factors of Spatial Correlation Network of Construction Carbon Emission in China from the Perspective of Whole Life Cycle ····· REN Xiao-song, LI Zhao-rui (1243)

Efficiency Characteristics and Evolution Patterns of Urban Carbon Metabolism of Production-Living-Ecological Space in Beijing-Tianjin-Hebei Region ····· TIAN Chao, CHENG Lin-lin, SHAO Ying-chao (1254)

Assessment of CO_2 Co-benefits of Air Pollution Control Policies in Taiyuan's 14th Five-Year Plan ····· XIAO Ting-yu, SHU Yun, LI hui, *et al.* (1265)

Coordinated Control of Carbon Emission Reduction and Air Quality Improvement in the Industrial Sector in Hunan Province ····· LI Nan, LIU Wan-wan, ZHU Shu-han, *et al.* (1274)

Coal Control and Carbon Reduction Path in Henan Province's Power Industry Under the Carbon Peak and Neutralization Target: A Medium- and Long-term Study ····· ZHANG Jing, YANG Meng, ZHANG Wei, *et al.* (1285)

Environmental Benefits of Pollution and Carbon Reduction by Bus Fleet Electrification in Zhengzhou ····· ZOU Chao, WANG Ya-nan, WU Lin, *et al.* (1293)

Multi-scale Driving Mechanism of Urbanization on $PM_{2.5}$ Concentration in Urban Agglomeration in the Middle Reaches of the Yangtze River ····· ZHANG Zheng, ZHOU Ting-gang, ZHOU Zhi-heng, *et al.* (1304)

Analysis of Spatio-temporal Distribution Characteristics and Influencing Factors of $PM_{2.5}$ Concentration in Urban Agglomerations on the Northern Slope of Tianshan Mountains ····· WANG Xiang-nan, ZHANG Zhe, LIU Fang-qing (1315)

Spatial Variability and Source Apportionment of $PM_{2.5}$ Carbon Components in Tianjin ····· WU Fu-liang, WU Jian-hui, DAI Qi-li, *et al.* (1328)

Characteristics and Source Analysis of Carbonaceous Aerosols in $PM_{2.5}$ in Huaxi District, Guiyang ····· GUI Jia-qun, YANG Yuan, WANG Xian-qin, *et al.* (1337)

Pollution Characteristics, Source Apportionment, and Meteorological Response of Water-soluble Ions in $PM_{2.5}$ in Xinxiang, North China ····· LIU Huan-jia, LI Lan-qing, LI Huan-li, *et al.* (1349)

Characterization of Metal Elements in Atmospheric $PM_{2.5}$ and Health Risk Assessment in Heze in Winter from 2017 to 2018 ····· DU Hong-xuan, REN Li-hong, ZHAO Ming-sheng, *et al.* (1361)

Analysis of the Jumping Characteristics and Influencing Factors of Ozone Pollution in Beijing ····· PAN Jin-xiu, AN Xin-xin, LIU Bao-xian, *et al.* (1371)

Analysis of Photochemical Characteristics and Sensitivity of Atmospheric Ozone in Nanjing in Summer ····· LUO Li-tong, ZHANG Yan-lin, LIN Yu-qi, *et al.* (1382)

Ozone Pollution in Suzhou During Early Summertime: Formation Mechanism and Interannual Variation ····· WU Ye-zheng, ZHANG Xin, GU Jun, *et al.* (1392)

Distribution Characteristics, Ecological Risk Assessment, and Source Tracing of Heavy Metals in the Sediments of Typical Lakes in the Middle Reaches of the Yangtze River ····· LU Hong-bin, LU Shao-yong, LI Xiang, *et al.* (1402)

Spatiotemporal Distribution and Source Analysis of Heavy Metals in Surface Sediments in Lake Ulansuhai Based on PCA-APCS-MLR Model ····· CUI Zhi-mou, SHI Xiao-hong, ZHAO Sheng-nan, *et al.* (1415)

Spatial and Temporal Distribution and Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Water of Changshou Lake Reservoir, Chongqing ····· ZHANG Rui-xi, LIU Ya-jun, LUO Yong-nan, *et al.* (1428)

Pollution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Microplastics in the Yangtze River Basin ····· LI Si-qiong, WANG Hua, CHU Lin-you, *et al.* (1439)

Assessment of Microplastic Pollution and Estimation of Annual Emission Volume in the Dongshan Canal of Yichang City ····· DING Shuang, LI Wei-ming, ZHANG Xu-tong, *et al.* (1448)

Occurrence Characteristic and Risk Assessment of Microplastics in Sishui River (Xingyang Section) ····· ZHAO Chang-min, HE Bing, LI He-tong, *et al.* (1457)

Contamination Characteristics and Ecological Risk Assessment of Pharmaceuticals and Personal Care Products in Drains Flowing into the Yellow River of Ningxia ····· GAO Li, LI Ling-yun, ZHENG Lan-xiang, *et al.* (1468)

Characteristics and Risk Assessment of Antibiotic Contamination in Oujiang River Basin in Southern Zhejiang Province ····· ZHONG Yi-xin, LI Li-xiang, WU Xin, *et al.* (1480)

Spatial-temporal Distribution and Source Analysis of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Sediments of Poyang Lake ····· MA Yan, SUN Chen, BI Jia-le, *et al.* (1492)

Change and Prediction of Water Purification Function in the South Bank of Hangzhou Bay in the Past 20 Years ····· WANG Shan-shan, CAO Gong-ping, XU Ming-wei, *et al.* (1502)

Effects of Land Use Types on Water Quality at Different Buffer Scales: Tianjin Section of the Haihe River Basin as an Example ····· DAI Meng-jun, ZHANG Bing, DU Qian-qian, *et al.* (1512)

Hydrochemical Characteristics and Control Factors of Shallow Groundwater in Anqing Section of the Yangtze River Basin ····· LIU Hai, SONG Yang, LI Ying-chun, *et al.* (1525)

Dynamic Changes of Dissolved Organic Matter Derived from Algal Decomposition and the Environmental Effects in Eutrophic Lakes ····· ZHANG Jin, CHEN Ming-ying, HAO Zhi-neng, *et al.* (1539)

Degradation of Carbamazepine in Water by UV-activated Sulfite Process ····· LIN Tao, YUAN Yu-jie (1553)

Detection, Generation, and Control of Disinfection By-products of Reclaimed Water ····· LIAO Yu-feng, WANG Zheng, PAN Yang, *et al.* (1561)

Absorption of Ammonium by Three Substrates Materials in Constructed Wetland System ····· HE Qiang, CHEN Bo-wen, YANG Yu-jing, *et al.* (1577)

Ecological Environment Assessment and Driving Mechanism Analysis of Nagqu and Amdo Sections of Qinghai-Xizang Highway Based on Improved Remote Sensing Ecological Index ····· FU Kai-xiang, JIA Guo-dong, YU Xin-xiao, *et al.* (1586)

Spatial-temporal Evolution and Driving Factors Analysis of Ecological Environment Quality in Daihai Basin based on AWRSEI ····· ZHAO Jia-li, LI Xing, SUN Bing (1598)

Quantitative Assessment of the Impact of Climate Change on the Growing Season of Vegetation Gross Primary Productivity in the Middle and Lower Reaches of the Yangtze River ····· XU Yong, PAN Yu-chun, ZOU Bin, *et al.* (1615)

Effect of Vegetation Restoration on Soil Organic Carbon Storage in Coal Mining Areas Based on Meta-analysis ····· LI Jian-ming, KANG Yu-xin, JIANG Fu-zhen, *et al.* (1629)

Effects of Continuous Annual Crop Rotation and Fallow on Soil Aggregate Stability and Organic Carbon ····· LU Ze-rang, LI Yong-mei, YANG Chun-huai, *et al.* (1644)

Effects of Four Amendments on Fertility and Labile Organic Carbon Fractions of Acid Purple Soil ····· DING Xin-ru, YAN Ning-zhen, WANG Zi-fang, *et al.* (1655)

Changes in Soil Nitrogen Components and Their Relationship with Environmental Factors with Different Tea Plantation Ages ····· SHAO Qi, WU Tao, XIE Xue-feng, *et al.* (1665)

Nutrients and Ecological Stoichiometry Characteristics of Typical Wetland Soils in the Lower Yellow River ····· WANG Chuan-ying, WANG Kai-yue, WANG Hao-ran, *et al.* (1674)

Effect of Film Mulching Age and Organic Fertilizer Application on the Distribution Characteristics of Microplastics in the Soil of a Peanut Field ····· SONG Ning-ning, LI Meng-jia, WANG Xue-xia, *et al.* (1684)

Effects of Straw Returning and Biochar Addition on Greenhouse Gas Emissions from High Nitrate Nitrogen Soil After Flooding in Rice-vegetable Rotation System in Tropical China ····· HU Tian-yi, CHE Jia-yue, HU Yu-jie, *et al.* (1692)

Tillage Depth Regulation and the Effect of Straw Return on Soil Respiration in Farmland ····· CHEN Xi, ZHANG Yan-jun, ZOU Jun-liang, *et al.* (1702)

Distribution Prediction of Soil Heavy Metals Based on Remote Sensing Temporal-Spatial-Spectral Features and Random Forest Model ····· WANG Ze-qiang, ZHANG Dong-you, XU Xi-bo, *et al.* (1713)

Characteristics and Identification Priority Source of Heavy Metals Pollution in Farmland Soils in the Yellow River Basin ····· LI Jun, LI Xu, LI Kai-ming, *et al.* (1724)

Characteristics of Cd Fluxe in Topsoil Around Typical Mining Area in Hezhou, Guangxi ····· YANG Ye-yu, LI Cheng, YANG Zhong-fang, *et al.* (1739)

Potential Ecological Risk Assessment of Soil Heavy Metals in Fengdong New District Based on Information Diffution Model ····· YANG Nan-nan, HAN Ling, LIU Ming (1749)

Traceability Analysis and Environmental Quality Assessment of Soil Heavy Metal Pollution in West Hunan Province ····· XIAO Kai-qi, XU Hong-gen, GAN Jie, *et al.* (1760)

Distribution Characteristics, Source Analysis and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in the Typical Industry Reclaimed Soil ····· SHEN Cheng, WANG Wen-juan, SHA Chen-yan, *et al.* (1769)

Provincial-scale Soil As Migration and Transformation and Rice Safe Planting Zoning: A Case Study of Guizhou Province ····· DONG Xin-yue, WU Yong, ZHOU Zi-han, *et al.* (1781)

Effect of Silica Fertilizer(Husk Ash) to Improve Soil Quality and Reduce Cd and As Accumulation in Rice ····· YI Xuan-tao, OUYANG Kun, GU Jiao-feng, *et al.* (1793)

Effect of EDDS Application on Soil Cu/Cd Availability and Uptake/transport by Castor ····· LIU Wen-ying, WU Gang, HU Hong-qing (1803)

Blocking Effects of Foliar Conditioners on Cadmium, Arsenic, and Lead Accumulation in Wheat Grain in Compound-contaminated Farmland ····· XIAO Bing, WANG Qiu-shi, GAO Pei-pei, *et al.* (1812)

Soil Microbial Community Structure and Functional Diversity Character of Abandoned Farmland in Minqin Oasis ····· LI Chang-le, ZHANG Fu, WANG Li-de, *et al.* (1821)

Microbial Mechanisms of Removal of Phthalic Acid Esters in Purple Soils Revealed Using Metagenomic Analysis ····· LI Yu-tong, YU Hai, LIU Kun, *et al.* (1830)

Air Microbial Contamination and Risk of Respiratory Exposure of Workers in Chicken Farms ····· BAI Yu-qiao, SUN Xing-bin, QIU Tian-lei, *et al.* (1840)

Occurrence Characteristics of Microplastics in Multi-environmental Media and *Bellamya aeruginosa* of Manao River ····· GAO Ya-kun, LI Wei-ming, ZHANG Xu-tong, *et al.* (1849)

Biological Effect of Microplastics with Different Functional Groups on the Bacterial Communities and Metabolic Functions of Zebrafish (*Danio rerio*) Embryos ····· YAN Zhen-hua, ZHANG Yan, BAO Xu-hui, *et al.* (1859)