万方知库
Eco-Environmental Knowledge Web

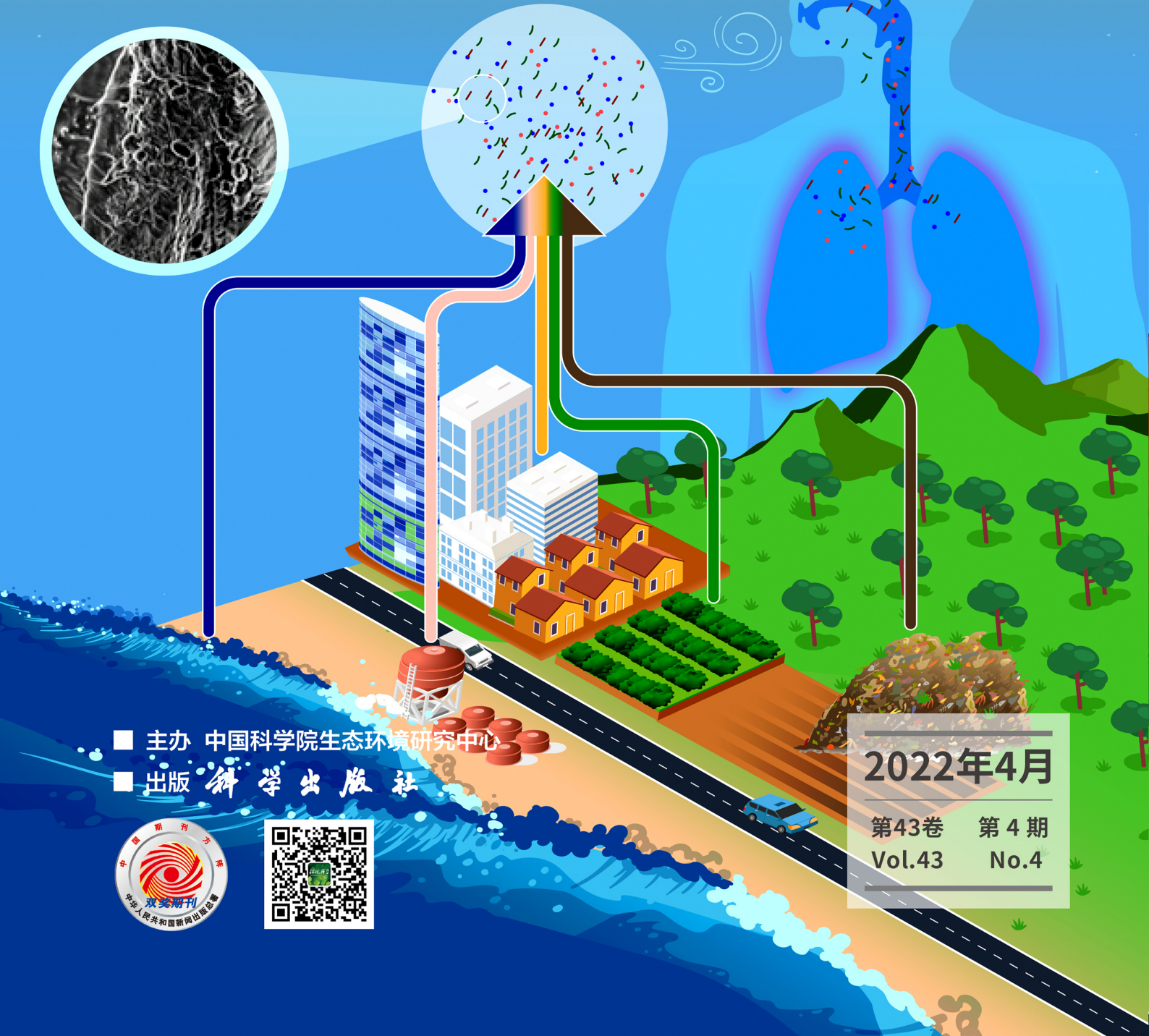
环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

大连海岸带夏、秋季大气沉降(微)塑料的赋存特征及其表面生物膜特性

涂晨，田媛，刘颖，张馨宁，骆永明



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心
■ 出版 科学出版社

2022年4月
第43卷 第 4 期
Vol.43 No.4

环境科学
(HUANJING KEXUE)
ENVIRONMENTAL SCIENCE
第43卷 第4期
2022年4月15日

目 次

2015~2019年河南省$PM_{2.5}$时空特征与驱动因素分析 …… 葛岂序, 刘岩, 杨洪, 郭恒亮 (1697)
郑州市大气$PM_{2.5}$中重金属的污染特征、来源及健康风险评估:基于高分辨数据 …… 曲光辉, 孙俊苹, 王申博, 姜楠, 李利萍, 刘洋, 陈红阳, 马双良 (1706)
宁波市春节期间水溶性离子污染来源和特征分析 …… 杨梦蓉, 潘勇, 黄仲文, 张晶晶, 黄显军, 何萌萌, 肖航 (1716)
上海城区$PM_{2.5}$中有机组分及硝基芳香化合物分布特征 …… 庄旻, 马英歌, 程玉璜, 周敏, 戴海夏, 黄成, 郁建珍, 朱书慧, 乔利平, 童张法 (1725)
南京北郊大气细粒子硝基苯酚类化合物污染特征与来源 …… 陈美娟, 钱姿合, 顾陈娟, 张书萌, 刘智艺, 王新锋, 盖鑫磊 (1738)
春节与疫情管控期间珠三角VOCs的组成和来源变化 …… 江明, 袁鸾, 温丽容, 张莹, 方洪波, 杨满芽, 李成柳 (1747)
重庆市主要工业源VOCs组分排放清单及其臭氧生成潜势 …… 李陵, 李振亮, 方维凯, 王晓宸, 蒲茜, 汪凌韬, 袁睿, 张卫东, 翟崇治 (1756)
珠三角某石化园区VOCs排放特征及影响评价…… 张雪驰, 沙青娥, 陆梦华, 王毓铮, 饶思杰, 明桂英, 李勤勤, 吴淑珠, 郑君瑜 (1766)
基于隧道测试的机动车VOCs排放特征及源解析 …… 刘鑫会, 朱仁成, 金博强, 梅慧, 祖雷, 尹沙沙, 张瑞芹, 胡京南 (1777)
基于多通道分布式VOCs在线监测质谱系统精准识别企业污染源 …… 韦啸, 张永杰, 王沛涛, 洪燕, 夏瑞, 高伟 (1788)
基于SOA和O_3生成潜势的杭州市$PM_{2.5}$和O_3协同控制 …… 林旭, 严仁嫦, 金嘉佳, 许凯儿 (1799)
超低排放燃煤电厂中湿式电除尘器对可凝结颗粒物排放特性的影响 …… 王鹏程, 袁畅, 梁胜文, 蒋鹭翔, 成海容, 许睿光, 庹晓晗, 王祖武 (1808)
西安市住宅室内空气污染物实测分析与叠加效应 …… 王秀茹, 樊灏, 范洁, 沈振兴 (1814)
大连海岸带夏、秋季大气沉降(微)塑料的赋存特征及其表面生物膜特性…… 涂晨, 田媛, 刘颖, 张馨宁, 骆永明 (1821)
基于在线观测本地因子的长三角家禽养殖氨排放时空分布特征 …… 高宗源, 徐昶, 倪远之, 沈根祥, 苗文亮, 王振旗, 付侃, 钱晓雍, 曹国民 (1829)
西宁市农牧源氨排放清单及其分布特征 …… 杨益, 姬亚芹, 高玉宗, 林孜, 林宇, 马妍 (1844)
“三水”统筹视角下京津冀地区城市水生态环境保护策略分析 …… 廖雅, 侯晓姝, 任晓红 (1853)
中国居民饮用水镉暴露非致癌风险的年龄分层权重 …… 秦宁, 阿依博塔·吐尔逊别克, 刘运炜, 侯荣, 徐翔宇, 官家丞, 段小丽 (1863)
新疆博尔塔拉河流域平原区地表水与地下水水化学特征及转化关系 …… 雷米, 周金龙, 张杰, 陈亚鹏, 滕杰, 吴彤, 徐东升, 孙英, 纪媛媛 (1873)
珠江源区小黄泥河流域地表水水化学组成特征及控制因素 …… 涂春霖, 尹林虎, 和成忠, 寸得欣, 马一奇, 令狐昌卫 (1885)
河套灌区浅层地下水NO_3^--N时空变化及驱动因素 …… 袁宏颖, 杨树青, 张万锋, 王波, 韩天凯, 丁雪华 (1898)
盐城地区地下水溶质来源及其成因分析 …… 王建, 张华兵, 许君利, 李永山 (1908)
白洋淀不同水体氢氧同位素特征及其指示意义 …… 王雨山, 尹德超, 祁晓凡, 徐蓉桢 (1920)
东部地区大型湖库有色可溶性有机物来源组成及潜在驱动因素 …… 陈丽丽, 肖启涛, 俞晓琴, 陈慧敏, 周蕾, 周永强, 韩龙飞 (1930)
松花湖沉积物溶解性有机质荧光光谱特性 …… 程云轩, 赵可, 张越, 张渝婷, 焦立新 (1941)
区域土地利用类型对水源水中溶解性有机物丰度和荧光组分的影响 …… 高静, 蒲晓, 张玉虎, 程红光, 张瑞宁, 刘训良, 董雪, 许新瑶 (1950)
南水北调东线枢纽湖泊表层水体甲烷释放特征及潜在影响因素 … 朱俊羽, 彭凯, 李宇阳, 俞晓琴, 陈慧敏, 周蕾, 周永强, 丁艳青 (1958)
千岛湖水体中邻苯二甲酸酯(PAEs)的分布特征及健康风险评价 …… 弥启欣, 国晓春, 卢少勇, 邓义祥, 卢洪斌, 李响, 刘晓贺, 陈金明 (1966)
蓝藻越冬期湖湾沉积物磷吸附特征和释放风险 …… 靳郑海, 涂成琪, 王书航, 陈俊伊, 卢昶雨, 黄威 (1976)
基于植物多样性的北京市湿地生态质量评价 …… 李果, 孙光, 赵梓伊, 刘冬梅, 肖能文, 赵志平, 罗遵兰 (1988)
小清河专项治理对莱州湾环境和浮游植物的影响 …… 张晶晶, 王玉珏, 李凡, 刘珂, 王英, 于洋, 高彦洁, 肖晓彤, 吕振波 (1997)
不同曝气方式对人工湿地细菌多样性、代谢活性及功能的影响 …… 王飞鹏, 黄亚玲, 张瑞瑞, 岳琛, 李飞翔, 张超月, 穆景利 (2007)
南宁市老城区降雨径流溯源及污染特征分析 …… 岳桢锷, 李一平, 周玉璇, 郑可, 于珊, 伍彬 (2018)
老化作用对微塑料吸附镉的影响及其机制 …… 王俊杰, 陈晓晨, 李权达, 金成俊, 黄艺佳, 范露健, 张剑宇, 刘宪华, 徐开钦 (2030)
碳化泡沫负载Co_3O_4活化过硫酸盐降解罗丹明B …… 王渊源, 阎鑫, 艾涛, 李卓, 牛艳辉 (2039)
低总氮浓度下Fe^{2+}促进ANAMMOX生物膜反应器脱氮 …… 郑旭文, 秦嘉富, 汪晓军, 陈浩川, 朱梓键, 陈振国 (2047)
污水管道增强通风作用下氧气气液传质特性 …… 杨洲, 张志强, 杨静, 卢金锁 (2055)
长江经济带工业区土壤重金属污染特征与评价 …… 张义, 周心劝, 曾晓敏, 冯娇, 刘玉荣 (2062)
中国北方典型设施菜地土壤稀土元素分布特征及环境意义 …… 王祖伟, 刘雅明, 王子璐, 苗钰婷 (2071)
贵州省典型铅锌矿区潜在有毒元素(PTEs)物源甄别、生态风险评价及控制因素 …… 张富贵, 彭敏, 贺灵, 马宏宏 (2081)
地质高背景与污染叠加区不同土地利用方式下土壤重金属分布特征 …… 王雪雯, 刘鸿雁, 顾小凤, 涂宇, 于恩江, 吴攀 (2094)
矿区周边农田土壤重金属分布特征及污染评价 …… 王海洋, 韩玲, 谢丹妮, 胡慧娟, 刘志恒, 王祯 (2104)
农田-泥炭藓系统重金属富集特征与生态风险评价 …… 朱迪, 张朝晖, 王智慧 (2115)
安顺市土壤pH空间变异及影响因素分析 …… 陈清霞, 陆晓辉, 涂成龙 (2124)
方解石基组配钝化剂与低积累玉米协同修复效果 …… 任超, 任彧仲, 李竞天, 王浩, 朱利文, 肖建辉, 赵瑞, 杜倩倩 (2133)
伯克氏菌Y4对水稻幼苗镉损伤和镉吸收的影响 …… 张雅荟, 刘月敏, 王常荣, 刘雅萍, 庞杰, 黄永春, 刘仲齐, 张长波 (2142)
我国长江中下游平原典型稻田含碳温室气体通量变化特性 …… 刘硕, 甄晓杰, 刘钢, 冯兆忠 (2151)
地膜覆盖和生物炭添加对菜地N_2O排放的影响 …… 胡剑, 江长胜, 陈鑫童, 熊艳芳, 郝庆菊 (2163)
氮肥运筹对稻田CH_4和N_2O排放的影响 …… 郑梅群, 刘娟, 姜培坤, 吴家森, 李永夫, 李松昊 (2171)
松花江下游滨岸带典型植被根际土壤细菌群落结构与功能多样性 …… 王露莹, 孙慧珍, 杨雪 (2182)
棉秆还田对咸水滴灌棉田土壤酶活性和细菌群落结构多样性的影响…… 周永学, 陈静, 李远, 侯振安, 闵伟 (2192)
pH对水稻土全程氨氧化细菌丰度和群落结构组成影响 …… 马瑞, 赵永鹏, 王智慧, 蒋先军 (2204)
生物炭对紫色土坡耕地侵蚀性耕层土壤有机碳的影响 …… 张健乐, 曾小英, 史东梅, 倪书辉, 夏蕊, 王荣浩 (2209)
有机肥替代化肥对旱地黄壤有机碳矿化及活性有机碳的影响 … 林仕芳, 王小利, 段建军, 皮义均, 郭琴波, 龙大勇, 徐彬, 杨宏伟 (2219)
九龙江河口潮滩湿地土壤有机碳储量、活性组分及稳定性沿淹水梯度的分布特征 …… 黄小清, 仝川, 罗敏, 杨洋, 谭凤凤, 潘哲妍, 刘娜, 陈欣, 黄佳芳 (2226)
碳中和战略下煤矿区生态碳汇体系构建及功能提升展望 …… 刘祥宏, 阎永军, 刘伟, 黄占斌 (2237)
《环境科学》征订启事(1929) 《环境科学》征稿简则(1975) 信息(1996, 2029, 2080)

Eco-Environmental Knowledge Web

环 境 科 学
Environmental Science

第43卷第4期 2022年4月
Vol.43,No.4 Apr.,2022

碳中和战略下煤矿区生态碳汇体系构建及功能提升展望

刘祥宏[1,2,3], 阎永军[4], 刘伟[5], 黄占斌[6]*

(1. 中煤科工集团北京土地整治与生态修复科技研究院有限公司, 北京 100013; 2. 煤炭科学研究总院, 北京 100013; 3. 煤炭行业矿区土地整治与生态修复工程研究中心, 北京 100013; 4. 中国电建集团北京勘测设计研究院有限公司, 北京 100024; 5. 国家林业和草原局中南调查规划设计院, 长沙 410014; 6. 中国矿业大学(北京)化学与环境工程学院, 北京 100083)

摘要: 煤炭资源开发引起矿区生态碳汇总量的降低,在碳中和战略下探索煤矿区生态碳汇提升技术和模式具有重大意义. 通过研究构建了包括管理模式与技术方法两个层次,土壤碳汇、植被碳汇和湿地碳汇这 3 个主要类别,矿区生态碳汇规划、碳汇监测调查、碳汇功能提升和碳汇损失防控等多项技术内容的煤矿区生态碳汇体系框架,明确了煤矿区的主要生态碳汇类型(以土壤碳汇和植被碳汇为主,其中高潜水位采煤沉陷区会涉及湿地碳汇)及生态碳汇损失形式(包括煤炭开采活动损失、生态植被建植过程损失和长期条件下生态稳定风险损失等),并针对土壤碳汇和植被碳汇提出煤矿区生态碳汇功能提升方法和碳汇损失防控措施. 结果可为煤矿区生态碳汇方面的科学研究与工程建设提供参考.

关键词:生态碳汇; 碳汇体系; 碳汇提升; 碳汇损失; 煤矿区

中图分类号: X171.1 **文献标识码**: A **文章编号**: 0250-3301(2022)04-2237-14 **DOI**: 10.13227/j.hjkx.202108170

System Construction and the Function Improvement of Ecological Carbon Sink in Coal Mining Areas Under the Carbon Neutral Strategy

LIU Xiang-hong[1,2,3], YAN Yong-jun[4], LIU Wei[5], HUANG Zhan-bin[6]*

(1. Beijing Research Institute of Land Renovation and Ecological Restoration Technology Co., Ltd., China Coal Technology and Engineering Group, Beijing 100013, China; 2. China Coal Research Institute, Beijing 100013, China; 3. Research Center of Land Renovation and Ecological Restoration Engineering in the Coal Industry, Beijing 100013, China; 4. Power China Beijing Engineering Corporation Limited, Beijing 100024, China; 5. Central South Inventory and Planning Institute of National Forestry and Grassland Administration, Changsha 410014, China; 6. School of Chemical and Environmental Engineering, China University of Mining and Technology-Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: The loss of ecological carbon sinks often occurs in the process of coal resource development. Under the carbon neutral strategy, it is of great significance to explore technologies and models for improving ecological carbon sinks in coal mining areas. This study firstly addressed the system construction framework of the ecological carbon sink in coal mining areas, which included two levels of management mode and technical methods; three main categories of soil carbon sink, vegetation carbon sink, and wetland carbon sink; and several technical contents such as ecological carbon sink planning, carbon sink monitoring and investigation, carbon sink function improvement, and carbon sink loss prevention. The study analyzed the main types of ecological carbon sink (mainly involving soil carbon sinks and vegetation carbon sinks, whereas wetland carbon sinks were mainly related to coal mining subsidence areas with high groundwater level) and circumstances of carbon sink losses (including coal mining activities, the process of ecological vegetation construction, and ecological stability risk under long-term conditions) and proposed methods to improve ecological carbon sinks and prevent carbon sink losses for soil carbon sinks and vegetation carbon sinks in coal mining areas. The results can provide technical reference for the scientific research and engineering construction of ecological carbon sinks in coal mining areas.

Key words: ecological carbon sink; carbon sink system; function improvement of carbon sink; loss of carbon sink; coal mining area

2020 年我国提出 CO_2 排放量力争 2030 年前达到峰值,力争 2060 年前实现碳中和的发展战略; 中央经济工作会议更是将“做好碳达峰、碳中和工作”列为 2021 年的重点任务之一. 各级政府部门和各行各业均在结合自身特点,深入开展碳达峰、碳中和战略影响和支持方略的深入研究探讨. 如期实现碳达峰、碳中和目标,一个重要方面在于提升生态碳汇能力,有效发挥森林、草原、湿地、海洋、土壤和冻土的固碳作用,提升生态系统碳汇增量[1].

煤矿区的开采活动会对矿区碳汇产生重要影响,主要包括开采过程中煤层气泄漏碳损失、煤矸石等含碳废物自燃造成的碳损失以及土地损毁造成土壤和植被碳汇损失等[2~4]. 其中,煤层气(主要为 CH_4)在不同开采深度下的排放因子有所不同[5],开采深度大于 400 m 时其排放因子可达 25 $m^3 \cdot t^{-1}$[6],且煤层气泄漏引起的碳损失甚至在煤矿停止开采后依然存在[5]. 煤矸石中有机质的含量变异性较大,含量较高的可达 20% 以上[7,8],而煤矸石自燃也成为矿区的主要碳损失形式之一[9]. 矿区内植被和土壤等主要碳汇要素受矿业开采活动影响后,其碳汇能力往往会被大幅削弱[10~13]. 黄翌等[10]针对大同

收稿日期: 2021-08-16; **修订日期**: 2021-09-20

基金项目: 中国煤炭科工集团有限公司科技创新创业资金专项项目(2020-2-CXY001, 2019-2-ZD005, 2019-2-ZD004); 国家重点研发计划项目(2020YFC1806504)

作者简介: 刘祥宏(1985~),男,博士,高级工程师,主要研究方向为矿区生态修复,E-mail:xicheng516@126.com

* 通信作者,E-mail:zbhuang2003@163.com

矿区忻州窑煤矿研究显示,煤矿开采导致植被净初级生产力(NPP)损失量为4 613.66 t,土壤有机碳增加1 641.17 t,植被-土壤系统碳汇量减少6 166.40 t;侯湖平等[11]针对徐州垞城矿不同土地覆盖类型下植被碳密度分析显示,林地碳密度降低了 53.52 $g\cdot m^{-2}$,耕地的碳密度降低 43.91 $g\cdot m^{-2}$,水域用地碳密度降低 81.44 $g\cdot m^{-2}$. 这种碳汇负面影响与矿区开采活动和土地利用强度紧密相关,而土地利用强度因素对碳排放一般表现为促进作用,如张苗等[14]的研究显示土地利用强度每提高 1% 水平碳排放总量将提高 0.21%,侯湖平等[11]针对矿区的研究显示,矿区碳储量年平均值的变化量与采矿生产能力呈高度负相关. 退化土壤上进行植被恢复后,植被和土壤的碳储量一般均有所提高,但恢复的速度与土壤退化程度有关[15]. 在遭受开采活动损害的煤矿区开展矿业用地整治和林草植被建植等生态建设工作,既符合绿色矿山建设要求,也是矿业企业抵消生产碳排放量[16]和赢得更大发展空间以及积极参与国际气候变化应对和国家碳汇减排战略的重要行动内容,是我国实现碳达峰、碳中和目标的重要技术措施之一.

在国家美丽中国、绿色矿山建设战略,以及“绿水青山就是金山银山”、“山水林田湖草生命共同体”等生态文明理念的引领下,我国矿区生态环境建设领域形成了预治理、土体重构和喷播复绿等主要矿区生态恢复技术方法,部分研究针对土地复垦和生态修复后的土地进行了碳汇储量和碳汇变化等研究,同时有一些矿区和矿业企业开展了碳汇林建设. 但整体上看,当前煤炭行业的发展、规划和战略导向,在标准规范、治理能力和技术研发等诸多方面与国家碳中和战略的愿景目标存在很大差距[17],而煤矿区生态碳汇方面则存在未能深入研究生态碳汇的相关规划、功能体系和建设方略(特别是对全周期的矿区生态碳汇构建研究不足),缺乏对煤矿区重建生态系统的固碳机制和限制性因素等方面系统探索,对碳成本和碳泄漏等碳汇损失问题没有引起足够重视等问题. 现有矿区生态碳汇技术方法不能全面反映和充分发挥矿区整体的碳汇功能,对矿区生态碳汇提升的指导有限,而矿区生态碳汇功能提升以及配套的碳汇损失防控技术研究的不充分和成果不足现状,不利于矿区生态修复工作深度融入矿区碳达峰、碳中和行动. 在此情况下,积极开展符合煤矿区特点生态碳汇体系构建以及矿区生态碳汇提升和碳汇损失防控技术、模式专题研究,有助于深入推进矿区碳汇工程和切实实现矿业减排增汇,并可为同类企业和项目提供可借鉴的模式经验,具有重要的现实意义.

1 煤矿区生态碳汇体系构建

1.1 生态碳汇体系概况

生态碳汇一般指森林、草原、湿地、海洋、土壤和冻土等所发挥的固碳作用,但以上功能单元间多有交叉,实际上生态碳汇总体可分为陆地碳汇和海洋碳汇两大类,或植被、土壤和水体这 3 大类(图 1). 生态碳汇相关研究更多关注陆地上林地、草地、湿地和耕地这 4 大类的碳汇变化情况,如方精云等[18]开展的中国陆地生态系统固碳效应研究,针对森林、灌丛、草地和农田生态系统的固碳现状、速率和潜力进行了评估.

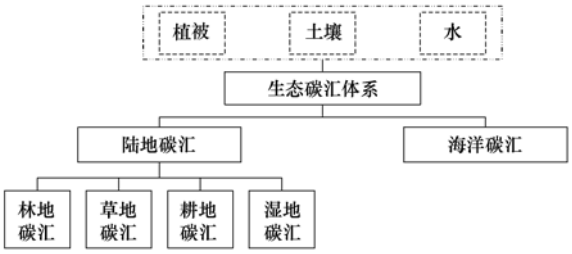


图 1 常规生态碳汇体系示意

Fig. 1 Conventional ecological carbon sink system

根据文献[19],林业碳汇主要包括地上生物量、地下生物量、枯落物、枯死木和土壤有机质碳库. 其中,植物可以通过光合作用吸收 CO_2 合成有机物并释放出氧气,从而起到减少空气中的 CO_2 的作用. 为此,林地和草原上的乔灌草植物在生态碳汇中发挥着重要作用. 植物碳汇方面已开展不同造林方式、不同林龄和不同管理措施等条件下的植物生物量(地上和地下)方面的研究[20,21]; 造林和人工林生长可吸收并固定 CO_2,其“幼龄效应”使得全球中、高纬度新造林的 CO_2 吸收超过天然林[22],这使得其成为生态保护修复和林业可持续发展并举的一个重要措施.

陆地土壤是地球表面最大的碳库,有研究表明全球土壤碳库达到 $2.2\times10^3\sim3\times10^3$ Pg,为植被碳库的 2~3 倍,是全球大气碳库的 2 倍[23,24]. 当前的相关研究主要关注自然状态下或人为扰动后(生态治理或农田经营)土壤碳密度、碳储量、土壤呼吸和土壤碳组分等性状的变化. 土壤碳库的构成影响其累积和分解,并直接影响全球陆地生态系统碳平衡,同时也影响土壤质量变化[25]. 人为增加土壤碳汇是应对全球气候变化的一种有效措施,而有机碳输入具有重要作用; 土壤有机碳作为一种活跃的碳库,其与周围环境发生的干湿交替和冻融转换等相互作用将影响其稳定性[26].

湿地也是地球表层系统中的重要碳汇之一，湿地生态系统土壤碳储量约 450 Pg，占全球土壤总储量的 1/3[27]，其不仅通过湿地植物和湿地水域微生物等的光合作用实现固碳，还存在大量未被分解的有机物质（如泥炭等）. 湿地碳汇实际由湿地基质碳汇、湿地植物碳汇和湿地水体碳汇这 3 个部分组成. 湿地碳汇研究方面和土壤碳汇类似，主要开展不同类型湿地条件下的碳汇密度和碳储量情况等研究，针对碳汇功能提升方面的研究不多.

1.2　煤矿区生态碳汇体系框架

煤矿区在煤炭开采过程中会出现表层剥离、沉陷以及煤矸石和剥离土石压占等工程剧烈扰动，造成地表土壤结构和植被盖度等受到严重损害，特别是对于干旱半干旱等生态脆弱和土壤有机质含量本底值低的区域而言，这种不利影响更加明显；而对于高潜水位区域，采煤沉陷区的水淹引起原有林木死亡和地下水上升后的盐渍化引起植被退化等问题. 矿区生产活动对生态的负面影响将严重影响区域生态碳汇储量[28]. 有研究认为[29~31]，煤炭开采将引起沉陷区域农田植被碳库碳储量减少，煤炭开采对区域农田植被碳库储量的影响属于失碳效应；程静霞等[32]的研究显示，采煤沉陷区沉陷坡和裂缝区两种破坏地表的土壤有机碳含量均降低，10 ~ 30 cm 的土壤剖面层有机碳含量降低最明显.

煤矿区土地复垦和植被恢复后可以增加矿区的碳汇储量[33~37]. 张黎明等[38]的研究通过建立碳减排效果测度模型评估了淮北矿区不同用地类型间转换下土地复垦碳减排效果，认为优先将草地、耕地和废弃地等复垦为林地可有效增强碳减排效果，其中废弃地复垦为耕地和林地的碳减排效果最显著. 一般随着煤矿废弃地修复年限的增加，植被碳汇量随着植物生长累积逐渐增加，而土壤有机碳也可得到显著提升[12,39~41]，张菁[42]的研究显示露天煤矿复垦 20 a 苜蓿地 0 ~ 10 cm 土层溶解性有机碳的芳香化和腐殖化程度较高，表现了表层底层有更强的固碳能力；而李俊超等[43]针对内蒙古黑岱沟露天煤矿排土场边坡土壤碳储量变化的研究显示，经 15 a 植被重建后露天煤矿排土场边坡虽然表现出巨大的固碳能力，但碳汇储量也仅为原地貌水平的 1/2 ~3/5，仍有较大的土壤碳汇提升空间. 有机肥施用或有机肥和无机肥配施处理一般是矿区复垦土壤培肥地力，提高土壤碳截存的最佳措施[44~51]，樊晓东等[52]的研究显示一定的施氮量下煤基复混肥对复垦土壤有机碳和碳库管理指数提升效果最好. 付梅臣等[53]的研究认为煤矿区应将土地复垦和碳储存管理相结合，采取植被光合作用增汇、土壤有机碳提高增汇、土地利用方式改变增汇和土地利用结构优化增汇等增汇措施.

充分认识煤矿区的碳储变化、碳汇增加的途径和效率，并由矿区碳达峰、碳中和战略总体规划角度出发，以生态碳汇体系框架为基础，积极构建煤矿区生态碳汇功能体系框架，可为矿区生态碳汇专项技术研究、标准体系构建和工程建设实施等工作提供指导. 初步提出构建的煤矿区生态碳汇体系框架如图 2 所示. 具体的：① 煤矿区的生态碳汇工作，需要在管理模式和技术方法两个层面开展，形成联动效应；② 煤矿区的生态碳汇工作，需要充分考虑土壤、植被和湿地水域 3 大生态碳汇主体，其中不同区域矿区湿地水域面积的差异较大，对于高潜水位采煤沉陷区可单独考虑湿地碳汇，而对于干旱矿区而言则可适当忽略湿地碳汇（或将其分解为湿生植物碳汇和湿地底泥基质碳汇，并分别计入矿区植物碳汇和土壤碳汇）. ③ 矿区生态碳汇技术方面，生态碳汇专项规划具有统领和总筹作用，是矿区生态碳汇研究和工程实施的前提；碳汇计量方法、碳汇调查监测和碳汇效应评估是碳汇功能提升和碳汇损失防控研究与碳汇市场交易的重要基础，该部分内容主要参考已经出台的文献[54]等技术标准以及文献[19,55,56]等碳汇计量方法学文件，以确保矿区生态碳汇工作的系统性；碳汇功能提升和碳汇损

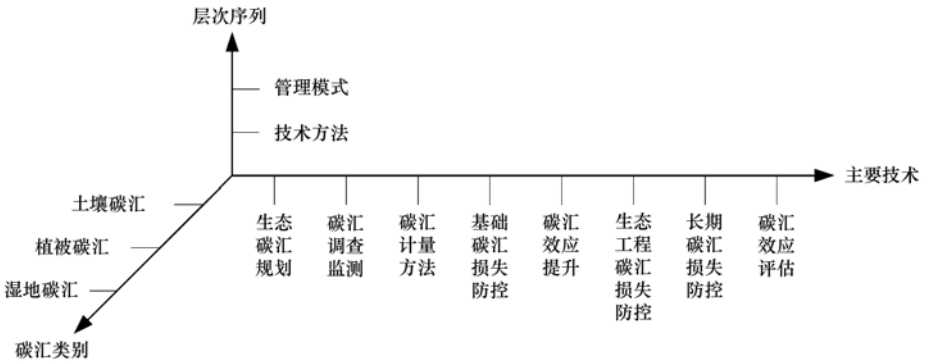


图 2　矿区生态碳汇体系框架

Fig. 2　Framework diagram of ecological carbon sink system in mining area

失防控作为最核心的两大技术内容,应引起重点关注,特别是碳汇损失方面,需要统筹处理煤炭开采过程引起的矿区基础碳汇损失、矿区生态恢复过程引起的附加损失和矿区生态恢复后的长期损失风险.

2 煤矿区生态碳汇功能提升

对于低土壤有机碳含量和低植被盖度下的受损煤矿区而言,其未来生态碳汇提升的潜力更加巨大[12,50],甚至一些经过较长时间复垦的矿区土地仍不能达到矿区原有地貌水平,仍具有较大提升空间[43]. 当前,针对生态碳汇功能提升仍以植树造林(碳汇林建设)增加植被碳汇为主导,专项提升技术缺乏,且未形成相应的完善技术体系,不利于矿区综合减排降碳行动的深入推进. 为此,应在矿区生态碳汇体系框架基础上,分层和分类开展碳汇功能提升关键技术研发,采用高效和新型的技术方法来充分挖掘矿区的生态碳汇潜能,并着力提升土壤和植被碳汇储量的稳定性.

煤矿区生态碳汇提升的重点方向如图 3 所示. 矿区土壤碳汇功能提升,从碳组分角度出发主要包括总碳含量提升、有机碳汇提升、稳定有机碳汇提升这 3 个层次,提升方法可分为土壤处理技术和植物处理技术两方面. 矿区植被碳汇的计量主体是植物体的地上、地下生物量和地表枯落物量,因而矿区植被碳汇功能的提升,主要是采取多种措施充分挖掘矿区植被的生物量潜力,显著提高矿区生态植被的地上、地下生物量和地表枯落物量.

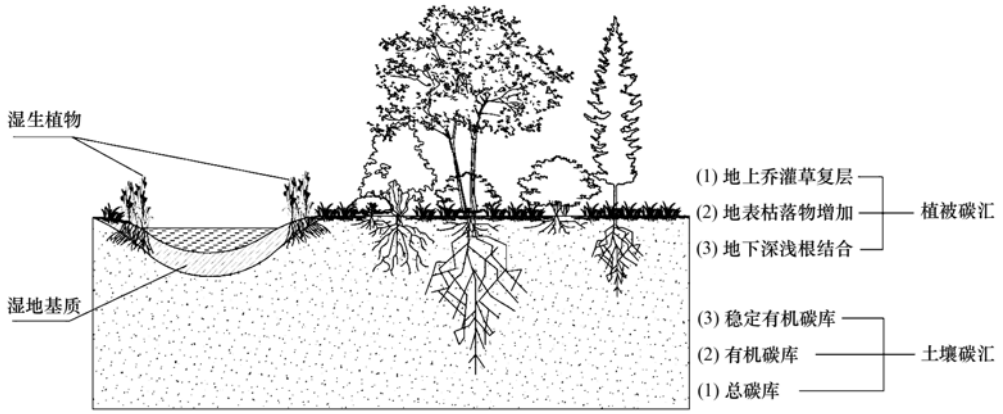


图 3 煤矿区生态碳汇提升示意

Fig. 3 Schematic diagram of ecological carbon sink improvement in coal mining areas

2.1 煤矿区土壤碳汇功能提升

土壤碳汇功能提升 3 个层次中,土壤总碳库提升需要建立在现有碳汇保存的基础上,通过控制煤炭开采地表扰动等措施减缓矿区土壤中已有无机和有机碳的矿化排放; 同时采取进一步添加有机和无机碳材料方式,实现总体有机碳汇量的快速和显著提升. 土壤有机碳汇提升主要是通过施用有机物料实现(包括秸秆、农家肥、有机肥、泥炭和蚯蚓粪等),且有机物料施用是土壤结构改良、肥力可持续提升的重要措施[46,49]. 有机物料的材料种类、施用方式也会影响有机碳的增加效果,如原岑[45]的研究发现,秸秆还田能显著提高土壤有机碳含量且粉碎秸杆还田方式较整秸秆覆盖更有利于土壤有机碳的积累.

土壤稳定有机碳汇提升是针对矿区土壤所施用有机材料存在逐步矿化损失问题而来,每年进入土壤的部分有机碳会以 CO_2 形式释放[57]. Paul 等[58]的研究显示造林 5 a 内每年 0 ~ 10 cm 层土壤碳将比初始土壤碳量减少约 3.46%, 0 ~ 30 cm 层减少约 0.63%; 而谢钧宇等[49]和范继香等[59]针对矿区复垦土壤不同施肥措施的试验显示,不同施肥措施对矿区复垦土壤活性有机碳含量均有一定的促进作用,但这种促进作用主要体现在活性有机碳上; 高健永等[47]的研究显示,有机无机肥配施对提高该复垦区 SOC 含量的效果最佳,但增加的有机碳首先累积在未受保护的细颗粒有机碳组分中; 高继伟[46]的研究显示,单施有机肥和有机无机肥配施处理下活性有机碳以及缓效有机碳组分含量显著提高,但惰性有机碳组分无明显变化. 张宇婕等[60]针对矸石山复垦果园地中轻、重组有机碳的研究发现,随复垦年限的增加轻组有机碳(LFOC)与总有机碳(TOC)比值呈增加趋势,重组有机碳(HFOC)与 TOC 比值呈递减趋势,显示土壤中更多的有机碳从稳定态转变为活性态.

稳定土壤有机碳库提升主要包括自身稳定有机碳材料的施用、有机材料在土壤中形成的稳定碳结构促进和含碳材料的深埋(如矿区煤矸石和残煤等废弃含碳材料的深埋[61])等技术方向. 煤矿区可用

的稳定有机碳材料主要包括风化煤等煤基材料腐殖化制备改良剂和农林有机材料炭化制备生物炭等. 其中,生物炭作为有机物质在缺氧条件下经高温裂解制备的材料,其自身惰性使得其具有碳封存效果[62,63],被认为是一种有效的固碳减排新途径[64],有研究认为应用生物炭技术每年至少可以减少人类12%的温室气体排放总量[65],把中国主要粮食作物秸秆全部转化为生物炭,可减少中国约13%的碳排放量[66]. 已开展研究显示生物炭的矿区土壤应用可提高土壤中有机碳和易氧化有机碳含量,降低土壤易氧化有机碳含量占总有机碳的比例[67],且生物炭的作用效果优于其他外源碳(堆肥、沼渣、牛粪和秸秆)[68]. 但在这些技术使用过程中,需要关注材料施用到土壤中后对土壤原有有机质的矿化过程的影响、制备过程中碳排放控制和测定的碳汇量是否能计入碳汇交易体系等问题.

Schmidt 等[69]的研究认为土壤有机质自身的化学结构本身并不能独立发挥稳定作用,外部环境和生物条件可能发挥主要作用. 土壤团聚体的形成和转化等过程与土壤固碳过程更是密不可分[70],土壤固定外源碳的能力和土壤中团聚体的组成息息相关[71]. 绝大部分的土壤有机碳贮存在团聚体内部或者团聚体间的孔隙中[70,72~74],形成团聚体结合态有机碳不易被分解矿化[75]. 一般认为,土壤团聚体稳定机制有化学稳定性、生物化学稳定性和物理稳定性这3种[71,76],其中土壤团聚体对土壤有机碳的物理保护是土壤有机碳最主要的稳定机制之一[75,77~80]. 研究显示影响土壤团聚体固碳主要因素包括土壤有机质、土壤微生物、土地利用方式[81~83]、铁铝氧化物和耕作方式等[84,85]. 实际上有机肥料和生物炭施用等措施,多具有增加团聚体继而具有提高土壤碳稳定性的作用[51,86~89],为提升煤矿区土壤的碳汇稳定性,还可针对性采取保护性耕作[90]、微量元素(Fe 或 Zn)添加[91]和腐殖酸施用[92,93]等提升土壤团聚体稳定性的方法.

另外,人工植被恢复也可增加煤矿复垦区土壤有机碳和微生物量碳等,但不同植被类型、植物种类和植被配置模式对矿区土壤碳汇功能的影响效果有一定差异[35,36,94,95]. 植被类型方面,高艺宁[36]的研究显示矿区复垦土地中灌木林地的土壤碳储量显著高于草地土壤碳储量,刘伟红[96]的研究通过比较矿区林地、草地和耕地的土壤有机碳含量,也认为林地更有利于保存和增加土壤碳含量;而李俊超等[43]的研究发现草地土壤碳汇的固碳效率要高于林地,并建议矿区边坡植被重建优先选择草地. 植物种类方面,王璐[97]的研究显示3种不同植物修复模式下土壤有机碳含量差异显著,呈现:栎树 > 火炬树 > 松树,并认为这与栎树凋落物多且易分解有关,建议作为当地矿区生态修复的优选树种;文月荣[98]的研究对比分析了香花槐、油松、新疆杨、紫穗槐、油松和柠条这6种主要的人工重建林地0 ~ 100 cm土壤有机碳的变化特征,显示紫穗槐林地土壤有机碳储量最高,是排土场治理优先推荐的植物;金永昌等[99]通过复垦土壤团聚体有机碳特征的研究认为,文冠果值得在后续复垦植被的选择中进行推广. 植被配置模式方面,关炳昌等[100]针对5种植物31个不同组合下的土壤碳库效应的研究显示,圆柏 + 文冠果 + 欧李配置模式有利于不同深度土壤有机碳固定;王芸[101]的研究显示"刺槐 × 榆树 × 臭椿"混交林复垦模式的0 ~ 100 cm范围内土壤有机碳库储量高于纯林样地;王颖哲[102]在安太堡矿区开展的研究显示"油松 × 刺槐"模式提升土壤碳库活性和质量的效果优于"刺槐 × 榆树 × 臭椿"模式以及各种纯林模式,植被恢复工作中应优先考虑. 综合可见,"乔木 + 灌木 + 草本"的矿区植被恢复模式增加土壤有机碳和活性有机碳含量较高,且能较稳定抵抗外界环境变化[94];而乔灌草复合植被群落也是植被碳汇稳定性的重要保证之一. 为此,在矿区土壤碳汇提升中,应在土壤改良材料施用基础上,紧密结合植物建植(特别是乔灌草复合植被群落建植)来实现更高效和稳定的土壤碳库建设.

2.2　煤矿区植被碳汇功能提升

植被碳汇量和植物体生物量紧密相关[38]. 赵魁[103]的研究显示煤矿塌陷复垦区的大乔木林、小乔木林、灌木丛和草地这4种生态系统均表现出碳汇功能,年净固碳量依次为:大乔木林 > 小乔木林 > 灌木丛 > 草地. 原野[104]和王怀泉[105]针对露天煤矿的研究均显示,"刺槐-油松林"的植被配置模式下碳汇量、碳固存速率远高于其他林地,反映了植被配置模式对植被碳汇有重要的影响. 一般矿区复垦为林地的,其生态碳库主要存储在植被中(而复垦为草地则主要存储在土壤中)[35];针对煤矿复垦区女贞林生态系统碳的源汇效应研究显示,相对于林下植被、枯落物而言,乔木层对碳汇的贡献率最高(占77.54%)[106]. 植被碳汇稳定方面,植硅体碳(phytolith-occluded carbon)作为一种相对稳定的碳组分,被认为是一种森林生态系统长期碳封存的途径[107];这种碳封存作用既体现在植物体本身,也会深刻影响植物体回归土壤后的土壤碳库[108~110];在传统提高植物净初级生产力措施基础上,采取硅肥或硅-磷复合肥等含硅材料施加和种植竹类等高硅植物等措施[109,111,112],均可提高陆地生态系统植硅

体碳汇潜力.

矿区植被碳汇功能提升核心在于植被生物量的增加,其主要的技术路径包括:①在考虑矿区生态承载力的基础上,优选自身生物量较大的植物(特别是高植硅体含量植物),并构建乔灌草混交、复层和深浅根搭配的乡土适生植物群落结构,充分利用植被垂直生长空间提升单位面积上的植被生物量; ②因矿区植被恢复很大程度上受到土壤环境因素的制约[36],为此应在植被种植前矿区土壤结构和养分状况治理基础上,加强矿区植被栽植后的养分、水分和生长调节等管理工作,确保实现矿区植被地上和地下部分的生长促进(以及植硅体形成); 后期适当补植补种适生和高生物量植被,提升矿区植被的单株生长速度和质量; ③对于可刈割、宜平茬管理的植物,考虑通过提升处理后植物体的有机碳保存时间方式,来增强矿区总体的植被碳汇量(如表层炭化处理、整体炭化处理、粉碎压制成木炭等方式); ④对植被枯落物和枯死木等采取原位留存的方式进行保存,减少区域碳汇总量的迁移.

3 煤矿区生态碳汇损失防控

当前,林业碳汇项目固碳结果的有效性要求将项目实施产生的碳成本和碳泄漏等温室气体排放扣除,以体现林业碳汇项目的净固碳能力[113,114]. 其中,林业碳汇项目的碳成本包括营造林活动中的清理整地、定植、施肥、抚育和管护等措施,以及所需物资在生产和运输过程产生温室气体排放; 碳泄漏是指由造林或再造林项目活动引起的和项目边界之外可测量的温室气体源排放的增加[115]. 如刘博杰等[116,117]针对天然林保护工程和退耕还林工程分别进行了营造林过程工程边界内碳排放和边界外碳泄漏的计量研究,认为肥料引起的碳排放是各区域最大的物资碳成本. 另外,碳汇损失还有一种被叫做碳汇非持久性风险,是指造林或再造林活动建立的森林植被所吸存的 CO_2 会因采伐、毁林、病虫害、气象灾害和地质灾害等人为或自然的原因而再次释放进入大气,导致造林或再造林活动碳汇效益发生逆转的现象[118]. 实际上林业碳汇计量含有枯落物和枯死木两大部分,因此矿区植被死亡后的短期内可计量的碳汇量变化不大; 但从长期来看,植被生物量增长过程会被死亡打断而引起增量停止,而死亡植株的地上和地下部分也将进入矿化分解过程,产生 CO_2 排放,进而形成实质性的碳汇损失.

因碳泄漏、碳成本以及碳汇非持久性风险引起的碳汇损失将严重影响矿区生态碳汇工作成效,造成矿区碳汇工程可计量碳汇价值损失[116,117,119]. 为此,矿区生态碳汇工作需要在关注碳汇功能提升的同时,精准识别碳汇损失风险,研究形成针对性的防控技术或管理体系,规避不利因素和消除碳损失风险.

矿区生态碳汇损失总体可分为 3 大类型:①开采活动引起的损失; ②生态植被建植过程的损失; ③长期条件下的生态稳定风险损失. 具体的,煤矿区的资源开采往往引起矿区的生态退化,带来矿区生态植被的碳吸收能力的下降、土壤固存碳汇被释放和土壤侵蚀迁移等碳汇损失问题,使得原有生态碳汇转变为碳源,降低矿区生态碳汇功能价值; 矿区生态碳汇构建过程中,存在地表扰动引起的内部泄漏和矿区生态碳汇建设的材料供应引入的外延泄漏风险,还有生态植被建植成活率、群落结构稳定性、土壤质量退化和水土流失等不稳定因素; 长期条件下的碳汇损失主要包括矿区植被因病虫害、鼠兔害、火灾和水灾等引起植被枯死,矿区土壤污染发生后的治理投入[53] 以及矿区煤矸石、残煤自燃和氧化引起的碳排放[9,12,53]等.

开采活动引起的碳汇损失防控,需在煤炭资源开采环节加强充填开采和保水开采等减损开采技术应用,采取矿区合理规划减少扰动,及时治理地裂缝,表土剥离回用[53] 以及增加临时性防护措施等; 其余两大碳汇损失类型均应在矿区生态修复过程中,关注矿区生态碳汇构建中的碳汇损失风险,针对生态碳汇功能构建和运营维护两大过程,细致探寻碳汇损失风险点,为精准开展防控措施研究和制定防控方案提供基础; 从技术方法创新和管理手段改进两方面出发,开展碳汇损失防控技术和管理方法研究并形成专项防控措施,确保矿区生态碳汇功能的稳定和可持续,努力实现矿区生态碳汇功能的最大化.

3.1 矿区土壤碳汇损失及防控

如图 4 所示,煤矿区土壤碳汇泄漏的主要风险点是矿区土壤有机碳的自然矿化分解,土壤侵蚀带来的碳迁移,部分集中堆存的残煤和煤矸石自燃以及远期土壤污染修复工程投入等. 其中,水土流失作为矿区的主要生态问题之一,其土壤侵蚀过程会造成土壤有机碳流失,增大侵蚀区土壤有机碳的矿化速率[120,121]; 渠俊峰等[122] 的研究发现由于重力作用和地表径流等影响,坡面区土壤样本测试有机碳含量中显示低于对照的平整田块,土壤有机碳流失非常显著. 针对矿区土壤碳汇损失的主要应对措施包括:①提升矿区土壤改良的碳汇效应,在增加有机材料施用的前提下,适当增加惰性和缓释土壤改良材料的应用,构建良好的土壤团聚体结构和有机无

机复合体结构，促进矿区土壤自身结构、土壤养分和土壤碳汇等功能的稳定性. ②在矿区地貌重塑和平整土地的过程中，采取坡面水平阶、截排水沟、鱼鳞坑、沟道谷坊和淤地坝等水土保持工程措施，防治土壤侵蚀，促进生态植被生长，及早产生良好的水土保持效应[122]，并加强后期水土保持措施的管护，避免土壤侵蚀产生的直接碳汇移出以及影响植物生长造成的次级碳汇损失. ③采用综合措施加强矿区残余煤炭和矸石山自燃的防治工作，规避自燃引起的地表和地表浅层土壤碳库中的碳排放. 此方面主要可通过煤基固废直接分散用作土壤改良剂和炭化处理后土壤应用等方式，强化煤基固废的高效土壤改良应用，其中煤基固废炭化处理后，可形成生物炭和活性炭类的新材料，增加煤基固废中碳的稳定性，进而实现更加稳定的储藏和更加有效的土壤改良作用. ④前期做好矿区土壤污染风险评估，需治理的早期治理，减少具有污染风险的土壤改良剂、植物生长调节剂和农药的使用，避免后期新增矿区土壤污染修复工程带来新的工程性投入和碳汇泄漏.

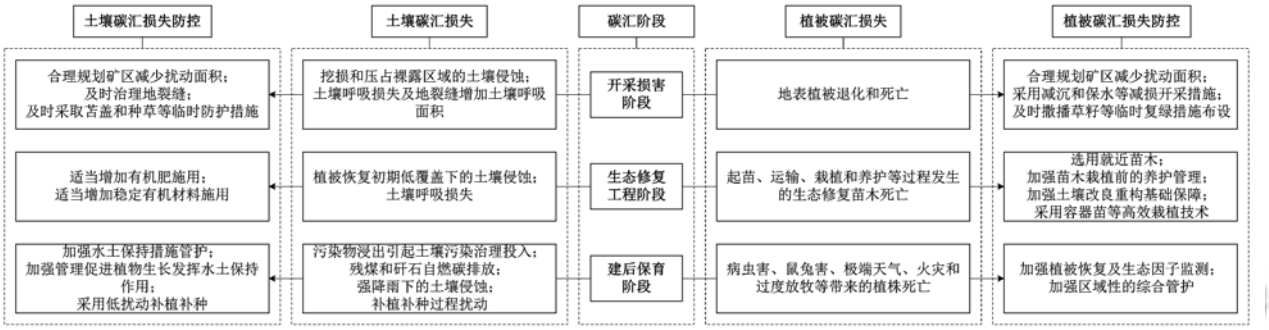


图 4　煤矿区生态碳汇损失与防控系统

Fig. 4　Ecological carbon sink loss and its prevention methods in coal mining area

另外，少耕、免耕、作物留茬和秸秆还田等保护性耕作可促进土壤碳固定. 石小霞等[123]通过研究 4 种处理方式下的土壤碳状况发现，秸秆还田是恢复农田耕作引起土壤碳库储存下降的有效措施；王明明[124]的研究显示秸秆覆盖对有机碳的改善效果优于免耕，秸秆覆盖和免耕同时使用对有机碳的固定效果优于单独使用；李景等[90]开展的 15 a 长期研究证实保护性耕作措施可提高黄土坡耕地区土壤和团聚体有机碳储量. 为此，对于煤矿区复垦为农田的区域，倡导采用保护性耕作措施实现碳泄漏的防控. 其中，农田经营管理中免耕措施可通过减少对土壤团聚体的破坏带来的有机碳损失[125]，来提高农田土壤固碳量，减少大气温室气体排放[126,127]，呈现更好的碳汇效应. 借鉴农业农田碳排放和碳汇研究经验，矿区土地治理和生态复绿后的管护过程要强调低扰动[41]，这需要在前期治理工程中提升土壤改良和植被恢复工程的效率和质量，确保苗木高成活率和高覆盖度，同时应注意减少后期补播和补种工程的深层土壤扰动影响.

3.2　矿区植被碳汇损失及防控

煤矿区生态修复工程本身，可通过种植植物以及植物地上和地下生物量的增长，而在修复区域产生植被碳汇的提升效果. 但因生态修复工程的实施过程，将涉及到苗木、肥料、水和机械等物资以及油料和电力等能源[53]的初始投入，这些构成了植被碳汇计量中不可忽视的碳成本，生态碳汇计量中需要减掉如种植苗木自身的碳汇量、运输的碳汇量、肥料改良剂碳汇量和工程施工碳汇量等碳成本. 基于矿区土壤养分和水分条件恶劣，特别是西部干旱半干旱区域，除了生态修复建成区域的可见碳成本外，实际还有因矿区条件恶劣和方法不当等原因而产生的植被碳汇损失.

植被碳汇损失可出现在生态修复工程的植被建设过程和建植后的养护过程. 其中，①植被建设过程中的碳泄漏主要是因矿区条件恶劣、苗木起苗和运输管护不到位以及反季节栽植等造成的栽植苗木和种植草本植物的早期枯死；②生态植被养护过程中的碳泄漏主要是由火灾、病虫害、鼠兔害、极端天气和过度放牧等带来的植被退化、植株死亡.

针对植被建设过程中的碳损失，其应对策略关键是提升复绿植物苗木的成活率和避免生态修复工程的重复建设，实现生态修复工程本身的低碳化（即能量和材料消耗最小化）. 具体包括：①加强矿区植被恢复设计和施工. 矿区生态修复植被设计和建植中，应着力构建基于乡土植物资源的混交、复合和近自然的植被群落，在增加植被碳汇总量的同时提升植被系统的自身稳定性，增强其对火灾、病害、虫害和鼠兔害等不利因素的抵抗能力，降低后期养护成本；应充分考虑矿区所在区域的生态承载力，进而确定科学合理的植被种植密度，规避高密度

植被建植造成水资源等的过度消耗带来的系统性风险. ②加强矿区生态修复区域的土壤改良培肥工作. 以良好的土壤结构、肥力水平和持水供水能力,确保种植植被的成活和高质高效生长. ③按照造林绿化相关技术标准要求确保就近取苗用苗. 其中,有相关技术标准对造林的种子和苗木做出具体要求,指出“不应长距离调运苗木”[128]和“碳汇造林优选采用就地育苗或就近调苗,减少长距离运苗活动造成的碳泄漏”[54]. 对此,在矿区(特别是大型矿业基地)采用林苗一体化模式进行苗圃基地建设,其可通过近距离提供充足的适生种苗,有效避免苗木远距离运输和原生地与矿区气候差异等不利影响,提升生态脆弱区生态碳汇建设效率和效益,并实现矿区生态修复的成本节约,乃至通过本矿区苗木外销实现经营创收和矿区生态碳汇功能的延伸. ④强化建植过程的碳汇损失风险管理. 生态碳汇项目一般考虑周期 20 a,为此建议采取非乡土植物和反季节栽植植物不计量碳汇等强制化的管理措施,来规避因生态植被建植不稳定风险带来的碳汇损失.

针对生态植被养护过程中的碳汇损失,其对策主要包括:①加强管护和灾害监测,建立相应的灾害预警与早期应对处理措施体系,进而确保不发生大规模的病、虫、鼠、兔灾害和火灾,规避极端恶劣天气的不利影响,提升矿区碳汇植被的生态稳定性,促进正向演替;②应建立矿区生态修复工程死亡植株的就地留置或就地粉碎还田制度,实现碳泄漏损失的迟滞,避免矿区总体碳汇量的剧烈波动.

4 结论与展望

在对生态碳汇技术以及煤炭行业碳汇和碳减排方面的研究成果进行系统研究的基础上,针对煤矿区生态碳汇建设面临的体系不完备和专项技术缺失问题,初步构建了煤矿区生态碳汇体系框架,为进一步的深入研究提供方向引导;同时针对碳汇功能提升和碳汇损失防控两大方面,分层次和分阶段地进行了专项技术方法总结和探讨,可为矿区生态碳汇效应的提升工作提供相关指导.

为了更好地推进矿区碳达峰、碳中和工作,矿区生态碳汇领域需在加大土壤团聚体固碳和土壤活性有机碳转化等深层次固碳机制研究的同时,及早构建科学和完善的矿区特色的生态碳汇体系,并进一步加大高效、经济和稳定的矿区生态碳汇提升与碳汇损失防控技术研究,具体方向包括以下 4 个方面.

(1) 开展全生命周期的煤矿区生态碳汇技术体系构建,捋清矿区过程性和全局性的生态碳汇输入与输出量,有效评估碳汇功能效果,精准掌握生态治理工程实施后的生态碳汇功能效应和矿区总碳储量的变化过程,构建形成“种碳→收碳→固碳→用碳”的矿区生态碳汇体系.

(2) 确保技术方法符合碳汇计量要求. 生态领域的一些新兴碳汇提升技术(如生物炭应用等),需要与碳汇计量方法等最新政策和要求进行衔接,在做好技术储备的同时,积极推动将新技术方法下的碳汇提升量全部纳入到可计量和可认定的碳汇中.

(3) 明确生态碳汇和常规能源碳汇的接口. 在区域总体碳汇功能提升规划基础上,选定适宜的区域和总体面积进行生态碳汇功能提升建设;同时做好生态建设区域内常规能源碳汇(如光伏和风电)的协同,部分抵消生态碳汇的不稳定性,有效提升单位面积内的稳定碳汇效能.

(4) 以自然恢复修复措施为基准,对比评估仿自然和低碳化的矿区生态治理模式,与重人工和大投入模式的综合碳汇效应差异. 在全生命周期理念下,研究确定碳汇提升效应更加显著的模式,进一步平衡确定矿区人工修复和自然修复的技术选择与区域划分.

参考文献:

[1] 张守攻. 提升生态碳汇能力[N]. 人民日报, 2021-06-10(13).

[2] 张媛. 煤炭开采对矿区生态系统的碳排放效应研究[D]. 晋中: 山西农业大学, 2019.
Zhang Y. Study on carbon emission effect of coal mining in mining area ecosystem[D]. Jinzhong: Shanxi Agricultural University, 2019.

[3] 张振芳. 露天煤矿碳排放量核算及碳减排途径研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2013.
Zhang Z F. Study on carbon emissions accounting and carbon emission reduction approach of surface coal mine[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2013.

[4] 杨博宇, 白中科, 张笑然. 特大型露天煤矿土地损毁碳排放研究——以平朔矿区为例[J]. 中国土地科学, 2017, **31**(6): 59-69.
Yang B Y, Bai Z K, Zhang X R. Carbon emission from land damage area in large opencast coal mines: a case study of Pingshuo mining area[J]. China Land Sciences, 2017, **31**(6): 59-69.

[5] Kholod N, Evans M, Pilcher R C, *et al*. Global methane emissions from coal mining to continue growing even with declining coal production[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, **256**, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.120489.

[6] 张晓慧, 刘金平. 我国地下煤矿温室气体溢散排放研究[J]. 中国煤炭, 2011, **37**(7): 114-116.
Zhang X H, Liu J P. Study on emission of greenhouse gases from coal mines in China[J]. China Coal, 2011, **37**(7): 114-116.

[7] 田怡然, 张晓然, 刘俊峰, 等. 煤矸石作为环境材料资源化再利用研究进展[J]. 科技导报, 2020, **38**(22): 104-113.
Tian Y R, Zhang X R, Liu J F, *et al*. The coal gangue reused as environmental materials[J]. Science & Technology Review, 2020, **38**(22): 104-113.

[8] 卞正富，金丹，董霁红，等. 煤矿矸石处理与利用的合理途径探讨[J]. 采矿与安全工程学报，2007，**24**(2)：132-136.
Bian Z F，Jin D，Dong J H，*et al*. Discussion on rational ways for coal gangue treatment and utilization[J]. Journal of Mining & Safety Engineering，2007，**24**(2)：132-136.

[9] Carras J N，Day S J，Saghafi A，*et al*. Greenhouse gas emissions from low-temperature oxidation and spontaneous combustion at open-cut coal mines in Australia[J]. International Journal of Coal Geology，2009，**78**(2)：161-168.

[10] 黄翌，汪云甲，田丰，等. 煤炭开采对植被-土壤系统扰动的碳效应研究[J]. 资源科学，2014，**36**(4)：817-823.
Huang Y，Wang Y J，Tian F，*et al*. Carbon disturbance effects in the vegetation-soil system caused by coal mining[J]. Resources Science，2014，**36**(4)：817-823.

[11] 侯湖平，张绍良，丁忠义，等. 煤矿区土地利用变化对生态系统植被碳储量的影响——以徐州垞城矿为例[J]. 煤炭学报，2013，**38**(10)：1850-1855.
Hou H P，Zhang S L，Ding Z Y，*et al*. Impact on vegetation carbon storage in ecosystem from land use change in coal mine area：a case study at Chacheng Mine in Xuzhou mining area[J]. Journal of China Coal Society，2013，**38**(10)：1850-1855.

[12] 闫美芳，王璐，郝存忠，等. 煤矿废弃地生态修复的土壤有机碳效应[J]. 生态学报，2019，**39**(5)：1838-1845.
Yan M F，Wang L，Hao C Z，*et al*. Effects of ecological restoration on soil organic carbon in post-mining lands[J]. Acta Ecologica Sinica，2019，**39**(5)：1838-1845.

[13] 徐占军，冯俊芳，张媛，等. 工作面开采沉陷对农田土壤和植被碳库扰动预评价[J]. 煤炭学报，2018，**43**(9)：2605-2617.
Xu Z J，Feng J F，Zhang Y，*et al*. Pre-evaluation of disturbance of farmland soil and vegetation carbon pool by mining subsidence in coal face[J]. Journal of China Coal Society，2018，**43**(9)：2605-2617.

[14] 张苗，陈银蓉，程道平，等. 土地利用结构和强度变化对碳排放影响分析[J]. 资源开发与市场，2018，**34**(5)：624-628，675.
Zhang M，Chen Y R，Cheng D P，*et al*. Research on influences of land use structure and intensity change on carbon emissions[J]. Resource Development & Market，2018，**34**(5)：624-628，675.

[15] 彭阳，白彦锋，徐睿，等. 森林恢复定义及恢复后生态系统碳储量变化分析[J]. 世界林业研究，2016，**29**(6)：43-47.
Peng Y，Bai Y F，Xu R，*et al*. Analysis on definition of forest restoration and its ecosystem carbon storage changes[J]. World Forestry Research，2016，**29**(6)：43-47.

[16] 武琳，刘雪华，赵政委. 山西平朔煤矿造林碳汇研究[J]. 生态经济(学术版)，2010，(2)：13-17.
Wu L，Liu X H，Zhao Z W. Forestry carbon sinks of pingshuo coal mine in Shanxi province[J]. Ecological Economy，2010，(2)：13-17.

[17] 陈浮，于昊辰，卞正富，等. 碳中和愿景下煤炭行业发展的危机与应对[J]. 煤炭学报，2021，**46**(6)：1808-1820.
Chen F，Yu H C，Bian Z F，*et al*. How to handle the crisis of coal industry in China under the vision of carbon neutrality[J]. Journal of China Coal Society，2021，**46**(6)：1808-1820.

[18] 方精云，于贵瑞，任小波，等. 中国陆地生态系统固碳效应——中国科学院战略性先导科技专项“应对气候变化的碳收支认证及相关问题”之生态系统固碳任务群研究进展[J]. 中国科学院院刊，2015，**30**(6)：848-857.
Fang J Y，Yu G R，Ren X B，*et al*. Carbon sequestration in China's terrestrial ecosystems under climate change-progress on ecosystem carbon sequestration from the CAS strategic priority research program[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences，2015，**30**(6)：848-857.

[19] 国家林业局. 碳汇造林项目方法学[R]. 北京：国家林业局，2013.

[20] 马学威，熊康宁，张俞，等. 森林生态系统碳储量研究进展与展望[J]. 西北林学院学报，2019，**34**(5)：62-72.
Ma X W，Xiong K N，Zhang Y，*et al*. Research progresses and prospects of carbon storage in forest ecosystems[J]. Journal of Northwest Forestry University，2019，**34**(5)：62-72.

[21] 田惠玲，朱建华，李宸宇，等. 基于自然的解决方案：林业增汇减排路径、潜力与经济性评价[J]. 气候变化研究进展，2021，**17**(2)：195-203.
Tian H L，Zhu J H，Li C Y，*et al*. Nature-based Solution：Potential and economic benefits of carbon removal or carbon emission reduction through forestry approaches[J]. Climate Change Research，2021，**17**(2)：195-203.

[22] 黄麟. 造林气候调节效应及其影响机理研究进展[J]. 生态学报，2021，**41**(2)：469-478.
Huang L. A review on the climatic regulation effects of afforestation and its impact mechanisms[J]. Acta Ecologica Sinica，2021，**41**(2)：469-478.

[23] Schimel D S. Terrestrial ecosystems and the carbon cycle[J]. Global Change Biology，1995，**1**(1)：77-91.

[24] Post W M，Emanuel W R，Zinke P J，*et al*. Soil carbon pools and world life zones[J]. Nature，1982，**298**(5870)：156-159.

[25] 余健，房莉，卞正富，等. 土壤碳库构成研究进展[J]. 生态学报，2014，**34**(17)：4829-4838.
Yu J，Fang L，Bian Z F，*et al*. A review of the composition of soil carbon pool[J]. Acta Ecologica Sinica，2014，**34**(17)：4829-4838.

[26] 徐嘉晖，孙颖，高雷，等. 土壤有机碳稳定性影响因素的研究进展[J]. 中国生态农业学报，2018，**26**(2)：222-230.
Xu J H，Sun Y，Gao L，*et al*. A review of the factors influencing soil organic carbon stability[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture，2018，**26**(2)：222-230.

[27] 王平，盛连喜，燕红，等. 植物功能性状与湿地生态系统土壤碳汇功能[J]. 生态学报，2010，**30**(24)：6990-7000.
Wang P，Sheng L X，Yan H，*et al*. Plant functional traits influence soil carbon sequestration in wetland ecosystem[J]. Acta Ecologica Sinica，2010，**30**(24)：6990-7000.

[28] 邱文玮，侯湖平. 矿区生态破坏碳扰动研究——以徐州九里矿为例[J]. 中国矿业，2013，**22**(2)：49-52.
Qiu W W，Hou H P. Research on carbon disturbance of mine ecological damage：a case study in Xuzhou Jiuli mine[J]. China Mining Magazine，2013，**22**(2)：49-52.

[29] 侯湖平，徐占军，张绍良，等. 煤炭开采对区域农田植被碳库储量的影响评价[J]. 农业工程学报，2014，**30**(5)：1-9.
Hou H P，Xu Z J，Zhang S L，*et al*. Effect evaluation on vegetation carbon pool of region agro-ecosystem by coal mining in mining area[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering，2014，**30**(5)：1-9.

[30] 徐占军，张绍良，侯湖平. 煤炭开采对农田土壤碳储量的影响研究——以典型煤炭开采沉陷盆地为例[J]. 现代矿业，2014，**30**(7)：128-131.
Xu Z J，Zhang S L，Hou H P. Research on the effect of coal mining on carbon reserves of farmland soil：taking the typical coal mining subsidence basin as a case[J]. Modern Mining，2014，**30**(7)：128-131.

[31] 田惠文，张欣欣，毕如田，等. 煤炭开采导致的农田生态系统固碳损失评估[J]. 煤炭学报，2020，**45**(4)：1499-1509.

Tian H W, Zhang X X, Bi R T, *et al*. An assessment of the carbon sequestration loss of farmland ecosystems caused by coal mining[J]. Journal of China Coal Society, 2020, **45**(4): 1499-1509.

[32] 程静霞, 聂小军, 刘昌华. 煤炭开采沉陷区土壤有机碳空间变化[J]. 煤炭学报, 2014, **39**(12): 2495-2500.
Cheng J X, Nie X J, Liu C H. Spatial variation of soil organic carbon in coal-mining subsidence areas[J]. Journal of China Coal Society, 2014, **39**(12): 2495-2500.

[33] 焦泽珍. 土地复垦对矿区植被及土壤碳汇量的影响——以黑岱沟露天煤矿区为例[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2013.
Jiao Z Z. The influence of land reclamation on the vegetation and soil carbon sequestration in mining area—taking the case of Heidaigou opencast coal mining[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2013.

[34] Piao S L, Wang X H, Park T, *et al*. Characteristics, drivers and feedbacks of global greening[J]. Nature Reviews Earth & Environment, 2020, **1**(1): 14-27.

[35] 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.

[36] 高艺宁. 露天煤矿复垦地土壤与植被碳储量研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2016.
Gao Y N. Soil and vegetation carbon storage in reclaimed land of opencast coal mine[D]. Huhhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2016.

[37] 张召, 白中科, 贺振伟, 等. 基于RS与GIS的平朔露天矿区土地利用类型与碳汇量的动态变化[J]. 农业工程学报, 2012, **28**(3): 230-236.
Zhang Z, Bai Z K, He Z W, *et al*. Dynamic changes of land use type and carbon sinks based on RS and GIS in Pingshuo opencast coal mine[J]. Transactions of the CSAE, 2012, **28**(3): 230-236.

[38] 张黎明, 张绍良, 侯湖平, 等. 矿区土地复垦碳减排效果测度模型与实证分析[J]. 中国矿业, 2015, **24**(11): 65-70.
Zhang L M, Zhang S L, Hou H P, *et al*. Evaluation model and empirical study of carbon emission reduction effect from mining land reclamation[J]. China Mining Magazine, 2015, **24**(11): 65-70.

[39] 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.

[40] 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.

[41] 李奇超, 李新举, 闵祥宇. 高潜水位煤矿区完整复垦周期的土壤碳演变特征[J]. 水土保持学报, 2018, **32**(4): 204-209, 215.
Li Q C, Li X J, Min X Y. Soil carbon evolution under a complete reclamation cycle in a coal mine area with the high groundwater level[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2018, **32**(4): 204-209, 215.

[42] 张菁. 安太堡露天煤矿不同复垦模式土壤有机碳组分及养分、酶活性变化[D]. 晋中: 山西农业大学, 2018.
Zhang J. The effect of different reclamation mode on soil organic carbon fractions and nutrients and enzyme ctivity in Antaibao opencast coal mine[D]. Jinzhong: Shanxi Agricultural University, 2018.

[43] 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.

[44] 范继香. 不同施肥措施对矿区复垦土壤活性碳库的影响[D]. 太原: 山西大学, 2011.
Fan J X. Effects of different fertilization on mine reclamation soil labile pool carbon[D]. Taiyuan: Shanxi University, 2011.

[45] 原芳. 不同土地利用方式对土壤碳形态的影响研究[D]. 太原: 山西大学, 2013.
Yuan Q. Study on soil organic carbon fractions in different land use types[D]. Taiyuan: Shanxi University, 2013.

[46] 高继伟. 采煤塌陷区复垦土壤肥力特性及有机碳氮库对施肥的响应[D]. 晋中: 山西农业大学, 2018.
Gao J W. Response of reclaimed soil fertility properties, organic carbon and nitrogen pools to fertilization in coal mining subsidence area[D]. Jinzhong: Shanxi Agricultural University, 2018.

[47] 高健永, 刘菲, 王楚涵, 等. 采煤塌陷区复垦土壤微团聚体中有机碳组分对施肥的响应[J]. 应用与环境生物学报, 2021, **27**(4): 963-969.
Gao J Y, Liu F, Wang C H, *et al*. Response of organic carbon fractions in microaggregates of reclaimed soil in coal mining subsidence area to fertilization[J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2021, **27**(4): 963-969.

[48] 焦欢, 李廷亮, 高继伟, 等. 培肥措施对复垦土壤轻重组有机碳氮的影响[J]. 水土保持学报, 2018, **32**(5): 208-213, 221.
Jiao H, Li T L, Gao J W, *et al*. Effects of fertilization on light and heavy fractions organic nitrogen in reclaimed soil[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2018, **32**(5): 208-213, 221.

[49] 谢钧宇, 孟会生, 焦欢, 等. 施肥对复垦土壤中活性和难降解碳氮组分的影响[J]. 应用与环境生物学报, 2019, **25**(5): 1113-1121.
Xie J Y, Meng H S, Jiao H, *et al*. Effects of fertilization regimes on organic carbon and total nitrogen in labile and recalcitrant fractions of reclaimed soils[J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2019, **25**(5): 1113-1121.

[50] Li J H, Li H, Zhang Q, *et al*. Effects of fertilization and straw return methods on the soil carbon pool and CO_2 emission in a reclaimed mine spoil in Shanxi Province, China[J]. Soil and Tillage Research, 2019, **195**, doi: 10.1016/j.still.2019.104361.

[51] 孙雪, 张玉铭, 张丽娟, 等. 长期添加外源有机物料对华北农田土壤团聚体有机碳组分的影响[J]. 中国生态农业学报, 2021, **29**(8): 1384-1396.
Sun X, Zhang Y M, Zhang L J, *et al*. Effects of long-term exogenous organic material addition on the organic carbon composition of soil aggregates in farmlands of North China[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2021, **29**(8): 1384-1396.

[52] 樊晓东, 刘冰, 孟会生, 等. 不同煤基复混肥对复垦土壤有机碳及碳库管理指数的影响[J]. 灌溉排水学报, 2020, **39**(5): 75-81.
Fan X D, Liu B, Meng H S, *et al*. The effects of coal-derived compound fertilizers on soil carbon and its formations in reclaimed soil in coal mining areas[J]. Journal of Irrigation and Drainage,

2020，**39**(5)：75-81.

[53] 付梅臣，郭卫斌，李建民，等. 我国煤矿区低碳型土地复垦现状与展望[J]. 中国矿业，2015，**24**(5)：49-52.
Fu M C，Guo W B，Li J M，*et al*. Low-carbon land reclamation in China's coal mining areas：current situation and prospects[J]. China Mining Magazine，2015，**24**(5)：49-52.

[54] LY/T 2252-2014，碳汇造林技术规程[S].
LY/T 2252- 2014，Technical regulation for afforestation for carbon sequestration[S].

[55] 国家林业局. 森林经营碳汇项目方法学[R]. 北京：国家林业局，2014.

[56] 国家林业局. 竹林经营碳汇项目方法学[R]. 北京：国家林业局，2015.

[57] 张国盛，黄高宝，Yin C. 农田土壤有机碳固定潜力研究进展[J]. 生态学报，2005，**25**(2)：351-357.
Zhang G S，Huang G B，Yin C. Soil organic carbon sequestration potential in cropland[J]. Acta Ecologica Sinica，2005，**25**(2)：351-357.

[58] Paul K I，Polglase P J，Nyakuengama J G，*et al*. Change in soil carbon following afforestation [J]. Forest Ecology and Management，2002，**168**(1-3)：241-257.

[59] 范继香，郜春花，张强，等. 施肥措施对矿区复垦土壤活性有机碳库的影响[J]. 中国农学通报，2012，**28**(36)：119-123.
Fan J X，Hao C H，Zhang Q，*et al*. Effect of different fertilization treatment on soil labile organic carbon in mine reclamation[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin，2012，**28**(36)：119-123.

[60] 张宇婕，于亚军. 不同复垦年限煤矸山重构土壤有机碳及其组分差异[J]. 土壤，2019，**51**(4)：732-738.
Zhang Y J，Yu Y J. Characteristics of soil organic carbon and its components in coal waste piles reclaimed with different years[J]. Soils，2019，**51**(4)：732-738.

[61] 杨博宇，白中科. 露天煤矿区低碳土地利用途径研究[J]. 中国矿业，2019，**28**(6)：89-93.
Yang B Y，Bai Z K. Research on the low-carbon land use in opencast coal mine area[J]. China Mining Magazine，2019，**28**(6)：89-93.

[62] Fang Y，Singh B，Singh B P，*et al*. Biochar carbon stability in four contrasting soils [J]. European Journal of Soil Science，2014，**65**(1)：60-71.

[63] Singh N，Abiven S，Torn M S，*et al*. Fire-derived organic carbon in soil turns over on a centennial scale [J]. Biogeosciences，2012，**9**(8)：2847-2857.

[64] Kerré B，Hernandez-Soriano M C，Smolders E. Partitioning of carbon sources among functional pools to investigate short-term priming effects of biochar in soil：$a^{13}C$ study[J]. Science of the Total Environment，2016，**547**：30-38.

[65] Woolf D，Amonette J E，Street-Perrott F A，*et al*. Sustainable biochar to mitigate global climate change [J]. Nature Communications，2010，**1**(1)，doi：10.1038/ncomms1053.

[66] 李飞跃，汪建飞. 中国粮食作物秸秆焚烧排碳量及转化生物炭固碳量的估算[J]. 农业工程学报，2013，**29**(14)：1-7.
Li F Y，Wang J F. Estimation of carbon emission from burning and carbon sequestration from biochar producing using crop straw in China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering，2013，**29**(14)：1-7.

[67] 刘阳. 生物炭添加对矿区土壤团聚体稳定性、碳氮分布及酶活性的影响[D]. 太原：太原理工大学，2020.
Liu Y. Effect of biochar on carbon and nitrogen，biological activity，and stability of soil aggregates in post-mining areas[D]. Tanyuan：Taiyuan University of Technology，2020.

[68] 张云龙，郜春花，刘靓，等. 矿区复垦土壤碳组分对外源碳输入的响应特征[J]. 中国生态农业学报，2020，**28**(8)：1219-1229.
Zhang Y L，Gao C H，Liu L，*et al*. Response of soil organic carbon fractions to exogenous carbon input in mine reclamation [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture，2020，**28**(8)：1219-1229.

[69] Schmidt M W I，Torn M S，Abiven S，*et al*. Persistence of soil organic matter as an ecosystem property[J]. Nature，2011，**478**(7367)：49-56.

[70] 陈建国，田大伦，闫文德，等. 土壤团聚体固碳研究进展[J]. 中南林业科技大学学报，2011，**31**(5)：74-80.
Chen J G，Tian D L，Yan D W，*et al*. Progress on study of carbon sequestration in soil aggregates [J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology，2011，**31**(5)：74-80.

[71] 徐香茹，汪景宽. 土壤团聚体与有机碳稳定机制的研究进展[J]. 土壤通报，2017，**48**(6)：1523-1529.
Xu X R，Wang J K. A review on different stabilized mechanisms of soil aggregates and organic carbon[J]. Chinese Journal of Soil Science，2017，**48**(6)：1523-1529.

[72] Jastrow J D. Soil aggregate formation and the accrual of particulate and mineral-associated organic matter [J]. Soil Biology and Biochemistry，1996，**28**(4-5)：665-676.

[73] Emerson W W. A classification of soil aggregates based on their coherence in water [J]. Australian Journal of Soil Research，1967，**5**(1)：47-57.

[74] 李景，吴会军，武雪萍，等. 长期保护性耕作提高土壤大团聚体含量及团聚体有机碳的作用[J]. 植物营养与肥料学报，2015，**21**(2)：378-386.
Li J，Wu H J，Wu X P，*et al*. Impact of long-term conservation tillage on soil aggregate formation and aggregate organic carbon contents[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer，2015，**21**(2)：378-386.

[75] 陈晓侠，梁爱珍，张晓平. 土壤团聚体固碳的研究方法[J]. 应用生态学报，2012，**23**(7)：1999-2006.
Chen X X，Liang A Z，Zhang X P. Research methods of carbon sequestration by soil aggregates：a review[J]. Chinese Journal of Applied Ecology，2012，**23**(7)：1999-2006.

[76] Six J，Conant R T，Paul E A，*et al*. Stabilization mechanisms of soil organic matter：implications for C-saturation of soils [J]. Plant and Soil，2002，**241**(2)：155-176.

[77] 张延，梁爱珍，张晓平，等. 土壤团聚体对有机碳物理保护机制研究[J]. 土壤与作物，2015，**4**(2)：85-90.
Zhang Y，Liang A Z，Zhang X P，*et al*. Progress in soil aggregates physical conservation mechanism for organic carbon [J]. Soil and Crop，2015，**4**(2)：85-90.

[78] Six J，Elliott E T，Paustian K. Soil macroaggregate turnover and microaggregate formation：a mechanism for C sequestration under no-tillage agriculture[J]. Soil Biology and Biochemistry，2000，**32**(14)：2099-2103.

[79] Six J，Bossuyt H，Degryze S，*et al*. A history of research on the link between (micro) aggregates，soil biota，and soil organic matter dynamics[J]. Soil and Tillage Research，2004，**79**(1)：7-31.

[80] 张沛沛，余洋. 采煤沉陷对土壤团聚体及其有机碳的影响[J]. 金属矿山，2020，(12)：203-209.
Zhang P P，Yu Y. Effects of coal mining subsidence on soil aggregates and organic carbon[J]. Metal Mine，2020，(12)：203-209.

[81] 池丽娟. 土地利用变化对土壤及其团聚体有机碳结合态的影响[D]. 福州: 福建农林大学, 2012.
Chi L J. Effects of land use change on soil and soil aggregates in bond-organic carbon [D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2012.

[82] 罗晓虹, 王子芳, 陆畅, 等. 土地利用方式对土壤团聚体稳定性和有机碳含量的影响[J]. 环境科学, 2019, **40**(8): 3816-3824.
Luo X H, Wang Z F, Lu C, *et al*. Effects of land use type on the content and stability of organic carbon in soil aggregates[J]. Environmental Science, 2019, **40**(8): 3816-3824.

[83] 张曼夏, 季猛, 李伟, 等. 土地利用方式对土壤团聚体稳定性及其结合有机碳的影响[J]. 应用与环境生物学报, 2013, **19**(4): 598-604.
Zhang M X, Ji M, Li W, *et al*. Effect of land use patterns on soil aggregate stability and aggregate-associated organic carbon [J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2013, **19**(4): 598-604.

[84] Kodešová R, Rohošková M, Žigová A. Comparison of aggregate stability within six soil profiles under conventional tillage using various laboratory tests[J]. Biologia, 2009, **64**(3): 550-554.

[85] 刘中良, 宇万太. 土壤团聚体中有机碳研究进展[J]. 中国生态农业学报, 2011, **19**(2): 447-455.
Liu Z L, Yu W T. Review of researches on soil aggregate and soil organic carbon[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2011, **19**(2): 447-455.

[86] 徐国鑫, 王子芳, 高明, 等. 秸秆与生物炭还田对土壤团聚体及固碳特征的影响[J]. 环境科学, 2018, **39**(1): 355-362.
Xu G X, Wang Z F, Gao M, *et al*. Effects of straw and biochar return in soil on soil aggregate and carbon sequestration[J]. Environmental Science, 2018, **39**(1): 355-362.

[87] Hu F N, Xu C Y, Ma R T, *et al*. Biochar application driven change in soil internal forces improves aggregate stability: based on a two-year field study[J]. Geoderma, 2021, **403**, doi: 10.1016/j.geoderma.2021.115276.

[88] Ul Islam M, Jiang F H, Guo Z C, *et al*. Does biochar application improve soil aggregation? A meta-analysis[J]. Soil and Tillage Research, 2021, **209**, doi: 10.1016/j.still.2020.104926.

[89] 邵慧芸, 李紫玥, 刘丹, 等. 有机肥施用量对土壤有机碳组分和团聚体稳定性的影响[J]. 环境科学, 2019, **40**(10): 4691-4699.
Shao H Y, Li Z Y, Liu D, *et al*. Effects of manure application rates on the soil carbon fractions and aggregate stability[J]. Environmental Science, 2019, **40**(10): 4691-4699.

[90] 李景, 吴会军, 武雪萍, 等. 15 年保护性耕作对黄土坡耕地区土壤及团聚体固碳效应的影响[J]. 中国农业科学, 2015, **48**(23): 4690-4697.
Li J, Wu H J, Wu X P, *et al*. Effects of 15-year conservation tillage on soil and aggregate organic carbon sequestration in the loess hilly region of China[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2015, **48**(23): 4690-4697.

[91] 姜振辉, 师江澜, 贾舟, 等. 秸秆还田配施中微量元素对农田土壤有机碳固持的影响[J]. 应用生态学报, 2016, **27**(4): 1196-1202.
Jiang Z H, Shi J L, Jia Z, *et al*. Effects of straw returning combined with medium and microelements application on soil organic carbon sequestration in cropland[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2016, **27**(4): 1196-1202.

[92] Piccolo A, Pietramellara G, Mbagwu J S C. Use of humic substances as soil conditioners to increase aggregate stability[J]. Geoderma, 1997, **75**(3-4): 267-277.

[93] Gutiérrez J L, González G, Segura M A, *et al*. Effect of humic acids from Leonardite on the stability of soil aggregates and melon roots under greenhouse conditions [J]. Phyton-International Journal of Experimental Botany, 2015, **84**(2): 298-305.

[94] 关炳昌. 植被配置模式对矿区复垦土壤有机碳影响[D]. 太原: 山西大学, 2019.
Guan B C. Effects of vegetation allocation model on soil organic carbon in reclaimed mining areas [D]. Taiyuan: Shanxi University, 2019.

[95] 席梅竹, 赵中秋, 白中科, 等. 露天煤矿区复垦土壤碳库研究进展[J]. 土壤通报, 2019, **50**(3): 748-756.
Xi M Z, Zhao Z Q, Bai Z K, *et al*. A review on soil carbon sequestration in reclaimed opencast coal mine [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2019, **50**(3): 748-756.

[96] 刘伟红. 黄土丘陵区露天煤矿复垦土壤有机碳的变化特征及影响因素[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2014.
Liu W H. Variation characteristics and influencing factors of soil organic carbon of reclaimed soils at an opencast coal mine in loess hilly region[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2014.

[97] 王璐. 煤矿废弃地不同树种修复对土壤碳的影响研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2018.
Wang L. Effects of vegetation restoration of different tree species on soil carbon in a post-mining land[D]. Tanyuan: Taiyuan University of Technology, 2018.

[98] 文月荣. 不同植被恢复模式下煤矿排土场土壤碳库管理指数与土壤酶活性研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2016.
Wen Y R. The soil carbon library management index and the soil enzyme activity of coal mine under different vegetation restoration pattern[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2016.

[99] 金永昌, 刘美英, 刘金善, 等. 复垦模式对采煤沉陷区土壤团聚体有机碳分布特征的影响[J]. 干旱区资源与环境, 2017, **31**(11): 105-109.
Jin Y C, Liu M Y, Liu J S, *et al*. Effect of reclamation methods on organic carbon distribution in soil aggregates in coal-mining subsided field [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2017, **31**(11): 105-109.

[100] 关炳昌, 刘家豪, 朱宇恩, 等. 矿区恢复植被配置模式对土壤碳库与生物多样性的影响[J]. 山西大学学报(自然科学版), 2020, **43**(1): 196-205.
Guan B C, Liu J H, Zhu Y E, *et al*. Effect of mining area vegetation restoration types on soil carbon fixation and biodiversity[J]. Journal of Shanxi University (Natural Science Edition), 2020, **43**(1): 196-205.

[101] 王芸. 安太堡露天煤矿不同复垦模式对土壤有机碳库的影响[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2014.
Wang Y. Study on effects of different land reclamation models on soil organic carbon pool in reclaimed land of Antaibao opencast mine[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2014.

[102] 王颖哲. 安太堡矿区不同植被恢复模式对土壤活性有机碳的影响[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2015.
Wang Y Z. Study on effects of different vegetation restoration patterns on soil active organic carbon in Antaibao opencast mine [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2015.

[103] 赵魁. 煤矿塌陷复垦区土壤呼吸及碳平衡研究——以淮南大通煤矿塌陷复垦区为例[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2013.

Zhao K. Study on soil respiration and carbon balance in reclamation area of coal mine—a case study in reclamation district of coal mine located in Datong District Huainan City [D]. Huainan: Anhui University of Science and Technology, 2013.

[104] 原野. 典型露天煤矿复垦生态系统碳固存研究：机理与效应——以平朔露天矿为例[D]. 北京：中国地质大学(北京), 2018.
Yuan Y. Carbon sequestration of reclaimed ecological system in typical open pit coal mine: mechanism and effect—a case study on the Pingshuo mine [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2018.

[105] 王怀泉. 基于生物量法安太堡矿不同复垦模式乔木碳汇量研究[D]. 北京：中国地质大学(北京), 2014.
Wang H Q. Arbor carbon storage of different reclamation patterns in ATB opencast mine dump based on biomass [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2014.

[106] 赵魁, 李紫秋, 姚多喜, 等. 矿山复垦区女贞人工林生态系统碳的源汇效应[J]. 地球与环境, 2017, **45**(4): 415-419.
Zhao K, Li Z Q, Yao D X, *et al*. Carbon sink or source effect of ligustrum plantation ecosystem in mine reclamation area[J]. Earth and Environment, 2017, **45**(4): 415-419.

[107] 李双, 盛茂银. 森林生态系统植硅体及其封存有机碳研究进展[J]. 生态学杂志, 2019, **38**(12): 3847-3853.
Li S, Sheng M Y. Research progress of phytolith and phytolith-occluded organic carbon in forest ecosystems [J]. Chinese Journal of Ecology, 2019, **38**(12): 3847-3853.

[108] 赵玉营. 草地生态系统植硅体碳汇及其控制机制[D]. 杭州：浙江农林大学, 2016.
Zhao Y Y. Research on silicon distribution and phytolith carbon sequestration of grassland ecosystem[D]. Hangzhou: Zhejiang A&F University, 2016.

[109] 袁发英, 王霖娇, 盛茂银. 作物植硅体形态的应用及其封存有机碳研究进展[J]. 中国生态农业学报, 2020, **28**(12): 1932-1940.
Yuan F Y, Wang L J, Sheng M Y. The application of crop phytoliths for reviewing occluded organic carbon[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2020, **28**(12): 1932-1940.

[110] 罗东海, 王子芳, 陆畅, 等. 缙云山不同土地利用方式下土壤植硅体碳的含量特征[J]. 环境科学, 2019, **40**(9): 4270-4277.
Luo D H, Wang Z F, Lu C, *et al*. Content of soil phytolith-occluded organic carbon in different land use patterns at Jinyun Mountain[J]. Environmental Science, 2019, **40**(9): 4270-4277.

[111] 潘文杰, 杨孝民, 张晓东, 等. 中国陆地生态系统植硅体碳汇研究进展[J]. 地球科学进展, 2017, **32**(8): 859-866.
Pan W J, Yang X M, Zhang X D, *et al*. Advances in study of phytolith carbon sequestration in terrestrial ecosystems of China [J]. Advances in Earth Science, 2017, **32**(8): 859-866.

[112] 孟赐福, 姜培坤, 徐秋芳, 等. 植物生态系统中的植硅体闭蓄有机碳及其在全球土壤碳汇中的重要作用[J]. 浙江农林大学学报, 2013, **30**(6): 921-929.
Meng C F, Jiang P K, Xu Q F, *et al*. PhytOC in plant ecological system and its important roles in the global soil carbon sink[J]. Journal of Zhejiang A&F University, 2013, **30**(6): 921-929.

[113] 逯非, 王效科, 韩冰, 等. 中国农田施用化学氮肥的固碳潜力及其有效性评价[J]. 应用生态学报, 2008, **19**(10): 2239-2250.
Lu F, Wang X K, Han B, *et al*. Assessment on the availability of nitrogen fertilization in improving carbon sequestration potential of China's cropland soil [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2008, **19**(10): 2239-2250.

[114] 张治军, 张小全, 朱建华, 等. 广西主要人工林类型固碳成本核算[J]. 林业科学, 2010, **46**(3): 16-22.
Zhang Z J, Zhang X Q, Zhu J H, *et al*. Cost of carbon sequestration of main plantation types in Guangxi[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2010, **46**(3): 16-22.

[115] 武曙红, 张小全, 李俊清. CDM 林业碳汇项目的泄漏问题分析[J]. 林业科学, 2006, **42**(2): 98-104.
Wu S H, Zhang X Q, Li J Q. Analyses on leakage issues of forestry sequestration project [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2006, **42**(2): 98-104.

[116] 刘博杰, 逯非, 王效科, 等. 中国天然林资源保护工程温室气体排放及净固碳能力[J]. 生态学报, 2016, **36**(14): 4266-4278.
Liu B J, Lu F, Wang X K, *et al*. Greenhouse gas emissions and net carbon sequestration of the natural forest protection program in China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, **36**(14): 4266-4278.

[117] 刘博杰, 张路, 逯非, 等. 中国退耕还林工程温室气体排放与净固碳量[J]. 应用生态学报, 2016, **27**(6): 1693-1707.
Liu B J, Zhang L, Lu F, *et al*. Greenhouse gas emissions and net carbon sequestration of "Grain for Green" program in China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2016, **27**(6): 1693-1707.

[118] 陈先刚, 赵晓惠, 陆梅. 造林再造林项目碳汇能力有效性判别[J]. 东北林业大学学报, 2009, **37**(10): 99-101.
Chen X G, Zhao X H, Lu M. Judgment of validity of carbon sequestration capacity of afforestation and reforestation project [J]. Journal of Northeast Forestry University, 2009, **37**(10): 99-101.

[119] Magnani F, Dewar R C, Borghetti M. Leakage and spillover effects of forest management on carbon storage: theoretical insights from a simple model [J]. Tellus B: Chemical and Physical Meteorology, 2009, **61**(2): 385-393.

[120] 魏守才, 张晓平, 陈学文. 土壤水蚀对土壤有机碳动态及全球碳循环平衡的影响[J]. 土壤与作物, 2015, **4**(4): 156-162.
Wei S C, Zhang X P, Chen X W. Effects of water-driven erosion on soil organic carbon dynamics and global carbon balance[J]. Soil and Crop, 2015, **4**(4): 156-162.

[121] Zeng Y, Fang N F, Shi Z H, *et al*. Soil organic carbon redistribution and delivery by soil erosion in a small catchment of the Yellow River Basin [J]. Journal of Geophysical Research: Biogeosciences, 2020, **125**, doi: 10.1029/2019JG005471.

[122] 渠俊峰, 张绍良, 李钢, 等. 高潜水位采煤沉陷区有机碳库演替特征研究[J]. 金属矿山, 2013, **42**(11): 150-153.
Qu J F, Zhang S L, Li G, *et al*. Evolution characteristics of "organic carbon" in coal mining subsidence wetland with high groundwater level[J]. Metal Mine, 2013, **42**(11): 150-153.

[123] 石小霞, 赵诣, 张琳, 等. 华北平原不同农田管理措施对于土壤碳库的影响[J]. 环境科学, 2017, **38**(1): 301-308.
Shi X X, Zhao Y, Zhang L, *et al*. Effects of different agricultural practices on soil carbon pool in North China Plain [J]. Environmental Science, 2017, **38**(1): 301-308.

[124] 王明明. 8 年保护性耕作对黄土高原玉米-小麦-大豆轮作系统土壤碳固定的影响[D]. 兰州：兰州大学, 2011.

Wang M M. Conservation tillage influence on soil carbon sequestration in a maize-wheat-soybean rotation system on the Loess Plateau[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2011.

[125] 张志丹, 杨学明, 李春丽, 等. 土壤有机碳固定研究进展[J]. 中国农学通报, 2011, **27**(21): 8-12.
Zhang Z D, Yang X M, Li C L, *et al*. Research progresses of soil organic carbon sequestration[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2011, **27**(21): 8-12.

[126] 王雪, 李景, 汪俊玉, 等. 免耕施肥条件下冬小麦季土壤呼吸速率及影响因素[J]. 中国土壤与肥料, 2017, (3): 105-110.
Wang X, Li J, Wang J Y, *et al*. Seasonal change and effecting factors on soil respiration of winter-wheat farmland under no-tillage and fertilizing[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2017, (3): 105-110.

[127] López-Fando C, Pardo M T. Soil carbon storage and stratification under different tillage systems in a semi-arid region[J]. Soil and Tillage Research, 2011, **111**(2): 224-230.

[128] GB/T 15776-2016, 造林技术规程[S].
GB/T 15776-2016, Afforestation technical regulations[S].

HUANJING KEXUE

Environmental Science (monthly)

Vol. 43 No. 4

Apr. 15, 2022

CONTENTS

Analysis on Spatial-temporal Characteristics and Driving Factors of $PM_{2.5}$ in Henan Province from 2015 to 2019 ····· GE Qi-xu, LIU Yan, YANG Hong, *et al.* (1697)

Pollution Characterization, Source Identification, and Health Risks of Atmospheric Particle-Bound Heavy Metals in $PM_{2.5}$ in Zhengzhou City: Based on High-resolution Data ····· QU Guang-hui, SUN Jun-ping, WANG Shen-bo, *et al.* (1706)

Source Analysis and Composition Characteristics of Water-soluble Ions During Spring Festival in Ningbo ····· YANG Meng-rong, PAN Yong, HUANG Zhong-wen, *et al.* (1716)

Characteristics of Nitroaromatic Compounds in $PM_{2.5}$ in Urban Area of Shanghai ····· ZHUANG Min, MA Ying-ge, CHENG Yu-huang, *et al.* (1725)

Characteristics and Sources of Nitrated Phenols in Atmospheric Fine Particles of Northern Suburban Nanjing ····· CHEN Mei-juan, QIAN Zi-he, GU Chen-juan, *et al.* (1738)

Variety of the Composition and Sources of VOCs During the Spring Festival and Epidemic Prevention in the Pearl River Delta ····· JIANG Ming, YUAN Luan, WEN Li-rong, *et al.* (1747)

Speciated Emission Inventory of VOCs from Industrial Sources and Their Ozone Formation Potential in Chongqing ····· LI Ling, LI Zhen-liang, FANG Wei-kai, *et al.* (1756)

Volatile Organic Compound Emission Characteristics and Influences Assessment of a Petrochemical Industrial Park in the Pearl River Delta Region ····· ZHANG Xue-chi, SHA Qing-e, LU Meng-hua, *et al.* (1766)

Characteristics and Source Apportionment of Vehicular VOCs Emissions in a Tunnel Study ····· LIU Xin-hui, ZHU Ren-cheng, JIN Bo-qiang, *et al.* (1777)

Accurate Identification of Pollution Sources in a Chemical Enterprise Based on a Distributed Multi-channel VOCs Online Monitoring Mass Spectrometry System ····· WEI Xiao, ZHANG Yong-jie, WANG Pei-tao, *et al.* (1788)

Coordinated Control of $PM_{2.5}$ and O_3 in Hangzhou Based on SOA and O_3 Formation Potential ····· LIN Xu, YAN Ren-chang, JIN Jia-jia, *et al.* (1799)

Effect of WESP on Emission Characteristics of Condensable Particulate Matter from Ultra-low Emission Coal-fired Power Plants ····· WANG Peng-cheng, YUAN Chang, LIANG Sheng-wen, *et al.* (1808)

Measurement Analysis and Superposed Effect of Residential Indoor Air Pollutants in Xi'an ····· WANG Xiu-ru, FAN Hao, FAN Jie, *et al.* (1814)

Occurrence of Atmospheric (Micro)plastics and the Characteristics of the Plastic Associated Biofilms in the Coastal Zone of Dalian in Summer and Autumn ····· TU Chen, TIAN Yuan, LIU Ying, *et al.* (1821)

Spatiotemporal Distribution of Ammonia Emissions from Poultry Farming in the Yangtze River Delta Based on Online Monitoring Derived Local Emission Factors ····· GAO Zong-yuan, XU Chang, NI Yuan-zhi, *et al.* (1829)

Agricultural Ammonia Emission Inventory and Its Distribution in Xining City ····· YANG Yi, JI Ya-qin, GAO Yu-zong, *et al.* (1844)

Analysis of the Urban Water Eco-environment Protection Strategy in the Beijing-Tianjin-Hebei Region from "Three Waters" Overall Planning ····· LIAO Ya, HOU Xiao-shu, REN Xiao-hong (1853)

Non-carcinogenic Risk Assessment of Cadmium Exposure Through Drinking Water in Chinese Residents Based on Age-stratification Weight ····· QIN Ning, Ayibota Tuerxunbieke, LIU Yun-wei, *et al.* (1863)

Hydrochemical Characteristics and Transformation Relationship of Surface Water and Groundwater in the Plain Area of Bortala River Basin, Xinjiang ····· LEI Mi, ZHOU Jin-long, ZHANG Jie, *et al.* (1873)

Hydrochemical Composition Characteristics and Control Factors of Xiaohuangni River Basin in the Upper Pearl River ····· TU Chun-lin, YIN Lin-hu, HE Cheng-zhong, *et al.* (1885)

Temporal and Spatial Variation Characteristics and Driving Factors of Nitrogen of Shallow Groundwater in Hetao Irrigation District ····· YUAN Hong-ying, YANG Shu-qing, ZHANG Wan-feng, *et al.* (1898)

Provenance of Groundwater Solute and Its Controlling Factors in Yancheng Area ····· WANG Jian, ZHANG Hua-bing, XU Jun-li, *et al.* (1908)

Hydrogen and Oxygen Isotopic Characteristics of Different Water and Indicative Significance in Baiyangdian Lake ····· WANG Yu-shan, YIN De-chao, QI Xiao-fan, *et al.* (1920)

Optical Composition and Potential Driving Factors of Chromophoric Dissolved Organic Matter in Large Lakes and Reservoirs in the Eastern Region of China ····· CHEN Li-li, XIAO Qi-tao, YU Xiao-qin, *et al.* (1930)

Fluorescence Spectral Characteristics of Dissolved Organic Matter in Songhua Lake Sediment ····· CHENG Yun-xuan, ZHAO Ke, ZHANG Yue, *et al.* (1941)

Abundance and Fluorescent Components of Dissolved Organic Matter Affected by Land Use in a Drinking Water Source ····· GAO Jing, PU Xiao, ZHANG Yu-hu, *et al.* (1950)

Emission of Methane from a Key Lake in the Eastern Route of the South-to-North Water Transfer Project and the Corresponding Driving Factors ····· ZHU Jun-yu, PENG Kai, LI Yu-yang, *et al.* (1958)

Distribution Characteristics and Ecological and Health Risk Assessment of Phthalic Acid Esters in Surface Water of Qiandao Lake, China ····· MI Qi-xin, GUO Xiao-chun, LU Shao-yong, *et al.* (1966)

Phosphorus Adsorption Characteristics and Loss Risk in Sediments of Lake Bay During the Overwinter Period of Cyanobacteria ····· JIN Zheng-hai, TU Cheng-qi, WANG Shu-hang, *et al.* (1976)

Ecological Quality Assessment of the Wetlands in Beijing: Based on Plant Diversity ····· LI Guo, SUN Guang, ZHAO Zi-yi, *et al.* (1988)

Effects of Pollution Control of Xiaoqing River on Environment Factors and Phytoplankton Community in the Laizhou Bay ····· ZHANG Jing-jing, WANG Yu-jue, LI Fan, *et al.* (1997)

Effects of Different Aeration Treatments on Bacterial Diversity, Metabolic Activity, and Function in Constructed Wetlands ····· WANG Fei-peng, HUANG Ya-ling, ZHANG Rui-rui, *et al.* (2007)

Analysis on the Source Tracing and Pollution Characteristics of Rainfall Runoff in the Old Urban Area of Nanning City ····· YUE Zhen-wu, LI Yi-ping, ZHOU Yu-xuan, *et al.* (2018)

Effects of Aging on the Cd Adsorption by Microplastics and the Relevant Mechanisms ····· WANG Jun-jie, CHEN Xiao-chen, LI Quan-da, *et al.* (2030)

Carbonized Foam Supported Co_3O_4 Activated Peroxymonosulfate Towards Rhodamine B Degradation ····· WANG Yuan-yuan, YAN Xin, AI Tao, *et al.* (2039)

Promoting Nitrogen Removal in ANAMMOX Biofilm Reactor by Fe^{2+} Under Low Nitrogen Concentration ····· ZHENG Xu-wen, QIN Jia-fu, WANG Xiao-jun, *et al.* (2047)

Investigation on Oxygen Gas-liquid Mass Transfer in Sewage Pipelines Under Enhanced Ventilation ····· YANG Zhou, ZHANG Zhi-qiang, YANG Jing, *et al.* (2055)

Characteristics and Assessment of Heavy Metal Contamination in Soils of Industrial Regions in the Yangtze River Economic Belt ····· ZHANG Yi, ZHOU Xin-quan, ZENG Xiao-min, *et al.* (2062)

Distribution and Environmental Significance of Rare Earth Elements in Typical Protected Vegetable Soil, Northern China ····· WANG Zu-wei, LIU Ya-ming, WANG Zi-lu, *et al.* (2071)

Sources Identification, Ecological Risk Assessment, and Controlling Factors of Potentially Toxic Elements in Typical Lead-Zinc Mine Area, Guizhou Province, Southwest China ····· ZHANG Fu-gui, PENG Min, HE Ling, *et al.* (2081)

Distribution Characteristics of Heavy Metals in Soils Affected by Different Land Use Types in a Superimposed Pollution Area with High Geological Background ····· WANG Xue-wen, LIU Hong-yan, GU Xiao-feng, *et al.* (2094)

Distribution Characteristics of Heavy Metals in Farmland Soils Around Mining Areas and Pollution Assessment ····· WANG Hai-yang, HAN Ling, XIE Dan-ni, *et al.* (2104)

Concentration Characteristics of Heavy Metals in Farmland-*Sphagnum* System and Ecological Risk Assessment ····· ZHU Di, ZHANG Zhao-hui, WANG Zhi-hui (2115)

Spatial Variation and Influencing Factors of Soil pH in Anshun City ····· CHEN Qing-xia, LU Xiao-hui, TU Cheng-long (2124)

Synergistic Repair Effect of Calcite-Based Passivator and Low-Accumulation Maize ····· REN Chao, REN Yu-zhong, LI Jing-tian, *et al.* (2133)

Effects of *Burkholderia* sp. Y4 on Cadmium Damage and Uptake in Rice Seedlings ····· ZHANG Ya-hui, LIU Yue-min, WANG Chang-rong, *et al.* (2142)

Changing Characteristics of Carbon-Based Greenhouse Gas Fluxes in Paddy Field in the Middle-Lower Yangtze Plain in China ····· LIU Shuo, ZHEN Xiao-jie, LIU Gang, *et al.* (2151)

Effects of Plastic Film Mulching and Biochar Application on N_2O Emission from a Vegetable Field ····· HU Jian, JIANG Chang-sheng, CHEN Xin-tong, *et al.* (2163)

Effects of Nitrogen Fertilizer Management on CH_4 and N_2O Emissions in Paddy Field ····· ZHENG Mei-qun, LIU Juan, JIANG Pei-kun, *et al.* (2171)

Structure and Functional Diversity of Bacterial Community in Rhizosphere Soil of Typical Vegetation in the Riparian Zone Along the Downstream of Songhua River ····· WANG Lu-ying, SUN Hui-zhen, YANG Xue (2182)

Effects of Cotton Stalk Returning on Soil Enzyme Activity and Bacterial Community Structure Diversity in Cotton Field with Long-term Saline Water Irrigation ····· ZHOU Yong-xue, CHEN Jing, LI Yuan, *et al.* (2192)

Effect of pH on the Abundance and Community Structure of Comammox *Nitrospira* in Paddy Soils ····· MA Rui, ZHAO Yong-peng, WANG Zhi-hui, *et al.* (2204)

Effects of Biochar on Soil Organic Carbon of Eroded Cultivated Layer of Slope Farmland in Purple Hilly Area ····· ZHANG Jian-le, ZENG Xiao-ying, SHI Dong-mei, *et al.* (2209)

Effects of Organic Fertilizer Replacing Chemical Fertilizer on Organic Carbon Mineralization and Active Organic Carbon in Dryland Yellow Soil ····· LIN Shi-fang, WANG Xiao-li, DUAN Jian-jun, *et al.* (2219)

Soil Organic Carbon Storage, Active Component Contents, and Stability Along a Flooding Gradient in the Tidal Wetland of the Jiulong River Estuary ····· HUANG Xiao-qing, TONG Chuan, LUO Min, *et al.* (2226)

System Construction and the Function Improvement of Ecological Carbon Sink in Coal Mining Areas Under the Carbon Neutral Strategy ····· LIU Xiang-hong, YAN Yong-jun, LIU Wei, *et al.* (2237)