

目次

2018~2020年北京市大气PM _{2.5} 污染特征及改善原因	刘保献, 李倩, 孙瑞雯, 董瑞, 王书肖, 郝吉明	(2409)
京津冀城市群冬季二次PM _{2.5} 的时空分布特征	姚青, 杨旭, 唐颖潇, 樊文雁, 蔡子颖, 韩素芹	(2421)
COVID-19管控前后不同污染阶段PM _{2.5} 中二次无机离子变化特征	姜楠, 郝雪新, 郝祺, 魏云飞, 张瑜, 吕政卿, 张瑞芹	(2430)
基于在线观测的太原市冬季PM _{2.5} 中金属元素污染水平及来源解析	崔阳, 郭利利, 李宏艳, 李永麒, 李滨, 何秋生, 王新明	(2441)
青藏高原东缘黑碳气溶胶变化特征及其来源	王红磊, 刘思晗, 赵天良, 卢文, 夏俊荣, 施双双	(2450)
湛江市夏季大气挥发性有机物污染特征及来源解析	虎晓蝶, 高博, 陈来国, 刘明, 陆海涛, 王硕, 赵伟, 梁小雅, 郭送军	(2461)
2021年夏季新乡市城区臭氧超标日污染特征及敏感性	侯墨, 蒋小梅, 赵文鹏, 马琳, 黄皓旻, 范丽雅, 叶代启	(2472)
台风“浪卡”过程对海南岛臭氧污染的影响分析	符传博, 丹利, 佟金鹤, 徐文帅	(2481)
天津市空气污染的健康影响分析	华琨, 罗忠伟, 贾斌, 薛倩倩, 李亚菲, 肖致美, 吴建会, 张裕芬, 冯银厂	(2492)
2002~2020年中国河流环境质量演变及驱动因子分析	杨传玺, 薛岩, 高畅, 万孜恒, 王小宁, 刘永林, 刘琳, 刘长青, 王炜亮	(2502)
1990~2020年黄河流域典型生态区生态环境质量时空格局及驱动力分析	王芳, 李文慧, 林妍敏, 南雄雄, 胡志瑞	(2518)
长江上游小型水库枯水期水质对景观组成、配置和水库特征的响应	钟泳林, 冉娇娇, 文雯, 张名瑶, 吕明权, 吴胜军	(2528)
宁夏入黄排水沟中典型内分泌干扰物的污染特征与风险评价	李凌云, 高礼, 郑兰香, 李富娟, 陶红, 马兰	(2539)
微塑料及金属在黄浦江地表水环境的赋存特征及与金属抗性基因的相关性分析	陆嘉玮, 徐晨辉, 胡纯, 刘树仁, 李方	(2551)
黄河兰州段城市河道表层沉积物重金属空间分布特征及来源解析	李军, 李旭, 李开明, 焦亮, 臧飞, 毛满萱, 潘文惠, 米璇	(2562)
三峡库区支流库湾消落带土壤磷形态赋存特征及其释放风险	张雪, 朱波	(2574)
霍邱县城湖泊沉积物营养盐分布及污染评价	刘海, 赵国红	(2583)
基于贝叶斯网络的太湖叶绿素a影响因素分析	刘杰, 何云川, 邓建明, 汤祥明	(2592)
河北省顺平县地下水化学特征及其成因分析	刘元晴, 周乐, 吕琳, 李伟, 王新峰, 路小慧, 郑一迪, 孟顺祥	(2601)
饮用水处理过程中全氟化合物的分布、转化及去向	钟婷婷, 林涛, 刘威	(2613)
镍铁氧体@活性炭复合材料去除六价铬的表征、性能及机制	张华, 李荣华, 陈金雄, 曾鸿鹄, 黄海艺, Asfandiyar Shahab	(2622)
纳米核壳Co@NC催化剂活化过氧乙酸降解磺胺甲噁唑	郑婷露, 张龙龙, 陈家斌, 张亚雷, 周雪飞	(2635)
富里酸改性FeMnNi-LDH复合材料对水中砷的吸附性能与机制	何雅馨, 柯心怡, 魏世强, 蒋珍茂	(2646)
富含钙/铝的污泥生物炭复合材料对水溶液中磷酸盐的吸附机制	欧阳铸, 曹露, 王炳乾, 丁丽, 黄海明, 祝采莹, 卞晓彤	(2661)
污泥生物炭掺杂改性及其对水中1,2-二氯乙烷吸附行为和机制	周佳伟, 施维林, 许伟, 魏晨军, 吴建生, 孟宪荣	(2671)
森林生态系统对大气氮沉降降低的响应	谢丹妮, 仰东星, 段雷	(2681)
气候变化和人类活动对我国典型草原区植被恢复的影响	张良侠, 岳笑, 周德成, 樊江文, 李愈哲	(2694)
西南地区陆地植被生态系统NPP时空演变及驱动力分析	徐勇, 黄海艳, 戴强玉, 郭振东, 郑志威, 盘钰春	(2704)
不同碳输入对天山雪岭云杉林土壤化学计量特征的影响	马鑫钰, 贡璐, 朱海强, 张甜, 殷珂洁, 陆星宇	(2715)
氮磷添加对荒漠草原土壤养分含量及生态化学计量特征的影响	刘姝萱, 安慧, 张馨文, 邢彬彬, 文志林, 王波	(2724)
互花米草入侵对杭州湾滨海湿地土壤碳氮磷生态化学计量特征的影响	李文琦, 项琦, 解雪峰, 吴涛, 蒋国俊, 张建珍, 濮励杰, 徐飞	(2735)
黄土旱塬24 a不同秸秆还田土壤碳、氮、磷和胞外酶计量特征	姚志霞, 周怀平, 解文艳, 杨振兴, 陈浩宁, 文永莉, 程曼	(2746)
黄土高原子午岭植被自然恢复下的固碳特征	许小明, 张晓萍, 王浩嘉, 贺洁, 王妙倩, 易海杰, 薛帆, 邹亚东, 田起隆, 何亮	(2756)
短期氮添加对黄土高原人工刺槐林土壤有机碳组分的影响	简俊楠, 刘伟超, 朱玉帆, 李佳欣, 温宇豪, 刘付和, 任成杰, 韩新辉	(2767)
福建省水田土壤有机碳积累对未来温度升高的响应	车燕, 邱龙霞, 吴凌云, 龙军, 毋亭, 李晶, 邢世和, 张黎明	(2775)
中国镉超富集植物的物种、生境特征和筛选建议	赵晓峰, 雷梅, 陈同斌	(2786)
基于地理探测器的土壤重金属空间分异及其影响因素分析研究进展	龚仓, 王顺祥, 陆海川, 陈勇, 刘玖芬	(2799)
河北省土壤化学元素的背景值与基准值	张丽婷, 成杭新, 谢伟明, 齐全强, 谢晓阳, 于文龙, 王俊达	(2817)
非粮化利用下耕地土壤重金属分布特征、生态风险和来源解析	邱乐丰, 祝锦霞, 潘艺, 党云晓, 吴绍华	(2829)
基于乡镇尺度的地质高背景区耕地土壤重金属来源分析与风险评价	余飞, 王佳彬, 王锐, 王宇, 宁墨奂, 张云逸, 苏黎明, 董金秀	(2838)
长株潭地区土壤Cd和Pb固液分配特征与环境风险	李钰滢, 彭驰, 刘乐乐, 张严, 何亚磊, 郭朝晖, 肖细元	(2849)
贵州铅锌矿区土壤和作物重金属生态风险与迁移特征	马宏宏, 张利, 郭飞, 杨峰, 王惠艳, 彭敏, 张富贵	(2856)
贵州省旱地土壤Hg污染状况与玉米安全生产评估	马丽钧, 周浪, 宋波, 王佛鹏, 张云霞, 吴勇	(2868)
山西野生连翘生长地土壤PAHs污染特征及风险评价	郭佳佳, 王琦, 康敏捷, 焦海华, 茹文明, 白志辉	(2879)
P对小麦Cd和As吸收与转运的影响	王云, 赵鹏, 李广鑫, 胡彩霞, 王俊, 刘红恩, 高巍, 秦世玉, 睢福庆, 李畅	(2889)
施硅对水稻铁膜砷固定和体内砷转运的影响	李林峰, 文伟发, 徐梓盛, 陈勇, 李奇, 李义纯	(2899)
广东海丰湿地生态恢复进程中不同生境的土壤微生物特征分析	马姣娇, 高常军, 易小青, 吴琰, 李佳鸿, 曾向武, 蔡坚	(2908)
五台山不同退化程度亚高山草甸土壤微生物群落分类与功能多样性特征	罗正明, 刘晋仙, 胡现秋, 赫磊, 周妍英, 郑庆荣, 柴宝峰	(2918)
天然高寒草地转变为混播人工草地对土壤微生物群落特征的影响	于皓, 刘悦, 邓晔, 芦光新, 颜琿璘, 王英成	(2928)
紫云英还田与化肥减量施肥对稻田土壤细菌群落组成和功能的影响	张济世, 刘春增, 郑春风, 张琳, 张香凝, 吕玉虎, 曹卫东, 张玉亭	(2936)
长期生草栽培对山核桃人工林土壤真菌群落和酶活性的影响	胡颖榕, 梁辰飞, 金锦, 王潇璇, 叶子豪, 吴家森	(2945)
高密度聚乙烯微塑料胁迫对棉花生长、枯萎病发生和根际细菌群落的影响	张浩, 孙洁, 杨慧颖, 董联政, 滑紫微, 韩辉, 陈兆进	(2955)
菌藻复合体系氮代谢性能及菌群特征	赵志瑞, 吴海森, 马超, 李书缘, 李晴, 袁凯倪, 孟祥源, 刘硕, 方晓峰	(2965)
中国碳排放及影响因素的市域尺度分析	吴健生, 晋雪茹, 王晗, 冯喆, 张丹妮, 李雪尘	(2974)
碳交易政策如何影响工业碳生产率:来自中国省级数据的准自然实验	房琪, 李绍萍	(2983)
垃圾分类对碳减排的影响分析:以青岛市为例	陈纪宏, 卞荣星, 张昕雪, 高晨琦, 孙英杰, 李卫华, 张国栋, 占美丽	(2995)
1950~2019年中国季节平均最高气温时空演变特征及其大气环流影响定量化分析	苏越, 路春燕, 黄雨菲, 苏艳琳, 王自立, 雷依凡	(3003)
《环境科学》征订启事(2480)	《环境科学》征稿简则(2538)	信息(2766, 2798, 2927)

黄土高原子午岭植被自然恢复下的固碳特征

许小明¹, 张晓萍^{1,2,*}, 王浩嘉¹, 贺洁¹, 王妙倩¹, 易海杰², 薛帆¹, 邹亚东¹, 田起隆², 何亮¹

(1. 西北农林科技大学水土保持研究所, 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 杨陵 712100; 2. 中国科学院水利部水土保持研究所, 杨陵 712100)

摘要: 为分析黄土高原生态脆弱区植被自然恢复的碳汇效应和植被群落特征变化对生态系统碳密度的影响, 采用时空互代的方法, 研究了子午岭地区 150 a 恢复年限内 8 个演替阶段(坡耕地、撂荒 10 a 草地、20 a 草地、白刺花 [*Sophora davidii* (Franch.) Skeels.]、白桦 (*Betula platyphylla* Suk.)、油松 (*Pinus tabulaeformis* Carr.)、辽东栎 (*Quercus wutaishanic* Mary) + 油松 (*Pinus tabulaeformis* Carr.) 混交林和辽东栎) 下植被-土壤系统的固碳特征, 探讨了群落特征变化对植被-土壤系统碳密度的影响。结果表明, 调查植被群落盖度从坡耕地阶段的 85% 波动增加到乔木阶段的 100%。物种数量、Margalef 指数、Shannon-Wiener 指数、Pielou 指数和 Simpson 指数总体呈现出先快速增加后缓慢降低直至趋向稳定的变化特征, 演替中期 (白桦) 达到峰值。植被各组分 (地上生物量、地下根系、枯落物) 的生物量和碳密度在演替过程中呈指数函数关系增加, 即白桦以前增加缓慢, 白桦和油松阶段显著增加 ($P < 0.05$); 植被生物量和碳密度在辽东栎 + 油松混交林阶段达到最大值, 分别为 27 858.08 $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$ 和 13 232.51 $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$ 。土壤有机碳密度随植被恢复呈幂函数关系, 在撂荒 10 a 草地和白桦阶段增幅最大, 白桦以后总体变化不显著 ($P > 0.05$)。演替初期农田生态系统的碳密度最小 (4 395.70 $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$), 其他 7 个阶段较其分别增加了 55.54%、40.37%、69.96%、202.48%、326.35%、357.43% 和 351.07%。群落盖度、Margalef 指数、Shannon-Wiener 指数、地上生物量、根系生物量和枯落物生物量与植被-土壤系统碳密度呈显著正相关 ($P < 0.05$)。子午岭地区植被长期自然恢复的碳汇效应显著, 种间竞争生长下的植被-土壤系统碳密度在演替后期趋向稳定, 演替过程中植被群落结构组成及植物多样性的动态变化提高了植被碳密度和土壤碳密度。研究有助于明确黄土高原生态脆弱区植被自然恢复的碳汇效应, 为促进天然林保护和实现碳中和提供理论依据。

关键词: 植被演替; 碳密度; 生态系统; 子午岭; 黄土高原

中图分类号: X171.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2023)05-2756-11 DOI: 10.13227/j.hjxx.202204297

Carbon Sequestration Characteristics Under Natural Vegetation Restoration in Ziwuling Area of the Loess Plateau

XU Xiao-ming¹, ZHANG Xiao-ping^{1,2,*}, WANG Hao-jia¹, HE Jie¹, WANG Miao-qian¹, YI Hai-jie², XUE Fan¹, ZOU Ya-dong¹, TIAN Qi-long², HE Liang¹

(1. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dry Land Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling 712100, China; 2. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling 712100, China)

Abstract: The aim of this study was to analyze the carbon sink effect under natural vegetation restoration and the influence of changes in vegetation community characteristics on ecosystem carbon density in ecologically fragile areas of the Loess Plateau. In this study, the changes in carbon sequestration of a vegetation-soil system under eight successional stages [slope cropland, abandoned cropland for 10 years, abandoned cropland for 20 years, *Sophora davidii* (Franch.) Skeels., *Betula platyphylla* Suk., *Pinus tabulaeformis* Carr., *Quercus wutaishanic* Mary + *P. tabulaeformis* Carr mixed forests, and *Q. wutaishanic* Mary] in Ziwuling area over 150 restoration periods were investigated using the common method of spatial and temporal substitution. This study also discussed the relationship between changes in vegetation community characteristics and vegetation-soil system carbon density. The results showed that the community coverage of the investigated vegetation fluctuated from 85% in the slope cropland stage to 100% in the arbor stage. The number of species, Margalef index, Shannon-Wiener index, Pielou index, and Simpson index initially increased rapidly, then declined slowly until becoming stable, and reached a peak in the middle of the succession (*B. platyphylla* Suk.). The biomass and carbon density of vegetation components (above-ground biomass, below-ground roots, and litter) increased exponentially during the succession, i.e., increased slowly before *B. platyphylla* Suk. but increased significantly in *B. platyphylla* Suk. and *P. tabulaeformis* Carr. ($P < 0.05$). The biomass and carbon density reached the maximum values of 27 858.08 $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$ and 13 232.51 $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$, respectively, in *Q. wutaishanic* Mary + *P. tabulaeformis* Carr mixed forests and tended to be stable in the late succession stage. Soil organic carbon density showed a power function relationship with vegetation restoration, with the greatest increase in the stages of abandoned cropland for 10 years and *B. platyphylla*, but no significant changes in the subsequent stages ($P > 0.05$). In the early succession stage, the carbon density of the farmland ecosystem was the lowest (4 395.70 $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$), whereas the other seven stages increased by 55.54%, 40.37%, 69.96%, 202.48%, 326.35%, 357.43%, and 351.07%, respectively, compared with the farmland ecosystem. Community coverage, Margalef index, Shannon-Wiener index, above-ground biomass, root biomass, and litter biomass were significantly positively correlated with vegetation-soil system carbon density ($P < 0.05$). The carbon sink effect of long-term natural restoration in Ziwuling Region was significant, and the carbon density of the vegetation-soil system under interspecific competition tended to be stable in the late succession stage. Dynamic changes in the vegetation community structure and plant diversity during the succession process increased vegetation carbon density and soil carbon density. This study helps to clarify the carbon sink effect of natural vegetation restoration in ecologically fragile areas

收稿日期: 2022-04-25; 修订日期: 2022-08-07

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41877083, 41440012, 41230852)

作者简介: 许小明 (1990 ~), 男, 博士研究生, 主要研究方向为植被恢复的环境效应评价, E-mail: 1559668557@qq.com

* 通信作者, E-mail: zhangxp@ms.iswc.ac.cn

of the Loess Plateau and provides a theoretical basis for promoting natural forest conservation and achieving carbon neutrality.

Key words: vegetation succession; carbon density; ecosystems; Ziwuling area; Loess Plateau

IPCC 第六次评估第一工作组报告指出,与 1850 ~ 1900 年相比,2010 ~ 2019 年全球平均气温上升了 $0.9 \sim 1.2^{\circ}\text{C}$,其中能源使用和土地利用变化等人为活动排放的温室气体(CO_2 、 CH_4 和 N_2O 等)造成了 $1.0 \sim 2.0^{\circ}\text{C}$ 的变暖^[1~3].世界主要经济体都在寻求减排途径以应对全球气候变暖造成的不利影响^[4],中国政府庄严宣告在 2030 年和 2060 年分别实现碳达峰和碳中和,致力于通过国际合作以应对气候变化^[5].植被恢复被广泛认为是具有吸收和固存 CO_2 作用的重要措施,有助于实现国土空间增绿和促进温室气体减排^[6~9].

自然生态系统能够有效吸收温室气体,具有可观的潜在固存能力^[10~12].天然林拥有丰富的生物多样性和稳定的生态功能,在维持陆地生态系统碳平衡方面发挥主导作用^[12],其碳汇效应备受关注^[7,11,13~16].子午岭地区是我国重要的天然林保护生态工程实施区,自 1866 年当地大量人口外迁以来,经历了 150 a 左右的自然恢复演替,形成了群落结构复杂和物种多样性丰富的天然次生林景观,在研究生态敏感区植被长期自然恢复对生态系统固碳功能影响方面具有典型性^[17].过去,围绕该地区不同植被演替阶段以及某一种植被类型下土壤不同组分碳含量、碳密度和碳储量的变化特征以及固碳机制等方面开展了比较深入的研究^[18~22].这些研究对认识天然次生植被的土壤碳汇作用及生态意义,明确植被演替各阶段的土壤固碳特征,持续推进天保工程以及促进退化区生态恢复治理具有重要的理论和现实指导意义.然而,目前有关子午岭地区植被恢复的固碳效应分析中,关注较多的是植被自然恢复下的土壤碳密度和碳储量的时间动态变化,较少从植被-土壤系统的角度进行多层次综合分析;从水土保持的角度分析,0 ~ 40 cm 土层是乔灌植被对土壤性质影响的关键层次,草本植物对表层(0 ~ 10 cm)土壤的作用更加突出^[23],表层和亚表层土壤固碳功能对植被恢复的响应关系能够明晰生态恢复的碳汇效应;此外,该区域植被演替过程中群落特征变化对生态系统碳汇效应的影响尚不清楚.植被恢复的固碳效应研究是国家生态文明建设的需要和应对全球气候变化的热点问题,关系到中华民族的永续发展,因此有必要进行深入分析和探讨.

长期自然恢复下不同植被演替阶段固碳作用的分析有助于明晰不同植被类型的碳汇功能差异,明确未来植被恢复的碳汇潜力和在应对气候变暖方面

的实际作用.基于植被空间排列顺序推断时间演替顺序的方法和子午岭地区植被演替阶段的研究结果^[17,18,24],通过资料搜集和野外考证,依据植被恢复年限和群落结构组成,本文系统分析涵盖不同植被类型的 8 个演替阶段(坡耕地、撂荒 10 a 草地、20 a 草地、白刺花、白桦、油松、辽东栎 + 油松混交林和辽东栎)的植被各组分和土壤层的固碳特征,以及探讨演替过程中植被群落特征变化与生态系统固碳的关系,以期为黄土高原地区退化生态系统恢复及碳库管理提供数据参考和理论依据.

1 研究区概况

子午岭地处黄土高原腹地,总面积约为 2.3 万 km^2 .地貌类型为黄土丘陵沟壑区,地形垂直分布不明显.气候类型为暖温带大陆性季风气候,多年平均气温为 7.4°C ,降水量为 576.7 mm,70% 以上的降水集中分布在夏秋两季,年内气候干湿交替特征明显.自 1866 年当地大量人口外迁至今,150 多年的植被自然演替过程孕育了森林茂密的天然次生林景观,辽东栎是当地水热条件下植被演替的顶级阶段.子午岭地区植被演替序列完整(坡耕地 → 撂荒草地 → 灌木 → 早期乔木 → 顶级乔木)^[17],是研究黄土覆盖区植被演替规律的天然实验室.灰褐土是植被次生演替作用下发育的最主要的土壤类型.山区土层浅薄,一般在 1 m 以内,缓坡和沟道台地土层较厚.

富县与黄陵县位于子午岭核心区(图 1),尤其是县域中西部山区植被自然演替很少受人类活动的干扰,在研究植被长期自然恢复下的生态环境效应方面具有很好的代表性.因此本研究选择该区域开展野外样地布设、植被群落特征调查和土壤剖面采样.

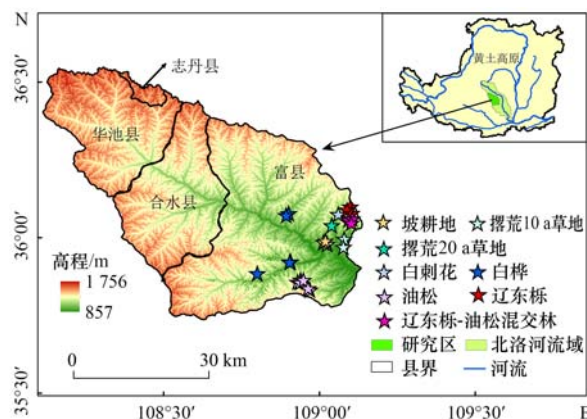


图 1 子午岭地区野外调查样地空间分布示意

Fig. 1 Spatial distribution of field survey sites in Ziwanling area

2 材料与方法

2.1 实验设计与群落调查

在邹厚远等^[17]划分的子午岭地区植被自然演替阶段的基础上,参考了该地区植物更新研究的相关成果^[18,24],通过对当地林业站和有经验的农户较为全面地走访和调查,本研究按照 8 个正向演替阶段,即:坡耕地(0 a)→撂荒 10 a 草地(10 a)→撂荒 20 a 草地(20 a)→白刺花(30~50 a)→白桦(70 a)→油松(120 a)→辽东栎+油松混交林(135 a 左右)→辽东栎(150 a),在一个较小的空间范围内,保证坡度和坡位等立地条件相近的基础上,共布设了 26 块标准样地.考虑到演替初期和前期植被类型比较单一,群落垂直和水平结构不复杂,布设 2 块样地基本上可以代表该种植被类型下植被

层和土壤层的基本特征.由于 4 个乔木植被类型处于演替中期和后期,群落结构复杂,林龄多样化,为了尽可能地保证调查的数据比较准确地代表野外的实际值,因此本研究中乔木阶段的植被类型选取的样地为 3~6 块.每一演替阶段样地考虑了阴坡和阳坡两个坡向.样地的基本信息详见图 1 和表 1.

坡耕地、草地和灌木的样地面积为 30 m×30 m,乔木样地面积为 60 m×60 m,2020 年 9 月 2~30 日进行了样地群落特征调查.乔木、灌木和草本样方尺寸依次设置为 20 m×20 m、10 m×10 m 和 1 m×1 m,通过样带法测量林地郁闭度和林分密度.典型株的选择标准是尽量均匀和随机,在每个样方中选取 3 个典型株,测量并记录树高和胸径或基径,调查林下主要草本种类.调查在比较不同演替阶段数据时,采用阴阳坡数据的平均值.

表 1 子午岭地区野外植被调查样地基本信息

Table 1 Basic information on field vegetation survey plots in Ziwtuling area									
演替阶段 及样地数量	坡位	坡度 /(°)	海拔 /m	郁闭度/盖度 /%	林分密度 /hm ²	树高 /m	胸径(基径) /cm	主要灌木	主要草本
演替初期:坡 耕地(玉米) (2 块)	中下 坡位	19~22	981~987	80~90	—	—	—	—	堇菜(<i>Viola verecunda</i> A. Gray)和冰草[<i>Agropyron cristatum</i> (L.) Gaertn.]
演替前期:撂 荒 10 a 草地 (2 块)	上坡位	24~25	1 212~1 215	87~96	—	—	—	胡枝子 (<i>Lespedeza bicolor</i> Turcz.)	白羊草[<i>Bothriochloa ischcemum</i> (L.) Keng]和白莲蒿(<i>Artemisia stechmanniana</i> Besser)
演替前期:撂 荒 20 a 草地 (2 块)	中坡位	6~8	994~1 021	60~90	—	—	—	胡枝子	艾草(<i>Artemisia argyi</i> Levl. et Van)、龙牙草(<i>Agrimonia pilosa</i> Ldb.)和芒草(<i>Miscanthus</i>)
演替前期:白 刺花(2 块)	中坡位	10~30	1 028~1 169	93	1 500~3 967	1.05~1.58	1.8~7.74	白刺花和虎榛子(<i>Ostryopsis davidiana</i> Decaisne)	披针叶苔草(<i>Carex lanceolata</i> Boott)、车前草(<i>Plantago depressa</i> Willd.)和白莲蒿
演替中期:白 桦(6 块)	中坡位	19~30	1 030~1 131	53~81	661~2 818	10.7~13.9	9.4~16.1	胡枝子	龙牙草、牛筋草[<i>Eleusine indica</i> (L.) Gaertn.]和艾草
演替中期:油 松(6 块)	中坡位	23~35	1 096~1 122	78~83	1 224~3 112	12.3~22.5	15.1~32.8	胡枝子	白刺花、披针叶苔草和白蒿(<i>Herba Artimisiae Sieversianae</i>)
演替后期:辽 东栎+油松混 交林(3 块)	中坡位	13~25	1 160~1 246	75~86	1 202~1 678	9.3~11.2	16.9~19.9	胡枝子	水栒子(<i>Cotoneaster multiflorus</i> Bge.)、白羊草和披针叶苔草
演替后期:辽 东栎(3 块)	中坡位	16~20	1 146~1 240	71~83	1 211~1 696	12.4~13.4	10.8~24.2	胡枝子和 白刺花	披针叶苔草

2.2 植被多样性指数计算

调查样地的 Margalef (D_{ma})、Shannon-Wiener (H)、Pielou (J_{sw}) 和 Simpson (D) 指数计算公式依次为^[25]:

$$D_{ma} = \frac{S - 1}{\ln N}$$
(1)

$$H = - \sum_{i=1}^S P_i \ln P_i$$
(2)

$$J_{sw} = \frac{-\sum P_i \ln P_i}{\ln S} \tag{3}$$

$$D = 1 - \sum_{i=1}^S P_i^2 \tag{4}$$

式中, S 为样方内物种数量, N 为样方内所有物种个体数之和, P_i 为物种的相对重要值。

2.3 植被生物量和碳密度估算

植被生物量包括了地上生物量(乔木、灌木和草本)、地表枯落物和地下根系生物量。

根据样地调查植株的高度、胸径、冠幅和分枝数等指标,参照表 2 中各植被类型的异速生长方程,结合实际调查的株密度估算出各植被类型单位面积的地上乔木和灌木生物量。草本生物量采用典型样方全收获法获取。

枯落物生物量,则通过在野外调查样地随机布设 3 个枯落物小样方(31.7 cm × 31.7 cm)^[26,27],收集样方内的枯落物样品,自然风干后称重来计算单位面积内枯落物的蓄积量。白刺花和草地枯落物蓄积量数据参考了栾莉莉等^[28]和汪建芳等^[29]在延安市安塞水土保持实验站野外调查的研究结果,进行研究分析。

选取植被长势较为均一的地段,利用根钻法采集坡耕地和草地根系生物量。参照文献[30]中的温带阔叶林根系生物量的标准根冠比计算方法估算了林地根系生物量:

$$UGB = \begin{cases} AGB \times 0.46, & AGB \leq 75 \\ AGB \times 0.23, & 75 < AGB \leq 150 \\ AGB \times 0.24, & AGB > 150 \end{cases} \tag{5}$$

式中,UGB 为地下生物量(t·hm⁻²); AGB 为地上生物量(t·hm⁻²)。

植物碳密度为生物量与植物含碳量的乘积,由于大多数植物及植物不同组分的含碳量为 45%~50%^[30,31],本文按照 47.5% 的取值来计算。

表 2 不同植被类型的地上生物量计算模型
Table 2 Above-ground biomass calculation models for different vegetation types

植被类型	生物量计算模型	文献
坡耕地	全收获法	[30]
草地	全收获法	[30]
白刺花	相对生长法	[32]
白桦	相对生长法	[33]
油松	相对生长法	[34]
辽东栎 + 油松混交林	相对生长法	[20,34]
辽东栎	相对生长法	[20]

2.4 土壤采集与有机碳测定

在不同演替阶段的植被调查样方内,选取 2 个代表株,挖取 2 个土壤剖面,按照 0~5、5~20 和 20

~40 cm 依次利用环刀(体积为 100 cm³)采集原状土和测定土壤容重。

土壤采样方法为农化土样研究中常用的多点混合土样采集方法。每层保证至少 4 个随机采集点混合取样,将土样装入已编号的塑封袋中。将样品中的石砾、根系、枯落物和动物粪便等侵入物全部检出,土样阴干后研磨、过筛(2 mm 孔径)和称重。利用重铬酸钾外加热法测定土壤有机碳含量^[35]。每块样地剖面每层包括 4 个重复。

2.5 土壤碳密度计算

本研究土壤有机碳密度的计算过程为^[36]:

某一土层 i 中储存的土壤有机碳密度 SOC _{i} (kg·m⁻²)的计算公式如下:

$$SOC_i = C_i D_i E_i (1 - G_i) / 10 \tag{6}$$

式中,SOC _{i} 为土壤有机碳密度(kg·m⁻²); C_i 为土壤有机碳含量(%); D_i 为土壤容重(g·cm⁻³); E_i 为土层厚度(cm); G_i 为直径 > 2 mm 的石砾占土壤样品的质量分数(%)。

某一土体剖面包括 k 层土壤时,按照下面公式计算该剖面的土壤有机碳密度 SOC _{i} :

$$SOC_i = \sum_{i=1}^k SOC_i = \sum_{i=1}^k C_i D_i E_i (1 - G_i) / 10 \tag{7}$$

由于子午岭石质山区土层浅薄,本研究按照野外实测的土壤剖面深度(0~40 cm)来计算 8 个植被演替序列下的土壤碳密度。

2.6 数据处理

借助 One-Way ANOVA 法和最小显著差异法(LSD)检验不同植被演替阶段群落基本特征(盖度、植被多样性指数和土壤容重)、植被生物量及碳密度、土壤有机碳密度和植被-土壤系统碳密度等方面的差异($\alpha = 0.05$)。图表中的数据为平均值 ± 标准差,地下根系生物量和碳密度为 0~40 cm 土层数据。使用 Microsoft Excel 2010 和 SPSS 26.0 软件对数据进行处理,基于 Origin 8.6 软件完成绘图。

3 结果与分析

3.1 不同演替阶段植物群落特征与生物量

如表 3 所示,物种数量在演替过程中呈现出先快速增加后减少直至趋向稳定的变化特征,其中,白刺花阶段最多。群落盖度从坡耕地阶段的 85% 波动增加到演替后期的 100%,乔木阶段植被盖度(100%)显著高于坡耕地和撂荒 20 a 草地($P < 0.05$)。坡耕地 Margalef 指数最低(0.68),白桦阶段最高(3.26),之后呈现出不显著的减少特征($P > 0.05$)。Shannon-Wiener 指数、Pielou 指数和 Simpson 指数与 Margalef 指数的变化规律基本一致。这 3 个

植被指数分别在坡耕地和撂荒 10 a 草地阶段达到最小,撂荒 20 a 草地较 10 a 草地表现出显著的增加趋势($P < 0.05$),之后各演替阶段则表征为不显著的增加特征($P > 0.05$).0 ~ 5、5 ~ 20 和 20 ~ 40 cm 土层土壤容重均表现为总体减小的趋势.其中,0 ~ 5 cm 土层土壤容重减少幅度最大(31.30%).

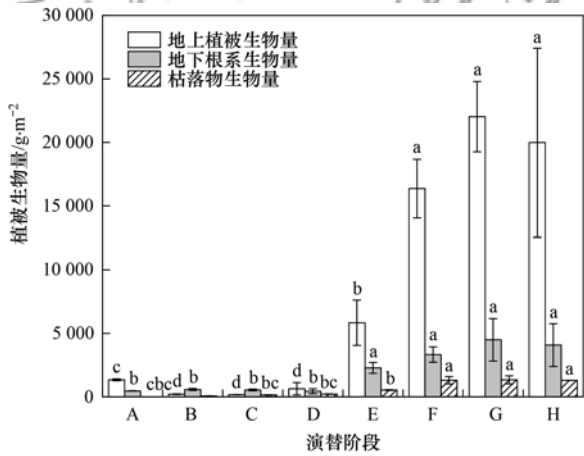
从图 2 可以看出,从坡耕地演替到气候顶级辽东栎阶段,地上植被、地下根系和枯落物生物量总体表现出增加的趋势,且均在辽东栎 + 油松混交林阶段达到峰值.白桦、辽东栎 + 油松混交林和辽东栎这 3 个演替阶段植被各组分的生物量无显著性差异($P > 0.05$).

表 3 不同植被演替阶段群落基本特征¹⁾

Table 3 Basic characteristics of communities at different vegetation succession stages

演替阶段	物种数	盖度/%	Margalef 指数	Shannon-Wiener 指数	Pielou 指数	Simpson 指数	土壤容重/ $\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$		
							0 ~ 5 cm	5 ~ 20 cm	20 ~ 40 cm
坡耕地	9	85.00 ± 5.00bc	0.68 ± 0.32c	0.61 ± 0.11b	0.69 ± 0.07a	0.35 ± 0.02b	1.15 ± 0.04a	1.28a	1.49 ± 0.13a
撂荒 10 a 草地	16	91.50 ± 4.50ab	1.72 ± 0.01bc	0.95 ± 0.15b	0.42 ± 0.06b	0.39 ± 0.07b	1.06 ± 0.01ab	1.17 ± 0.04bc	1.22 ± 0.06b
撂荒 20 a 草地	24	75.00 ± 15.00c	1.90 ± 0.01bc	1.69 ± 0.05a	0.76 ± 0.07a	0.75 ± 0.03a	1.11 ± 0.03a	1.19 ± 0.01bc	1.17 ± 0.02b
白刺花	39	93.30ab	1.93 ± 0.32bc	1.70 ± 0.08a	0.76 ± 0.03a	0.75 ± 0.01a	0.96 ± 0.04b	1.10 ± 0.03c	1.16 ± 0.06b
白桦	38	98.14 ± 1.86a	3.26 ± 0.81a	2.12 ± 0.39a	0.76 ± 0.10a	0.80 ± 0.11a	1.01 ± 0.04b	1.20 ± 0.02ab	1.23 ± 0.03b
油松	24	100.00a	2.85 ± 0.71ab	2.11 ± 0.47a	0.78 ± 0.13a	0.80 ± 0.14a	0.85 ± 0.06c	1.14 ± 0.03bc	1.22 ± 0.05b
辽东栎 + 油松混交林	25	100.00a	2.28 ± 0.97ab	1.76 ± 0.33a	0.70 ± 0.11a	0.74 ± 0.11a	0.73d	1.01 ± 0.06d	1.13 ± 0.12b
辽东栎	25	100.00a	2.65 ± 0.57ab	2.01 ± 0.17a	0.78 ± 0.03a	0.81 ± 0.03a	0.79 ± 0.05cd	1.11 ± 0.03c	1.14 ± 0.04b

1) 数值表示平均值 ± 标准差,不同小写字母表示不同演替阶段差异显著($P < 0.05$)



不同小写字母表示不同演替阶段植被生物量差异显著($P < 0.05$); 植被类型: A 为坡耕地(玉米), B 为撂荒 10 a 草地, C 为撂荒 20 a 草地, D 为白刺花, E 为白桦, F 为油松, G 为辽东栎 + 油松混交林, H 为辽东栎, 下同

图 2 不同植被演替阶段生物量

Fig. 2 Biomass at different vegetation succession stages

3.2 不同演替阶段植被碳密度的变化

据图 3 可知,研究区地上植被、地下根系和枯落物碳密度均表现出随恢复时间的延长而增加的特征,且均在辽东栎 + 油松混交林阶段达到峰值.演替前期,植被各组分碳密度变化不明显($P > 0.05$),演替中期增加显著($P < 0.05$),演替后期呈波动持稳

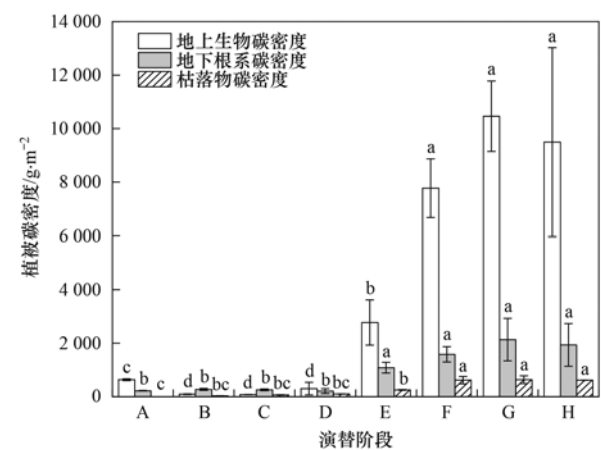
坡耕地地上生物量($1\,339.34\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$)大于撂荒 10 a 草地($201.76\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$)、20 a 草地($170.52\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$)和白刺花($637.50\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$)且差异显著($P < 0.05$).白刺花到白桦阶段,地上生物量增加迅速($P < 0.05$),油松到辽东栎阶段,地上生物量则趋向稳定($P > 0.05$).根系生物量方面,白桦以前,各演替阶段之间无明显变化($P > 0.05$);白刺花到白桦阶段,根系生物量呈显著增加($P < 0.05$),之后波动持稳.枯落物和根系生物量变化规律一致.白桦以前,从坡耕地到白刺花阶段,枯落物生物量表现出小幅增加($P > 0.05$).白刺花到白桦阶段,枯落物生物量则快速增加($P < 0.05$)(图 2).

状态($P > 0.05$).

地上生物碳密度方面,坡耕地($636.18\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$)显著大于撂荒 10 a 草地($95.84\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$)、20 a 草地($80.99\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$)和白刺花($302.81\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$)($P < 0.05$).白桦碳密度($2\,773.05\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$)显著大于白刺花($P < 0.05$),油松碳密度($7\,771.48\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$)显著大于白桦.白桦以后,地上生物碳密度总体趋向稳定($P > 0.05$).根系碳密度方面,坡耕地、撂荒草地和白刺花之间差异不显著($P > 0.05$),但根系碳密度在白桦阶段显著增加($P < 0.05$),之后各演替阶段总体变化不大($P > 0.05$).枯落物碳密度和根系碳密度变化趋势基本一致,乔木林地枯落物较灌木、草地和坡耕地具有明显的碳汇功能($P < 0.05$,图 3).

从不同演替阶段植被碳密度的组成来看,坡耕地地上生物碳密度的比例最大(73.99%),根系碳密度在撂荒 10 a 草地(68.17%)和 20 a 草地(63.67%)中占主导地位,白刺花地上生物碳密度约占植被总碳密度的 49.13%,4 个乔木阶段地上生物碳密度的比例最大(67.47%~79.06%,图 3).

综合来看,与坡耕地比较,其他 7 个演替阶段植被总碳密度分别增加了 - 77.76%、- 77.57%、- 65.95%、127.06%、451.18%、631.02% 和



不同小写字母表示不同演替阶段植被碳密度差异显著 ($P < 0.05$)

图3 不同植被演替阶段植被碳密度

Fig. 3 Carbon density of vegetation at different vegetation succession stages

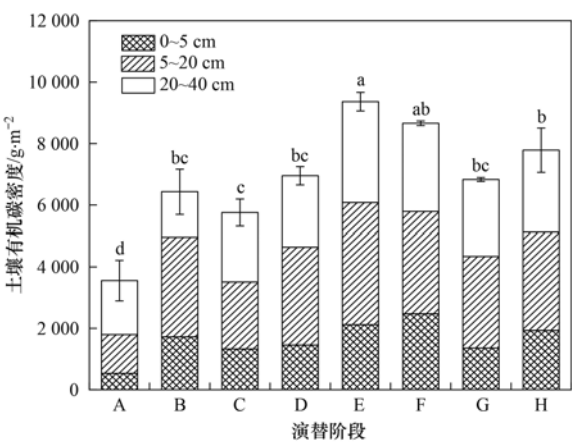
565.69%.

3.3 不同演替阶段土壤有机碳密度和植被-土壤系统碳密度的变化

图4表明,在植被演替作用下,研究区0~40 cm 土层土壤有机碳密度表现出波动增加的特征.坡耕地0~40 cm 土层土壤有机碳密度最小($3\,552.10\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$),白桦阶段最大($9\,363.90\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$),为坡耕地的2.64倍.坡耕地0~40 cm 土层土壤有机碳密度与其他7个演替阶段差异显著($P < 0.05$).撂荒草地与白刺花无显著差异($P > 0.05$),油松、辽东栎+油松混交林和辽东栎土壤有机碳密度与撂荒10 a 草地、白刺花差异总体不显著($P > 0.05$),表明除白桦外,其他林草地对0~40 cm 土层土壤有机碳密度的影响无明显差异($P > 0.05$).

本研究表明,坡耕地0~5 cm 土层土壤有机碳密度与其他7个演替阶段差异显著($P < 0.05$),说明植被恢复对提高贴地表层的土壤固碳效应作用明显.坡耕地、撂荒草地5~20 cm 和20~40 cm 土层土壤有机碳密度和其他演替阶段对比差异显著($P < 0.05$),乔灌林地对亚表层和更深层土壤的固碳能力明显大于草地和坡耕地(图4).

从图5可以看出,不同演替阶段的植被-土壤系统碳密度随恢复时间延长表现出增加的特征.白桦以前,各演替阶段的碳密度增幅不大,在白桦和油松这2个阶段增加最快,油松及之后各阶段趋向稳定.演替初期农地生态系统碳密度最低,为 $4\,395.70\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$,其他7个阶段分别较农地增加了55.54%、40.37%、69.96%、202.48%、326.35%、357.43%和351.07%.乔木阶段的植被-土壤系统碳汇效应最强,其次为灌木和草地,农地最弱.



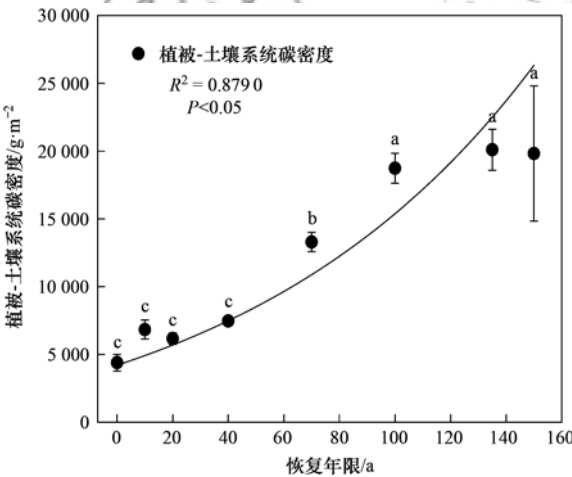
不同小写字母表示不同演替阶段0~40 cm 土层土壤

有机碳密度差异显著 ($P < 0.05$)

图4 不同植被演替阶段土壤有机碳密度

Fig. 4 Soil organic carbon density at different vegetation succession stages

8个演替阶段的植被-土壤系统各组分碳密度总体表征为:土壤层>地上生物层>根系层>枯落物层.油松以前各阶段的碳密度以土壤碳密度为主(70.43%~94.05%),其中撂荒草地占比最高.油松及之后各阶段主要表现为植被固碳(53.79%~66.04%,表4).



不同小写字母表示不同演替阶段的植被-

土壤系统碳密度差异显著 ($P < 0.05$)

图5 不同演替阶段的植被-土壤系统碳密度

Fig. 5 Carbon density of vegetation-soil system at different succession stages

3.4 演替过程中植被群落特征变化对植被-土壤系统碳密度的影响

如表5所示,研究区8个演替阶段的植被碳密度与土壤碳密度呈不显著的相关关系($P > 0.05$),表明二者存在正反馈的相互作用效应.植被碳密度与植被-土壤系统碳密度的正相关关系显著($P < 0.05$),而土壤碳密度与植被-土壤系统之间的正相关关系不显著($P > 0.05$).

表 4 不同植被演替阶段地上生物、地下根系、枯落物和土壤层碳密度及其占比
Table 4 Carbon density and its proportion in above-ground vegetation, below-ground roots, litter, and soil layers of different vegetation succession stages

演替阶段	地上生物		地下根系(0~40 cm)		枯落物		土壤层(0~40 cm)		植被+土壤层	
	碳密度 /g·m ⁻²	占比 /%	碳密度 /g·m ⁻²	占比 /%	碳密度 /g·m ⁻²	占比 /%	碳密度 /g·m ⁻²	占比 /%	总碳密度 /g·m ⁻²	合计 /%
坡耕地	636.18	14.47	207.44	4.72	0.00	0.00	3 552.07	80.81	4 395.70	100
撂荒 10 a 草地	95.84	1.40	274.40	4.01	36.91	0.54	6 430.05	94.05	6 837.20	100
撂荒 20 a 草地	80.99	1.31	258.52	4.19	76.00	1.23	5 754.87	93.27	6 170.39	100
白刺花	302.81	4.05	118.40	1.58	98.33	1.32	6 951.56	93.05	7 471.10	100
白桦	2 773.05	20.86	906.12	6.81	253.06	1.90	9 363.93	70.43	13 296.17	100
油松	7 771.48	41.47	1 689.47	9.01	620.55	3.31	8 659.66	46.21	18 741.16	100
辽东栎+油松混交林	10 461.16	52.03	2 134.08	10.61	682.83	3.40	6 829.05	33.96	20 107.12	100
辽东栎	9 495.73	47.89	1 929.54	9.73	618.11	3.12	7 784.15	39.26	19 827.53	100

表 5 不同演替阶段群落结构组成和多样性与植被-土壤系统碳密度的相关性系数¹⁾
Table 5 Correlation coefficients between community structure composition, diversity, and vegetation-soil system carbon density at different succession stages

碳密度	物种数	盖度	Margalef 指数	Shannon-Wiener 指数	Pielou 指数	Simpson 指数	地上 生物量	根系 生物量	枯落物 生物量	植被 碳密度	土壤有机 碳密度
植被碳密度	0.33	0.85 **	0.62	0.62	0.45	0.43	0.98 **	0.79 *	0.83 *	—	—
土壤有机碳密度	0.66	0.73 *	0.95 **	0.95 **	0.68	0.82 *	0.50	0.45	0.67	0.48	—
植被-土壤系统碳密度	0.54	0.95 **	0.74 *	0.74 *	0.48	0.57	0.86 **	0.86 **	0.95 **	0.83 *	0.67

1) * 表示在 0.05 水平上显著相关(双侧), ** 表示在 0.01 水平上显著相关(双侧)

植被碳密度与群落盖度、地上生物量、根系生物量和枯落物生物量显著相关($P < 0.05$). 群落演替过程中植被多样性指数的增加有利于提高植被碳密度,但相关性不显著($P > 0.05$). 土壤有机碳密度与群落盖度、Margalef 指数、Shannon-Wiener 指数和 Simpson 指数相关程度较高($P < 0.05$). 植被-土壤系统碳密度与群落盖度、Margalef 指数、Shannon-Wiener 指数、地上生物量、根系生物量和枯落物生物量显著相关($P < 0.05$).

4 讨论

4.1 植被演替对植物多样性和生物量的影响

子午岭地区 8 个植被演替阶段的群落盖度呈现出增加的趋势(表 3). 演替初期,坡耕地作物间杂草较少,调查期间玉米正处于灌浆期,植物生长达到鼎盛,样地平均盖度为 85%. 撂荒草地枯落物蓄存量少和缺少垂直结构^[10,25],导致该阶段植被盖度与坡耕地差异不显著($P > 0.05$). 白刺花阶段群落盖度较坡耕地和草地提升,达到了 93.30%,白刺花群落垂直结构的出现以及地表枯落物的较快蓄积是引起该阶段植被盖度增长较大的主要原因^[28]. 植被演替到白桦阶段,群落垂直分层数量增加,枯落物快速累积,盖度(98.14%)较白刺花进一步增加. 白桦以后各阶段,地上活立木和枯落物进一步蓄积,群落总盖度达到 100%. 已有研究指出,子午岭次生林区林下地表枯落物盖度接近 100%,枯落物通过覆盖地表,

为土壤碳素的增加提供了物质来源,在未来的林地抚育管理中应保护枯落物和重视其生态作用^[26].

调查表明,150 a 的植被恢复过程中物种数量呈现出先增加后缓慢减少直至趋向稳定的变化特征,演替中期即白桦阶段达到最大值(表 3). 与物种数量变化密切相关的物种 Margalef 和 Shannon-Wiener 等指数在演替中期(70~80 a)最高,这与李裕元等^[37]的研究结果相一致. 撂荒 10 a 草地、20 a 草地和白刺花等演替早期先锋单优物种在适应和改造劣地的过程中,逐步改善了植被生长环境,增加了物种多样性. 从白刺花演替到白桦,群落垂直结构分异特征更加明显,物种数量增多,先锋植物、过渡植物、伴生植物、喜阳植物和耐荫植物共存,物种多样性达到最大. 本研究得出的植被群落多样性变化规律证实了中期物种丰富度假说^[25]. 植被演替后期如辽东栎+油松混交林和辽东栎,其种间竞争加剧,伴生植物、过渡植物和林下喜阳植物逐渐被演替,优势种、建群种和林下耐荫植物发展成为群落主要的植被类型,各分层物种数量变化不大,群落结构和多样性指数等渐趋稳定. 董凌勃等^[25]在陕北纸坊沟流域的研究同样发现,退耕草地的 Simpson 指数与 Pielou 指数也表现出先增加后减少的特征,表现出植物在竞争生长过程中,维持着与生境条件(光照和养分)的动态平衡关系.

不同演替阶段植被各组分生物量呈指数函数关系增加(图 2). 演替初期和前期,由于作物、草地和

白刺花植物生态学性质的影响,导致地上生物、地下根系和枯落物生物量较小。从白刺花演替到白桦,植被生物量得到了快速蓄积,这主要受样地优势种从低矮灌木演变为高大乔木,以及白桦林地群落垂直复层结构发育的综合影响。白桦到油松阶段,植被生物量持续增加。一方面林地枯落物积累时间较长;另一方面,油松林地郁闭度、林分密度、树高和胸径等均较白桦偏高(表1),这就有利于地上和地下生物量的增加。较高的林地郁闭度(80%左右)和适宜的林分密度($1\,400\text{株}\cdot\text{hm}^{-2}$ 左右)^[38]是植被生物量在辽东栎+油松混交林阶段达到峰值的主要原因。姜鹏等^[39]对木兰围场几种典型恢复植被类型生物量的比较分析中得出,由于阔叶与针叶混交植被配置,有效地利用了光照与空间资源,林分郁闭度增加,致使混交林的生物量最大。

4.2 植被-土壤系统碳密度变化对植被演替的响应

子午岭地区 150 a 的自然演替过程明显提高了植被碳密度和土壤碳密度(图3和图4)。植被碳密度与生物量的变化趋势一致,植被生物量的多寡决定了碳密度的蓄存量^[15,30]。不同演替阶段之间的土壤固碳功能差异较大(图4)^[40]。根据土壤碳密度的计算方法^[36],土壤容重和有机碳含量的变化共同影响着不同演替阶段土壤碳密度的累积量(表2)。草地群落生物多样性的增加^[37],枯落物和地下根系的输入增加了土壤有机碳密度,以及较高的地表覆盖度减轻了雨滴击溅侵蚀和地表径流对土壤的冲刷,降低了土壤碳素的流失^[26,29,41],这都是导致撂荒 10 a 草地土壤碳密度较坡耕地呈显著增加的原因($P < 0.05$)。白桦及之后各阶段土壤碳密度较草地和白刺花进一步增加,其中植被根系和枯落物的大量输入提高了土壤有机碳含量(图2和图4)^[41],较高的群落多样性增强了土壤的固碳能力(表5),此外较高的林地郁闭度调控了土壤温度,减少了土壤有机碳的损耗,有利于土壤碳密度的增加^[42](表1)。辽东栎+油松混交林和辽东栎较低的土壤容重以及较高的土壤异养呼吸速率是导致其土壤碳密度较低的主要原因^[43]。

本研究发现,植被碳密度和土壤碳密度存在正反馈的相互作用效应,有效提升了植被-土壤系统的碳汇功能^[25](表5)。地上生物、根系和枯落物碳密度均随植被演替表现出增加的趋势。生态恢复过程中,根系生物量和枯落物的输入,在微生物分解作用下,极大改善了土壤理化性状,提高了土壤有机碳含量和碳密度,尤其以 0~5 cm 土层增加最为明显(图4)^[44,45]。土壤有机碳含量的增加,为植被生长提供了大量营养元素,促进了植被的恢复。因此,良性循

环的植被-土壤系统有利于生物的不断演替,增强了生态系统的固碳功能。

生态系统碳密度由植被和土壤两部分组成^[46],研究区各演替阶段植被-土壤系统碳密度随恢复时间的延长表现出增加的特征(表4)。Deng 等^[21]研究表明,在年降水量 $>550\text{ mm}$ 的子午岭地区,植被固碳主要受恢复年限的影响。由于该地区土层浅薄的客观实际,课题组采集并估算了 40 cm 土层厚度的土壤碳密度,这就导致演替中后期乔木阶段土壤碳密度在植被-土壤系统碳密度中的比重小于植被部分。不同演替阶段植被-土壤系统碳密度的指数变化趋势是植被碳密度和土壤碳密度共同作用的结果,演替中后期的变化趋势主要受植被碳密度的影响(图3~5)。与传统上以 1 m 采样深度估算土壤固碳功能的研究比较^[45],本研究受土样采集深度的影响,会导致不同演替阶段植被-土壤系统各组分碳密度的比例关系发生变化。研究发现植被群落的次生演替过程影响了不同阶段植被-土壤系统碳密度的组分,油松以前各阶段以土壤固碳的形式为主(70.43%~94.05%),油松及之后各阶段则主要表现为植被固碳(53.79%~66.04%,表4)。

群落盖度、Margalef 指数、Shannon-Wiener 指数、地上生物量、根系和枯落物生物量与植被-土壤系统碳密度显著相关($P < 0.05$,表5)。植被演替影响下,群落盖度越大,表明植被垂直结构越复杂,地上活立木、地下根系和地表枯落物蓄积量越大,越有利于植被碳密度的增加(表3)。群落盖度的增加保护了表层土壤结构^[25],演替中后期较高的植被 Margalef 指数和 Shannon-Wiener 指数,意味着地下根系生物量越大(表3和图2),有效发挥了固结、缠绕和改善土壤结构以及增汇的作用^[37]。大量枯落物的蓄积,改善了土壤理化特性,减轻了土壤侵蚀^[26],提高了土壤固碳能力。

5 结论

(1)黄土高原子午岭地区 150 a 左右的植被次生演替过程提高了植被层(地上生物、地下根系、枯落物)和土壤层的固碳功能,长期恢复碳汇效应明显。

(2)植被生物量和碳密度在演替前期增加缓慢,中后期显著增加($P < 0.05$)。土壤有机碳密度则在撂荒 10 a 草地和白桦阶段增幅最大,表明植被恢复初期与中期的土壤固碳作用明显,而植被碳密度的增加是植被与环境长期作用的结果并受植被生态学特性的影响。

(3)不同演替阶段的植被-土壤系统碳密度差异

明显,乔木、灌木和草地生态系统固碳能力分别是农地的 4.09、1.70 和 1.48 倍。群落盖度、Margalef 指数、Shannon-Wiener 指数、地上生物量、根系生物量和枯落物生物量均在演替后期趋向稳定,对植被-土壤系统碳密度的影响显著($P < 0.05$)。

(4) 植被碳密度与土壤碳密度存在正向的相互作用效应,有效提升了生态系统的碳汇功能。本研究有助于明晰脆弱区生态恢复的固碳功能,促进植被长期恢复和巩固生态恢复成效。

致谢:陕西省延安市吴起县吴起高级中学冯学慧老师在野外植被调查和土壤采样提供的帮助,在此表示感谢。

参考文献:

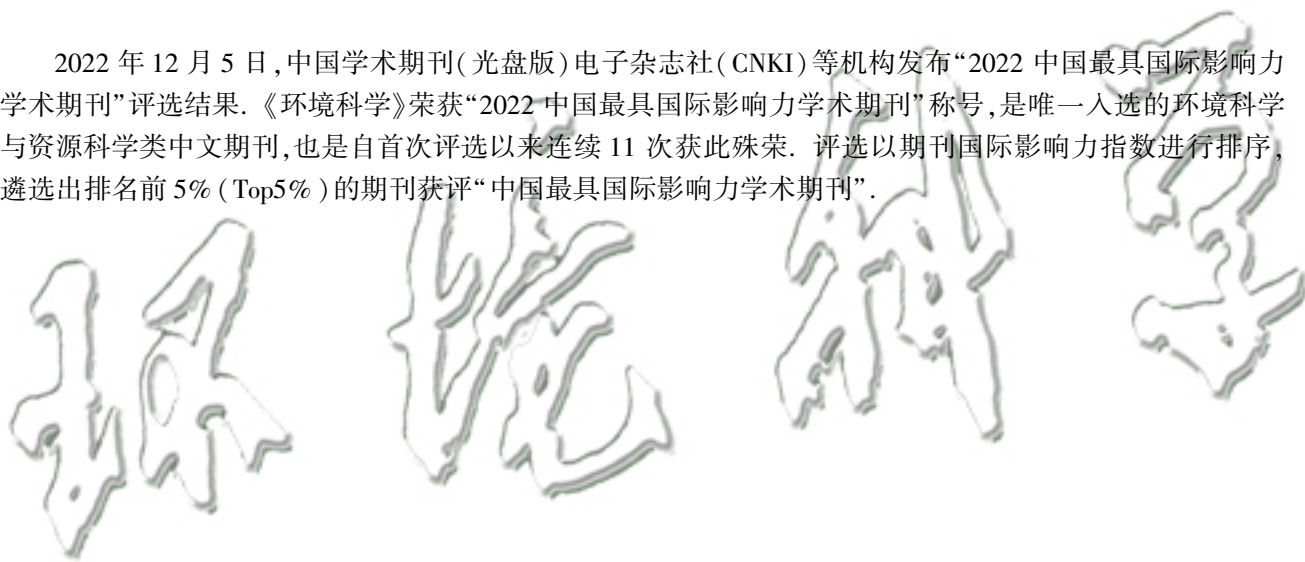
- [1] 张玉铭, 胡春胜, 张佳宝, 等. 农田土壤主要温室气体(CO_2 、 CH_4 、 N_2O)的源/汇强度及其温室效应研究进展[J]. 中国生态农业学报, 2011, **19**(4): 966-975.
Zhang Y M, Hu C S, Zhang J B, *et al.* Research advances on source/sink intensities and greenhouse effects of CO_2 , CH_4 and N_2O in agricultural soils [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2011, **19**(4): 966-975.
- [2] 孙颖. 人类活动对气候系统的影响——解读 IPCC 第六次评估报告第一工作组报告第三章[J]. 大气科学学报, 2021, **44**(5): 654-657.
Sun Y. Impact of human activities on climate system: an interpretation of Chapter III of WGI report of IPCC AR6 [J]. Transactions of Atmospheric Sciences, 2021, **44**(5): 654-657.
- [3] 李缘缘, 魏伟, 周俊菊, 等. 中国土地利用碳排放变化及协调分区[J]. 环境科学, 2023, **44**(3): 1267-1276.
Li Y Y, Wei W, Zhou J J, *et al.* Changes in land use carbon emissions and coordinated zoning in China [J]. Environmental Science, 2023, **44**(3): 1267-1276.
- [4] 李辉, 庞博, 朱法华, 等. 碳减排背景下我国与世界主要能源消费国能源消费结构与模式对比[J]. 环境科学, 2022, **43**(11): 5294-5304.
Li H, Pang B, Zhu F H, *et al.* Comparative energy consumption structure and mode between China and major energy consuming countries under the background of carbon emission reduction [J]. Environmental Science, 2022, **43**(11): 5294-5304.
- [5] 丁仲礼. 中国碳中和框架路线图研究[J]. 中国工业和信息化, 2021, (8): 54-61.
- [6] Hong S B, Yin G D, Piao S L, *et al.* Divergent responses of soil organic carbon to afforestation [J]. Nature Sustainability, 2020, **3**(9): 694-700.
- [7] Favero A, Daigneault A, Sohngen B. Forests: carbon sequestration, biomass energy, or both? [J]. Science Advances, 2020, **6**(13), doi: 10.1126/sciadv. aay6792.
- [8] 刘祥宏, 阎永军, 刘伟, 等. 碳中和战略下煤矿区生态碳汇体系构建及功能提升展望[J]. 环境科学, 2022, **43**(4): 2237-2250.
Liu X H, Yan Y J, Liu W, *et al.* System construction and the function improvement of ecological carbon sink in coal mining areas under the carbon neutral strategy [J]. Environmental Science, 2022, **43**(4): 2237-2250.
- [9] 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.
- [10] 季波, 谢应忠, 何建龙, 等. 宁夏典型温性天然草地固碳特征[J]. 应用生态学报, 2020, **31**(11): 3657-3664.
Ji B, Xie Y Z, He J L, *et al.* Carbon sequestration characteristics of typical temperate natural grasslands in Ningxia, China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2020, **31**(11): 3657-3664.
- [11] Li M D, Cui Y P, Fu Y M, *et al.* Simulating the potential sequestration of three major greenhouse gases in China's natural ecosystems [J]. Forests, 2020, **11**(2), doi: 10.3390/f11020128.
- [12] Lu F, Hu H F, Sun W J, *et al.* Effects of national ecological restoration projects on carbon sequestration in China from 2001 to 2010 [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2018, **115**(16): 4039-4044.
- [13] 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.
- [14] 刘玉林, 朱广宇, 邓蕾, 等. 黄土高原植被自然恢复和人工造林对土壤碳氮储量的影响[J]. 应用生态学报, 2018, **29**(7): 2163-2172.
Liu Y L, Zhu G Y, Deng L, *et al.* Effects of natural vegetation restoration and afforestation on soil carbon and nitrogen storage in the Loess Plateau, China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2018, **29**(7): 2163-2172.
- [15] 张逸如, 刘晓彤, 高文强, 等. 天然林保护工程区近 20 年森林植被碳储量动态及碳汇(源)特征[J]. 生态学报, 2021, **41**(13): 5093-5105.
Zhang Y R, Liu X T, Gao W Q, *et al.* Dynamic changes of forest vegetation carbon storage and the characteristics of carbon sink (source) in the Natural Forest Protection Project region for the past 20 years [J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, **41**(13): 5093-5105.
- [16] Paul T, Kimberley M O, Beets P N. Natural forests in New Zealand—a large terrestrial carbon pool in a national state of equilibrium [J]. Forest Ecosystems, 2021, **8**(1), doi: 10.1186/s40663-021-00312-0.
- [17] 邹厚远, 刘国彬, 王晗生. 子午岭林区北部近 50 年植被的变化发展[J]. 西北植物学报, 2002, **22**(1): 1-8.
Zou H Y, Liu G B, Wang H S. The vegetation development in North Ziwuling forest region in last fifty years [J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2002, **22**(1): 1-8.
- [18] 周印东, 吴金水, 赵世伟, 等. 子午岭植被演替过程中土壤剖面有机质与持水性能变化[J]. 西北植物学报, 2003, **23**(6): 895-900.
Zhou Y D, Wu J S, Zhao S W, *et al.* Change of soil organic matter and water holding ability during vegetation succession in Ziwuling region [J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2003, **23**(6): 895-900.
- [19] Fu X L, Shao M A, Wei X R, *et al.* Soil organic carbon and total nitrogen as affected by vegetation types in Northern Loess Plateau of China [J]. Geoderma, 2010, **155**(1-2): 31-35.
- [20] 王娟, 陈云明, 曹扬, 等. 子午岭辽东栎林不同组分碳含量与碳储量[J]. 生态学报, 2012, **31**(12): 3058-3063.
Wang J, Chen Y M, Cao Y, *et al.* Carbon concentration and carbon storage in different components of natural *Quercus wutaishanica* forest in Ziwuling of Loess Plateau, Northwest China

- [J]. Chinese Journal of Ecology, 2012, **31**(12): 3058-3063.
- [21] Deng L, Wang K B, Chen M L, *et al.* Soil organic carbon storage capacity positively related to forest succession on the Loess Plateau, China[J]. CATENA, 2013, **110**: 1-7.
- [22] 姚小萌. 子午岭植被恢复下土壤碳库演变特征及影响机理研究[D]. 西安: 陕西师范大学, 2016.
- [23] 王承书, 高峰, 孙文义, 等. 黄土丘陵沟壑区坡沟系统不同降雨类型的土壤入渗特征[J]. 生态学报, 2021, **41**(8): 3111-3122.
- Wang C S, Gao F, Sun W Y, *et al.* Rainfall-infiltration process and characteristics of slope-gully system in the hilly and gully region of the Loess Plateau[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, **41**(8): 3111-3122.
- [24] 雷利平, 王孝安, 郭华, 等. 子午岭地区辽东栎和油松林建群种的更新生态位宽度分析[J]. 西北植物学报, 2007, **27**(7): 1446-1453.
- Lei L P, Wang X A, Guo H, *et al.* Dominant species of regeneration niche in *Quercus liaotungensis* and *Pinus tabulaeformis* forest in Ziuling Mountain[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2007, **27**(7): 1446-1453.
- [25] 董凌勃, 海旭莹, 汪晓珍, 等. 黄土高原退耕还草地植物群落动态对生态系统碳储量的影响[J]. 生态学报, 2020, **40**(23): 8559-8569.
- Dong L B, Hai X Y, Wang X Z, *et al.* Effects of plant community dynamics on ecosystem carbon stocks since returning farmlands to grasslands on the Loess Plateau[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, **40**(23): 8559-8569.
- [26] 许小明, 邹亚东, 孙景梅, 等. 黄土高原北洛河流域林地枯落物特征及水分吸持效应[J]. 生态学报, 2021, **41**(13): 5153-5165.
- Xu X M, Zou Y D, Sun J M, *et al.* Litter characteristics and water retention capacity in major forestland in the Beiluo River Basin of the Loess Plateau[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, **41**(13): 5153-5165.
- [27] 张万儒, 许本彤. 森林土壤定位研究方法[M]. 北京: 中国林业出版社, 1986.
- [28] 栾莉莉, 张光辉, 孙龙, 等. 黄土高原区典型植被枯落物蓄积量空间变化特征[J]. 中国水土保持科学, 2015, **13**(6): 48-53.
- Luan L L, Zhang G H, Sun L, *et al.* Spatial variation of typical plant litters in the Loess Plateau[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2015, **13**(6): 48-53.
- [29] 汪建芳, 王兵, 王忠禹, 等. 黄土高原典型植被枯落物坡面分布及持水特征[J]. 水土保持学报, 2018, **32**(4): 139-144.
- Wang J F, Wang B, Wang Z Y, *et al.* Slope distribution and water holding characteristics of typical vegetation litter on the Loess Plateau[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2018, **32**(4): 139-144.
- [30] Ravindranath N H, Ostwald M. 林业碳汇计量[M]. 李怒云, 吕佳, 译. 北京: 中国林业出版社, 2009.
- Ravindranath N H, Ostwald M. Carbon inventory methods[M]. Li N Y, Lv J, trans. Beijing: China Forestry Publishing House, 2009.
- [31] Deng L, Han Q S, Zhang C, *et al.* Above-ground and below-ground ecosystem biomass accumulation and carbon sequestration with *Caragana Korshinskii* kom plantation development[J]. Land Degradation & Development, 2017, **28**(3): 906-917.
- [32] 卜崇峰, 刘国彬, 张文辉. 黄土丘陵沟壑区狼牙刺的生长特征研究[J]. 西北植物学报, 2004, **24**(10): 1792-1797.
- Bu C F, Liu G B, Zhang W H. Growth of characteristics of *Sophora viciifolia* population in the hilly and gully region of Loess Plateau[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2004, **24**(10): 1792-1797.
- [33] 刘彦春. 川西亚高山主要森林类型恢复过程中地上生物量、生产力变化研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2010.
- Liu Y C. Research on the changes of aboveground biomass and NPP in recovery process for main forest types in subalpine region of western Sichuan[D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry, 2010.
- [34] 刘迎春, 王秋凤, 于贵瑞, 等. 黄土丘陵区两种主要退耕还林树种生态系统碳储量和固碳潜力[J]. 生态学报, 2011, **31**(15): 4277-4286.
- Liu Y C, Wang Q F, Yu G R, *et al.* Ecosystems carbon storage and carbon sequestration potential of two main tree species for the Grain for Green Project on China's hilly Loess Plateau[J]. Acta Ecologica Sinica, 2011, **31**(15): 4277-4286.
- [35] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. (第三版). 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [36] 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.
- [37] 李裕元, 邵明安. 子午岭植被自然恢复过程中植物多样性的变化[J]. 生态学报, 2004, **24**(2): 252-260.
- Li Y Y, Shao M A. The change of plant diversity during natural recovery process of vegetation in Ziuling area[J]. Acta Ecologica Sinica, 2004, **24**(2): 252-260.
- [38] 刘宇, 郭建斌, 王彦辉, 等. 宁夏六盘山不同密度华北落叶松人工林枯落物水文效应[J]. 北京林业大学学报, 2016, **38**(8): 36-44.
- Liu Y, Guo J B, Wang Y H, *et al.* Hydrological effects of forest litter of *Larix principis-rupprechtii* plantations with varying densities in Liupan Mountains of Ningxia, China[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2016, **38**(8): 36-44.
- [39] 姜鹏, 张绍轩, 任佳佳, 等. 木兰围场典型落叶松-杨桦混交林生物量及固碳能力[J]. 生态学报, 2015, **35**(9): 2937-2945.
- Jiang P, Zhang S X, Ren J J, *et al.* Biomass and carbon fixation ability of typical larch-poplar and betula mixed forest in Mulanweichang[J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, **35**(9): 2937-2945.
- [40] 兰志龙, 赵英, 张建国, 等. 陕北黄土丘陵区不同土地利用方式下土壤碳剖面分布特征[J]. 环境科学, 2018, **39**(1): 339-347.
- Lan Z L, Zhao Y, Zhang J G, *et al.* Profile distribution of soil organic and inorganic carbon under different land use types in the Loess Plateau of Northern Shaanxi[J]. Environmental Science, 2018, **39**(1): 339-347.
- [41] 许小明, 田起隆, 孙景梅, 等. 子午岭地区植被演替的土壤碳汇效应[J]. 水土保持学报, 2022, **36**(3): 159-165, 180.
- Xu X M, Tian Q L, Sun J M, *et al.* Effects on soil carbon sink of vegetation succession in the Ziuling area[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2022, **36**(3): 159-165, 180.
- [42] 黎鹏, 张勇, 李夏浩祺, 等. 黄土丘陵区不同退耕还林措施的土壤碳汇效应[J]. 水土保持研究, 2021, **28**(4): 29-33.
- Li P, Zhang Y, Li X H Q, *et al.* Effect of soil carbon sink in the hilly region of the Loess Plateau under Grain for Green Project[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2021, **28**(4): 29-33.
- [43] 孙美美, 宋变兰, 时伟宇, 等. 黄土丘陵区刺槐、辽东栎林生态系统碳汇功能特征[J]. 水土保持研究, 2020, **27**(2): 55-61.
- Sun M M, Song B L, Shi W Y, *et al.* Characteristics of carbon

- sink in Black Locust Plantation and Oak natural secondary forest in Loess Hilly Region [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2020, **27**(2): 55-61.
- [44] Deng L, Liu G B, Shanguan Z P. Land-use conversion and changing soil carbon stocks in China's ' Grain-for-Green ' Program; a synthesis [J]. Global Change Biology, 2014, **20** (11): 3544-3556.
- [45] 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.
- [46] 李妙宇, 上官周平, 邓蕾. 黄土高原地区生态系统碳储量空间分布及其影响因素[J]. 生态学报, 2021, **41**(17): 6786-6799.
- Li M Y, Shanguan Z P, Deng L. Spatial distribution of carbon storages in the terrestrial ecosystems and its influencing factors on the Loess Plateau [J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, **41**(17): 6786-6799.

《环境科学》连续 11 次荣获 “中国最具国际影响力学术期刊”称号

2022 年 12 月 5 日,中国学术期刊(光盘版)电子杂志社(CNKI)等机构发布“2022 中国最具国际影响力学术期刊”评选结果.《环境科学》荣获“2022 中国最具国际影响力学术期刊”称号,是唯一入选的环境科学与资源科学类中文期刊,也是自首次评选以来连续 11 次获此殊荣.评选以期刊国际影响力指数进行排序,遴选出排名前 5% (Top5%) 的期刊获评“中国最具国际影响力学术期刊”.



CONTENTS

Pollution Characteristics and Factors Influencing the Reduction in Ambient PM _{2.5} in Beijing from 2018 to 2020	LIU Bao-xian, LI Qian, SUN Rui-wen, <i>et al.</i>	(2409)
Spatio-temporal Distribution Characteristics of Secondary Aerosol in Beijing-Tianjin-Hebei Urban Agglomeration in Winter	YAO Qing, YANG Xu, TANG Ying-xiao, <i>et al.</i>	(2421)
Changes in Secondary Inorganic Ions in PM _{2.5} at Different Pollution Stages Before and After COVID-19 Control	JIANG Nan, HAO Xue-xin, HAO Qi, <i>et al.</i>	(2430)
On-line Measurement of Trace Elements in PM _{2.5} in Winter in Urban Taiyuan, China: Levels and Source Apportionment	CUI Yang, GUO Li-li, LI Hong-yan, <i>et al.</i>	(2441)
Characteristics and Source Apportionment of Black Carbon Over the Eastern Tibetan Plateau	WANG Hong-lei, LIU Si-han, ZHAO Tian-liang, <i>et al.</i>	(2450)
Characteristics and Source Apportionment of Volatile Organic Compounds in Zhanjiang in Summer	PANG Xiao-die, GAO Bo, CHEN Lai-guo, <i>et al.</i>	(2461)
Ozone Pollution Characteristics and Sensitivity During the Ozone Pollution Days in Summer 2021 of Xinxiang City	HOU Mo, JIANG Xiao-mei, ZHAO Wen-peng, <i>et al.</i>	(2472)
Influence of Typhoon Nangka Process on Ozone Pollution in Hainan Island	FU Chuan-bo, DAN Li, TONG Jin-he, <i>et al.</i>	(2481)
Health Impacts of Air Pollution in Tianjin	HUA Kun, LUO Zhong-wei, JIA Bin, <i>et al.</i>	(2492)
Analysis of Change and Driving Factors of River Environmental Quality in China from 2002 to 2020	YANG Chuan-xi, XUE Yan, GAO Chang, <i>et al.</i>	(2502)
Spatiotemporal Pattern and Driving Force Analysis of Ecological Environmental Quality in Typical Ecological Areas of the Yellow River Basin from 1990 to 2020	WANG Fang, LI Wen-hui, LIN Yan-min, <i>et al.</i>	(2518)
Response of Water Quality in Small Reservoirs to Landscape Composition, Landscape Configuration, and Reservoir Characteristics in the Upper Reaches of the Yangtze River During Dry Season	ZHONG Yong-lin, RAN Jiao-jiao, WEN Wen, <i>et al.</i>	(2528)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Typical Endocrine Disrupting Chemicals in Drains Flowing into the Yellow River of Ningxia	LI Ling-yun, GAO Li, ZHENG Lan-xiang, <i>et al.</i>	(2539)
Occurrence Characteristics of Microplastics and Metal Elements in the Surface Water of Huangpu River and Their Associations with Metal Resistance Genes	LU Jia-wei, XU Chen-ye, HU Chun, <i>et al.</i>	(2551)
Spatial Distribution Characteristics and Source Analysis of Heavy Metals in Urban River Surface Sediments from the Lanzhou Reach of the Yellow River	LI Jun, LI Xu, LI Kai-ming, <i>et al.</i>	(2562)
Distribution and Release Potential of Soil Phosphorus Fractions in Water-level Fluctuation Zone of the Tributary Bay, Three Gorges Reservoir	ZHANG Xue, ZHU Bo, <i>et al.</i>	(2574)
Distribution and Pollution Assessment of Nutrients in the Surface Sediments of Lake in Huoqiu County	LIU Hai, ZHAO Guo-hong, <i>et al.</i>	(2583)
Analysis of Influencing Factors of Chlorophyll-a in Lake Taihu Based on Bayesian Network	LIU Jie, HE Yun-chuan, DENG Jian-ming, <i>et al.</i>	(2592)
Hydrochemical Characteristics and Control Factors of Groundwater in Shunping County, Hebei Province	LIU Yuan-qing, ZHOU Le, LÜ Lin, <i>et al.</i>	(2601)
Distribution, Transformation, and Fate of Per- and Polyfluoroalkyl Substances in Drinking Water Treatment	ZHONG Ting-ting, LIN Tao, LIU Wei, <i>et al.</i>	(2613)
Removal of Cr(VI) via a Nickel Ferrite/Activated Carbon Composite Under Batch Experiments: Study of Characterization, Performance, and Mechanism	ZHANG Hua, LI Rong-hua, CHEN Jin-xiong, <i>et al.</i>	(2622)
Degradation of SMX with Peracetic Acid Activated by Nano Core-shell Co@NC Catalyst	ZHENG Ting-lu, ZHANG Long-long, CHEN Jia-bin, <i>et al.</i>	(2635)
Adsorption Characteristics of Arsenic and Cadmium by FeMnNi-LDH Composite Modified by Fulvic Acid and Its Mechanisms	HE Ya-xin, KE Xin-yi, WEI Shi-qiang, <i>et al.</i>	(2646)
Adsorption Mechanism for Phosphate in Aqueous Solutions of Calcium/Aluminum-rich Sludge Biochar Composite	OUYANG Zhu, CAO Lu, WANG Bing-qian, <i>et al.</i>	(2661)
Sludge Biochar Modified by B-doped and Its Adsorption Behavior and Mechanism of 1,2-DCA in Water	ZHOU Jia-wei, SHI Wei-lin, XU Wei, <i>et al.</i>	(2671)
Response of Forest Ecosystems to Decreasing Atmospheric Nitrogen Deposition	XIE Dan-ni, YANG Dong-xing, DUAN Lei, <i>et al.</i>	(2681)
Impacts of Climate Change and Human Activities on Vegetation Restoration in Typical Grasslands of China	ZHANG Liang-xia, YUE Xiao, ZHOU De-cheng, <i>et al.</i>	(2694)
Spatial-temporal Variation in Net Primary Productivity in Terrestrial Vegetation Ecosystems and Its Driving Forces in Southwest China	XU Yong, HUANG Hai-yan, DAI Qiang-yu, <i>et al.</i>	(2704)
Effects of Different Carbon Inputs on Soil Stoichiometry in Tianshan Mountains	MA Xin-yu, GONG Lu, ZHU Hai-qiang, <i>et al.</i>	(2715)
Effects of Nitrogen and Phosphorus Addition on Soil Nutrient Content and Stoichiometry in Desert Grassland	LIU Shu-xuan, AN Hui, ZHANG Xin-wen, <i>et al.</i>	(2724)
Effect of <i>Spartina alterniflora</i> Invasion on Soil C:N:P Stoichiometry in Coastal Wetland of Hangzhou Bay	LI Wen-qi, XIANG Qi, XIE Xue-feng, <i>et al.</i>	(2735)
Effects of 24 Years Different Straw Return on Soil Carbon, Nitrogen, Phosphorus, and Extracellular Enzymatic Stoichiometry in Dryland of the Loess Plateau, China	YAO Zhi-xia, ZHOU Huai-ping, XIE Wen-yan, <i>et al.</i>	(2746)
Carbon Sequestration Characteristics Under Natural Vegetation Restoration in Ziwuling Area of the Loess Plateau	XU Xiao-ming, ZHANG Xiao-ping, WANG Hao-jia, <i>et al.</i>	(2756)
Effects of Short-term Nitrogen Addition on Soil Organic Carbon Components in <i>Robinia pseudoacacia</i> L. Plantation	JIAN Jun-nan, LIU Wei-chao, ZHU Yu-fan, <i>et al.</i>	(2767)
Response of Soil Organic Carbon Accumulation in Paddy Fields in Fujian Province to Future Temperature Increases	CHE Yan, QIU Long-xia, WU Ling-yun, <i>et al.</i>	(2775)
Species, Habitat Characteristics, and Screening Suggestions of Cadmium Hyperaccumulators in China	ZHAO Xiao-feng, LEI Mei, CHEN Tong-bin, <i>et al.</i>	(2786)
Research Progress on Spatial Differentiation and Influencing Factors of Soil Heavy Metals Based on Geographical Detector	GONG Cang, WANG Shun-xiang, LU Hai-chuan, <i>et al.</i>	(2799)
Geochemical Background and Baseline Value of Soil Chemical Elements in Hebei Province	ZHANG Li-ting, CHENG Hang-xin, XIE Wei-ming, <i>et al.</i>	(2817)
Distribution Characteristics, Ecological Risks, and Source Identification of Heavy Metals in Cultivated Land Under Non-grain Production	QIU Le-feng, ZHU Jin-xia, PAN Yi, <i>et al.</i>	(2829)
Source Analysis and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in the Arable Soil at the Geological High Background, Based on the Township Scale	YU Fei, WANG Jia-bin, WANG Rui, <i>et al.</i>	(2838)
Solid-solution Partitioning Coefficients and Environmental Risk of Cd and Pb in Soil in Chang-Zhu-Tan Area	LI Yu-ying, PENG Chi, LIU Le-le, <i>et al.</i>	(2849)
Ecological Risk and Migration Patterns of Heavy Metals in Soil and Crops in the Lead-Zinc Mining Area in Guizhou, China	MA Hong-hong, ZHANG Li, GUO Fei, <i>et al.</i>	(2856)
Mercury Pollution in Dryland Soil and Evaluation of Maize Safety Production in Guizhou Province	MA Li-jun, ZHOU Lang, SONG Bo, <i>et al.</i>	(2868)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of PAHs in the Soil of Wild <i>Forsythia Suspensa</i> in Shanxi	GUO Jia-jia, WANG Qi, KANG Min-jie, <i>et al.</i>	(2879)
Effects of P on the Uptake and Transport of Cd and As in Wheat Seedlings	WANG Yun, ZHAO Peng, LI Guang-xin, <i>et al.</i>	(2889)
Effects of Silicon Application on Arsenic Sequestration in Iron Plaque and Arsenic Translocation in Rice	LI Lin-feng, WEN Wei-fa, XU Zi-sheng, <i>et al.</i>	(2899)
Characteristics of Soil Microbial Community in Different Habitats in the Process of Ecological Restoration of Haifeng Wetland in Guangdong	MA Jiao-jiao, GAO Chang-jun, YI Xiao-qing, <i>et al.</i>	(2908)
Taxonomic and Functional Diversity of Soil Microbial Communities in Subalpine Meadow with Different Degradation Degrees in Mount Wutai	LUO Zheng-ming, LIU Jin-xian, HU Yan-qiu, <i>et al.</i>	(2918)
Effects of the Transformation from Natural Alpine Grassland to Mixed Artificial Grassland on the Characteristics of Soil Microbial Community	YU Hao, LIU Yue, DENG Ye, <i>et al.</i>	(2928)
Effects of Chinese Milk Vetch Returning Incorporated with Chemical Fertilizer Reduction on the Composition and Function of Soil Bacterial Communities in Paddy Fields	ZHANG Ji-shi, LIU Chun-zeng, ZHENG Chun-feng, <i>et al.</i>	(2936)
Effects of Long-term Sod Cultivation on Chinese Hickory Plantation Soil Fungal Community and Enzyme Activities	HU Ying-bing, LIANG Chen-fei, JIN Jin, <i>et al.</i>	(2945)
Effects of Microplastic High-density Polyethylene on Cotton Growth, Occurrence of <i>Fusarium</i> wilt, and Rhizosphere Soil Bacterial Community	ZHANG Hao, SUN Jie, YANG Hui-ying, <i>et al.</i>	(2955)
Nitrogen Metabolism and Flora Characteristics of Bacteria Algae Complex System	ZHAO Zhi-rui, WU Hai-miao, MA Chao, <i>et al.</i>	(2965)
Analysis of Carbon Emissions and Influencing Factors in China Based on City Scale	WU Jian-sheng, JIN Xue-ru, WANG Han, <i>et al.</i>	(2974)
How Do Carbon Trading Policies Affect Industrial Carbon Productivity: Quasi-natural Experiments from Chinese Provincial Data	FANG Qi, LI Shao-ping, <i>et al.</i>	(2983)
Influence of the Classification of Municipal Solid Wastes on the Reduction of Greenhouse Gas Emissions: A Case Study of Qingdao City, China	CHEN Ji-hong, BIAN Rong-xing, ZHANG Ting-xue, <i>et al.</i>	(2995)
Quantitative Analysis of Spatio-temporal Evolution Characteristics of Seasonal Average Maximum Temperature and Its Influence by Atmospheric Circulation in China from 1950 to 2019	SU Yue, LU Chun-yan, HUANG Yu-fei, <i>et al.</i>	(3003)