

目次(卷终)

基于气象条件指数的我国重点区域 PM _{2.5} 和臭氧复合污染气象影响评估	杨欣, 杨元琴, 李红, 高健, 牛军捷, 储王辉, 刘世杰, 陈义珍, 何友江, 赵好希 (6433)
“2+26”城市 PM _{2.5} 与气象因子的尺度依存关系及影响因素分析	吴舒祺, 金团团, 郑冬阳, 顾杨吻, 赵文吉 (6441)
武汉军运会前后大气 PM _{2.5} 化学组分和来源	刘世豪, 孔少飞, 郑煌, 陈楠, 祝波, 祁士华 (6452)
2016~2020 年邯郸市冬季 PM _{2.5} 污染特征与来源解析	牛红亚, 高娜娜, 鲍晓磊, 胡伟, 胡偲豪, 吴春苗, 马心怡, 纪晓腾, 樊景森, 王金喜 (6463)
渭南市冬季 PM _{2.5} 化学组成及来源解析	郭景宁, 李小飞, 余锋, 张蕊, 高月, 杨雯 (6474)
长三角城郊冬季 PM _{2.5} 中铵盐的形成过程及来源解析	项妍琨, 曹芳, 张雯洪, 范美益, 章炎麟 (6486)
上海城区硝基芳香族化合物的化学组成及特征分析	杨露, 马英歌, 郁建珍, 吴宇航, 乔利平, 周敏, 朱书慧, 黄成, 童张法 (6495)
吕梁市 PM _{2.5} 中多环芳烃的来源解析及健康风险评估	牟玲, 刘紫叶, 李杨勇, 李雪梅, 李晓帆, 刘添, 冯传阳, 姜辛 (6508)
广西背景大气中生物质燃烧对碳质气溶胶组成和吸光性的影响	吴星麒, 曹芳, 洪一航, 邢佳莉 (6518)
南京北郊大气棕碳吸光特性、来源及其季节变化特征	陈星州, 崔世杰, 张运江, 先久坤, 王镜雯, 汪俊峰, 盖鑫磊 (6529)
京津冀地区“煤改电”对 PM _{2.5} 污染的健康效益评估	张茹婷, 陈传敏, 刘松涛, 吴华成, 周卫青, 李朋 (6541)
基于化学损耗修正的青岛胶州市环境 VOCs 来源解析	孔翠丽, 吴雨彤, 顾瑶, 宋江邦, 孟赫, 石来元, 刘保双 (6551)
聊城市城区夏季 VOCs 污染特征及来源解析	李万勇, 黄浩瑜, 王艳振, 朱子博, 王一秋, 高艳珊, 彭娜娜, 伦小秀, 黄亮, 冯如帆, 菅月诚, 王强 (6564)
基于三维空气质量模型的淄博市臭氧及前体物来源解析	张馨心, 赵秀颖, 黄凌, 薛金, 卞锦婷, 王杨君, 李莉 (6576)
中国高温下臭氧抑制事件的时空特征及其影响因素	欧林冲, 陈伟华, 伍永康, 吴乐敏, 王雪梅 (6586)
基于无人机的城市大气细颗粒物与臭氧污染探测与溯源研究进展	曲雅微, 王体健, 袁成, 吴昊 (6598)
京津冀地区机动车细颗粒物污染的健康影响分析	郝永佩, 宋晓伟, 宋晓东, 王京伟, 程鹏 (6610)
中国水泥行业通过 CCUS 技术的减排潜力评估	魏宁, 刘胜男, 魏凤, 李小春 (6621)
钢铁行业生命周期碳排放核算及减排潜力评估	宋晓璐, 杜帅, 邓陈宁, 谢明辉, 沈鹏, 赵慈, 陈忱, 刘晓宇 (6630)
珠江三角洲二氧化碳源汇演变特征及驱动因素	胡景心, 沙青娥, 刘慧琳, 张雪驰, 郑君瑜 (6643)
东莞市低碳路径下加速电气化对 CO ₂ 和污染物协同减排影响	吴乐敏, 陈丙寅, 欧林冲, 白玉洁, 刘可旋, 王伟文, 彭勃, 王雪梅 (6653)
县域尺度下长株潭地区城市化与碳排放的关系	刘贤赵, 李阳 (6664)
城市草坪温室气体排放特征及影响因素	陈丽涵, 刘硕, 林溢, 郭娜, 臧昆鹏, 陈圆圆, 李嘉鑫, 邱珊珊, 卿雪梅, 洪海祥, 蒋凯, 熊浩宇, 方双喜 (6680)
双视角下中国畜牧业甲烷排放的温室效应	刘舒乐, 严薇, 高庆先, 马占云 (6692)
中国典型流域有机磷酸酯的污染特征与风险评估	赵江陆, 路海健, 吕佳佩, 杨江涛, 罗莹, 曹渺, 孙善伟, 郭昌胜, 徐建 (6700)
黄河下游悬河段饮用水源地土壤重金属污染、来源及健康风险	彭超月, 任翀, 申浩欣, 王艳峰, 段海静, 王玉龙, 李旭辉, 刘德新, 马建华 (6710)
黄河干流沉积物重金属的赋存形态特征及污染评价	王依滴, 欧阳威, 刘连华, 陆中桂 (6720)
土地利用结构与空间格局对鄱阳湖流域中小河流水质的影响	温嘉伟, 王鹏, 黄高翔, 张华, 聂明华, 丁明军, 折远洋 (6728)
内蒙古典型湖泊水环境特征及水质评价	王欣远, 潘保柱, 王立新, 刘铁军, 廖梓龙, 韩语, 杨子杰 (6744)
锡林河上游雨季降水、河水和地下水转化关系	孙金, 王怡璇, 杨璐, 段利民, 褚少杰, 张桂馨, 张波, 刘廷玺 (6754)
西北盐湖流域地下水水化学特征及控制因素	艳艳, 高瑞忠, 刘廷玺, 房丽晶, 王银龙 (6767)
巴里坤-伊吾盆地平原区地下水污染风险评价	刘钰, 曾妍妍, 周金龙, 闫志云, 白凡 (6778)
亚硫酸氢盐强化微量 Fe ²⁺ 活化过二硫酸盐降解扑热息痛	莫苗婷, 聂淑华, 晏彩霞, 丁明军, 陈诗瑶, 聂明华 (6790)
污泥生物炭活化过一硫酸盐降解环丙沙星	郑大洋, 邹佳丽, 徐皓, 王滕, 石宇翔, 陈永健, 李彬阳, 王亚宜, 冯沁, 吴敏 (6801)
NaHCO ₃ 活化荞麦皮生物炭对碘酸钾的吸附	魏红, 赵江娟, 景立明, 钮金芬, 付冉, 董莹 (6811)
竹基 N、P 共掺杂活性炭的制备及其铜离子吸附性能	王贵龙, 刘艳艳, 江荣源, 李思敏, 林冠峰, 卢贝丽, 黄彪, 陈燕丹 (6823)
西南高山峡谷区植被变化及影响因素分析	赖金林, 齐实, 崔冉冉, 廖瑞恩, 唐颖, 李鹏 (6833)
生物炭施用对农田土壤团聚体及有机碳影响的整合分析	孟艳, 沈亚文, 孟维伟, 王旭清, 李宗新, 刘开昌, 代红翠 (6847)
农田土壤碳循环过程及其量化方法	孙昭安, 朱彪 (6857)
生物炭施用 5 a 后对桂北桉树人工林土壤有机碳组分的影响	牟芝熠, 沈育伊, 曹杨, 王紫卉, 陈运霜, 滕秋梅, 黄科朝, 毛馨月, 徐广平 (6869)
喀斯特地区植被恢复下土壤活性有机碳与碳库管理指数的演变特征	蔡华, 舒英格, 王昌敏, 廖远行, 罗秀龙, 龙慧, 李雪梅 (6880)
中国典型抗生素在环境介质中的污染特征与生态风险评估	陈丽红, 曹莹, 李强, 孟甜, 张森 (6894)
基于 MGWR 的土壤 pH 值空间建模及其影响因素分析	赵明松, 陈宣强, 徐少杰, 邱士其, 王世航 (6909)
某燃煤电厂周边农田土壤重金属污染特征及源解析	张军, 李旭, 刘磊玉, 李雨茹 (6921)
重庆典型在产石化场地土壤污染特征及来源解析	张渝蓉, 罗帅, 陈媛, 曹军, 刘斌, 刘元元 (6933)
高垦殖丘陵区不同类型农用地土壤中抗生素抗性基因分布特征	陈瑞, 程建华, 唐翔宇 (6947)
有机肥配施生物炭对果园土壤反硝化微生物和酶活性的影响	邓正昕, 高明, 熊子怡, 王莹燕, 谢军, 王子芳 (6955)
有机肥处理对旱地红壤细菌群落及玉米生产力的影响	林婷婷, 郑洁, 朱国繁, 梁璐, 杨叶钰萍, 刘佳, 徐勤松, 孙波, 蒋瑞霖 (6965)
微塑料和镉复合污染对狼尾草根际土壤微生物群落结构和功能的影响	段莉阳, 张玉, 任学敏, 李玉英, 张英君, 张浩, 韩辉, 陈兆进 (6973)
设施番茄种植年限对土壤理化性质及微生物群落的影响	赵阳阳, 刘银双, 宋瑶, 张晓旭, 贾振华, 黄亚丽 (6982)
3 种氧化剂对焦化场地多环芳烃的修复效果与土著微生物的响应关系	李伟, 王伟伟, 孟祥宇, 孙英杰, 王亚楠, 李书鹏, 杨乐巍, 刘鹏, 刘渊文 (6992)
河北省不同盐渍化土壤类型的微生物多样性与种群结构	刘银双, 牛宏进, 赵阳阳, 孙宏勇, 陈晓波, 黄亚丽 (7004)
玉米根际微生物氮磷转化的功能基因组学分析	汪香君, 姜美彤, 李森, 倪浩为, 孙波, 梁玉婷 (7014)
外源菌剂联合柠檬酸强化龙葵修复土壤镉污染	王楷, 王丽, 王一钲, 游梦, 梁婷, 邹茸, 范洪黎 (7024)
1 株肠杆菌与硫酸盐联合施用对水稻积累镉的影响	张朴心, 姚俊帆, 刘玉玲, 张威宇, 尹雪斐, 铁柏清 (7036)
《环境科学》第 44 卷(2023 年)总目录	(7045)
《环境科学》征订启事(6507)	
《环境科学》征稿简则(6620)	
信息(6743, 6846, 6856)	

喀斯特地区植被恢复下土壤活性有机碳与碳库管理指数的演变特征

蔡华, 舒英格*, 王昌敏, 廖远行, 罗秀龙, 龙慧, 李雪梅

(贵州大学农学院, 贵阳 550025)

摘要: 植被恢复通过改变碳输入和转化速率, 影响陆地生态系统的碳循环. 为探明喀斯特地区植被恢复过程中土壤活性有机碳组分与碳库管理指数的演变特征, 以喀斯特地区草地序列(5、10、15 和 20 a)、灌木序列(5、10、15 和 20 a)和园地序列(5、10 和 15 a)土壤为研究对象, 以相邻农田为对照(CK), 分析了不同植被恢复年限对土壤有机碳(SOC)、易氧化有机碳(ROC_{333} 、 ROC_{167} 和 ROC_{33} , 即能被 333、167 和 33 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ KMnO_4 氧化的土壤活性有机碳)、微生物量碳(MBC)、溶解性有机碳(DOC)及碳库管理指数(CPMI)演变的影响. 结果表明, 与 CK 相比, 0~40 cm 土层草地、灌木和园地序列平均 SOC 含量分别增加了 70.77%、114.40% 和 50.17%. 在 0~20 cm 土层, 随恢复年限增加, 草地序列和园地序列的 SOC 含量呈先升后降势态, 灌木序列呈先升后降再升势态, ROC_{333} 、 ROC_{167} 和 ROC_{33} 与对应序列的 SOC 变化势态一致; 在 20~40 cm 土层, 各序列的 ROC_{333} 、 ROC_{167} 和 ROC_{33} 与对应序列的 SOC 的变化势态不一致. 在 0~40 cm 土层, 草地序列 MBC 含量呈先降后升再降势态, 各土层 MBC 最大值均在 G15; 灌木序列在 0~10 cm 土层为先升后降再升势态, 在 10~40 cm 土层为先升后降势态; 园地序列在 0~30 cm 土层为先升后降势态, 在 30~40 cm 土层为逐渐升高势态. 3 个序列 K_{oc} 大致呈先降后升再降势态, L 和 LI 与 K_{oc} 相反; CPI 呈先升后降势态; 草地和园地序列的碳库管理指数(CPMI)呈先升后降势态, 而灌木序列 CPMI 的则呈先升后降再升势态. SOC、 ROC_{333} 、 ROC_{167} 、 ROC_{33} 和 MBC 含量及 K_{oc} 的年增长量大小为: 灌木 > 草地 > 园地, DOC 和 CPMI 的年增长量大小为: 园地 > 草地 > 灌木. 3 个序列 SOC 及其组分含量均总体随土层增加而降低, 具有明显的表聚性. 冗余分析结果显示碱解氮(AN)是影响喀斯特地区植被恢复下土壤活性有机碳组分和土壤有机碳库的主要环境因子. 综上, 土壤活性有机碳组分和 CPMI 随植被恢复时间发生演变, 不同植被恢复均能一定程度地提高喀斯特地区 SOC 及其组分含量, 灌木恢复促进 SOC 的积累.

关键词: 喀斯特地区; 植被恢复; 土壤; 活性有机碳组分; 碳库管理指数(CPMI); 演变特征

中图分类号: X143 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2023)12-6880-14 DOI: 10.13227/j.hjlx.202301073

Evolution Characteristics of Soil Active Organic Carbon and Carbon Pool Management Index Under Vegetation Restoration in Karst Area

CAI Hua, SHU Ying-ge*, WANG Chang-min, LIAO Yuan-hang, LUO Xiu-long, LONG Hui, LI Xue-mei

(College of Agriculture, Guizhou University, Guiyang 550025, China)

Abstract: Vegetation restoration affects the carbon cycle of terrestrial ecosystems by changing the rate of carbon input and conversion. In order to explore the evolution characteristics of soil active organic carbon components and carbon pool management index during vegetation restoration in karst areas, the soil of a grassland sequence(5, 10, 15, and 20 a), shrub sequence(5, 10, 15, and 20 a), and garden sequence(5, 10, and 15 a) in a karst area was taken as the research object, and the adjacent farmland was taken as the control(CK). The effects of different vegetation restoration years on the evolution of soil organic carbon(SOC), readily oxidizable organic carbon(ROC_{333} , ROC_{167} , and ROC_{33} were all soil active organic carbon that could be oxidized by 333, 167, and 33 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ KMnO_4), microbial biomass carbon(MBC), dissolved organic carbon(DOC), and carbon pool management index(CPMI) were analyzed. The results showed that compared with that of CK, the average grassland, shrub, and garden SOC contents in the 0-40 cm soil layer increased by 70.77%, 114.40%, and 50.17%, respectively. In the 0-20 cm soil layer, with the increase in restoration years, the SOC content of the grassland sequence and garden sequence increased first and then decreased, and that of the shrub sequence increased first, then decreased, and then increased again. ROC_{333} , ROC_{167} , and ROC_{33} were consistent with the SOC change trend of the corresponding sequence. In the 20-40 cm soil layer, the change trend of ROC_{333} , ROC_{167} , and ROC_{33} of each sequence was inconsistent with the SOC of the corresponding sequence. In the 0-40 cm soil layer, the MBC content of the grassland sequence decreased first, then increased, and then decreased, and the maximum value of MBC in each soil layer was in G15. The shrub sequence in the 0-10 cm soil layer increased first, then decreased, and then increased, and in the 10-40 cm soil layer it increased first and then decreased. The garden sequence increased first and then decreased in the 0-30 cm soil layer and gradually increased in the 30-40 cm soil layer. K_{oc} of the three sequences decreased first, then increased, and then decreased, whereas L and LI showed the opposite of K_{oc} . CPI increased first and then decreased; the CPMI of the grassland and garden sequences increased first and then decreased, whereas the CPMI of the shrub sequence increased first, then decreased, and then increased again. The contents of SOC, ROC_{333} , ROC_{167} , ROC_{33} , and MBC and the annual growth of K_{oc} were shrub > grassland > orchard, and the annual growth of DOC and CPMI were orchard > grassland > shrub. The contents of SOC and its components in the three sequences decreased with the increase in soil layer and had obvious surface aggregation. Redundancy analysis showed that alkali-hydrolyzable nitrogen(AN) was the main environmental factor affecting soil active organic carbon components and soil organic carbon pool under the vegetation restoration in the karst area. In summary, soil active

收稿日期: 2023-01-11; 修订日期: 2023-03-03

基金项目: 国家自然科学基金项目(31460133)

作者简介: 蔡华(1995~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为喀斯特地区土壤碳氮循环, E-mail: 2770509301@qq.com

* 通信作者, E-mail: maogen958@163.com

organic carbon components and CPMI evolved with vegetation restoration years. Different vegetation restorations could increase the content of SOC and its components in karst areas to a certain extent, and shrub restoration promotes the accumulation of SOC.

Key words: karst region; vegetation restoration; soil; active organic carbon components; carbon pool management index (CPMI); evolution characteristics

土壤有机碳(SOC)对土壤肥力和环境具有重要意义,对SOC的研究一直是土壤与环境科学的热点领域^[1].SOC作为土壤肥力形成的基础,不但影响土壤质量、功能和粮食产量,在全球气候变化中也扮演重要角色^[2].全球0.1%的SOC变化将引起大气圈 $1\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 CO_2 浓度变化,会显著改变大气中二氧化碳含量,进而影响全球气候变化进程^[3].增加SOC是减缓大气 CO_2 浓度上升和全球变暖的重要手段,也是实现我国“碳中和”目标的有效途径^[4].因此,开展SOC及组分的时空动态研究对于正确评价土壤在全球变化中的地位与作用,具有十分重要的科学意义.

SOC总量的变化非常缓慢,对气候变化、土地管理措施和植被恢复的反应表现出一定的滞后性,在短期内较难观测到其发生的微小变化^[5].活性有机碳组分虽然占SOC总量的比例较小,但可灵敏地反映SOC细微变化,更有助于揭示土壤有机碳的动态变化^[6],常用易氧化有机碳、溶解性有机碳和微生物量碳等指标表征.Lefroy等^[7]在研究易氧化有机碳过程中,首次提出土壤碳库管理指数(carbon pool management index,CPMI).CPMI是土壤有机碳和参考土壤有机碳的比值与土壤有机碳活度指数的乘积,比活性有机碳更为灵敏地反映各种土地利用或管理措施引起的土壤质量下降或更新的程度^[8].前人在若尔盖沙化草地^[9]、黄土高原丘陵沟壑区^[9]、滇南地区桃园^[6]、湖南长沙^[10]和重庆缙云山^[11]等区域对土壤活性有机碳组分开展了大量研究,对于喀斯特地区的研究尚较少^[12~15].已有研究多集中在不同土地利用方式^[9,11]、植被恢复模式^[16,17]和施肥措施^[18~20]等对活性有机碳组分的影响.有研究发现植被恢复能提高土壤活性有机碳组分含量^[5,21],也有研究发现植被恢复导致土壤活性有机碳组分降低或者没有显著变化^[17,22].可见,植被恢复过程中土壤活性有机碳组分的变化仍存在很大的不确定性.这可能是区域类型、恢复年限、植被恢复类型、土层深度和土壤理化性质等因素综合作用的结果^[23,24].因此,深刻地认识植被恢复动态过程中土壤有机碳活性组分的演变特征可为制定合理的生态系统土壤碳管理策略提供理论支撑.

中国西南喀斯特生态系统极为脆弱^[25],可承受灾变阈值弹性小,易受不利因素干扰^[26].植被恢复是该区域一项重要的生态治理措施^[25],植被恢复被

认为是增加SOC固存的有效措施^[23],喀斯特地区的植被恢复初期恢复速度快且具有巨大固碳潜力^[27].由于植被种类及其配置的不同,必然导致凋落物数量、组成和凋落规律,以及环境的不同,从而对土壤碳产生影响^[28],特别是活性碳组分会存在差异^[12].目前,喀斯特地区土壤有机碳组分的研究主要集中在不同植被类型^[12,15]和恢复措施^[13,14]等方面.已有研究发现,在喀斯特地区由耕地到任豆林和自然恢复灌丛,土壤活性有机碳组分含量显著增加^[15],而耕地转变为花椒林后却逐渐降低^[29].然而,关于喀斯特地区石灰土土壤活性有机碳组分随植被恢复过程演变研究却少见报道,人们关于喀斯特地区土壤活性有机碳组分对植被恢复响应的方向、过程、强度及规律的认识十分匮乏.因此,本研究运用时间序列法,通过阐明喀斯特地区石灰土植被恢复过程中土壤活性有机碳组分的演变特征和影响因素,旨在为我国喀斯特地区植被恢复重建和碳循环管理提供理论依据.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

贵州省贵安新区($26^{\circ}11'07''\sim 26^{\circ}36'56''\text{N}$, $105^{\circ}56'20''\sim 106^{\circ}39'10''\text{E}$)是我国第8个国家级新区,属于高原型亚热带季风湿润气候区,年均降雨量为 $1\,165\text{ mm}$,年均气温为 $12.80\sim 16.20\text{ }^{\circ}\text{C}$,年均相对湿度为 77% ,海拔为 $1\,018\sim 1\,647\text{ m}$,境内地形条件复杂,属典型喀斯特地貌,土地利用方式多样,时间序列完整.本研究以贵安新区马场镇平阳村、林卡村、新寨村和凯掌村为研究区,区域母岩以石灰岩和泥质灰岩为主,土壤类型主要为石灰土,通过实地考察和走访当地村民,两者相结合确定植被类型和恢复年限.

1.2 样地选取和采样

在充分进行野外调研的基础上,综合考虑地形、土壤类型、植被恢复类型和恢复年限等因素,在研究区内选取不同植被恢复类型、恢复年限、地形和土壤类型等环境因子基本一致的序列样地,包括草地序列(Grass序列为G5:5 a, G10:10 a, G15:15 a, G20:20 a)、灌木序列(Shrub序列为S5:5 a, S10:10 a, S15:15 a, S20:20 a)和园地序列(Orchard序列为O5:5 a, O10:10 a, O15:15 a),并以相邻长期耕作的农田为对照(CK),其中草地序

列植被类型主要为白茅[*Imperata cylindrical*(L.) Beauv.],灌木序列以火棘(*Pyracantha fortuneana*)、青蒿(*Artemisia annua*)、野莓(*Rubus idaeus*L.)和野花椒(*Zanthoxylum simulans*)等为优势种群,园地序列主要种植桃树(*Amygdalus persica*L.),农田主要种植玉米(*Zea mays*),样地详情见

表 1. 选取典型样点,按 0~5、5~10、10~20、20~30 和 30~40 cm 划分土层,采用“S”形布点,每一样点重复采样 3 次.土壤样品去除肉眼可见的根系石砾动植物残体等,过 2 mm 筛后分成两份,一份于 4℃ 冰箱保存用于土壤微生物量碳测定,另一份土壤风干后备用.

表 1 样地基本情况

Table 1 General situation of experimental sample sites

样地类型	恢复年限/a	海拔/m	经纬度	主要植被
农田	0	1 211	26°20'52"N, 106°32'19"E	玉米(<i>Zea mays</i>)
	5	1 217	26°22'47"N, 106°32'18"E	白茅[<i>Imperata cylindrical</i> (L.) Beauv.]
草地	10	1 236	26°19'27"N, 106°29'10"E	白茅
	15	1 285	26°20'05"N, 106°27'56"E	白茅
	20	1 249	26°19'59"N, 106°28'47"E	白茅
	5	1 216	26°21'04"N, 106°32'21"E	火棘(<i>Pyracantha fortuneana</i>)、青蒿(<i>Artemisia annua</i>)和野莓(<i>Rubus idaeus</i> L.)
灌木	10	1 278	26°20'14"N, 106°27'46"E	火棘、青蒿和野莓
	15	1 243	26°19'15"N, 106°28'41"E	火棘、青蒿、野莓和野花椒(<i>Zanthoxylum simulans</i>)
	20	1 289	26°18'54"N, 106°28'39"E	火棘、青蒿、野莓和野花椒
	5	1 225	26°20'54"N, 106°32'19"E	桃树(<i>Amygdalus persica</i> L.)
园地	10	1 209	26°20'52"N, 106°32'19"E	桃树
	15	1 215	26°21'04"N, 106°32'21"E	桃树

1.3 样品分析及方法

土壤有机碳(SOC)采用重铬酸钾外加热法、pH 采用电位法(水:土=2.5:1)、全磷(TP)和全钾(TK)采用 NaOH 熔融法、碱解氮(AN)采用碱解扩散法、速效磷(AP)采用 0.5 mol·L⁻¹ NaHCO₃ 法、速效钾(AK)采用乙酸铵浸提-火焰光度法、含水率(SMC)采用烘干法,以上指标具体参见鲍士旦^[30]的方法;土壤容重(BD)和总孔隙度(STP)用环刀法^[31];土壤机械组成用比重计法^[31],粒级划分用国际制[砂粒(Sa)2~0.02 mm、粉粒(Si)0.02~0.002 mm 和黏粒(Cl)<0.002 mm].

易氧化有机碳(ROC₃₃₃、ROC₁₆₇和 ROC₃₃)采用 333、167 和 33 mmol·L⁻¹ KMnO₄ 氧化法^[32],土壤微生物量碳(MBC)用氯仿熏蒸浸提法测定^[33];溶解性有机碳(DOC)用 K₂SO₄ 溶液提取法^[25].

1.4 指标计算

有机碳组分分配比例计算方法^[34]:

有机碳组分分配比例 = (有机碳组分含量 ÷ 土壤有机碳含量) × 100% (1)

SOC 氧化稳定性系数^[18]计算公式为:

氧化稳定性系数(K_{os}) = (土壤有机碳含量 - 活性有机碳含量) ÷ 活性有机碳含量 (2)

碳库管理指数(CPMI)计算方法^[6,32]:

非活性有机碳(NLOC) = 土壤有机碳含量 - 活性有机碳含量 (3)

碳库活度(L) = 活性有机碳含量 ÷ NLOC (4)

碳库活度指数(LI) = 样品的碳库活度 ÷

参考土壤的碳库活度 (5)

碳库指数(CPI) = 样品有机碳含量 ÷

参考土壤总有机碳含量 (6)

碳库管理指数(CPMI) = 碳库活度指数 × 碳库指数 × 100% (7)

本文选取 CK 土壤作为参考土壤,活性有机碳含量为 ROC₃₃₃ 含量.

1.5 统计方法

数据统计分析用 Excel 2010 和 SPSS 22.0,用 Canoco 5 进行冗余分析,用 Origin 2021 作图.

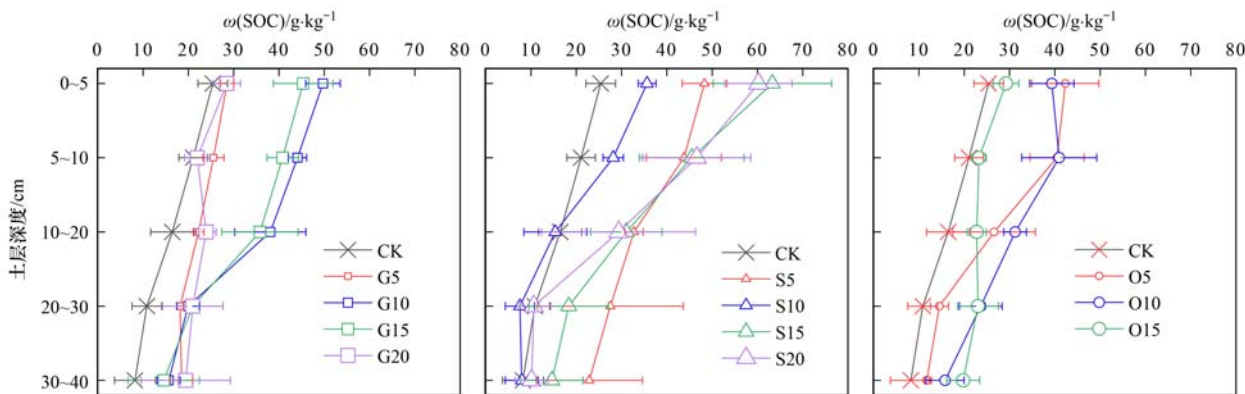
2 结果与分析

2.1 不同恢复年限土壤剖面有机碳及活性组分的演变特征

2.1.1 土壤有机碳

如图 1 所示,相同恢复年限的 SOC 含量均随土层加深而减小,0~20 cm 土层高于 20~40 cm,有明显的表聚现象;相同恢复年限,除 S10 外,在 0~10 cm 土层,SOC 含量总体表现为:灌木>草地>园地;除 S5 的 10~30 cm 外,3 个序列各土层 SOC 含量均高于 CK;在 0~40 cm 土层,灌木序列平均 SOC 高于草地序列和园地序列,分别高出 25.54% 和 28.47%.

随恢复年限的增加,在 0~20 cm 土层,草地序列和园地序列的 SOC 含量均呈先升后降的势态,在 20~40 cm 土层,草地序列变化不明显,园地序列呈逐渐增加势态.随恢复年限的增加,在 0~20 cm 土



SOC:土壤有机碳; CK:对照农田,G5:草地 5 a,G10:草地 10 a,G15:草地 15 a,G20:草地 20 a; S5:灌木 5 a,S10:灌木 10 a,S15:灌木 15 a, S20:灌木 20 a; O5:园地 5 a,O10:园地 10 a,O15:园地 15 a,下同

图 1 各序列不同恢复年限土壤剖面 SOC 分布

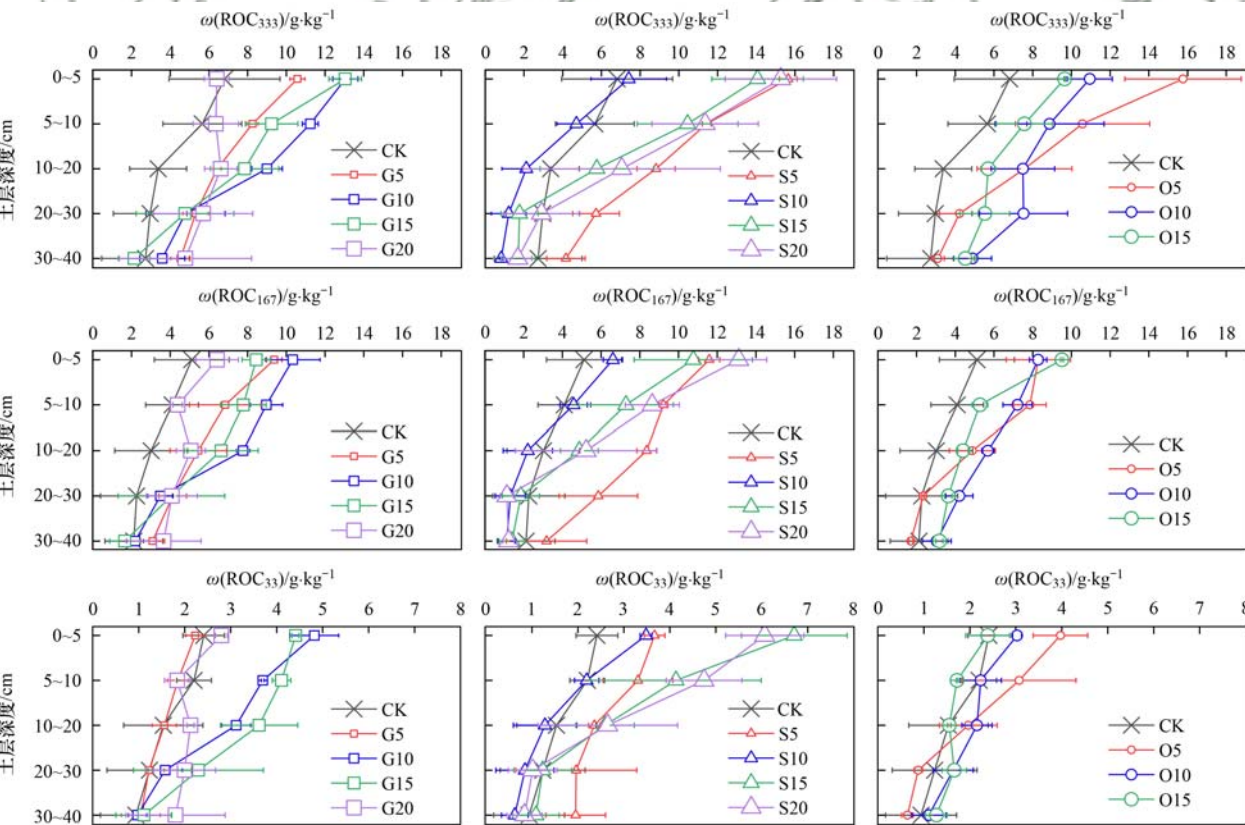
Fig. 1 SOC distribution in soil profile of different restoration years in each sequence

层,灌木序列则呈升高(CK ~ 5 a)-降低(5 ~ 10 a)-升高(10 ~ 20 a)并逐渐稳定的势态,在 20 ~ 40 cm 土层,灌木序列呈升高(CK ~ 5 a)-降低(5 ~ 10 a)-升高(10 ~ 15a)-降低(15 ~ 20 a)势态.与 CK 相比,草地序列、灌木序列和园地序列 0 ~ 40 cm 土层平均 SOC 增幅分别 70.77%、114.40%和 50.17%.

2.1.2 易氧化有机碳

如图 2 所示,在 0 ~ 40 cm 土层,3 个序列的 3 种

易氧化有机碳有明显差异,总体含量表现为: $ROC_{333} > ROC_{167} > ROC_{33}$;相同恢复年限 ROC_{333} 、 ROC_{167} 和 ROC_{33} 含量整体随土层加深而减小,表聚性明显.相同恢复年限,除 S10 的 0 ~ 20 cm 土层和 O5 的 0 ~ 5 cm 土层外,在 0 ~ 20 cm 土层, ROC_{333} 、 ROC_{167} 和 ROC_{33} 含量大小表现为:灌木 > 草地 > 园地.在 0 ~ 40 cm 土层,灌木序列平均 ROC_{333} 、 ROC_{167} 和 ROC_{33} 均高于草地序列和园地序列,分别高出 10.89% 和



ROC_{333} :被 333 mmol·L⁻¹ KMnO₄ 氧化的活性有机碳; ROC_{167} :被 167 mmol·L⁻¹ KMnO₄ 氧化的活性有机碳;
 ROC_{33} :被 33 mmol·L⁻¹ KMnO₄ 氧化的活性有机碳;下同

图 2 各序列不同恢复年限土壤剖面易氧化有机碳分布

Fig. 2 Distribution of readily oxidizable organic carbon in soil profiles of different restoration years in each sequence

4.89%、5.75%和13.70%、20.95%和49.23%。

随恢复年限的增加,在0~20 cm土层,草地序列和园地序列 ROC_{333} 、 ROC_{167} 和 ROC_{33} 含量呈先升后降势态,而灌木序列则为:升高(CK~5 a)-降低(5~10 a)-升高(10~20 a)势态。在20~40 cm土层,草地序列 ROC_{333} 、 ROC_{167} 和 ROC_{33} 含量呈:升高(CK~5 a)-降低(5~15 a)-升高(15~20 a)势态,而灌木序列均呈先升后降势态,园地序列的 ROC_{333} 和 ROC_{167} 呈先升后降势态, ROC_{33} 呈先降后升势态。与CK相比,草地、灌木和园地3个序列0~40 cm土层平均 ROC_{333} 增幅分别为66.67%、55.52%和76.18%; ROC_{167} 增幅分别为71.49%、64.93%和59.60%; ROC_{33} 增幅分别为45.17%、58.87%和17.64%。

2.1.3 微生物量碳

如图3所示,相同恢复年限的MBC含量均随土

层加深而减小,有明显的表聚现象。相同恢复年限,除S10外,在0~10 cm土层,MBC含量大小表现为:灌木>草地>园地。在0~40 cm土层,灌木序列平均MBC高于草地序列和园地序列,分别高出65.42%和30.72%。

随恢复年限的增加,在0~40 cm土层,草地序列MBC含量呈降低(CK~5 a)-升高(5~15 a)-下降(15~20 a)势态,各土层MBC最大值均在G15,土层由浅到深分别为944.83、768.49、525.49、348.81和221.93 $mg \cdot kg^{-1}$;灌木序列在0~10 cm土层为升高(CK~5 a)-降低(5~10 a)-升高(10~20 a)势态,在10~40 cm土层为先增后减并趋于稳定,最大值均在S5;园地序列在0~30 cm土层为先升后降势态,在30~40 cm土层为逐渐升高势态。与CK相比,草地、灌木和园地这3个序列土壤0~40 cm土层平均MBC增幅分别为15.27%、81.18%和45.86%。

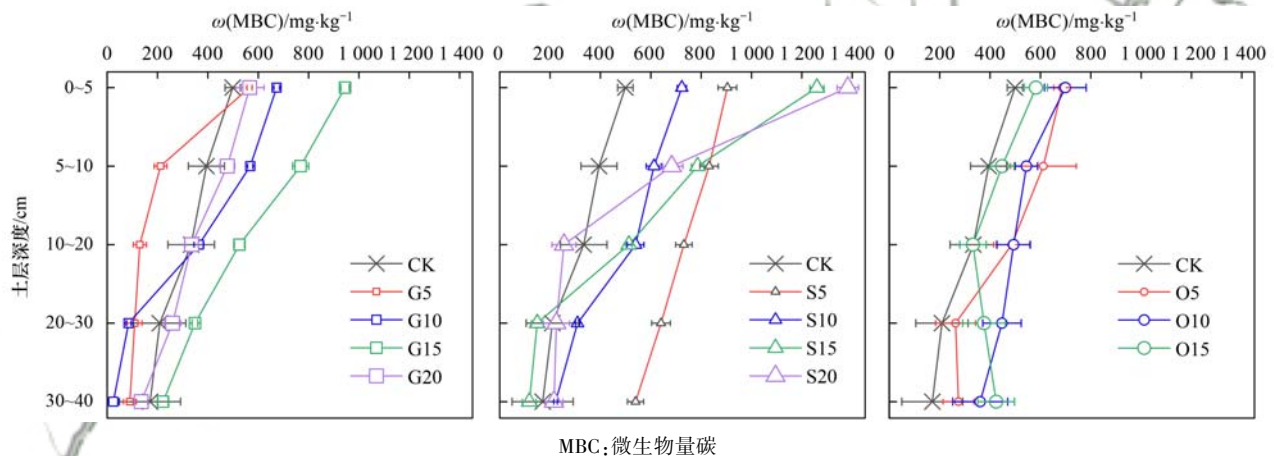


图3 各序列不同恢复年限土壤剖面MBC分布

Fig. 3 Distribution of MBC in soil profile of different restoration years in each sequence

2.1.4 溶解性有机碳

图4显示,草地序列和灌木序列相同恢复年限,DOC含量均随土层加深而减小,有明显表聚现象,而园地序列相同恢复年限则在5~10 cm出现聚集;相同恢复年限,在0~10 cm土层,DOC含量大小表现为:灌木>草地>园地。在0~40 cm土层,灌木序列平均DOC均高于草地序列和园地序列,分别高出22.49%和5.95%。

随恢复年限的增加,在0~30 cm土层,草地序列DOC含量呈降低(CK~5 a)-升高(5~10 a)-降低(10~15 a)-升高(15~20 a)波动势态,0~20 cm土层,最大值均在G20,20~30 cm土层,最大值为G10(42.30 $mg \cdot kg^{-1}$);而在30~40 cm土层,草地序列DOC呈降低(CK~5 a)-升高(5~15 a)-降低(15~20 a)势态,最大值为G15(26.72 $mg \cdot kg^{-1}$)。随恢复年限的增加,灌木序列在0~40 cm土层,DOC含量呈先升后降势态,最大值均在S10,土层由浅到深分别为

127.74、102.62、83.99、66.44和55.64 $mg \cdot kg^{-1}$ 。园地序列在0~20 cm土层,随恢复年限的增加,DOC含量呈降低(CK~5 a)-升高(5~10 a)-降低(10~15 a)势态,在20~40 cm土层,DOC含量呈先升后降势态,各土层最大值均在O10,土层从浅到深分别为80.45、86.61、63.89、54.06和60.20 $mg \cdot kg^{-1}$ 。与CK相比,草地、灌木和园地3个序列0~40 cm土层平均DOC增幅分别为10.13%、34.91%和21.20%。

2.2 不同恢复年限土壤剖面上活性有机碳分配比例变化特征

图5显示,相同恢复年限3个序列 ROC_{333}/SOC 、 ROC_{167}/SOC 和 ROC_{33}/SOC ,除CK的 ROC_{167}/SOC 外,大致随土壤深度增加而降低。相同恢复年限草地的MBC/SOC和DOC/SOC,均随土层深度增加而降低;灌木和园地序列的MBC/SOC,在5 a和10 a随土层增加而增加,而O15、S15和S20则转变为随土层增加而降低;相同恢复年限的DOC/SOC,S5

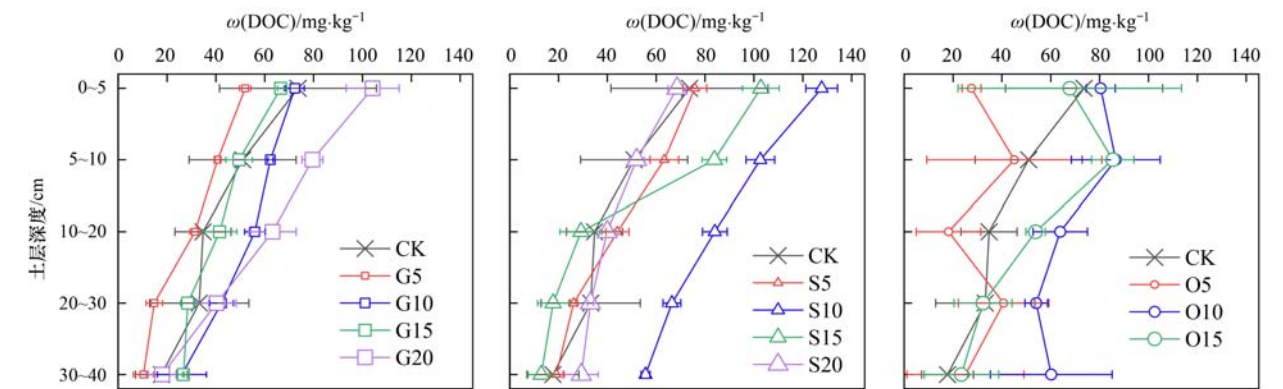


图4 各序列不同恢复年限土壤剖面 DOC 分布

Fig. 4 Distribution of DOC in soil profile of different restoration years in each sequence

和 S15 随土层增加而降低,S10 和 S20 反之;园地序列的 DOC/SOC 随土层增加而增大. 相同恢复年限同一土层,3 个序列的 ROC_{333}/SOC 和 ROC_{167}/SOC 基本以灌木最低,而 ROC_{33}/SOC 、 MBC/SOC 和 DOC/SOC 则又以灌木最高.

随恢复年限的增加,在 0 ~ 40 cm 土层,草地和灌木序列 ROC_{333}/SOC 和 ROC_{167}/SOC 呈升高 (CK ~ 5 a)-降低 (5 ~ 10 a)-升高 (10 ~ 20 a) 势态, ROC_{33}/SOC 呈先降后升势态. 随恢复年限的增加,在 0 ~ 40 cm 土层,草地序列的 MBC/SOC 和 DOC/SOC 呈先降后升势态,灌木序列的 MBC/SOC 呈逐渐升高势态,而灌木序列的 DOC/SOC 呈先升后降势态. 随恢复年限增加,在 0 ~ 40 cm 土层,园地序列 ROC_{333}/SOC 和 ROC_{33}/SOC 呈升高 (CK ~ 5 a)-降低 (5 ~ 10 a)-升高 (10 ~ 15 a) 势态, ROC_{167}/SOC 、 MBC/SOC 和 DOC/SOC 呈逐渐升高势态.

2.3 不同恢复年限土壤剖面上氧化稳定性系数和碳库管理指数演变特征

图 6 表明,3 个序列相同恢复年限的 K_{os} 随土层加深而增大;相同恢复年限, K_{os} 大小为:灌木 > 草地 > 园地. 3 个序列相同恢复年限的 L 随土层加深而减小. 相同恢复年限的 LI ,草地序列的 G5、G10 和 G15 随土层加深而减小,G20 则为先增后减;灌木和园地序列,除 S10 和 O10 的 30 ~ 40 cm 土层,基本都随土层加深而减小. 相同恢复年限的 CPI ,草地序列随土层加深而增大;灌木序列的 S5 和 S10 随土层加深而增大,而 S15 和 S20 则反之;园地序列的 O5 随土层加深而减小,而 O10 和 O15 则反之. 相同恢复年限的 $CPMI$,草地序列的 G5、G10 和 G15 随土层加深而减小,而 G20 则反之;灌木序列除 S10 外,均随土层加深而减小;园地序列的 O5 和 O15 随土层加深而减小,O10 随土层加深而增大.

随恢复年限的增加,在 0 ~ 40 cm 土层,3 个序列 K_{os} 大致呈先降后升再降势态, L 和 LI 大致呈先

升后降再升势态, CPI 呈先升后降势态,草地和园地序列的 $CPMI$ 呈先升后降势态,而灌木序列的 $CPMI$ 则呈先升后降再升势态.

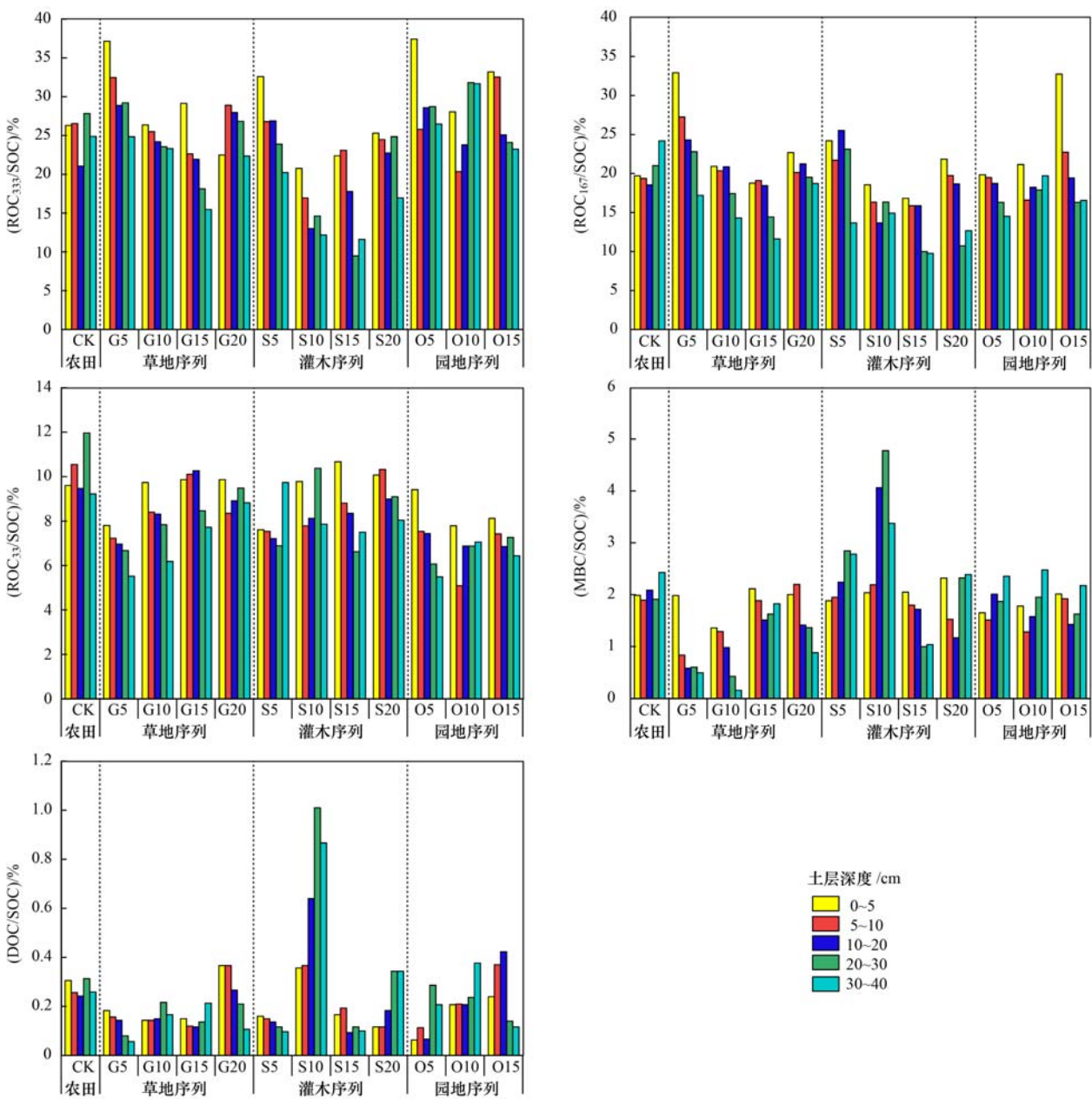
2.4 不同恢复年限下土壤全剖面 SOC 及活性组分、碳库管理指数与其他性质的相关性

时间是土壤形成和所有土壤过程的关键驱动因素,有研究表明在相似的成土条件下,时间对于植被恢复 SOC 演变有积极的影响^[35],因此,采用线性回归量化土壤有机碳组分、碳库管理指数与时间的耦合关系(表 2)得出,除草地和灌木序列的 DOC 和

表 2 土壤全剖面 SOC 及活性组分、碳库管理指数与时间序列的耦合分析¹⁾

Table 2 Coupling analysis of soil organic carbon components, carbon pool management index, and time series			
类型	项目	回归方程	相关系数
草地序列	SOC	$y = 0.569x + 19.470$	0.377 ***
	ROC_{333}	$y = 0.136x + 4.941$	0.304 *
	ROC_{167}	$y = 0.107x + 3.884$	0.297 *
	ROC_{33}	$y = 0.057x + 1.646$	0.366 ***
	MBC	$y = 6.360x + 305.948$	0.221 *
	DOC	$y = 0.651x + 40.762$	0.193 ^{NA}
	K_{os}	$y = -0.031x + 3.756$	0.153 ^{NA}
	CPMI	$y = 2.904x + 118.085$	0.363 **
灌木序列	SOC	$y = 0.841x + 21.721$	0.371 ***
	ROC_{333}	$y = 0.164x + 5.196$	0.281 **
	ROC_{167}	$y = 0.115x + 4.023$	0.250 *
	ROC_{33}	$y = 0.082x + 1.761$	0.379 ***
	MBC	$y = 11.351x + 413.883$	0.269 **
	DOC	$y = 0.368x + 49.133$	0.090 ^{NA}
	K_{os}	$y = 0.027x + 3.880$	0.101 ^{NA}
	CPMI	$y = 2.002x + 124.876$	0.230 *
园地序列	SOC	$y = 0.485x + 23.257$	0.224 ***
	ROC_{333}	$y = 0.088x + 6.070$	0.151 *
	ROC_{167}	$y = 0.072x + 4.525$	0.159 *
	ROC_{33}	$y = 0.054x + 1.777$	0.260 ***
	MBC	$y = 6.626x + 391.670$	0.162 *
	DOC	$y = 0.700x + 43.963$	0.159 *
	K_{os}	$y = -0.092x + 3.863$	0.329 **
	CPMI	$y = 5.385x + 114.770$	0.516 ***

1) * 表示显著水平 ($P < 0.05$), ** 表示极显著水平 ($P < 0.01$), *** 表示非常显著水平 ($P < 0.001$), NA 表示差异未达显著水平 ($P \geq 0.05$),下同



ROC₃₃₃/SOC:333 mmol·L⁻¹ KMnO₄ 氧化的活性有机碳与土壤有机碳的比值; ROC₁₆₇/SOC:167 mmol·L⁻¹ KMnO₄ 氧化的活性有机碳与土壤有机碳的比值; ROC₃₃/SOC:33 mmol·L⁻¹ KMnO₄ 氧化的活性有机碳与土壤有机碳的比值; MBC/SOC:微生物量碳与土壤有机碳的比值; DOC/SOC:溶解性有机碳与土壤有机碳的比值

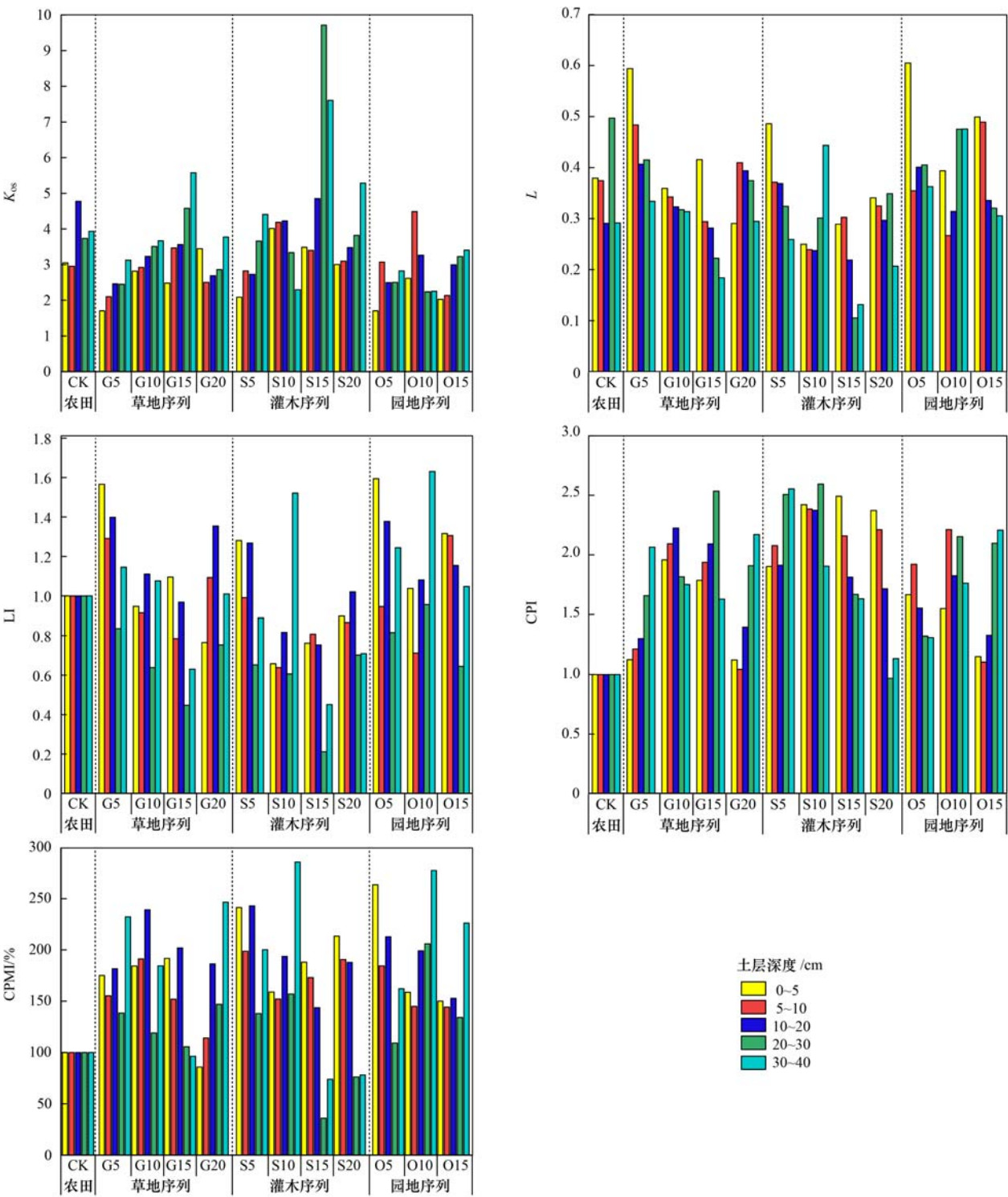
图5 土壤活性有机碳占总有机碳的比例

Fig. 5 Ratio of soil active organic carbon to total organic carbon

K_{os} 未达到显著水平外,3 个序列的其余指标均达到显著水平,相关性系数范围为 0.151 ~ 0.516,介于弱相关到相关性一般之间。就 0 ~ 40 cm 土层而言, SOC、ROC₃₃₃、ROC₁₆₇、ROC₃₃、MBC 和 K_{os} 的年增长量大小表现为:灌木 > 草地 > 园地,DOC 和 CPMI 的年增长量大小表现为:园地 > 草地 > 灌木。

土壤的理化性质是影响土壤有机碳组分的重要环境特征,因此,以 SOC、ROC₃₃₃、ROC₁₆₇、ROC₃₃、MBC、DOC、L、LI、CPI、CPMI 和 K_{os} 为响应变量,以 pH、BD、STP、Cl、Si、Sa、SMC、TP、TK、AN、

AP 和 AK 为解释变量,对 3 个序列分别进行冗余分析(RDA)和蒙特卡洛检验,结果表明,草地序列的 AN、TP、Sa、SMC 和 AK,灌木序列的 AN、pH、AP、AK 和 Cl,园地序列的 AN、Sa、AP、Si 和 AK 占解释量的前 5,共同解释的变异分别为 55.7%、62.5% 和 44.6%,其中除灌木序列的 pH 和 Cl 外,均与 SOC、ROC₃₃₃、ROC₁₆₇、ROC₃₃、MBC、DOC、L、LI、CPI 和 CPMI 呈显著正相关,与 K_{os} 呈显著负相关;而 BD 与 SOC、ROC₃₃₃、ROC₁₆₇、ROC₃₃、MBC、DOC、L、LI、CPI 和 CPMI 呈显著负相关,与 K_{os} 呈显著正相关



K_{0s} :氧化稳定性系数, L :碳库活度, LI :碳库活度指数, CPI :碳库指数, $CPMI$:碳库管理指数

图6 各序列不同恢复年限土壤剖面 K_{0s} 、 L 、 LI 、 CPI 和 $CPMI$ 的演变

Fig. 6 Evolution of K_{0s} , L , LI , CPI , and $CPMI$ in soil profiles with different restoration years

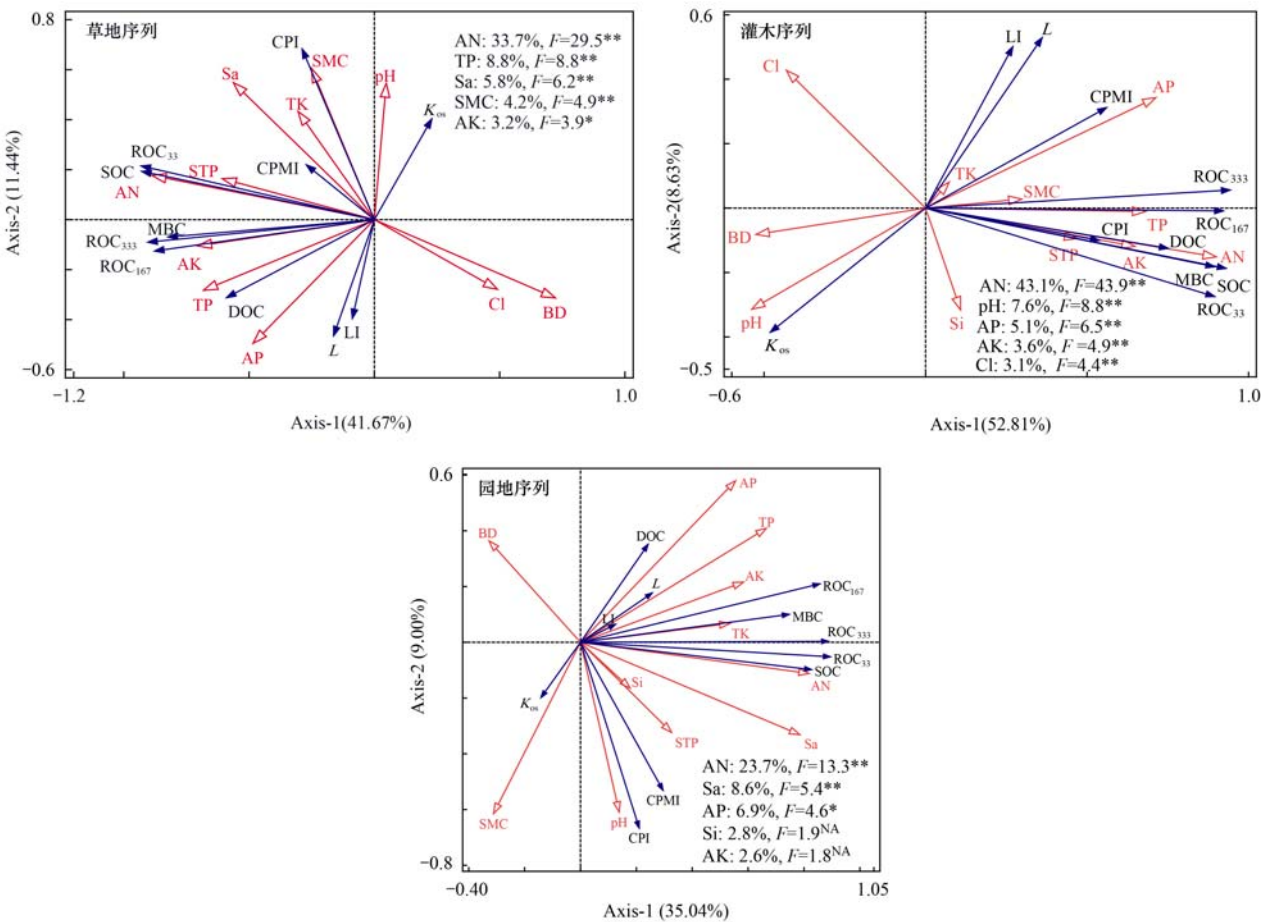
系(图7).

3 讨论

3.1 不同恢复年限下土壤有机碳组分的演变规律

SOC 含量实际上表达了土壤中有机碳输入与分解两个过程的动态平衡^[1]. 本研究显示,3 个序列 SOC 均有明显的表聚现象,与大多数土壤一致^[36].3

个序列 0 ~ 40 cm 土层 SOC 含量比 CK 平均高 70.77%、114.40% 和 50.17%,可见,3 个序列均不同程度地提高 SOC 含量,与蒲玉琳等^[5] 和徐鹏等^[11] 研究的结果一致. 相同恢复年限,在 0 ~ 10 cm 土层,SOC 含量大小表现为:灌木 > 草地 > 园地. 这是因为植被恢复增大土壤中凋落物的归还量与地下根系量及其根系分泌物量、微生物数量,最终致使有机



TP:全磷,TK:全钾,AN:碱解氮,AP:速效磷,AK:速效钾,SMC:含水率,BD:容重,STP:总孔隙度,Sa:砂粒,Sl:粉粒,Cl:黏粒;百分数表示解释量, F 表示重要性;蓝色箭头线条表示响应变量,红色箭头线条表示解释变量;*表示 $P<0.05$,**表示 $P<0.01$,NA表示 $P>0.05$

图7 不同序列的土壤有机碳组分、碳库管理指数与土壤理化性质的冗余分析

Fig. 7 Redundancy analysis of soil organic carbon components, carbon pool management index and soil physical and chemical properties in different sequences

物料的输入量高于矿化分解损失量.但不同恢复类型提高SOC的能力不同,灌木和草地序列平均值分别是园地序列2.28倍和1.41倍,主要是由于当地果园每年都存在除草、剪枝和清耕等管理措施,减少了有机物料输入,破坏了土壤团聚体结构,降低团聚体对土壤碳的固持能力,说明在人为干扰下土壤固碳能力明显下降.从时序角度看,随恢复年限的增加,不同土层3个序列SOC变化势态不一致,草地和园地随恢复年限的增加呈先增后减势态,而灌木则呈波动式增加势态,与史利江等^[16]和Chen等^[37]研究的结果不一致,SOC年增长量以灌木最大.同一序列随恢复年限增加,各土层间变化势态基本相似,主要原因是土壤表层有机物质的积累主要依赖凋落物的分解.凋落物主要集中在土壤表层,而中下层土壤不能直接接收地表植物残体,主要依靠上层的淋溶下移和地下部分植物残体分解,导致土壤层有机质含量自上而下依次减小^[38].植物根系也主要集中在土壤表层,每年细根的不断生长、死亡和分解对SOC的贡献率最高可达

80%,其垂直分布直接影响各土壤层次碳及养分含量^[39].此外,3个序列的冗余分析表明SOC及组分均与BD显著负相关,容重直接影响到孔隙度^[40],深层BD增加,通透性和水热条件差,植物根系密度降低,抑制了土壤中微生物活性,特别是根际微生物活性,进而影响SOC含量^[25].

易氧化有机碳即 KMnO_4 氧化的活性有机碳,主要包括单一碳水化合物、氨基酸和糖类、一些简单的有机化合物等,是土壤养分的潜在来源及土壤微生物活动的重要能源^[32],是对管理措施和有机物输入敏感的有机碳组分,可以灵敏地反映SOC的动态变化.本研究中 ROC_{333} 、 ROC_{167} 和 ROC_{33} 剖面上变化势态与SOC相似,都具有表聚性,与张慧玲等^[32]和Bongiorno等^[41]研究的结果相似. ROC_{333} 、 ROC_{167} 和 ROC_{33} 与SOC均存在极显著正相关关系(表3),表明土壤活性有机碳含量在很大程度上由SOC含量决定,不同类型植被有机物料的输入量不同,微生物群落组成和多样性存在差异,从而影响了SOC的矿

化和固定过程,进而决定了活性有机碳的含量^[42]. 本研究中园地人为活动干扰相对较多,ROC₃₃₃、ROC₁₆₇和ROC₃₃的年增长量大小为:灌木序列>草地序列>园地序列,与白义鑫等^[28]的结论类似.此外,这种差异还可能是由于不同种类植物输入碳所含的蛋白质、纤维素和木质素等物质组成比例不同.有研究表明KMnO₄对土壤中的木质素较为敏感,对纤维素不敏感,所以增加的活性有机碳可能主要来源于木质素部分^[32],这可能是草地表层低于灌木的原因.易氧化有机碳除了受凋落物和根系分泌物的影响外,与土壤养分和机械组成等密切相关^[25].本研究表明,在0~20 cm土层,随恢复年限的增加,3个序列的ROC₃₃₃、ROC₁₆₇和ROC₃₃的变化势态与SOC类似,而20~40 cm土层,却与SOC变化不一致.冗余分析显示,SOC及组分与AN、Cl和BD等显著相关.这可能是由于AN影响到植物和微生物对有机碳分解和利用速度^[43,44],致使SOC及组分变化势态不一致.另外,土壤机械组成不同,改变土壤物理结构和水分有效性,黏粒与SOC结合形成有机-无机复合体^[45],进而影响了各活性组分间的转换^[46].

表3 不同组分活性有机碳与SOC的相关系数¹⁾(n=180)

Table 3 Correlation coefficient between active organic carbon and SOC in different components (n=180)

	SOC	ROC ₃₃₃	ROC ₁₆₇	ROC ₃₃	MBC	DOC
SOC	1					
ROC ₃₃₃	0.683 **	1				
ROC ₁₆₇	0.872 **	0.708 **	1			
ROC ₃₃	0.900 **	0.661 **	0.846 **	1		
MBC	0.776 **	0.582 **	0.754 **	0.778 **	1	
DOC	0.390 **	0.283 **	0.390 **	0.390 **	0.479 **	1

1) ** 表示 $P < 0.01$

MBC也是一个敏感指标,温度、湿度、根系及根际分泌物等都会影响微生物生物量及活性^[5]. 本研究表明,在相同恢复年限下3个序列MBC含量差异主要体现在0~10 cm土层,0~10 cm土层作为土体与植物进行物质交换的界面,植物根系和凋落物等主要集中在这一土层^[38].在植被恢复过程中凋落物-根系-微生物协同作用下对SOC产生影响^[47],植物根系可直接或间接影响凋落物的输入和分解过程,当土壤养分充足时,根系通过大量吸收养分刺激地上部分生长,进而产生较多的凋落物,同时根系产生的分泌物能够改变土壤微生物多样性^[42].通常高质量的凋落物具有较高的氮含量和较低的C/N值,更易被土壤微生物分解^[48].微生物本身是土壤重要的碳库,土壤微生物通过“体外修饰”和“体内周转”途径调控土壤有机碳的形成和转化过

程^[49],在土壤碳循环过程中起到重要的作用.植被恢复引起土壤微生物生物量、多样性和活性改变,进而驱动土壤微生物“碳泵”^[50],对MBC产生影响.3个序列不同层次随时间变化势态不同,主要原因在于,草本植物前期处于缓慢生长的过程,生物量小、凋落物以及根系处于不发达阶段,所以MBC增长缓慢,甚至出现下降,随着年限增加植物根系逐渐老化与退化,同时对地表土壤侵蚀的减缓作用进一步降低,所以出现下降势态.灌木序列MBC表层随恢复年限增加呈波动式增加,主要源于灌木大量凋落物和根系分布,为微生物提供更多的食物来源.

DOC是地表植被及覆盖物淋溶、土壤根系分泌及微生物新陈代谢产物,对SOC含量及土壤物理化学循环过程产生重要的影响^[51],其活性极高,是连接土壤圈层与其他圈层的重要物质形式.本研究表明,草地和灌木DOC存在表聚性,而园地则在5~10 cm出现聚集.DOC与SOC均存在极显著关系(表3),但3个序列各土层随恢复时间变化势态不一致,与SOC变化也不一致.冗余分析表明灌木序列的pH与DOC等活性组分呈极显著负相关.可能是因为灌木较为丰富的土壤凋落物分解和根系分泌的有机酸,使pH值降低,影响微生物对土壤碳的分解和累积,从而抑制了土壤中DOC的转化速率^[52],提高了灌木DOC含量.喀斯特地区土壤母质层发育缓慢且易淋失^[38],园地植被类型单一,且常年遭受人为扰动,抗降水侵蚀能力相对较弱,所以造成了DOC的向下迁移^[25].

3.2 不同恢复年限下土壤有机碳组分分配比例差异

土壤活性有机碳占SOC的比例表示土壤中活性有机碳与非活性有机碳的相对数量,较活性有机碳本身更能反映SOC组成的变化^[28].ROC₃₃₃、ROC₁₆₇、ROC₃₃、MBC和DOC虽然都是SOC的活性组分,但其在含量、来源和去向、影响因素等方面存在差异,是从不同角度反映有机碳的活性特征^[53].本研究显示,ROC₃₃₃/SOC、ROC₁₆₇/SOC和ROC₃₃/SOC在剖面上的变化势态与其组分相似,易氧化有机碳分配比例从SOC自身分解特征方面指示SOC活性强度,比值越大说明有机碳活性越强,被分解矿化的潜力越大^[54],反之,土壤SOC的稳定性越强^[53].一般其值介于15%~25%之间^[54],本研究中ROC₃₃₃占比略大于此范围,ROC₃₃₃是所有活性有机碳组分占比最高的组分,此结果与张慧玲等^[32]研究的结果一致.MBC/SOC也称微生物熵,从分解转化有机碳的能力方面指示SOC活性特征,一般介于0.3%~7%间^[32],本研究中3个序列MBC/SOC小于此范围.微生物熵反映了输入土壤中有有机物向

微生物量碳的转化效率,值越大,转化率越大,微生物对有机碳的利用率越高.微生物熵能够较早地揭示环境或生物因子改变对土壤的影响^[55].微生物熵的增大还有赖于恢复年限的增加引起土壤中体积 $< 5 \times 10^3 \mu\text{m}^3$ 的活的细菌、真菌、藻类和微动物的增多^[5].DOC/SOC 指示 SOC 的溶解能力,反映 SOC 流失水平,与 SOC 的矿化量具有较好的正相关性^[53],该值越大表示有机碳活性越大,微生物越容易矿化分解^[5].相同恢复年限同一土层,3 个序列的 ROC₃₃₃和 ROC₁₆₇占比以灌木最低,表明相较于草地和园地,灌木 SOC 的活性较低及稳定性更高,而 ROC₃₃/SOC、MBC/SOC 和 DOC/SOC 却又以灌木最高,反映了灌木土壤含有更多易于被微生物利用的有机质,通过更活跃的微生物活动,把土壤有机碳储存在微生物体内,指示了 SOC 的积累效应^[56].总的来看,随年限的增加,草地和灌木序列活性有机碳分配比例整体减少,最大值集中在 5 a 和 10 a,说明随着植被的恢复草地和灌木均促进 SOC 的积累.园地则出现相反情况,说明在人为扰动下, SOC 的积累受阻.

3.3 不同恢复年限下氧化稳定性系数和碳库管理指数演变规律

氧化稳定性是 SOC 重要的性质之一,关系到 SOC 分解的难易程度以及养分释放等许多方面^[57],可反映植被恢复后 SOC 氧化稳定性的演变情况, K_{os} 值愈大, SOC 氧化稳定性愈大,反之则愈小^[18]. 本研究中,3 个序列相同恢复年限的 K_{os} 随土层加深而增大,说明深层 SOC 较表层土壤受到更好的保护,稳定性更强^[28]. 相同恢复年限, K_{os} 大小为:灌木 > 草地 > 园地,表明灌木有更强的稳定性. 在 0 ~ 40 cm 土层,3 个序列 K_{os} 随恢复年限呈先降再升再降势态,表明 3 个序列 SOC 氧化稳定性变化类似.

L 、 LI 、 CPI 和 $CPMI$ 均能反映土壤有机碳库的质量,可以用来衡量土地利用方式的科学性,其值越大土壤碳库质量越高^[11]. 本研究中,植被恢复后土壤质量有所提高 ($CPMI > 100\%$), 在 0 ~ 40 cm 土层,随植被恢复草地和园地序列的 $CPMI$ 呈先升后降势态,原因是自然(土壤侵蚀)和人为(耕作)干扰使土壤质量恶化,植被恢复后, SOC 输入增加,土壤侵蚀造成的碳流失减少,土壤质量提高 $CPMI$ 增大^[17]. 而灌木序列则呈升高-降低-升高势态,说明灌木随着恢复时间的增加, SOC 波动性积累,碳库质量波动式提高. 同时,凋落物和根系主要影响表层 SOC 含量,深层土壤微生物的活性有限^[58], 因此恢复时间对深层土壤质量的改善作用不明显.

4 结论

(1) 不同植被恢复均能一定程度地提高喀斯特地区土壤有机碳及其组分含量,土壤垂直剖面上,各恢复年限土壤有机碳及其组分含量均总体随土层增加而降低,具有明显的表聚性.

(2) SOC、ROC₃₃₃、ROC₁₆₇、ROC₃₃、MBC 的年增长量大小为:灌木 > 草地 > 园地, DOC 和 CPMI 的年增长量大小为:园地 > 草地 > 灌木.

(3) 3 个序列相同恢复年限的 K_{os} 随土层加深而增大,说明深层 SOC 较表层土壤受到更好的保护,稳定性更强. 相同恢复年限, K_{os} 大小为:灌木 > 草地 > 园地,表明灌木有更强的稳定性. 灌木恢复是喀斯特地区较为合适的生态系统土壤碳管理模式.

参考文献:

- [1] 张维理, Kolbe H, 张认连. 土壤有机碳作用及转化机制研究进展[J]. 中国农业科学, 2020, 53(2): 317-331.
Zhang W L, Kolbe H, Zhang R L. Research progress of SOC functions and transformation mechanisms [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2020, 53(2): 317-331.
- [2] 赵永存, 徐胜祥, 王美艳, 等. 中国农田土壤固碳潜力与速率: 认识、挑战与研究建议[J]. 中国科学院院刊, 2018, 33(2): 191-197.
Zhao Y C, Xu S X, Wang M Y, et al. Carbon sequestration potential in Chinese cropland soils: review, challenge, and research suggestions [J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2018, 33(2): 191-197.
- [3] Maraseni T N, Pandey S S. Can vegetation types work as an indicator of soil organic carbon? An insight from native vegetations in Nepal[J]. Ecological Indicators, 2014, 46: 315-322.
- [4] 杨元合, 石岳, 孙文娟, 等. 中国及全球陆地生态系统碳源汇特征及其对碳中和的贡献[J]. 中国科学: 生命科学, 2022, 52(4): 534-574.
Yang Y H, Shi Y, Sun W J, et al. Terrestrial carbon sinks in China and around the world and their contribution to carbon neutrality[J]. Science China Life Sciences, 2022, 65(5): 861-895.
- [5] 蒲玉琳, 叶春, 张世熔, 等. 若尔盖沙化草地不同生态恢复模式土壤活性有机碳及碳库管理指数变化[J]. 生态学报, 2017, 37(2): 367-377.
Pu Y L, Ye C, Zhang S R, et al. Effects of different ecological restoration patterns on labile organic carbon and carbon pool management index of desertification grassland soil in zoige [J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(2): 367-377.
- [6] 杨淑琪, 唐芬, 杨桦, 等. 滇南地区桃树种植模式对土壤有机碳组分及碳库管理指数的影响[J]. 生态学报, 2023, 43(1): 290-303.
Yang S Q, Tang F, Yang H, et al. Effects of peach tree planting patterns on soil organic carbon fractions and carbon pool management index in southern Yunnan [J]. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(1): 290-303.
- [7] Lefroy R D B, Blair G J, Strong W M. Changes in soil organic matter with cropping as measured by organic carbon fractions and ¹³C natural isotope abundance[J]. Plant and Soil, 1993, 155(1): 399-402.

- [8] Xu H W, Qu Q, Chen Y H, *et al.* Responses of soil enzyme activity and soil organic carbon stability over time after cropland abandonment in different vegetation zones of the Loess Plateau of China [J]. CATENA, 2021, **196**, doi: 10.1016/j.catena.2020.104812.
- [9] 闫丽娟, 李广, 吴江琪, 等. 黄土高原 4 种典型植被对土壤活性有机碳及土壤碳库的影响 [J]. 生态学报, 2019, **39** (15): 5546-5554.
Yan L J, Li G, Wu J Q, *et al.* Effects of four typical vegetations on soil active organic carbon and soil carbon in loess plateau [J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, **39** (15): 5546-5554.
- [10] 张仕吉, 项文化, 孙伟军, 等. 中亚热带土地利用方式对土壤易氧化有机碳及碳库管理指数的影响 [J]. 生态环境学报, 2016, **25** (6): 911-919.
Zhang S J, Xiang W H, Sun W J, *et al.* Effects of land use on soil readily oxidized carbon and carbon management index in hilly region of central hunan province [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2016, **25** (6): 911-919.
- [11] 徐鹏, 江长胜, 郝庆菊, 等. 缙云山土地利用方式对土壤活性有机质及其碳库管理指数的影响 [J]. 环境科学, 2013, **34** (10): 4009-4016.
Xu P, Jiang C S, Hao Q J, *et al.* Effects of the different land use on soil labile organic matter and carbon management index in Junyun mountain [J]. Environmental Science, 2013, **34** (10): 4009-4016.
- [12] 滕秋梅, 沈育伊, 徐广平, 等. 桂北喀斯特山区不同植被类型土壤碳库管理指数的变化特征 [J]. 生态学杂志, 2020, **39** (2): 422-433.
Teng Q M, Shen Y Y, Xu G P, *et al.* Characteristics of soil carbon pool management indices under different vegetation types in Karst Mountainous areas of north Guangxi [J]. Chinese Journal of Ecology, 2020, **39** (2): 422-433.
- [13] Bai Y X, Sheng M Y, Hu Q J, *et al.* Response of soil organic carbon and its active fractions to restoration measures in the Karst rocky desertification ecosystem, SW China [J]. Polish Journal of Environmental Studies, 2021, **30** (3): 1991-2011.
- [14] 李金垚, 潘雯, 王佳, 等. 土壤活性有机碳及碳库管理指数对石漠化治理措施的响应 [J]. 林业科学研究, 2022, **35** (5): 156-163.
Li J Y, Pan W, Wang J, *et al.* Response of active organic carbon and carbon pool management index of Karst soil to rocky desertification control measures [J]. Forest Research, 2022, **35** (5): 156-163.
- [15] 赵元, 张伟, 胡培雷, 等. 桂西北喀斯特峰丛洼地不同植被恢复方式下土壤有机碳组分变化特征 [J]. 生态学报, 2021, **41** (21): 8535-8544.
Zhao Y, Zhang W, Hu P L, *et al.* Responses of soil organic carbon fractions to different vegetation restoration in a typical Karst Depression [J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, **41** (21): 8535-8544.
- [16] 史利江, 高杉, 姚晓军, 等. 晋西北黄土丘陵区不同植被恢复下的土壤碳氮累积特征 [J]. 生态环境学报, 2021, **30** (9): 1787-1796.
Shi L J, Gao S, Yao X J, *et al.* Characteristics of soil carbon and nitrogen accumulation under different vegetation restoration in the loess hilly region of Northwest Shanxi province [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2021, **30** (9): 1787-1796.
- [17] 李文杰, 张祯皎, 赵雅萍, 等. 刺槐林恢复过程中土壤微生物碳降解酶的变化及与碳库组分的关系 [J]. 环境科学, 2022, **43** (2): 1050-1058.
Li W J, Zhang Z J, Zhao Y P, *et al.* Changes in soil microbial carbon-degrading enzymes and their relationships with carbon pool components during the restoration process of robinia pseudoacacia [J]. Environmental Science, 2022, **43** (2): 1050-1058.
- [18] 王超, 邱竞驰, 李建华, 等. 香蕉秆及其生物炭对双季水稻土团聚体及碳库管理的影响 [J]. 农业环境科学学报, 2022, **41** (3): 537-546.
Wang C, Qiu J C, Li J H, *et al.* Effects of banana stem and its biochar on soil aggregates and carbon pool management in paddy soil cultivated for double cropping [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2022, **41** (3): 537-546.
- [19] 黄巧义, 林碧珊, 饶国良, 等. 秸秆还田配施石灰对酸性水稻土有机碳及碳库管理指数的影响 [J]. 环境科学, 2023, **44** (10): 5813-5822.
Huang Q Y, Lin B S, Rao G L, *et al.* Effects of straw returning with lime on soc and carbon pool management in acidic paddy soil [J]. Environmental Science, 2023, **44** (10): 5813-5822.
- [20] 邓旭哲, 韩晨, 薛利祥, 等. 增温施肥对稻麦农田土壤有机碳及其活性组分的影响 [J]. 环境科学, 2023, **44** (3): 1553-1561.
Deng X Z, Han C, Xue L X, *et al.* Effects of warming and fertilization on soil organic carbon and its labile components in rice-wheat rotation [J]. Environmental Science, 2023, **44** (3): 1553-1561.
- [21] 龙启霞, 蓝家程, 姜勇祥. 生态恢复对石漠化地区土壤有机碳累积特征及其机制的影响 [J]. 生态学报, 2022, **42** (18): 7390-7402.
Long Q X, Lan J C, Jiang Y X. Effects of soil organic carbon fractions on aggregates under ecological restoration in rocky desertification region [J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, **42** (18): 7390-7402.
- [22] Rong G H, Li W R, Zhu H S, *et al.* Dynamics of new- and old-organic carbon and nitrogen in bulk soils and aggregates following afforestation on farmland [J]. CATENA, 2020, **195**, doi: 10.1016/j.catena.2020.104838.
- [23] Xiao K C, He T G, Chen H, *et al.* Impacts of vegetation restoration strategies on soil organic carbon and nitrogen dynamics in a Karst area, Southwest China [J]. Ecological Engineering, 2017, **101**: 247-254.
- [24] Zhu X C, Ma M G, Tateno R, *et al.* Effects of vegetation restoration on soil carbon dynamics in Karst and Non-Karst regions in Southwest China: a synthesis of multi-source data [J]. Plant and Soil, 2022, **475** (1-2): 45-59.
- [25] 吴云杰, 田鑫, 张明意, 等. 植被修复初期对贵州高原喀斯特湿地湖滨带碳元素的影响 [J]. 生态学报, 2022, **42** (19): 7785-7795.
Wu Y J, Tian X, Zhang M Y, *et al.* Influence of vegetation restoration on carbon in the lakeside zone of Karst wetland in Guizhou Plateau [J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, **42** (19): 7785-7795.
- [26] 田静, 盛茂银, 汪攀, 等. 西南喀斯特土地利用变化对植物凋落物-土壤 C、N、P 化学计量特征和土壤酶活性的影响 [J]. 环境科学, 2019, **40** (9): 4278-4286.
Tian J, Sheng M Y, Wang P, *et al.* Influence of land use change on litter and soil C, N, P stoichiometric characteristics and soil enzyme activity in Karst ecosystem, Southwest China [J]. Environmental Science, 2019, **40** (9): 4278-4286.
- [27] 王世杰, 彭韬, 刘再华, 等. 加强喀斯特关键带长期观测研究, 支撑西南石漠化区生态恢复与民生改善 [J]. 中国科学院院刊, 2020, **35** (7): 925-933.
Wang S J, Peng T, Liu Z H, *et al.* Strengthen Karst surface systematic processes research, support ecological restoration and

- social improvement in Karst rocky desertification areas in Southwest China[J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2020, **35**(7): 925-933.
- [28] 白义鑫, 盛茂银, 胡琪娟, 等. 西南喀斯特石漠化环境下土地利用变化对土壤有机碳及其组分的影响[J]. *应用生态学报*, 2020, **31**(5): 1607-1616.
- Bai Y X, Sheng M Y, Hu Q J, *et al.* Effects of land use change on soil organic carbon and its components in Karst rocky desertification of Southwest China [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2020, **31**(5): 1607-1616.
- [29] 张文娟, 廖洪凯, 龙健, 等. 种植花椒对喀斯特石漠化地区土壤有机碳矿化及活性有机碳的影响[J]. *环境科学*, 2015, **36**(3): 1053-1059.
- Zhang W J, Liao H K, Long J, *et al.* Effects of chinese prickly ash orchard on soil organic carbon mineralization and labile organic carbon in Karst rocky desertification region of guizhou province[J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(3): 1053-1059.
- [30] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. (第三版). 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [31] 张甘霖, 龚子同. 土壤调查实验室分析方法[M]. 北京: 科学出版社, 2012.
- [32] 张慧玲, 吴建平, 熊鑫, 等. 南亚热带森林土壤碳库稳定性与碳库管理指数对模拟酸雨的响应[J]. *生态学报*, 2018, **38**(2): 657-667.
- Zhang H L, Wu J P, Xiong X, *et al.* Effects of simulated acid rain on soil labile organic carbon and carbon management index in subtropical forests of China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, **38**(2): 657-667.
- [33] 简俊楠, 刘伟超, 朱玉帆, 等. 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[J]. *环境科学*, 2023, **44**(5): 2767-2774.
- Jian J N, Liu W C, Zhu Y F, *et al.* Effects of short-term nitrogen addition on soil organic carbon components in robinia pseudoacacia plantation[J]. *Environmental Science*, 2023, **44**(5): 2767-2774.
- [34] 王兴, 钟泽坤, 王佳懿, 等. 黄土高原撂荒地土壤碳库对两年增温增雨的响应[J]. *土壤学报*, 2023, **60**(2): 523-534.
- Wang X, Zhong Z K, Wang J Y, *et al.* Responses of soil carbon pool of abandoned grassland on the loess plateau to two-years warming and increased precipitation[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2023, **60**(2): 523-534.
- [35] Han X, Liu X, Li Z W, *et al.* Characteristics of soil organic carbon fractions and stability along a chronosequence of *Cryptomeria japonica* var. *sinensis* plantation in the rainy area of western China[J]. *Forests*, 2022, **13**(10), doi: 10.3390/f13101663.
- [36] Wang C G, Li H X, Cai T J, *et al.* Variation of soil carbon and nitrogen storage in a natural restoration chronosequence of reclaimed temperate marshes [J]. *Global Ecology and Conservation*, 2021, **27**, doi: 10.1016/j.gecco.2021.e01589.
- [37] Chen A M, Wang Z G, Lin Y M, *et al.* Temporal variation of soil organic carbon pools along a chronosequence of reforested land in Southwest China[J]. *CATENA*, 2020, **194**, doi: 10.1016/j.catena.2020.104650.
- [38] Liu Y L, Li J W, Hai X Y, *et al.* Carbon inputs regulate the temperature sensitivity of soil respiration in temperate forests[J]. *Journal of Arid Land*, 2022, **14**(9): 1055-1068.
- [39] Upson M A, Burgess P J. Soil organic carbon and root distribution in a temperate arable agroforestry system[J]. *Plant and Soil*, 2013, **373**(1-2): 43-58.
- [40] 张勇, 史学正, 赵永存, 等. 滇黔桂地区土壤有机碳储量与影响因素研究[J]. *环境科学*, 2008, **29**(8): 2314-2319.
- Zhang Y, Shi X Z, Zhao Y C, *et al.* Estimates and affecting factors of soil organic carbon storages in Yunnan-Guizhou-Guangxi region of China [J]. *Environmental Science*, 2008, **29**(8): 2314-2319.
- [41] Bongiorno G, Bünemann E K, Oguejiofor C U, *et al.* Sensitivity of labile carbon fractions to tillage and organic matter management and their potential as comprehensive soil quality indicators across pedoclimatic conditions in Europe [J]. *Ecological Indicators*, 2019, **99**: 38-50.
- [42] Kravchenko A N, Guber A K, Razavi B S, *et al.* Microbial spatial footprint as a driver of soil carbon stabilization[J]. *Nature Communications*, 2019, **10**(1): 3121.
- [43] Dai L J, Ge J S, Wang L Q, *et al.* Influence of soil properties, topography, and land cover on soil organic carbon and total nitrogen concentration: a case study in Qinghai-Tibet plateau based on random forest regression and structural equation modeling[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, **821**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.153440.
- [44] Song M, He T G, Chen H, *et al.* Dynamics of soil gross nitrogen transformations during post-agricultural succession in a subtropical Karst region[J]. *Geoderma*, 2019, **341**: 1-9.
- [45] 郑维熙, 周忠发, 朱黎黎, 等. 岩溶区土壤理化特征与土壤有机碳含量关系研究[J]. *环境科学与技术*, 2021, **44**(7): 91-99.
- Zheng W X, Zhou Z F, Zhu C C, *et al.* Study on the relationship between soil physical and chemical characteristics and soil organic carbon content in Karst area[J]. *Environmental Science & Technology*, 2021, **44**(7): 91-99.
- [46] Wiesmeier M, Urbanski L, Hobbey E, *et al.* Soil organic carbon storage as a key function of soils- A review of drivers and indicators at various scales [J]. *Geoderma*, 2019, **333**: 149-162.
- [47] Deng L, Wang K B, Zhu G Y, *et al.* Changes of soil carbon in five land use stages following 10years of vegetation succession on the Loess Plateau, China[J]. *CATENA*, 2018, **171**: 185-192.
- [48] van den Brink L, Canessa R, Neidhardt H, *et al.* No home - field advantage in litter decomposition from the desert to temperate forest[J]. *Functional Ecology*, 2023, doi: 10.1111/1365-2435.14285.
- [49] 李芳芳, 李中文, 李宇轩, 等. “微生物碳泵”作用下的土壤有机碳稳定性及其吸附特性研究进展[J]. *农业环境科学学报*, 2022, **41**(6): 1155-1163.
- Li F F, Li Z W, Li Y X, *et al.* Stability of soil organic carbon in the “microbial carbon pump” process and its adsorption characteristics: a review [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2022, **41**(6): 1155-1163.
- [50] 梁超, 朱雪峰. 土壤微生物碳泵储碳机制概论[J]. *中国科学: 地球科学*, 2021, **51**(5): 680-695.
- Liang C, Zhu X F. The soil microbial carbon pump as a new concept for terrestrial carbon sequestration [J]. *Science China Earth Sciences*, 2021, **64**(4): 545-558.
- [51] 李亚林, 练金山, 任凤玲, 等. 浸提条件对土壤溶解性有机碳测定结果的影响[J]. *农业资源与环境学报*, 2022, **39**(4): 741-748.
- Li Y L, Lian J S, Ren F L, *et al.* Effects of extraction conditions on the concentration of dissolved organic carbon in soil [J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2022, **39**

- (4): 741-748.
- [52] 杨怡, 欧阳运东, 陈浩, 等. 西南喀斯特区植被恢复对土壤氮素转化通路的影响[J]. 环境科学, 2018, **39**(6): 2845-2852.
- Yang Y, Ouyang Y D, Chen H, *et al.* Effects of vegetation restoration on soil nitrogen pathways in a Karst region of Southwest China [J]. Environmental Science, 2018, **39**(6): 2845-2852.
- [53] 唐国勇, 李昆, 孙永玉, 等. 干热河谷不同利用方式下土壤活性有机碳含量及其分配特征[J]. 环境科学, 2010, **31**(5): 1365-1371.
- Tang G Y, Li K, Sun Y Y, *et al.* Soil labile organic carbon contents and their allocation characteristics under different land uses at dry-hot valley [J]. Environmental Science, 2010, **31**(5): 1365-1371.
- [54] 张帅, 许明祥, 张亚锋, 等. 黄土丘陵区土地利用变化对深层土壤活性碳组分的影响[J]. 环境科学, 2015, **36**(2): 661-668.
- Zhang S, Xu M X, Zhang Y F, *et al.* Effects of land use change on soil active organic carbon in deep soils in hilly loess plateau region of Northwest China [J]. Environmental Science, 2015, **36**(2): 661-668.
- [55] 纪娇娇, 郑蔚, 杨智杰, 等. 亚热带森林转换对土壤微生物呼吸及其熵值的影响[J]. 生态学报, 2020, **40**(3): 800-807.
- Ji J J, Zheng W, Yang Z J, *et al.* Effects of subtropical forest conversion on soil microbial respiration and its entropy [J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, **40**(3): 800-807.
- [56] 宋小艳, 张丹桔, 张健, 等. 马尾松(*Pinus massoniana*)人工林林窗对土壤不同形态活性有机碳的影响[J]. 生态学报, 2015, **35**(16): 5393-5402.
- Song X Y, Zhang D J, Zhang J, *et al.* Effects of gap size in *Pinus massoniana* plantations on different soil labile organic carbon fractions [J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, **35**(16): 5393-5402.
- [57] 张琦, 王淑兰, 王浩, 等. 深松与免耕频次对黄土旱塬春玉米田土壤团聚体与土壤碳库的影响[J]. 中国农业科学, 2020, **53**(14): 2840-2851.
- Zhang Q, Wang S L, Wang H, *et al.* Effects of subsoiling and no-tillage frequencies on soil aggregates and carbon pools in the Loess Plateau [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2020, **53**(14): 2840-2851.
- [58] Xu H W, Qu Q, Wang M G, *et al.* Soil organic carbon sequestration and its stability after vegetation restoration in the Loess Hilly Region, China [J]. Land Degradation & Development, 2020, **31**(5): 568-580.



CONTENTS

Meteorological Impact Assessment of PM _{2.5} and O ₃ Complex Pollution in Key Regions of China Based on Meteorological Conditions Index	YANG Xin, YANG Yuan-qin, LI Hong, <i>et al.</i>	(6433)
Scale Dependence Between PM _{2.5} and Meteorological Factors and Its Influencing Factors in “2+26” Cities	WU Shu-qi, JIN Jian-nan, ZHENG Dong-yang, <i>et al.</i>	(6441)
Chemical Constituents and Sources of PM _{2.5} Around the Wuhan Military Games Period	LIU Shi-hao, KONG Shao-fei, ZHENG Huang, <i>et al.</i>	(6452)
Characteristics and Sources of PM _{2.5} Pollution During Winter in Handan City from 2016 to 2020	NIU Hong-ya, GAO Na-na, BAO Xiao-lei, <i>et al.</i>	(6463)
Chemical Compositions and Sources of PM _{2.5} in Weinan City	GUO Jing-ning, LI Xiao-fei, YU Feng, <i>et al.</i>	(6474)
Analysis of Formation Processes and Sources of PM _{2.5} Ammonium During Winter and Summer in Suburban Area of the Yangtze River Delta	XIANG Yan-kun, CAO Fang, ZHANG Wen-qi, <i>et al.</i>	(6486)
Chemical Composition and Characterization of Nitroaromatic Compounds in Urban Areas of Shanghai	YANG Lu, MA Ying-ge, YU Jian-zhen, <i>et al.</i>	(6495)
Source Analysis and Health Risk Assessment of PAHs in PM _{2.5} , Liliang City	MU Ling, LIU Zi-ye, LI Yang-yong, <i>et al.</i>	(6508)
Effect of Biomass Burning on Carbonaceous Aerosol Composition and Light Absorption in Guangxi Regional Background Site	WU Xing-qi, CAO Fang, HONG Yi-hang, <i>et al.</i>	(6518)
Characteristics of Light Absorption, Sources, and Seasonal Variation of Atmospheric Brown Carbon in Northern Nanjing	CHEN Xing-zhou, CUI Shi-jie, ZHANG Yun-jiang, <i>et al.</i>	(6529)
Health Benefit Assessment of Coal-to-electricity Policy on PM _{2.5} Pollution in Beijing-Tianjin-Hebei Region	ZHANG Ru-ting, CHEN Chuan-min, LIU Song-tao, <i>et al.</i>	(6541)
Source Apportionment of Ambient VOCs in Qingdao Based on Photochemical Loss Correction	KONG Cui-li, WU Yu-tong, GU Yao, <i>et al.</i>	(6551)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of VOCs in Urban Areas of Liaocheng in Summer	LI Wan-yong, HUANG Hao-yu, WANG Yan-zhen, <i>et al.</i>	(6564)
Source Analysis of Ozone and Its Precursors in Zibo Based on 3-D Air Quality Model	ZHANG Xin-xin, ZHAO Xiu-ying, HUANG Ling, <i>et al.</i>	(6576)
Spatio-temporal Characteristics and Influencing Factors of Ozone Suppression Events Under High Temperature in China	OU Lin-chong, CHEN Wei-hua, WU Yong-kang, <i>et al.</i>	(6586)
Review of UAV-based Atmospheric Fine Particulate Matter and Ozone Pollution Detection and Source Localization	QU Ya-wei, WANG Ti-jian, YUAN Cheng, <i>et al.</i>	(6598)
Health Impact Analysis of Fine Particulate Pollution from Vehicles in the Beijing-Tianjin-Hebei Region	HAO Yong-pei, SONG Xiao-wei, ZHU Xiao-dong, <i>et al.</i>	(6610)
Assessment of Emission Reduction Potential of CO ₂ Capture, Geological Utilization, and Storage in Cement Industry of China	WEI Ning, LIU Sheng-nan, WEI Feng, <i>et al.</i>	(6621)
Life Cycle Carbon Emission Accounting and Emission Reduction Potential Assessment of Steel Industry	SONG Xiao-cong, DU Shuai, DENG Chen-ning, <i>et al.</i>	(6630)
Evolution Characteristics and Driving Forces of Carbon Dioxide Emissions and Sinks in the Pearl River Delta Region, China	HU Jing-xin, SHA Qing-e, LIU Hui-lin, <i>et al.</i>	(6643)
Impact of Accelerated Electrification Under the Low Carbon Path in Dongguan City on the Coordinated Emission Reduction of CO ₂ and Pollutants	WU Le-min, CHEN Bing-yin, OU Lin-chong, <i>et al.</i>	(6653)
Relationship Between Urbanization and Carbon Emissions in the Chang-Zhu-Tan Region at the County Level	LIU Xian-zhao, LI Yang, <i>et al.</i>	(6664)
Characteristics and Influencing Factors of Greenhouse Fluxes from Urban Lawn	CHEN Li-han, LIU Shuo, LIN Yi, <i>et al.</i>	(6680)
Dual-Perspective Analysis of the Warming Effect of the Methane Emissions from Animal Husbandry in China	LIU Shu-le, YAN Wei, CAO Qing-xian, <i>et al.</i>	(6692)
Pollution Level and Risk Assessment of OPEs in Typical River Basins of China	ZHAO Jiang-lu, LU Hai-jian, LÜ Jia-pei, <i>et al.</i>	(6700)
Soil Heavy Metal Contamination, Sources, and Health Risk of Typical Drinking Water Sources in the Suspended Reach of the Lower Yellow River	PENG Chao-yue, REN Chong, SHEN Hao-xin, <i>et al.</i>	(6710)
Fraction Characteristic and Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Sediments of the Yellow River Mainstream	WANG Yi-di, OUYANG Wei, LIU Lian-hua, <i>et al.</i>	(6720)
Influence of Land Use Structure and Spatial Pattern on Water Quality of Small and Medium-sized Rivers in Poyang Lake Basin	WEN Jia-wei, WANG Peng, HUANG Gao-xiang, <i>et al.</i>	(6728)
Water Environment Characteristics and Water Quality Assessment of Typical Lakes in Inner Mongolia	WANG Xin-yuan, PAN Bao-zhu, WANG Li-xin, <i>et al.</i>	(6744)
Relationship Between Precipitation, River Water, and Groundwater Conversion in the Upper Reaches of Xilin River During the Rainy Season	SUN Jin, WANG Yi-xuan, YANG Lu, <i>et al.</i>	(6754)
Hydrochemical Characteristics and Control Factors of Groundwater in the Northwest Salt Lake Basin	YAN Yan, GAO Rui-zhong, LIU Ting-xi, <i>et al.</i>	(6767)
Groundwater Pollution Risk Assessment in Plain Area of Barkol-Yiwu Basin	LIU Yu, ZENG Yan-yan, ZHOU Jin-long, <i>et al.</i>	(6778)
Bisulfite Promoted Minute Fe ²⁺ -Activated Peroxydisulfate for Paracetamol Degradation	MO Xi-ting, NIE Shu-hua, YAN Cai-xia, <i>et al.</i>	(6790)
Degradation of Ciprofloxacin by Activating Peroxymonosulfate with Sludge Biochar	ZHENG Da-yang, ZOU Jia-li, XU Hao, <i>et al.</i>	(6801)
Adsorption of Iopamidol by NaHCO ₃ -activated Buckwheat Biochar	WEI Hong, ZHAO Jiang-juan, JING Li-ming, <i>et al.</i>	(6811)
Preparation of Bamboo-based N, P Co-doped Activated Carbon and Its Lanthanum Ion Adsorption Performance	WANG Gui-long, LIU Yan-yan, JIANG Rong-yuan, <i>et al.</i>	(6823)
Analysis of Vegetation Change and Influencing Factors in Southwest Alpine Canyon Area	LAI Jin-lin, QI Shi, CUI Ran-ran, <i>et al.</i>	(6833)
Effect of Biochar on Agricultural Soil Aggregates and Organic Carbon: A Meta-analysis	MENG Yan, SHEN Ya-wen, MENG Wei-wei, <i>et al.</i>	(6847)
Carbon Cycling Processes in Croplands and Their Quantification Methods	SUN Zhao-an, ZHU Biao, <i>et al.</i>	(6857)
Effects of Biochar Application on Soil Organic Carbon Component in <i>Eucalyptus</i> Plantations After Five Years in Northern Guangxi	MOU Zhi-yi, SHEN Yu-yi, CAO Yang, <i>et al.</i>	(6869)
Evolution Characteristics of Soil Active Organic Carbon and Carbon Pool Management Index Under Vegetation Restoration in Karst Area	CAI Hua, SHU Ying-ge, WANG Chang-min, <i>et al.</i>	(6880)
Pollution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Typical Antibiotics in Environmental Media in China	CHEN Li-hong, CAO Ying, LI Qiang, <i>et al.</i>	(6894)
Spatial Prediction Modeling for Soil pH Based on Multiscale Geographical Weighted Regression(MGWR) and Its Influencing Factors	ZHAO Ming-song, CHEN Xuan-qiang, XU Shao-jie, <i>et al.</i>	(6909)
Characteristics and Source Analysis of Heavy Metal Pollution in Farmland Around a Coal-fired Power Plant	ZHANG Jun, LI Xu, LIU Lei-yu, <i>et al.</i>	(6921)
Characteristics of Soil Pollution and Source Analysis of Typical Pollutants in the Petrochemical Site	ZHANG Yu-rong, LUO Shuai, CHEN Yuan, <i>et al.</i>	(6933)
Characteristics of Antibiotic Resistance Genes Distribution in Different Types of Agricultural Land Soils in Highly Cultivated Hilly Areas	CHEN Rui, CHENG Jian-hua, TANG Xiang-yu, <i>et al.</i>	(6947)
Effects of Organic Fertilizer Combined with Biochar on Denitrifying Microorganisms and Enzyme Activities in Orchard Soil	DENG Zheng-xin, GAO Ming, XIONG Zi-yi, <i>et al.</i>	(6955)
Effects of Organic Fertilization on Bacterial Community and Maize Productivity in Dryland Red Soil	LIN Ting-ting, ZHENG Jie, ZHU Guo-fan, <i>et al.</i>	(6965)
Effects of Combined Pollution of Microplastics and Cadmium on Microbial Community Structure and Function of <i>Pennisetum hybridum</i> Rhizosphere Soil	DUAN Li-yang, ZHANG Yu, REN Xue-min, <i>et al.</i>	(6973)
Effects of Tomato Planting Years on Soil Physical and Chemical Properties and Microbial Communities	ZHAO Yang-yang, LIU Yin-shuang, SONG Yao, <i>et al.</i>	(6982)
Remediation of Three Oxidants on Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Coking Contaminated Soil and Its Response to Indigenous Microorganisms	LI Wei, WANG Hua-wei, MENG Xiang-yu, <i>et al.</i>	(6992)
Microbial Diversity and Population Structure of Different Salinized Soil Types in Hebei Province	LIU Yin-shuang, NIU Hong-jin, ZHAO Yang-yang, <i>et al.</i>	(7004)
Functional Genomics Analysis of Nitrogen and Phosphorus Transformation in Maize Rhizosphere Microorganisms	WANG Xiang-jun, JIANG Mei-tong, LI Sen, <i>et al.</i>	(7014)
Remediation of Soil Cadmium Contamination by <i>Solanum nigrum</i> L. Enhanced by the Combination of Exogenous Bacteria and Citric Acid	WANG Kai, WANG Li, WANG Yi-kun, <i>et al.</i>	(7024)
Effect of Combined Application of an <i>Enterobacter</i> and Sulfur Fertilizer on Cadmium and Arsenic Accumulation in Rice	ZHANG Pu-xin, YAO Jun-fan, LIU Yu-ling, <i>et al.</i>	(7036)