

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第39卷 第1期

Vol.39 No.1

2018

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

2006~2015年北京市不同地区 O ₃ 浓度变化	王占山, 李云婷, 安欣欣, 李倩, 孙乃迪, 王步英, 潘锦秀 (1)
南京北郊黑碳气溶胶的来源解析	肖思略, 于兴娜, 朱彬, 何稼祺, 吕睿, 沙丹丹 (9)
电镀厂周边大气 PM ₁₀ 中重金属季节性分布特征及生态风险评价	赵珍丽, 赵委托, 黄庭, 程胜高, 余葱葱, 尹伊梦 (18)
广西玉林市大气 PM ₁₀ 和 PM _{2.5} 中有机碳和元素碳污染特征分析	黄炯丽, 陈志明, 莫招育, 李宏姣, 杨俊超, 刘慧琳, 毛敬英, 梁桂云, 张达标, 吴熊平, 郝爽 (27)
青岛近海及黄渤海大气气溶胶中不同形态氮磷质量浓度及组成特征	张瑞峰, 祁建华, 丁雪, 谢丹丹 (38)
大气环境分区管理: 以广东省为例	杨柳林, 李敏辉, 廖程浩, 曾武涛, 张晖, 张永波 (49)
基于高分影像的城市黑臭水体遥感识别: 以南京为例	温爽, 王桥, 李云梅, 朱利, 吕恒, 雷少华, 丁萧蕾, 苗松 (57)
基于 SWAT 模型的流域河道硝酸盐 δ ¹⁵ N 和 δ ¹⁸ O 模拟	王康, 冉宁, 林忠兵, 周祖昊 (68)
程海流域非点源污染负荷估算及其控制对策	陈学凯, 刘晓波, 彭文启, 董飞, 黄智华, 冯顺新, 王若男 (77)
陆浑水库饮用水源地水体中金属元素分布特征及健康风险评价	余葱葱, 赵委托, 高小峰, 程胜高, 谢地, 马鹏途 (89)
天津供水系统中抗生素分布变化特征与健康风险评价	张新波, 宋姿, 张丹, 刘楠楠, 李楠, 温海涛 (99)
西南丘陵区村镇典型供水水源有机物分布特征及对饮水水质的影响	王琼, 李乃稳, 李磊, 李龙国, 苟思, 杨凌肖 (109)
北京市地下水有机氯和有机磷农药健康风险评价	陈卫平, 彭程伟, 杨阳, 吴玉梅 (117)
黄河岸边土壤中类二噁英类多氯联苯污染现状及风险	姚宏, 卢双, 张旭, 裴晋, 鲁垠涛 (123)
淹水落干下三峡水库消落带土壤无机磷形态转化特征	周健, 李春辉, 张志永, 胡红青, 万成炎, 胡莲, 潘晓洁 (130)
磷酸盐对铁锰复合氧化膜去除地表水中氨氮的影响	卓瑞双, 黄廷林, 张瑞峰, 文刚 (137)
K ₂ S ₂ O ₈ 强化 g-C ₃ N ₄ 薄膜电极光电催化降解 Cu(CN) ₂ 并同步回收 Cu	党聪哲, 李一兵, 王彦斌, 赵旭 (145)
以 HKUST-1 为模板制备铜氧化物活化过一硫酸氢钾降解罗丹明 B	蒲嘉懿, 万金泉, 王艳, 马邕文, 武书彬 (152)
氨化松香基交联聚合树脂对水中诺氟沙星的吸附性能	马亚红, 黄婉婷, 刁开盛, 李鹏飞, 谭学才, 董慧岭, 覃方夸, 雷福厚, 刘绍刚 (161)
铁锰泥除砷颗粒吸附剂对 As(V) 的吸附去除	曾辉平, 吕赛赛, 杨航, 尹灿, 曹瑞华, 王艳菊, 李冬, 张杰 (170)
水铁矿及其胶体对砷的吸附与吸附形态	马玉玲, 马杰, 陈雅丽, 雷梅, 郭华明, 翁莉萍, 李永涛 (179)
阳(阴)离子复配修饰两性磁性膨润土的表面特征差异及对苯酚吸附的影响	任爽, 孟昭福, 王腾, 张洋, 田凯, 刘伟, 闫东旭 (187)
典型城市污水中对羟基苯甲酸酯的污染特征	赵雪, 张子峰, 祝富杰, 李一凡, 马万里 (195)
水力停留时间对活性炭生物转盘处理污水的影响	许雯佳, 成小英 (202)
环丙沙星对膜生物反应器运行效能的影响及其去除特性	戴琦, 刘锐, 舒小铭, 张永明, 陈吕军 (212)
AAO 工艺低氧条件下的运行及其模拟	曹特特, 王林, 李咏梅 (219)
磷酸盐对亚硝化系统的抑制及恢复	顾澄伟, 陈方敏, 李祥, 张程锦 (227)
碳源对污水处理厂 SAD 工艺小试的影响	李冬, 赵世勋, 王俊安, 朱金凤, 关宏伟, 张杰 (232)
容积负荷对 ABR-MBR 工艺反硝化除磷性能的影响	吕亮, 尤雯, 韦佳敏, 吴鹏, 沈耀良 (239)
DNBF-O ₃ -GAC 组合工艺深度脱除氮磷及代谢产物	钟丽燕, 郝瑞霞, 王卫东, 万京京, 朱晓霞 (247)
交替好氧/缺氧运行模式对生物脱氮效能及活性污泥胞外聚合物的影响	孙洪伟, 陈翠忠, 吴长峰, 赵华南, 于雪, 方晓航 (256)
纳米零价铁对升流式颗粒污泥床反硝化性能的影响	周丰, 王翻翻, 钱飞跃, 黄慧敏, 沈耀良, 周建民 (263)
高含固污泥厌氧消化中 Fe/S 及 pH 对原位抑硫效率影响及其交互作用	韩芸, 曹玉芹, 卓杨, 王晓飞, 韩雅婷, 彭党聪 (269)
浑河流域贮存污泥成分特征及演变规律分析	刘甜甜, 崔崇威, 赫俊国, 唐建 (276)
去除城市生活污泥中有机络合态金属强化其厌氧生物制气	卢怡清, 许颖, 董滨, 戴晓虎 (284)
污泥飞灰中重金属不同浸出方法比较及综合毒性评价	王丰, 李润东, 李彦龙, 赵云斌, 杨天华 (292)
初冬时期闽江河口区养殖塘排水后的 CH ₄ 和 N ₂ O 通量日变化特征	杨平, 谭立山, 黄佳芳, 何清华, 全川 (300)
3 种土壤改良剂对河套灌区玉米田温室气体排放的影响	武岩, 红梅, 林立龙, 刘梅, 刘宇杰 (310)
有机氮替代比例对冬小麦/夏玉米轮作体系作物产量及 N ₂ O 排放的影响	侯苗苗, 吕凤莲, 张弘毅, 周应田, 路国艳, Ayaz Muhammad, 黎青慧, 杨学云, 张树兰 (321)
拔节期水稻光合碳输入的动态变化及其对施氮的响应: ¹³ C-CO ₂ 脉冲标记	陈珊, 祝贞科, 袁红朝, 王久荣, 彭佩钦, 葛体达, 吴金水 (331)
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	兰志龙, 赵英, 张建国, 李会杰, 司炳成, 焦瑞, Muhammad Numan Khan, Tanveer Ali Sial (339)
不同地表条件下生物炭对土壤氮挥发的影响	邹娟, 胡学玉, 张阳阳, 陈窈君, 王向前, 刘扬 (348)
秸秆与生物炭还田对土壤团聚体及固碳特征的影响	徐国鑫, 王子芳, 高明, 田冬, 黄容, 刘江, 黎嘉成 (355)
县域尺度土壤铜的有效性及相关影响因素评估	李锦芬, 瞿明凯, 刘刚, 黄标 (363)
基于改进 LUR 模型的区域土壤重金属空间分布预测	曾菁菁, 沈春竹, 周生路, 陆春峰, 金志丰, 朱雁 (371)
沈北新区土壤中多环芳烃污染特征及源解析	李嘉康, 宋雪英, 魏建兵, 王颖怡, 李玉双, 郑学昊 (379)
磷酸盐、腐殖酸与粉煤灰联合钝化处理模拟铅镉污染土壤	赵庆圆, 李小明, 杨麒, 陈灿, 钟振宇, 钟宇, 陈飞, 陈寻峰, 王祥 (389)
控源及改良措施对稻田土壤和水稻镉累积的影响	封文利, 郭朝晖, 史磊, 肖细元, 韩晓晴, 冉洪珍, 薛清华 (399)
典型土壤双季稻对 Cd 吸收累积差异	李欣阳, 龙坚, 王树兵, 陈齐, 董霞, 蒋凯, 侯红波, 彭佩钦, 廖柏寒 (406)
松花江上游夹皮沟金矿开采区芦苇叶片汞分布特征	张曼胤, 李梦洁, 崔丽娟, 王贺年, 郭子良, 徐卫刚, 魏圆云, 杨思, 肖红叶 (415)
硝酸盐对土壤反硝化活性及厌氧降解的影响	代军帅, 左小虎, 王明霞, 姚炎红, 周志峰 (422)
长期施肥对稻田土壤微生物量、群落结构和活性的影响	王伟华, 刘毅, 唐海明, 孙志龙, 李宝珍, 葛体达, 吴金水 (430)
海洋沉积物中硫酸盐还原菌和硫酸化菌群落分析方法的比较	张玉, 米铁柱, 甄毓, 陈烨, 付璐璐, 王勋功 (438)
鄱阳湖微囊藻毒素时空分布格局及其与理化及生物因子的关系	袁丽娟, 廖旦根, 张莉, 张大文, 罗林广, 刘聚涛 (450)
畜禽粪便中多重耐药细菌及耐药基因分布特征	张昊, 王盼亮, 杨清香, 俞宁 (460)
烟气净化工艺和焚烧炉类型对生活垃圾焚烧灰性质的影响	章骅, 于思源, 邵立明, 何品晶 (467)

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

兰志龙¹, 赵英^{1*}, 张建国¹, 李会杰², 司炳成², 焦瑞¹, Muhammad Numan Khan¹, Tanveer Ali Sial¹

(1. 西北农林科技大学资源环境学院, 农业部西北植物营养与农业环境重点实验室, 杨凌 712100; 2. 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 杨凌 712100)

摘要: 黄土高原土层深厚, 土壤剖面碳存储受土地利用方式影响明显。为探讨不同土地利用方式对深层土壤碳分布的影响, 研究了人工经济林地(陕北米脂)、退耕还林地(神木)和防风固沙林地(榆林榆阳区)0~20.0 m 土壤有机碳(SOC)和无机碳(SIC)的分布特征和差异。结果表明, 在不同土地利用方式下 SOC 含量: 矮化枣树(2.00 g·kg⁻¹) > 未矮化枣树(1.54 g·kg⁻¹) > 柠条林(0.97 g·kg⁻¹) > 退化人工草地(0.81 g·kg⁻¹) > 樟子松林(0.70 g·kg⁻¹) > 荒草地(0.45 g·kg⁻¹), 且各剖面之间 SOC 含量存在显著性差异($P < 0.05$)。在不同土地利用方式下 SIC 含量: 矮化枣树(11.66 g·kg⁻¹) ≥ 未矮化枣树(11.59 g·kg⁻¹) > 柠条林(9.62 g·kg⁻¹) > 退化人工草地(8.07 g·kg⁻¹) > 樟子松林(4.32 g·kg⁻¹) > 荒草地(0.47 g·kg⁻¹); 人工经济林和退耕还林(草)样地内所有土壤剖面之间 SIC 含量无显著性差异; 人工经济林、退耕还林(草)剖面 and 防风固沙林地剖面 SIC 含量存在显著性差异($P < 0.05$)。矮化枣树、未矮化枣树、柠条林、退化人工草地、樟子松林和荒草地土壤剖面无机碳密度分别是有机碳密度的 6.19、7.71、10.80、10.78、5.91 和 1.03 倍。综上可见, 不同土地利用方式之间土壤碳储量存在明显差异, 无机碳的含量远高于有机碳。

关键词: 土地利用方式; 土壤有机碳; 土壤无机碳; 碳密度; 黄土高原

中图分类号: X171.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2018)01-0339-09 DOI: 10.13227/j.hjks.201704157

Profile Distribution of Soil Organic and Inorganic Carbon Under Different Land Use Types in the Loess Plateau of Northern Shaanxi

LAN Zhi-long¹, ZHAO Ying^{1*}, ZHANG Jian-guo¹, LI Hui-jie², SI Bing-cheng², JIAO Rui¹, Muhammad Numan Khan¹, Tanveer Ali Sial¹

(1. Key Laboratory of Plant Nutrition and the Agri-environment in Northwest China, Ministry of Agriculture, College of Natural Resource and Environment, Northwest A&F University, Yangling 712100, China; 2. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling 712100, China)

Abstract: Carbon storage in the Loess Plateau is affected by land use. In order to assess the differences in soil organic carbon (SOC) and soil inorganic carbon (SIC) under different land use patterns in deep soil profiles, we investigated the distribution characteristics of SOC and SIC at 0–20.0 m soil depth at three locations in the northern Shaanxi province (i.e., an economical plantation in Mizhi, a reforestation area in Shenmu, and a wind break and sand fixation forest district in Yuyang). The results showed that the order for SOC content was: pruning jujube tree (2.00 g·kg⁻¹) > jujube tree (1.54 g·kg⁻¹) > Caragana (0.97 g·kg⁻¹) > degraded artificial grassland (0.81 g·kg⁻¹) > pine forests (0.70 g·kg⁻¹) > natural grass field (0.45 g·kg⁻¹), which indicated significant differences between SOC content and land use types ($P < 0.05$). Similarly, the order of SIC content was: pruning jujube tree (11.66 g·kg⁻¹) > jujube tree (11.59 g·kg⁻¹) > Caragana (9.62 g·kg⁻¹) > degraded artificial grassland (8.07 g·kg⁻¹) > pine forests (4.32 g·kg⁻¹) > natural grass field (0.47 g·kg⁻¹). There were no significant differences between SIC content and soil profiles under the economical plantation of Mizhi and the reforestation area of Shenmu. There were significant differences for SIC content between an artificial economic forest, an area returning farmland to a forest (grass) profile, and a windbreak and sand fixation forest ($P < 0.05$). The SIC densities for pruning jujube tree, jujube tree, Caragana, degraded artificial grassland, pine forest, and natural grass field were 6.19, 7.71, 10.70, 10.78, 5.91, and 1.03 times that of its corresponding SOC density, respectively. It has been concluded that the soil carbon storage was significantly different for different land use patterns, and the SIC content was much higher than the SOC content in the soil profile.

Key words: land use types; soil organic carbon; soil inorganic carbon; carbon density; Loess Plateau

收稿日期: 2017-04-15; 修订日期: 2017-07-19

基金项目: 陕西省科技计划项目(2014KJXX-44); 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室主任基金项目(K318009902-1427); 国家自然科学基金项目(41371234, 41371233)

作者简介: 兰志龙(1991~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为土壤物理学, E-mail: lanzhilong1024@163.com

* 通信作者, E-mail: yzhaosoils@gmail.com

土壤生态系统扮演着碳源和碳汇的双重角色,其中土地利用类型已成为碳固定与排放的重要影响因素.受水资源、气候变化及人类活动的影响^[1,2],干旱半干旱区土地利用类型呈现复杂多变的特征.准确量化干旱半干旱区域不同土地利用方式下土壤碳储量变化对于理解区域碳循环过程是必不可少的^[3,4].全球土壤碳库在0~1 m土壤层内的土壤有机碳(SOC)储量大约含有1 600 Pg,而土壤无机碳(SIC)库在0~1 m土层内的储量为695~748 Pg^[5~8].中国SOC和SIC储量分别为83.8 Pg和77.9 Pg,SIC主要分布于西北干旱半干旱地区和华北地区^[9~11].大量研究表明,深层土壤具有相当高的碳储量,在1~3 m土层碳储量为0~1 m的60%左右^[5,9,12].因此,仅利用0~1 m土层的SOC和SIC含量将大大低估土壤碳储量,尤其是SIC储量^[13].

目前,有关不同土地利用方式下土壤碳的研究主要集中在0~1 m,且主要集中于SOC的研究,而对深层SOC和SIC的研究相对较少.SIC多以碳酸盐的形式存在于土壤中,而且游离的 CaCO_3 会影响土壤团聚体状况、微生物活性以及土壤有机碳含量,进而影响SOC库和碳循环的过程^[14].此外,随着植被根系区域生物地球化学过程的进行,根系产生的分泌物以及根系脱落物会增加SOC含量^[15~17].大量的研究表明,在干旱半干旱黄土高原地区,农业发展历史和土地利用变化已对土壤碳循环产生重要影响.土地利用变化既有利于土壤碳汇的形成,但也可能会造成土壤碳的排放,从而对深层SOC和SIC分布产生一定的影响^[18~21].在干旱半干旱黄土高原地区,研究不同土地利用方式对SOC和SIC垂直分布的影响程度,以期为该地区深层土壤储存,并为干旱半干旱黄土丘陵区植被恢复及其合理配置提供依据.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于陕西省北部的黄土丘陵区(图1),属温带半干旱大陆性季风气候,年均降雨量在400~460 mm,7~9月降雨量占全年降水量的55%~78%;年均气温7.9~8.9℃.黄土丘陵区覆盖着深厚的黄土层,黄土厚度在50~80 m之间.自北向南分别选择神木县退耕还林(草)、榆林市榆阳区防风固沙林和米脂县孟岔湾高产人工经济林这3个代表性区域的典型植被类型下的土壤作为研究对象.神

木六道沟位于神木县以西14 km处,北依长城,地处毛乌素沙地的边缘,流域面积为6.886 km²,主要植被类型有人工林(柠条林等)和退化人工草地(苜蓿地退化形成以长芒草为主的草地)等;榆林(榆阳区)土壤类型主要为风沙土,表土疏松,区域性植被稀少,主要的植被类型为人工樟子松林和荒草地等;米脂县孟岔湾属于典型的黄土高原丘陵沟壑区,气候干燥,蒸发强烈,土层深厚,土质均一,主要土地利用类型为人工经济林(枣树).

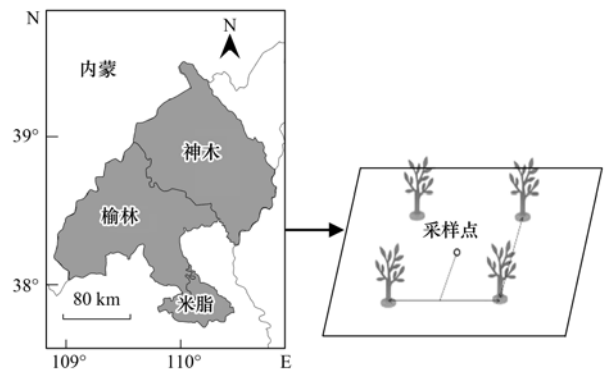


图1 研究区域及采样点分布示意

Fig. 1 Locations of the study area and sample points on the Loess Plateau in China

1.2 研究方法

土壤样品采集于2014年8月下旬,选择不同区域具有代表性的土地利用方式为研究对象,且每种土地利用类型的种植年限在30年左右;矮化枣树、非矮化枣树、柠条林和退化人工草地每块样地采集一个土壤深剖面的样品,采样深度为20.0 m.樟子松林和荒草地由于沙土的上层土壤含水量较低,沙层流动性较大,深层土壤样品极难采集,采样深度分别为8.0 m和8.4 m.为减少地形(海拔、坡度、坡向等)差异对植被生长的影响,同时尽可能减小空间位置差异造成的空间变异误差,本实验选取同一区域相近地形条件下相距不超过200 m的两块样地作为样品采集点.每个剖面每间隔20 cm采集一个土样,带回室内风干过0.25 mm筛,用于测定SOC.土壤含水量采用105℃烘干24 h至恒重来测定;SOC采用重铬酸钾-外加热法;SIC采用气量法测定,在干旱和半干旱区域SIC主要以碳酸盐的形式存在,利用碳酸盐与HCl反应,产生CO₂,在气量管中收集并记录体积,根据当时的大气压计算无机碳的含量^[22].

为了探讨土壤剖面SOC和SIC的分布及影响因素,分别测定土壤机械组成、根系密度和土壤容重.土壤机械组成采用吸管法测定,每50 cm测定

一个样品. 根系分布主要分析人工经济林和退耕还林区土壤剖面中的根系分布,采用直径 6 cm 根钻每 20 cm 采集一个样品,用水冲洗,使用 ESPON Prefection V700 扫描成像,并用 WinRHIZO 软件分析根系密度. 土壤容重采用了一个替代的办法,即用土钻获取的 20 cm 高度土柱中,截取中间一段受干扰最小的 5 cm 土壤样品,烘干称重利用公式(1)计算土壤容重. 理论上,无论采用何种取样方式都存在外力对土壤体积的影响,如果处理得当(土钻取样旋转时用力均匀,截取土壤样品时体积准确),在缺乏其它有效测定土壤深层容重的前提下,根据笔者的测试,这种方法尚可接受. 本研究在防风固沙林地的深层土壤容重均按照表层 5 ~ 10 cm 的容重计算,樟子松林和荒草地 5 ~ 10 cm 的土壤容重分别为 1.62 g·cm⁻³和 1.60 g·cm⁻³. 不同土地利用方

式土壤基本性质见表 1.

SOC 和 SIC 密度的计算公式为:

$$\gamma_{i,i+50} = \frac{m_i}{(1 + \omega_i/100) \cdot V} \quad (1)$$

式中, γ_i 为土壤容重, g·cm⁻³; ω_i 为每层土壤质量含水量, %; m_i 为每层土壤质量, g; V 为土壤样品体积, cm³.

$$\text{SOC } D_i(\text{or SIC } D_i) = \frac{(1 - \delta\%) \cdot C_i \cdot h \cdot \gamma_i}{100} \quad (2)$$

式中, SOC D_i 为土壤有机碳密度, kg·m⁻²; SIC D_i 为土壤无机碳密度, kg·m⁻²; δ 为砾石的含量, % (采样区砾石含量为 0); C_i 为每层 SOC 或 SIC 含量, g·kg⁻¹; h 为土层厚度, cm; γ_i 为土壤容重, g·cm⁻³; 100 为转换系数^[23,24].

表 1 样地基本特征

Table 1 Basic characteristics of the sampling plots

土地利用类型	坡向	海拔高度 /m	采样深度 /m	植被密度 /棵·hm ⁻²	植被高度 /m	土壤颗粒组成/%		
						砂粒 (>0.05 mm)	粉粒 (0.05 ~ 0.002 mm)	黏粒 (<0.002 mm)
矮化枣树	西南	977	20	3 400	1.0	18.95	71.72	9.33
未矮化枣树	东南	1 015	20	3 400	5.0	20.78	68.15	11.07
柠条林	东南	1217	20	3 000	1.4	41.94	47.93	10.13
退化人工草地	东南	1 209	20	—	0.2	39.16	49.47	10.98
樟子松林	—	1 102	8	2 800	9.0	68.52	27.77	3.71
荒草地	—	1 100	8.4	—	0.3	86.61	12.00	1.39

采用 Excel 2013 和 SPSS 18.0 软件对数据进行统计分析. 采用单因素(one-way ANOVA)和 LSD 法进行方差分析和多重比较($\alpha=0.05$),用 Pearson 法对 SOC、SIC 和土壤理化性状进行相关分析. 利用 OriginLab2016 软件作图.

2 结果与分析

2.1 不同土地利用方式下 SOC 剖面分布

不同土地利用方式下各剖面 SOC 含量均为表层最高(图 2). 0 ~ 2.0 m 土层内随着剖面深度加深 SOC 含量逐渐降低,在 2.0 m 以下各剖面趋于稳定,但矮化枣树与未矮化枣树在 11.0 m 以下趋于稳定. 各剖面土壤平均 SOC 含量大小为:矮化枣树(2.00 g·kg⁻¹) > 未矮化枣树(1.54 g·kg⁻¹) > 柠条林(0.97 g·kg⁻¹) > 退化人工草地(0.81 g·kg⁻¹) > 樟子松林(0.70 g·kg⁻¹) > 荒草地(0.45 g·kg⁻¹),且在 $P < 0.05$ 水平,土壤有机碳之间存在显著性差异(图 3). 在人工经济林区,2 m 以下土层矮化枣树与未矮化枣树在 4.0 ~ 11.0 m 之间变化较大;矮化枣

树在此土层的 SOC 含量的平均值是 2.14 g·kg⁻¹,高于 11.0 m 以下的 1.69 g·kg⁻¹. 未矮化枣树在此土层 SOC 的含量的平均值是 1.40 g·kg⁻¹,略低于下层 SOC 含量. 在退耕还林(草)区,柠条林地剖面 SOC 含量与退化人工草地存在明显差异;在防风固沙林地中,樟子松林土壤剖面 SOC 含量在 2.0 m 以下明显升高,2.0 m 以下土层平均 SOC 是 0 ~ 2.0 m 土层的 1.5 倍;荒草地 8 m 土层 SOC 无明显变化.

2.2 不同土地利用方式下 SIC 的剖面分布

不同土地利用方式下除矮化枣树和荒草地外,其他土地利用类型 SIC 分布变化较为剧烈(图 4). 各剖面中平均 SIC 含量大小为:矮化枣树(11.66 g·kg⁻¹) ≥ 未矮化枣树(11.59 g·kg⁻¹) > 柠条林(9.62 g·kg⁻¹) > 退化人工草地(8.07 g·kg⁻¹) > 樟子松林(4.32 g·kg⁻¹) > 荒草地(0.47 g·kg⁻¹),在 $P < 0.05$ 水平,人工经济林区和退耕还林(草)区剖面 SIC 含量之间无显著性差异;而人工经济林和退耕还林(草)与防风固沙林地各剖面之间存在显著性差异(图 3). 人工经济林区,矮化枣树 SIC 含量在

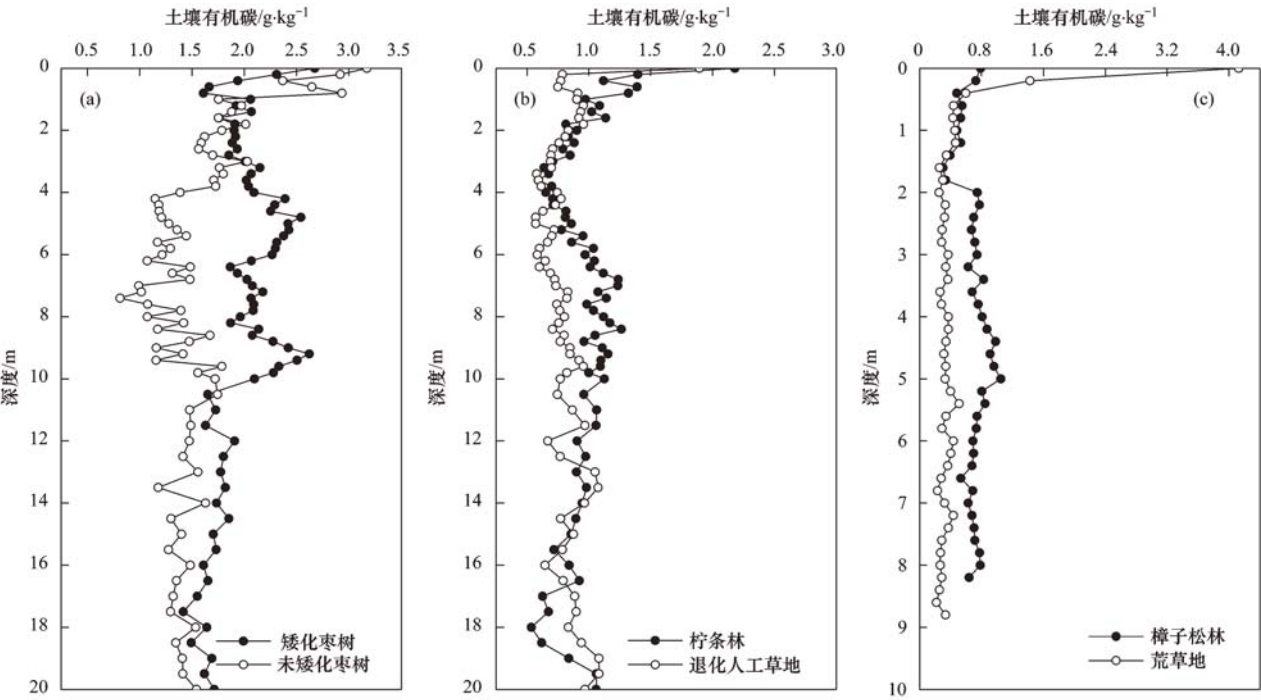


图 2 不同土地利用方式下 SOC 的剖面分布

Fig. 2 Vertical SOC distributions for the different land use types

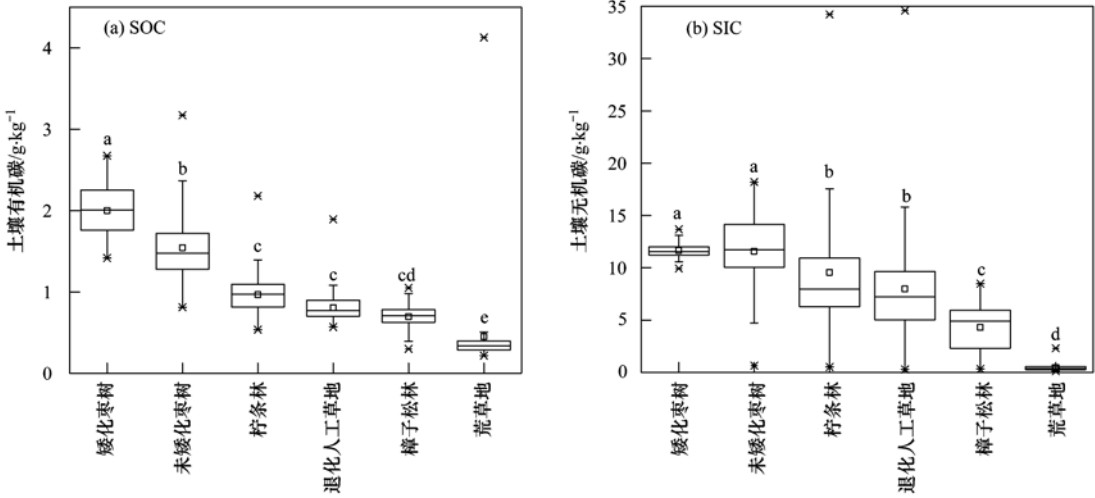


图 3 不同土地利用方式下土壤 SOC 和 SIC 差异

Fig. 3 Mean soil organic carbon and inorganic carbon box plots for different land use types

整个剖面无较大波动,而未矮化枣树 SIC 在剖面 0 ~5.0 m 和 17.0 m 以下存在明显波动,在 0 ~2.2 m SIC 存在一个峰值,最高达到 18.21 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$;在剖面 3.6 ~4.8 m 土层中出现一个低值区,最低达到 0.63 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$;在 5.0 ~17.0 m 之间,土壤剖面中 SIC 含量趋于稳定[图 4(a)]. 退耕还林(草)区,柠条林和退化人工草地土壤剖面 SIC 有明显的波动;柠条林地分别在剖面 0.1、2.5、5.8、8.7 和 15.0 m 处出现峰值,其 SIC 峰值含量是整个剖面平均 SIC 的 3 ~4 倍;最大和最小值分别是

34.22 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 0.51 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$. 退化人工草地在 0 ~1.4 m 剖面 SIC 含量较低,而分别在剖面 3.8、7.8、10.5、14.0 和 17.0 m 左右出现峰值,其 SIC 峰值含量是整个剖面平均 SIC 的 1.5 ~4.3 倍;最大和最小值分别是 34.58 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 0.28 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ [图 4(b)]. 防风固沙林区,樟子松林 0 ~2.0 m 土壤剖面中 SIC 的含量为 0.57 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,在 2.0 m 处显著增大后逐渐趋于稳定,且稳定于 5.56 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 左右;2.0 m 以下 SIC 含量是上层的 9.75 倍;而荒草地剖面 SIC 的含量无明显的变化[图 4(c)].

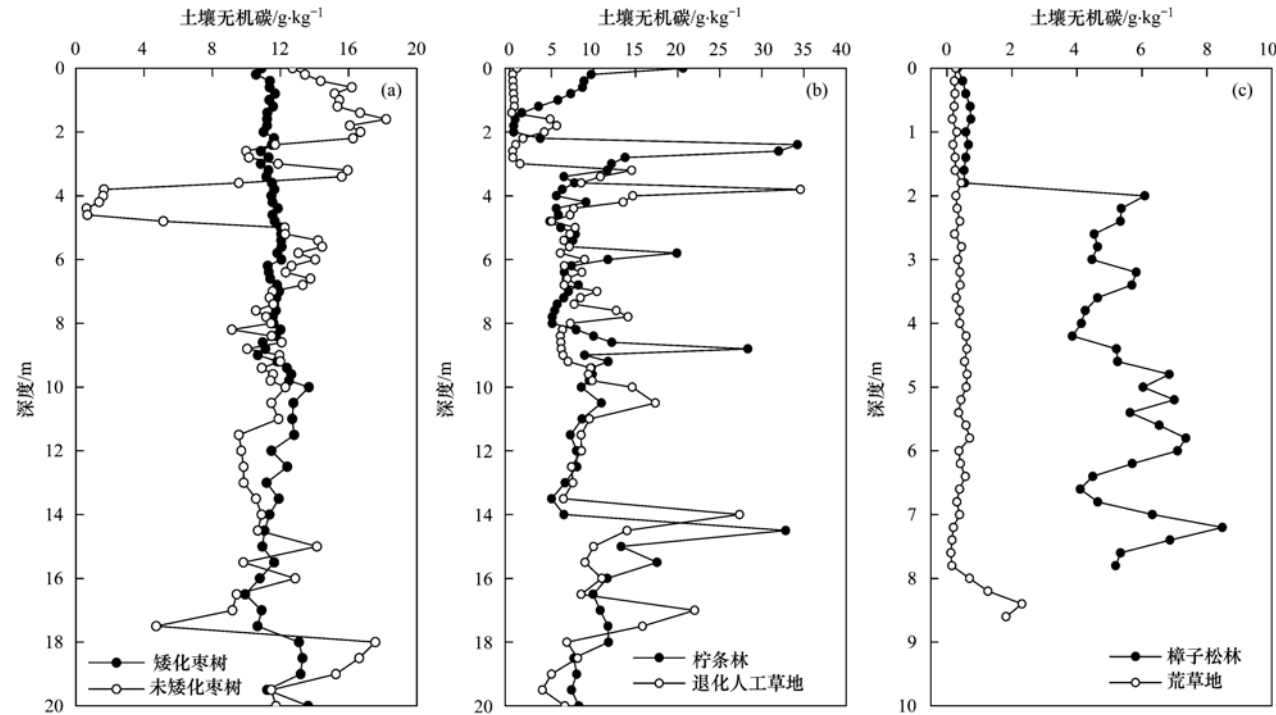


图 4 不同土地利用方式下 SIC 的剖面分布

Fig. 4 Vertical SIC distributions for the different land use types

2.3 不同土地利用方式下土壤剖面 SOC 密度和 SIC 密度

如图 5(a) 所示,不同土地利用方式下 SOC 密度分布存在明显的差异. 不同剖面 20.0 m 的 SOC 密度大小依次为:矮化枣树($53.54 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$) > 未矮化枣树($43.51 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$) > 柠条林($26.88 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$) > 退化人工草地($25.35 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$); 8.0 m 剖面中 SOC 密度大小依次为樟子松林($9.26 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$) > 荒草地($6.13 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$). 图 5(b)中不同土地利用方式下 0~1.0 m 和 0~5.0 m 的 SIC 密度存在明显的差异; 0~20.0 m 的 SIC 密度差异较小. 不同剖面

20.0 m 的 SIC 密度大小依次为: 未矮化枣树($335.52 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$) > 矮化枣树($331.60 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$) > 柠条林($290.26 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$) > 退化人工草地($273.28 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$); 8.0 m 剖面中 SIC 密度大小依次为樟子松林($55.94 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$) > 荒草地($6.56 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$). 在每个剖面当中, SOC 与 SIC 密度之间存在非常显著的差异(图 6). 矮化枣树、未矮化枣树、柠条林、退化人工草地、樟子松林和荒草地中每个剖面中 SIC 密度分别是 SOC 密度的 6.19、7.71、10.80、10.78、5.91 和 1.03 倍,仅在荒草地中两者之间无较大差异.

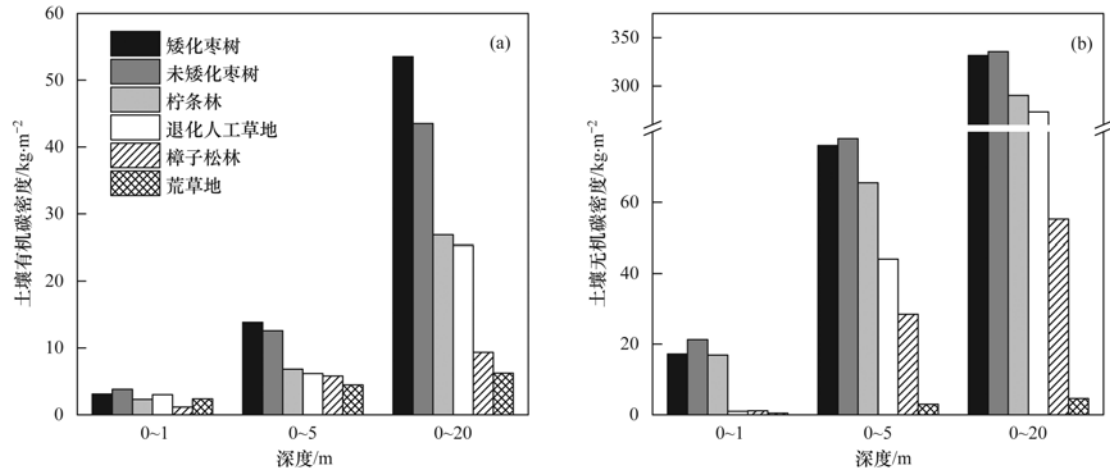


图 5 不同土地利用方式下 0~1.0、0~5.0 和 0~20.0 m 土层 SOC 和 SIC 密度

Fig. 5 Mean SOC and SIC densities in 0-1.0, 0-5.0, and 0-20.0 m thick soil layers for the different land use types

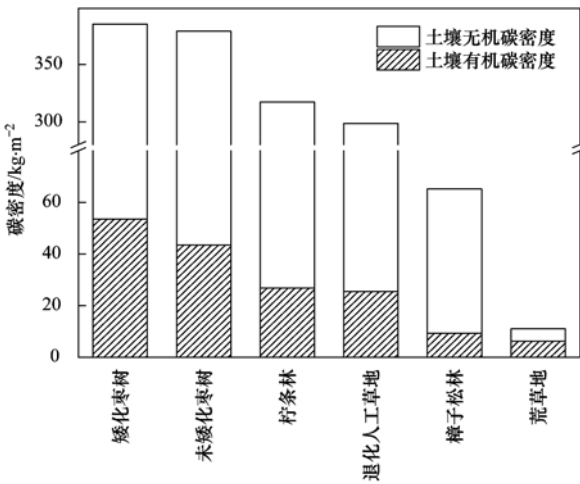


图 6 不同土地利用方式下的土壤碳密度
Fig. 6 Soil carbon density for the different land use types

3 讨论

3.1 不同土地利用方式对 SOC 的影响

SOC 在深层土壤剖面中的分布与土地利用方式、土壤理化性质、土地管理措施以及剖面中古土壤的分布等有关. 在本研究中,干旱半干旱黄土丘陵区不同土地利用方式是 SOC 垂直分布的一个主要的影响因素;在不同土地利用方式下 SOC 含量存在很大差异,在 $P < 0.05$ 的水平存在显著的差异 (图 3)^[25];这是因人工经济林区、退耕还林(草)区和防风固沙区 SOC 含量之间的差异主要是因为土壤质地有着明显的差异,土壤类型分别属于粉壤土、壤土和砂土;SOC 含量与土壤中黏粒和粉粒含量呈正相关关系,与沙粒呈负相关关系 (表 2). 不同的

土层 SOC 也存在一定差异,SOC 含量在表层最高,随着剖面深度的增加 SOC 含量逐渐减少 (图 4),这与 Wang 等^[26]的研究结果相似. 这主要是因表层积累大量的枯枝落叶及植物残体提高了表层 SOC 含量,柠条林、退化人工草地和荒草地尤为明显.

在 2.0 m 以下深层剖面中,图 2(a)矮化枣树 SOC 含量高于未矮化枣树,且在 4.0 ~ 11.0 m 之间的差异更大,这是矮化枣树在前期灌过水,引起土壤剖面中 SOC 含量的提高,而且灌溉的同时也会造成上层可溶性 SOC 的淋溶^[27];11.0 m 以下两者之间存在很较小的差异. 这表明矮化枣树冠幅的减少并未影响 SOC 含量,主要是灌溉水引起的差异. 图 2(b)中,柠条林和退化人工草地土壤剖面中 SOC 无显著性差异 (图 3),这主要是退化人工草地在退化演替之前主要是苜蓿,因其生物量大根系发达,导致柠条林和退化人工草地之间无较大差异;但在剖面 4.6 ~ 11.0 m 存在一定的差异,这主要是柠条林根系持续生长产生的分泌物以及根系脱落物造成的差异^[28];这表明柠条林的持续生长提高了土壤剖面中 SOC 密度 (图 5). 图 2(c)中樟子松林和荒草地之间存在显著性差异,2.0 m 以下樟子松林地的 SOC 含量是荒草地 1.67 倍,是樟子松林上层 0 ~ 2.0 m 的 1.41 倍,这主要原因是 2.0 m 以下剖面中 SOC 与土壤粉粒和黏粒含量增加呈正相关;其次是樟子松根系生长提高了土层中的 SOC 含量. 荒草地在表层 0 ~ 0.4 m SOC 含量高于樟子松林是因表层存在大量的枯枝落叶,造成表层 SOC 快速升高.

表 2 不同土地利用方式下土壤理化性质与土壤碳之间皮尔逊相关关系¹⁾

Table 2 Pearson correlations analysis of soil properties and soil carbon for the different land use types

土地利用类型		土壤含水量	pH	EC	砂粒	粉粒	黏粒	根系密度	容重	SIC
矮化枣树	SOC	-0.398 ** (71)	-0.049 (71)	-0.111 (71)	-0.251 (39)	0.14 (39)	0.196 (39)	0.348 * (37)	-0.514 ** (41)	-0.22 (71)
	SIC	0.125 (71)	0.246 * (71)	-0.205 (71)	-0.353 * (39)	0.459 ** (39)	-0.029 (39)	-0.315 (37)	-0.516 ** (41)	
未矮化枣树	SOC	0.005 (71)	-0.175 (71)	-0.007 (71)	-0.017 (39)	0.131 (39)	-0.228 (39)	0.642 ** (21)	-0.480 ** (41)	0.344 ** (71)
	SIC	-0.191 (71)	0.035 (71)	0.06 (71)	0.022 (39)	0.183 (39)	-0.157 (39)	0.048 (21)	-0.006 (41)	
柠条林	SOC	0.063 (71)	-0.428 ** (71)	0.296 * (71)	-0.266 (41)	0.300 (41)	0.022 (41)	0.732 ** (44)	-0.499 ** (41)	0.019 (71)
	SIC	-0.015 (71)	0.228 (71)	-0.06 (71)	0.096 (41)	-0.154 (41)	0.135 (41)	0.232 (44)	0.393 * (41)	
退化人工草地	SOC	0.344 ** (71)	-0.248 * (71)	0.437 ** (71)	-0.445 ** (40)	0.411 ** (40)	0.550 (40)	0.794 ** (12)	0.137 (41)	-0.168 (71)
	SIC	0.008 (71)	0.447 ** (71)	-0.036 (71)	0.131 (40)	-0.339 * (40)	0.353 (40)	-0.489 (12)	0.148 (41)	
樟子松林	SOC	0.54 ** (44)	-0.561 ** (44)	0.684 ** (44)	-0.513 * (17)	0.473 (17)	0.569 * (17)			0.613 ** (44)
	SIC	0.912 ** (44)	0.398 ** (44)	0.614 ** (44)	-0.858 ** (17)	0.87 ** (17)	0.49 * (17)			
荒草地	SOC	-0.364 * (44)	-0.601 ** (44)	0.27 (44)	-0.222 (18)	-0.106 (18)	0.798 ** (18)			-0.143 (44)
	SIC	0.495 ** (44)	0.309 ** (44)	0.427 ** (44)	-0.408 (18)	0.514 * (18)	-0.207 (18)			

1) * 表示 $P < 0.05$, ** 表示 $P < 0.01$; 括号中的数字为样本数

3.2 不同土地利用方式对 SIC 的影响

在干旱半干旱地区, SIC 在土壤剖面中的分布主要受土壤母质、气候因素和土壤理化性质等因素影响^[29,30]. 在本研究中, 不同土地利用方式下人工经济林区域和退耕还林(草)区域剖面 SIC 含量之间无显著性差异; 而人工经济林和退耕还林(草)与防风固沙林地各剖面之间存在显著性差异(图 3); 采样点各剖面中 SIC 的变化范围是 0.28 ~ 34.58 g·kg⁻¹. 人工经济林区和退耕还林(草)区域平均 SIC 含量与高于防风固沙林区荒草地, 这主要是因为人工经济林区和退耕还林(区)土壤母质中含有大量的碳酸盐使整个剖面中 SIC 含量较高. 而在土壤表层 0 ~ 0.4 m 剖面中 SIC 整个含量较低是由于降水和植被生长的共同作用使表层碳酸盐发生淋溶, SIC 的含量低于 0.4 m 以下土层.

人工经济林区矮化枣树和未矮化枣树具有较高的 SIC 含量, 未矮化枣树在 4.0 m 左右的土层中出现大的波动可能是因为此土层中古气候较为湿润或者母质的原因, 使其含量低于剖面其他部位^[31]. 在 5.0 ~ 17.0 m 剖面中, 两个土壤剖面中 SIC 含量无明显差异, 而在 17.0 m 以下波动增大, 这是因母质的差异引起的变化. 退耕还林(草)样地中, 柠条林和退化人工草地 SIC 含量在剖面中具有剧烈的波动, 这可能与古气候变化有关. 在气候湿润的时期发生碳酸盐的淋溶和累积, 在土壤剖面中形成“料浆层”. 而“料浆层”的碳酸盐含量高于剖面其他部位, 导致剖面中出现 SIC 含量突然增加的现象; 在 0 ~ 4.0 m 柠条林和退化人工草地 SIC 含量整体较低, 这可能与采样点古气候湿润程度有关, 降水增加土壤表层的碳酸盐溶解, 形成易溶的重碳酸盐, 随着土壤水分向下淋溶, 当土壤中水分被植物利用后, 重碳酸盐累积转化为碳酸盐沉积形成钙积层, 提高土壤下层 SIC 含量^[32]. 在防风固沙区, 樟子松林和荒草地土壤剖面 SIC 含量有显著差异(图 3). 在 2.0 m 以下, 樟子松林中 SIC 含量突然增大, 是 2.0 m 以上层的 9.75 倍, 这主要是樟子松林地 SIC 含量的增加主要与土壤粉粒和 SOC 含量的增加有关. 根据皮尔逊相关系数表明 SIC 与砂粒、粉粒、黏粒和 SOC 之间的相关系数分别是 -0.858、0.870、0.490 和 0.613 ($P < 0.01$) (表 2). 在荒草地剖面中 SIC 含量较低且无较大的波动, 这主要是荒草地属于沙土不利于无机碳颗粒的保存. 这表明土壤质地对土壤碳存储过程中起到重要的作用.

3.3 陕北黄土丘陵区不同土地利用方式对土壤碳密度的影响

在干旱半干旱地区土壤碳储量对于生物圈以及碳循环过程具有重要意义. 不同的土地利用方式对土壤碳储量有很大的影响. 从研究区的土壤碳密度可知, 在不同土地利用方式下 20.0 m 剖面中土壤碳密度达到 344.98 kg·m⁻², 因此之前学者对于干旱半干旱地区的土壤碳的研究严重低估了该地区土壤碳储量, 因为大多数的研究集中于土壤表层 SOC, 而忽视了 SIC 的含量及深层剖面的碳储量^[10]. 土壤碳库的微小变化, 都可引起大气 CO₂ 剧烈变化. 干旱半干旱区 SIC 密度远大于 SOC 密度, 在人工经济林区域、退耕还林(草)区域以及防风固沙林区域的樟子松林 SIC 密度是 SOC 密度的 6.19 ~ 10.80 倍, 这与 Wu 等^[32]的研究结果相一致, 这主要是因为土壤母质中含有的大量的无机碳提高了土壤碳密度. 荒草地整个土壤剖面中砂粒含量在 75% 以上, 土壤质地较粗, 土壤颗粒对于 SOC 和 SIC 没有保护和固定作用, 导致 SOC 和 SIC 含量都很低. 在干旱半干旱地区 SIC 储量是 SOC 储量的 1 ~ 11 倍, 不同土地利用方式对于土壤碳库影响, 即可能变成向大气输送 CO₂, 也可能会变成吸收大气中 CO₂. 土壤碳酸盐的转化周期较长, 因而 SIC 在土壤中的累积是一个重要的碳汇, 也是一个稳定的土壤碳库. 不合理的土地利用造成土壤退化, 引起有机碳含量下降, 使土壤由碳汇变成碳源, 影响区域内气候的变化以及碳循环的过程. 根据不同土地利用方式下土壤有机碳的累积和对无机碳含量的影响, 矮化枣树, 退化人工草地和樟子松林在 3 个采样点对于黄土丘陵区的植被恢复以及生态建设是较合理的措施.

4 结论

(1) 不同土地利用方式下, 3 个采样点各剖面平均 SOC 含量之间存在显著性差异 ($P < 0.05$); SIC 在人工经济林和退耕还林(草)样地内两点剖面平均 SIC 含量之间无显著性差异, 人工经济林、退耕还林(草)和防风固沙林样地以及防风固沙林样地之间平均 SIC 含量存在显著性差异 ($P < 0.05$).

(2) 不同利用方式土壤碳密度之间差异性显著, 矮化枣树、未矮化枣树、柠条林、退化人工草地、樟子松林和荒草地中每个剖面中 SIC 密度分别是有机碳密度的 6.19、7.71、10.80、10.78、5.91 和 1.03 倍. 从长远来看, 矮化枣树, 退化人工草地和樟子松林在 3 个采样点对于黄土丘陵区的植被恢

复以及生态建设是较合理的措施.

参考文献:

- [1] Conant R T, Cerri C E P, Osborne B B, *et al.* Grassland management impacts on soil carbon stocks: a new synthesis[J]. *Ecological Applications*, 2017, **27**(2): 662-668.
- [2] Deng L, Zhu G Y, Tang Z S, *et al.* Global patterns of the effects of land-use changes on soil carbon stocks[J]. *Global Ecology and Conservation*, 2016, **5**: 127-138.
- [3] Lal R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security[J]. *Science*, 2004, **304**(5677): 1623-1627.
- [4] Liu C, Li Z, Dong Y, *et al.* Do land use change and check-dam construction affect a real estimate of soil carbon and nitrogen stocks on the Loess Plateau of China? [J]. *Ecological Engineering*, 2017, **101**: 220-226.
- [5] Batjes N H. Total carbon and nitrogen in the soils of the world [J]. *European Journal of Soil Science*, 1996, **47**(2): 151-163.
- [6] Eswaran H, Van Den Berg E, Reich P. Organic carbon in soils of the world[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1993, **57**(1): 192-194.
- [7] Mi N, Wang S Q, Liu J Y, *et al.* Soil inorganic carbon storage pattern in China[J]. *Global Change Biology*, 2008, **14**(10): 2380-2387.
- [8] Schimel D S. Terrestrial ecosystems and the carbon cycle[J]. *Global Change Biology*, 1995, **1**(1): 77-91.
- [9] Li Z P, Han F X, Su Y, *et al.* Assessment of soil organic and carbonate carbon storage in China[J]. *Geoderma*, 2007, **138**(1-2): 119-126.
- [10] 刘伟, 程积民, 陈芙蓉, 等. 黄土高原中部草地土壤有机碳密度特征及碳储量[J]. *草地学报*, 2011, **19**(3): 425-431.
- [10] Liu W, Cheng J M, Chen F R, *et al.* Characteristic of organic carbon density and organic carbon storage in the natural grassland of center Loess Plateau[J]. *ActaAgrestiaSinica*, 2011, **19**(3): 425-431.
- [11] 潘根兴. 中国土壤有机碳和无机碳库量研究[J]. *科技通报*, 1999, **15**(5): 330-332.
- [11] Pan G X. Study on carbon reservoir in soils of China [J]. *Bulletin of Science and Technology*, 1999, **15**(5): 330-332.
- [12] Jobbágy E G, Jackson R B. The vertical distribution of soil organic carbon and its relation to climate and vegetation [J]. *Ecological Applications*, 2000, **10**(2): 423-436.
- [13] Wang Y G, Li Y, Ye X H, *et al.* Profile storage of organic/inorganic carbon in soil: from forest to desert[J]. *Science of the Total Environment*, 2010, **408**(8): 1925-1931.
- [14] 马昕昕, 许明祥, 杨凯. 黄土丘陵区刺槐林深层土壤有机碳矿化特征初探[J]. *环境科学*, 2012, **33**(11): 3893-3900.
- [14] Ma X X, Xu M X, Yang K. Soil organic carbon mineralization of black locust forest in the deep soil layer of the hilly region of the Loess Plateau, China [J]. *Environmental Science*, 2012, **33**(11): 3893-3900.
- [15] Durigan M R, Cherubin M R, de Camargo P B, *et al.* Soil organic matter responses to anthropogenic forest disturbance and land use change in the eastern Brazilian Amazon [J]. *Sustainability*, 2017, **9**(3): 379.
- [16] 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.
- [16] Zhang S, Xu M X, Zhang Y S, *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.
- [17] Díaz-Hernández J L. Is soil carbon storage underestimated? [J]. *Chemosphere*, 2010, **80**(3): 346-349.
- [18] 张丽华, 谢忠奎, 王亚军, 等. 陇中黄土高原土地利用变化对土壤有机碳、无机碳的影响[J]. *土壤通报*, 2013, **44**(2): 369-375.
- [18] Zhang L H, Xie Z K, Wang Y J, *et al.* The impact of land use change on soil organic carbon and soil inorganic carbon contents at Loess Plateau in Longzhong [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2013, **44**(2): 369-375.
- [19] 杨玉海, 陈亚宁, 李卫红, 等. 塔里木河干流土地利用/覆被变化对土壤有机碳储量的影响[J]. *中国环境科学*, 2016, **36**(9): 2784-2790.
- [19] Yang Y H, Chen Y N, Li W H, *et al.* Effects of land use/cover change on soil organic carbon storage in the main stream of Tarim River[J]. *China Environmental Science*, 2016, **36**(9): 2784-2790.
- [20] 孙文义, 郭胜利, 周小刚. 黄土丘陵沟壑区地形和土地利用对深层土壤有机碳的影响[J]. *环境科学*, 2010, **31**(11): 2740-2747.
- [20] Sun W Y, Guo S L, Zhou X G. Effects of topographies and land uses on soil organic carbon in subsurface in hilly region of Loess Plateau [J]. *Environmental Science*, 2010, **31**(11): 2740-2747.
- [21] 文雯, 周宝同, 汪亚峰, 等. 黄土高原羊圈沟小流域土地利用时空变化的土壤有机碳效应[J]. *生态学报*, 2015, **35**(18): 6060-6069.
- [21] Wen W, Zhou B T, Wang Y F, *et al.* Effects of spatio-temporal changes of land-use on soil organic carbon in Yangjuangou watershed in Loess Plateau, China [J]. *ActaEcologicaSinica*, 2015, **35**(18): 6060-6069.
- [22] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. (第三版). 北京: 中国农业出版社, 2000. 25-210.
- [23] 金峰, 杨浩, 蔡祖聪, 等. 土壤有机碳密度及储量的统计研究[J]. *土壤学报*, 2001, **38**(4): 522-528.
- [23] Jin F, Yang H, Cai Z C, *et al.* Calculation of density and reserve of organic carbon in soils [J]. *ActaPedologicaSinica*, 2001, **38**(4): 522-528.
- [24] 许乃政, 张桃林, 王兴祥, 等. 长江三角洲地区土壤无机碳库研究[J]. *长江流域资源与环境*, 2009, **18**(11): 1038-1044.
- [24] Xu N Z, Zhang T L, Wang X X, *et al.* Statistical calculation of soil inorganic carbon stock in the Yangtze delta region [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2009, **18**(11): 1038-1044.
- [25] Conant R T, Smith G R, Paustian K. Spatial variability of soil carbon in forested and cultivated sites [J]. *Journal of Environmental Quality*, 2003, **32**(1): 278-286.
- [26] Wang Y Q, Shao M A, Zhang C C, *et al.* Soil organic carbon in deep profiles under Chinese continental monsoon climate and its relations with land uses[J]. *Ecological Engineering*, 2015, **82**: 361-367.
- [27] Clark J M, Chapman P J, Adamson J K, *et al.* Influence of

- drought-induced acidification on the mobility of dissolved organic carbon in peat soils[J]. *Global Change Biology*, 2005, **11**(5): 791-809.
- [28] Rumpel C, Kögel-Knabner I. Deep soil organic matter—a key but poorly understood component of terrestrial C cycle[J]. *Plant and Soil*, 2011, **338**(1-2): 143-158.
- [29] 杨黎芳, 李贵桐. 土壤无机碳研究进展[J]. *土壤通报*, 2011, **42**(4): 986-990.
- Yang L F, Li G T. Advances in research of soil inorganic carbon [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2011, **42**(4): 986-990.
- [30] 崔丽峰, 刘丛强, 涂成龙, 等. 黄土地区不同覆被下土壤无机碳分布及同位素组成特征[J]. *生态学杂志*, 2013, **32**(5): 1187-1194.
- Cui L F, Liu C Q, Xu C L, *et al.* Soil inorganic carbon and its isotopic composition under different vegetation types in Loess Plateau of Northwest China [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2013, **32**(5): 1187-1194.
- [31] 李香钰, 方小敏, 杨一博, 等. 3 Ma 以来黄土高原朝那黄土-红粘土序列赤铁矿记录及其古气候意义[J]. *第四纪研究*, 2012, **32**(4): 700-708.
- Li X Y, Fang X M, Yang Y B, *et al.* Hematite record of 3Ma loess-red clay sequences in the central Chinese loess plateau 3 Ma and its paleoclimatic significance [J]. *Quaternary Sciences*, 2012, **32**(4): 700-708.
- [32] Wu H B, Guo Z T, Gao Q, *et al.* Distribution of soil inorganic carbon storage and its changes due to agricultural land use activity in China[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2009, **129**(4): 413-421.

环境科学

CONTENTS

Variation of O ₃ Concentration in Different Regions of Beijing from 2006-2015	WANG Zhan-shan, LI Yun-ting, AN Xin-xin, <i>et al.</i>	(1)
Source Apportionment of Black Carbon Aerosol in the North Suburb of Nanjing	XIAO Si-han, YU Xing-na, ZHU Bin, <i>et al.</i>	(9)
Seasonal Characteristics and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in PM ₁₀ Around Electroplating Plants	ZHAO Zhen-li, ZHAO Wei-tuo, HUANG Ting, <i>et al.</i>	(18)
Characteristics of Organic and Elemental Carbon in PM ₁₀ and PM _{2.5} in Yulin City, Guangxi	HUANG Jiong-li, CHEN Zhi-ming, MO Zhao-yu, <i>et al.</i>	(27)
Concentrations and Compositions of Different Forms of Nitrogen and Phosphorus in Atmospheric Aerosols in the Qingdao Coastal Region and over the Yellow and Bohai Sea	ZHANG Rui-feng, QI Jian-hua, DING Xue, <i>et al.</i>	(38)
Air Quality Subarea Management: A case study of Guangdong Province	YANG Liu-lin, LI Min-hui, LIAO Cheng-hao, <i>et al.</i>	(49)
Remote Sensing Identification of Urban Black-Odor Water Bodies Based on High-Resolution Images; A Case Study in Nanjing	WEN Shuang, WANG Qiao, LI Yun-mei, <i>et al.</i>	(57)
Simulation of Nitrate Isotopic ($\delta^{15}\text{N}$ and $\delta^{18}\text{O}$) by Coupling the Hydrology and Transport Processes Described by the SWAT Model	WANG Kang, RAN Ning, LIN Zhong-bing, <i>et al.</i>	(68)
Estimation of and Control Strategies for Pollution Loads from Non-point Sources in the Chenghai Watershed	CHEN Xue-kai, LIU Xiao-bo, PENG Wen-qi, <i>et al.</i>	(77)
Distribution Characteristics and Health Risk Assessment of Metals in Drinking Water Sources from the Luhun Reservoir	YU Cong-cong, ZHAO Wei-tuo, GAO Xiao-feng, <i>et al.</i>	(89)
Distribution Characteristics and Health Risk Assessment of Antibiotics in the Water Supply System in Tianjin	ZHANG Xin-bo, SONG Zi, ZHANG Dan, <i>et al.</i>	(99)
Organic Distribution Characteristics and Influence on Drinking Water Quality in the Typical Water Sources for Towns in the Southwest Hilly Area of China	WANG Qiong, LI Nai-wen, LI Lei, <i>et al.</i>	(109)
Health Risk Evaluation of Organochlorine and Organophosphorous Pesticides in Groundwater in Beijing	CHEN Wei-ping, PENG Cheng-wei, YANG Yang, <i>et al.</i>	(117)
Pollution Status and Risks of Dioxin-like Polychlorinated Biphenyls in the Soil of the Yellow River	YAO Hong, LU Shuang, ZHANG Xu, <i>et al.</i>	(123)
Effects of Flooding and Drying on the Transformation of Soil Inorganic Phosphorus in the Water-Level-Fluctuating Zone of the Three Gorges Reservoir, China	ZHOU Jian, LI Chun-hui, ZHANG Zhi-yong, <i>et al.</i>	(130)
Effect of Phosphate on the Ammonium Removal Performance of Iron-Manganese Co-oxide Film in Surface Water Treatment	ZHUO Rui-shuang, HUANG Ting-lin, ZHANG Rui-feng, <i>et al.</i>	(137)
Enhanced Photoelectrocatalytic Oxidation of Cu(CN) ₃ ²⁻ and Synchronous Cathodic Deposition of Cu by Peroxydisulfate	DANG Cong-zhe, LI Yi-bing, WANG Yan-bin, <i>et al.</i>	(145)
Using HKUST-1 as a Template for Copper Oxides Preparation to Activate Peroxymonosulfate for RhB Degradation	PU Jia-yi, WAN Jin-quan, WANG Yan, <i>et al.</i>	(152)
Evaluation of Performance of an Aminated Rosin-based Resin for Adsorption of Norfloxacin from Aqueous Solutions	MA Ya-hong, HUANG Wan-ting, DIAO Kai-sheng, <i>et al.</i>	(161)
Arsenic(V) Removal by Granular Adsorbents Made from Backwashing Residuals from Biofilters for Iron and Manganese Removal	ZENG Hui-ping, LÜ Sai-sai, YANG Hang, <i>et al.</i>	(170)
Arsenic Adsorption and Its Species on Ferrihydrite and Ferrihydrite Colloid	MA Yu-ling, MA Jie, CHEN Ya-li, <i>et al.</i>	(179)
Comparison of Amphoteric-Cationic and Amphoteric-Anionic Modified Magnetic Bentonites: Characterization and Sorption Capacity of Phenol	REN Shuang, MENG Zhao-fu, WANG Teng, <i>et al.</i>	(187)
Pollution Characteristics of Parabens in Typical Sewage Wastewater	ZHAO Xue, ZHANG Zi-feng, ZHU Fu-jie, <i>et al.</i>	(195)
Influence of Hydraulic Retention Time on the Treatment of Polluted River Water by an Activated Carbon Rotating Biological Contactor	XU Wen-jia, CHENG Xiao-ying, <i>et al.</i>	(202)
Removal and Influence of Ciprofloxacin in a Membrane Bioreactor	DAI Qi, LIU Rui, SHU Xiao-ming, <i>et al.</i>	(212)
Operation of the AAO Process Under Low Dissolved Oxygen Conditions and Its Simulation	CAO Te-te, WANG Lin, LI Yong-mei, <i>et al.</i>	(219)
Inhibitory Effects of Phosphate and Recovery on a Nitrification System	GU Cheng-wei, CHEN Fang-min, LI Xiang, <i>et al.</i>	(227)
Effect of Carbon Source on Lab-scale SAD Process in a Wastewater Treatment Plant	LI Dong, ZHAO Shi-xun, WANG Jun-an, <i>et al.</i>	(232)
Effect of Volume Loading Rate (VLR) on Denitrifying Phosphorus Removal by the ABR-MBR Process	LÜ Liang, YOU Wen, WEI Jia-min, <i>et al.</i>	(239)
Combined Process of DNB-F-O ₃ -GAC for Nitrogen and Phosphorus and Metabolite Advanced Removal	ZHONG Li-yan, HAO Rui-xia, WANG Wei-dong, <i>et al.</i>	(247)
Influence of Operating Modes for the Alternating Anoxic/Oxic Process on Biological Nitrogen Removal and Extracellular Polymeric Substances of Activated Sludge	SUN Hong-wei, CHEN Cui-zhong, WU Chang-feng, <i>et al.</i>	(256)
Effects of Nanoscale Zero-valent Iron (nZVI) on Denitrifying Performance of an Upflow Granular Sludge Bed Reactor	ZHOU Feng, WANG Fan-fan, QIAN Fei-yue, <i>et al.</i>	(263)
Influence on Desulfurization Efficiency and Interactions of Fe/S and pH During H ₂ S in situ Depression of High Solid Anaerobic Digestion	HAN Yun, CAO Yu-qin, ZHUO Yang, <i>et al.</i>	(269)
Analysis of Storage Sludge Composition Characteristics and Evolutionary Regularity in the Hunhe River Basin	LIU Tian-tian, CUI Chong-wei, HE Jun-guo, <i>et al.</i>	(276)
Enhancement of Anaerobic Methane Production by Removal of Organic-bonding Metals from Sewage Sludge	LU Yi-qing, XU Ying, DONG Bin, <i>et al.</i>	(284)
Comparison of Different Leaching Methods for Heavy Metals in Sludge Fly Ash and Comprehensive Toxicity Evaluation	WANG Feng, LI Run-dong, LI Yan-long, <i>et al.</i>	(292)
Diurnal Variations of CH ₄ and N ₂ O Fluxes from the Drained Aquaculture Pond in the Minjiang River Estuary During Early Winter	YANG Ping, TAN Li-shan, HUANG Jia-fang, <i>et al.</i>	(300)
Effects of Three Soil Amendments on Greenhouse Gas Emissions From Corn Fields in the Hetao Irrigation District	WU Yan, HONG Mei, LIN Li-long, <i>et al.</i>	(310)
Effect of Organic Manure Substitution of Synthetic Nitrogen on Crop Yield and N ₂ O Emission in the Winter Wheat-Summer Maize Rotation System	HOU Miao-miao, LÜ Feng-lian, ZHANG Hong-tao, <i>et al.</i>	(321)
Dynamics of Rice Photosynthesized Carbon Input and Its Response to Nitrogen Fertilization at the Jointing Stage: ¹³ C-CO ₂ Pulse-labeling	CHEN Shan, ZHU Zhen-ke, YUAN Hong-zhao, <i>et al.</i>	(331)
Profile Distribution of Soil Organic and Inorganic Carbon Under Different Land Use Types in the Loess Plateau of Northern Shaanxi	LAN Zhi-long, ZHAO Ying, ZHANG Jian-guo, <i>et al.</i>	(339)
Effect of Biochar on Ammonia Volatilization from Soils of Different Surface Conditions	ZOU Juan, HU Xue-yu, ZHANG Yang-yang, <i>et al.</i>	(348)
Effects of Straw and Biochar Return in Soil on Soil Aggregate and Carbon Sequestration	XU Guo-xin, WANG Zi-fang, GAO Ming, <i>et al.</i>	(355)
Assessment of the Availability of Soil Copper and Related Influencing Factors at a County Scale	LI Jin-fen, QU Ming-kai, LIU Gang, <i>et al.</i>	(363)
Application of the LUR Model in the Prediction of Spatial Distributions of Soil Heavy Metals	ZENG Jing-jing, SHEN Chun-zhu, ZHOU Sheng-lu, <i>et al.</i>	(371)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Soils of Shenyang North New Area	LI Jia-kang, SONG Xue-ying, WEI Jian-bing, <i>et al.</i>	(379)
Passivation of Simulated Pb- and Cd-Contaminated Soil by Applying Combined Treatment of Phosphate, Humic Acid, and Fly Ash	ZHAO Qing-yuan, LI Xiao-ming, YANG Qi, <i>et al.</i>	(389)
Distribution and Accumulation of Cadmium in Paddy Soil and Rice Affected by Pollutant Sources Control and Improvement Measures	FENG Wen-li, GUO Zhao-hui, SHI Lei, <i>et al.</i>	(399)
Differences in Cd Accumulation in Typical Soils Under the Double Rice System	LI Xin-yang, LONG Jian, WANG Shu-bing, <i>et al.</i>	(406)
Distribution Characteristics of Mercury in Reed Leaves from the Jiapiou Gold Mine in the Songhua River Upstream	ZHANG Man-yin, LI Meng-jie, CUI Li-juan, <i>et al.</i>	(415)
Effect of Nitrate Amendment on Soil Denitrification Activity and Anthracene Anaerobic Degradation	DAI Jun-shuai, ZUO Xiao-hu, WANG Ming-xia, <i>et al.</i>	(422)
Effects of Long-term Fertilization Regimes on Microbial Biomass, Community Structure and Activity in a Paddy Soil	WANG Wei-hua, LIU Yi, TANG Hai-ming, <i>et al.</i>	(430)
Analysis of Sulfate-Reducing and Sulfur-Oxidizing Prokaryote Community Structures in Marine Sediments with Different Sequencing Technologies	ZHANG Yu, MI Tie-zhu, ZHEN Yu, <i>et al.</i>	(438)
Seasonal and Spatial Variations of Microcystins and Their Relationships with Physicochemical and Biological Factors in Poyang Lake	YUAN Li-juan, LIAO Qie-gen, ZHANG Li, <i>et al.</i>	(450)
Distribution of Multidrug-Resistant Bacteria and Antibiotic-Resistant Genes in Livestock Manures	ZHANG Hao, WANG Pan-liang, YANG Qing-xiang, <i>et al.</i>	(460)
Influence of Air Pollution Control (APC) Systems and Furnace Type on the Characteristics of APC Residues from Municipal Solid Waste Incinerators	ZHANG Hua, YU Si-yuan, SHAO Li-ming, <i>et al.</i>	(467)