

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第2期

Vol.36 No.2

2015

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目 次

霾与非霾期间汞在不同粒径颗粒物上的分布特征 朱琮宇,程金平,魏雨晴,薄丹丹,陈筱佳,江璇,王文华(373)
大气传输路径对上甸子本底站气溶胶光学特性的影响 蒲维维,石雪峰,马志强,赵秀娟,张小玲,徐晓峰(379)
近 3 年太原市夏季降水的化学特征研究 郭晓方,崔阳,王开扬,何秋生,王新明(388)
太原市 PM_{2.5} 中有机碳和元素碳的污染特征 刘珊,彭林,温彦平,白慧玲,刘凤娴,史美鲜,李丽娟(396)
青海省西宁市和天峻县大气颗粒物中有机氯农药和类二噁英多氯联苯的水平与分布
..... 李秋旭,何畅,马召辉,马丽花,扎西卓玛,王英,金军(402)
北京 10 个常绿树种颗粒物吸附能力研究 王兵,张维康,牛香,王晓燕(408)
人工湿地空气微生物群落碳源代谢特征 宋志文,王琳,徐爱玲,吴等等,夏岩(415)
春季融雪补给后巩乃斯河水物理化学性质空间分布特征研究 刘翔,郭玲鹏,张飞云,马杰,牟书勇,赵鑫,李兰海(421)
青藏高原湖泊小流域水体离子组成特征及来源分析 李鹤,李军,刘小龙,杨曦,张伟,王洁,牛颖权(430)
亚热带深水水库——龙滩水库季节性分层与富营养化特征分析
..... 张奎,李秋华,黄国佳,欧腾,李翎,吴迪,周黔兰,高廷进(438)
长江河口水库沉积物磷形态、吸附和释放特性 金晓丹,吴昊,陈志明,宋红军,何义亮(448)
黄河口溶解无机碳时空分布特征及影响因素研究 郭兴森,吕迎春,孙志高,王传远,赵全升(457)
苕溪干流悬浮物和沉积物的磷形态分布及成因分析 陈海龙,袁旭音,王欢,李正阳,许海燕(464)
滇池表层沉积物氮污染特征及其潜在矿化能力
..... 孟亚媛,王圣瑞,焦立新,刘文斌,肖焱波,祖维美,徐天敏,丁帅,周童(471)
城郊排水沟渠溶质传输的暂态存储影响及参数灵敏性 李如忠,钱靖,董玉红,唐文坤,杨继伟(481)
艾比湖表层沉积物重金属的来源、污染和潜在生态风险研究 张兆永,吉力力·阿不都外力,姜逢清(490)
工矿业绿洲城郊排污渠沉积物重金属的形态分布规律及风险评估
..... 臧飞,王胜利,南忠仁,王兆炜,任业萌,王德鹏,廖琴,周婷(497)
山东省典型工业城市土壤重金属来源、空间分布及潜在生态风险评估 戴彬,吕建树,战金成,张祖陆,刘洋,周汝佳(507)
UV 协同 ClO₂ 去除三氯生及其降解产物的研究 李玉瑛,何文龙,李青松,金伟伟,陈国元,李国新(516)
氯化铁絮凝-直接过滤工艺对地下水中 As(V) 的去除机制研究 康英,段晋明,景传勇(523)
负载纳米零价铁铜藻基活性炭的制备及其去除水中 Cr(VI) 的研究 曾淦宁,武晓,郑林,伍希,屠美玲,王铁杆,艾宁(530)
磁性石墨烯吸附水中 Cr(VI) 研究 刘伟,杨琦,李博,陈海,聂兰玉(537)
TiO₂@ 酵母复合微球固定床吸附荧光增白剂-VBL 的研究 王菲,张凯强,白波,王洪伦,索有瑞(545)
MnO₂/CFP 复合电极的制备及电吸附 Pb²⁺ 特性的研究 刘方园,胡承志,李永峰,梁乾伟(552)
吸附相反应技术制备微弱光响应的多组分掺杂 TiO₂ 催化剂 王挺,祝轶琛,孙志轩,吴礼光(559)
掺铁 TiO₂ 纳米管阵列模拟太阳光光电催化降解双酚 A 的研究 项国梁,喻泽斌,陈颖,徐天佐,彭振波,刘钰鑫(568)
天然矿物负载 Fe/Co 催化 H₂O₂ 氧化降解阳离子红 3R 马楠,刘华波,谢鑫源(576)
臭氧微气泡处理酸性大红 3R 废水特性研究 张静,杜亚威,刘晓静,周玉文,刘春,杨景亮,张磊(584)
碳源类型、温度及电子受体对生物除磷的影响 韩芸,许松,董涛,王斌帆,王显耀,彭党聪(590)
低温低溶解氧 EBPR 系统的启动、稳定运行及工艺失效问题研究 马娟,李璐,俞小军,魏雪芬,刘娟丽(597)
O 池溶解氧水平对石化废水 A/O 工艺污染物去除效果和污泥微生物群落的影响
..... 丁鹏元,初里冰,张楠,王星,王建龙(604)
改善污泥脱水性能的丝状真菌的分离及其促进污泥脱水的机制初探 周雨璐,付豪逸,范先锋,王振宇,郑冠宇(612)
热碱处理对污水处理厂污泥特性的影响研究 杨世东,陈霞,刘操,肖本益(619)
不同退化程度羊草草原碳收支对模拟氮沉降变化的响应
..... 齐玉春,彭琴,董云社,肖胜生,贾军强,郭树芳,贺云龙,闫钟清,王丽芹(625)
地表臭氧浓度升高对旱作农田 N₂O 排放的影响 吴杨周,胡正华,李岑子,陈书涛,谢燕,肖启涛(636)
亚热带次生林不同土壤呼吸组分的多年观测研究 刘义凡,陈书涛,胡正华,沈小帅,张旭(644)
川中丘陵县域土壤氮素空间分布特征及其影响因素 罗由林,李启权,王昌全,李冰,张新,冯文颖,翁倩,吴冕(652)
黄土丘陵区土地利用变化对深层土壤活性碳组分的影响 张帅,许明祥,张亚锋,王超华,陈盖(661)
汶川地震灾区不同气候区土壤微生物群落碳源代谢多样性 张广帅,林勇明,马瑞丰,邓浩俊,杜锟,吴承祯,洪伟(669)
土壤电动修复的电极空间构型优化研究 刘芳,付融冰,徐珍(678)
有机氯农药污染场地挖掘过程中污染物的分布及健康风险 张石磊,薛南冬,杨兵,李发生,陈宣宇,刘博,孟磊(686)
水稻不同生育期根际及非根际土壤砷形态迁移转化规律 杨文骏,王英杰,周航,易开心,曾敏,彭佩钦,廖柏寒(694)
植物根系体外溶液的提取方法研究:以多环芳烃为例 朱满党,都江雪,乐乐,李金凤,杨青青,陆守昆,占新华(700)
垂序商陆叶细胞壁结合锰机制研究 徐向华,刘翠英,李平,郎漫,赵小艳,杨建军,官敏(706)
1 株筛自柴油污染土壤的铜绿假单胞菌对萘的降解特性研究 刘文超,吴彬彬,李晓森,卢滇楠,刘永民(712)
CdSe/ZnS 量子点对斑马鱼胚胎发育的毒性效应 陈慕飞,黄承志,蒲德永,郑朝依,袁开米,金星星,张耀光,金丽(719)
锯齿新米虾对 Cu²⁺ 和毒死蜱毒性的生理响应 李典宝,张玮,王丽卿,张瑞雷,季高华(727)
同步衍生超声乳化微萃取气相色谱法测定环境水样中的苯胺类化合物 田立勋,戴之希,王国栋,翁焕新(736)
热水环境中 Na⁺ 活化斜发沸石吸附钙离子除硬过程研究 张硕,王栋,陈远超,张兴文,陈贵军(744)
区域经济-污染-环境三维评价模型的构建与应用 樊新刚,米文宝,马振宁(751)
《环境科学》征订启事(401) 《环境科学》征稿简则(437) 信息(489,522,726,735)

黄土丘陵区土地利用变化对深层土壤活性碳组分的影响

张帅¹, 许明祥^{1,2*}, 张亚锋¹, 王超华², 陈盖²

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

摘要: 土壤活性有机碳组分对土地利用变化的响应规律已成为当前土壤碳和养分循环研究的一个热点. 本文以黄土丘陵子午岭林区为研究区, 通过分析天然乔木林转变为人工乔木林、天然乔木林转变为农田、天然灌木林转变为农田以及撂荒后土壤活性有机碳含量及其在土壤剖面上分布的差异, 与浅层 (0~60 cm) 土壤对比, 分析土地利用变化对深层土壤 (60~200 cm) 活性有机碳组分的影响. 结果表明: ①土壤易氧化性碳 (LOC) 和土壤微生物量碳 (MBC) 含量主要集中在 0~60 cm 土层, 分别占 0~200 cm 土层含量的 49%~66% 和 71%~84%. 不同土地利用类型 0~60 cm 土层 LOC 和 MBC 含量差异显著, 深层土壤含量差异不显著. ②土地利用变化对土壤活性有机碳影响显著, 浅层比深层反映敏感. 天然乔木林转变成人工乔木林和农田、天然灌木林转变成撂荒地和农田这 4 种土地利用转变方式下, 浅层土壤 LOC 分别减少了 10%、60%、29%、40%, 深层分别减少了 9%、21%、12%、1%; 浅层土壤 MBC 分别减少了 24%、73%、23%、56%, 深层土壤 MBC 分别减少了 25%、18%、8%、11%. ③土地利用变化改变了活性有机碳占总有机碳的分配比例. 天然乔木林和天然灌木林转变成农田浅层土壤 LOC/SOC 比例增加, 深层差异不大; 天然灌木林转变为农田, 浅层土壤 MBC/SOC 降低, 深层差异不大. 结果说明土壤活性有机碳含量和分配比例受土地利用变化的影响, 与浅层相比, 深层土壤有机碳具有较大的稳定性.

关键词: 黄土丘陵区; 土地利用变化; 深层土壤; 土壤活性有机碳

中图分类号: X144 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)02-0661-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.2015.02.038

Effects of Land Use Change on Soil Active Organic Carbon in Deep Soils in Hilly Loess Plateau Region of Northwest China

ZHANG Shuai¹, XU Ming-xiang^{1,2*}, ZHANG Ya-feng¹, WANG Chao-hua², CHEN Gai²

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

Abstract: Response of soil active organic carbon to land-use change has become a hot topic in current soil carbon and nutrient cycling study. Soil active organic carbon distribution characteristics in soil profile under four land-use types were investigated in Ziwuling forest zone of the Hilly Loess Plateau region. The four types of land-use changes included natural woodland converted into artificial woodland, natural woodland converted into cropland, natural shrubland converted into cropland and natural shrubland converted into revegetated grassland. Effects of land-use changes on soil active organic carbon in deep soil layers (60-200 cm) were explored by comparison with the shallow soil layers (0-60 cm). The results showed that: ①The labile organic carbon (LOC) and microbial carbon (MBC) content were mainly concentrated in the shallow 0-60 cm soil, which accounted for 49%-66% and 71%-84% of soil active organic carbon in the profile (0-200 cm) under different land-use types. Soil active organic carbon content in shallow soil was significantly varied for the land-use changes types, while no obvious difference was observed in soil active organic carbon in deep soil layer. ②Land-use changes exerted significant influence on soil active organic carbon, the active organic carbon in shallow soil was more sensitive than that in deep soil. The four types of land-use changes, including natural woodland to planted woodland, natural woodland to cropland, natural shrubland to revegetated grassland and natural shrubland to cropland, LOC in shallow soil was reduced by 10%, 60%, 29%, 40%, and LOC in the deep layer was decreased by 9%, 21%, 12%, 1%, respectively. MBC in the shallow soil was reduced by 24%, 73%, 23%, 56%, and that in the deep layer was decreased by 25%, 18%, 8% and 11%, respectively. ③Land-use changes altered the distribution ratio of active organic carbon in soil profile. The ratio between LOC and SOC in shallow soil increased when natural woodland and shrubland were converted into farmland, but no obvious difference was observed in deep soil. The ratio of MBC/SOC in shallow soil decreased when natural shrubland was converted into farmland, also, no significant difference was detected in the ratio of MBC/SOC for other land-use change types. The results suggested that land-use change exerted significant influence on soil active organic carbon content and distribution proportion in soil profile. Soil organic carbon in deep soil was more stable than that in shallow soil.

收稿日期: 2014-08-02; 修订日期: 2014-10-09

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41171422, 41171228); 中国科学院战略性先导科技专项 (XDA05050504)

作者简介: 张帅 (1988~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为土地利用变化及其环境效应, E-mail: zhouyananzhang@163.com

* 通讯联系人, E-mail: xumx@nwsuaf.edu.cn

Key words: Hilly Region of the Loess Plateau; land-use change; deep soil layer; active organic carbon

土地利用/覆被变化(LUCC)是全球环境变化的核心领域,是驱动陆地生态系统碳循环的重要原因^[1,2]。土地利用变化是仅次于化石燃料燃烧而使大气CO₂浓度急剧增加的最主要的人为活动^[2]。它既可改变土壤有机物的输入,又可通过改变小气候和土壤条件来影响土壤有机碳的分解速率,从而改变土壤有机碳储量。目前关于土地利用变化对有机碳的研究集中于30 cm以上的表层土壤^[3-5],但是越来越多的研究证明土地利用变化对更深层土壤有机碳也有影响^[6-8]。

土地利用变化主要是影响土壤有机碳组分中分解相对快的部分,即活性碳组分^[9]。活性有机碳最活跃,周转最快,对土地利用变化最敏感,是土壤有机碳中对物理或化学等干扰因素反映最敏感的部分^[10],是反映土壤有机碳动态变化特征敏感性指标^[11],一定程度上也可以反映有机碳的稳定性。近期的研究表明,表层与深层土壤的土壤学性质、环境和物理化学特征具有很大差异,碳动态过程和对外界环境变化的响应也不同,不能模糊土壤有机碳在土壤剖面分布中的异质性^[12-14],而且大量的有机碳储存于深层土壤^[15,16],深层土壤有机碳的长期稳定固存的机制问题仍未明晰。因此,深入研究深层土壤有机碳组分变化对促进土壤有机碳固存机制具有重要意义。

土壤活性有机碳组分对土地利用变化的响应规律成为当前土壤碳和养分循环研究的一个热点^[17]。国内的研究主要集中于不同林分对土壤活性有机碳的影响^[18,19],有关土地利用方式对土壤活性有机碳的影响也主要集中于川西高原、东北平原,关于黄土丘陵区土地利用变化对土壤活性有机碳组分影响的研究较少。在我国黄土高原地区,几千年的人类活动已经使土地利用方式发生了很大变化,尤其是清朝末年毁林开荒、20世纪70年代荒地开垦以及近十多年来的退耕还林,导致土地利用/覆被发生了几次重大变化^[20],无疑这些活动对土壤碳将产生一定的影响。本文以黄土丘陵子午岭林区为研究区,通过分析天然乔木林、天然灌木林转变成人工乔木林、农田及撂荒地土壤活性有机碳含量及其在土壤剖面上分布的差异,与浅层(0~60 cm)土壤对比,分析土地利用变化对深层(60~200 cm)活性碳组分的影响,揭示浅层和深层土壤活性有机碳对土地利用变化响应的敏感性,以期为深入理解土地利用

变化对土壤有机碳库的影响机制,探索深层土壤有机碳的稳定性提供科学依据,推动我国全球变化科学的发展。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于陕西省富县任家台子午岭林区(东经109°08'~109°11',北纬36°04'~36°05')。地貌类型属梁状黄土丘陵沟壑区,海拔高程920~1683 m,相对高差100~150 m,沟谷密度4.5 km·km⁻²。年均气温9℃,年均降雨量576.7 mm,多集中在7、8、9这3个月,占全年降雨的60%以上,属于暖温带半湿润气候。地面组成物质主要以新黄土、老黄土为主,有些沟谷底部出现三趾马红土和白垩系砂、页岩。在清同治年间陕甘交界地区发生大范围民族冲突,此后该地区人口逃亡、田地荒芜,植被开始自然恢复,至今已有近150年历史,目前子午岭已经形成较大范围而且连片的次生森林景观,20世纪40~60年代以来,由于战争、饥荒、自然灾害等原因,陆续有人迁居此地,重新开始垦荒种田,同时由于人口变动又不断出现新的弃耕地^[20]。区内林木郁闭度达0.7以上,主要树种有山杨(*Pobulus davidiana*)、白桦(*Betula platyphylla* Suk)、辽东栎(*Quercus liaotungensis* Koidz)、榆树(*Ulmus pumila*)和杜梨(*Pyrus betulaefolia* Bunge)等。林下草灌覆盖度达0.9以上,主要有绣线菊(*Spiraea salicifolia* L.)、胡枝子(*Lespedeza bicolor* Turcz.)、黄刺玫(*Rosa xanthina* Lindl)、山桃(*Prunus davidiana* Franch.)、酸刺(*Hippophae rhamnoides* Linn.)、铁杆蒿(*Compositae*)、白草(*Pennisetum centrasiaticum* Tzvel)、羽茅(*Achnatherum sibiricum*)、野菊(*Dendranthema*)等。林下的枯枝落叶层厚度2~5 cm。阴坡及半阴坡的森林长势较阳坡好,梁峁顶部多旱生草灌植被,局部有散生的杜梨(*Pyrus betulaefolia* Bunge)分布。

1.2 样地选择和土样采集

根据子午岭地区实际情况,于2013年8~11月在研究区选取天然乔木林、天然灌木林、人工乔木林、撂荒地、农地这5种不同典型土地利用类型,针对4种土地利用变化(天然乔木林-人工乔木林、天然乔木林-农田、天然灌木林-农田、天然灌木林-农

田-撂荒),采用相邻样地比较法,布点采样,以真实反映土地利用变化对活性有机碳组分的影响.天然林是原始森林遭破坏后经保护而形成的天然次生林,对照农田由天然乔木林开垦形成,耕作时间约

25 a;人工乔木林是在天然乔木林破坏后重新建立,栽种约 30 a;撂荒地 and 对照农田是天然灌木林开垦形成,其中撂荒地耕作 20 a 后撂荒 10 a 左右,农田开垦时间约 50 a(样地概况见表 1).

表 1 样地概况

Table 1 Characteristics of the studied sites

土地利用	经纬度	海拔/m	坡位	坡向	坡度/(°)	主要植物种类
天然乔木林	109°08.948'E ~ 109°08.953'E 36°05.380'N ~ 36°05.411'N	1 266 ~ 1 276	中上	北偏西	15 ~ 30	油松 <i>P. tabulaeformis</i> 、山杨 <i>P. davidiana</i>
天然灌木林	109°10.623'E ~ 109°11.352'E 36°04.294'N ~ 36°04.562'N	1 212 ~ 1 264	中	南	18 ~ 25	山桃 <i>P. davidiana</i> 、山杏 <i>Armeniaca sibirica</i> (L.) Lam.、狼牙刺 <i>Sophora davidii</i> 、黄刺玫 <i>Rosa xanthina</i> Lindl.、狗尾草 <i>S. viridis</i>
人工乔木林	109°10.228'E ~ 109°10.272'E 36°04.274'N ~ 36°04.428'N	1 211 ~ 1 216	中上	北	15 ~ 25	油松 <i>P. tabulaeformis</i> 、狗尾草 <i>S. viridis</i>
撂荒地	109°10.601'E ~ 109°11.221'E 36°04.241'N ~ 36°04.514'N	1 201 ~ 1 212	中下	南	8 ~ 15	角蒿 <i>I. sinensis</i> 、黄蒿 <i>Artemisia annua</i> L.、狗尾草 <i>S. viridis</i>
农田	109°10.560'E ~ 109°11.377'E 36°04.462'N ~ 36°05.012'N	1 253 ~ 1 284	中上	南	5 ~ 8	谷子 <i>Setaria italica</i> 、玉米 <i>Zea mays</i> 、大豆 <i>Glycine max</i>
农田	109°08.911'E ~ 109°08.941'E 36°05.402'N ~ 36°05.452'N	1 252 ~ 1 275	中上	北偏西	15 ~ 30	大豆 <i>Glycine max</i>

每种土地类型选取有代表性的重复样地 3 个,为减少样地间地形及小气候差异,选择邻近、坡向和土壤类型基本相同的样地,其中土壤类型均为黄绵土.每块样地选 5 个采样点,用土钻取土,采样深度 0 ~ 200 cm,以 20 cm 为一层取样,共 10 层.每一层 5 个样点采集的土样组成一个混合样,按照四分法,取其中的一部分装入塑料袋中,放在 4℃ 冰箱内冷藏,用于测定微生物量碳(MBC),取另一部分土风干后测定易氧化性碳(LOC)和有机碳含量.

1.3 室内分析

1.3.1 土壤有机碳含量测定

采用重铬酸钾-外加热容量法^[21].

1.3.2 土壤微生物量碳的测定

土壤微生物量碳采用氯仿熏蒸法测定^[22].

根据下式计算微生物量碳含量:

$$BC = 2.64FC$$

式中,2.64 为 BC 换算系数,FC 为熏蒸与未熏蒸土壤 K_2SO_4 提取液中有机碳含量的差值.

1.3.3 土壤易氧化性碳测定

称取处理过约含 15 mg 有机碳的土样,放在 100 mL 塑料瓶内,加 333 mmol·L⁻¹ 的高锰酸钾溶液 25 mL,以 25 r·min⁻¹,振荡后的样品以 4 000 r·min⁻¹ 离心 5 min,取上清液,用去离子水按 1:250 比例稀释,然后用分光光度计 565 nm 比色测定,根据 $KMnO_4$ 浓度的变化计算活性有机碳含量,单位 g·kg⁻¹(即每 kg 干土中含活性有机碳量)^[23,24].

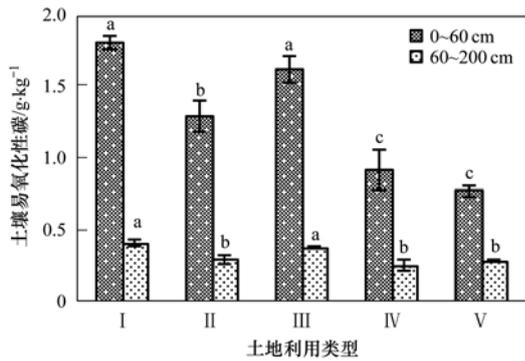
1.4 数据计算与分析

用 Excel 进行数据预处理,土壤活性有机碳剖面分布比例采用加权平均计算,不同土地利用类型下 LOC/SOC 和 MBC/SOC 比例是按照 10 个层次(0 ~ 20、20 ~ 40、..., 180 ~ 200)加权计算,用 SPSS 16.0 统计软件对不同利用类型下浅层和深层易氧化性碳和微生物量碳含量以及 LOC/SOC 和 MBC/SOC 比例进行 ANOVA 分析,LSD 法进行差异显著性检验.

2 结果与分析

2.1 不同土地利用类型土壤易氧化性碳含量及剖面分布特征

研究区天然乔木林、天然灌木林、人工乔木林、撂荒地和农田土壤易氧化性碳平均含量分别为 0.84、0.60、0.76、0.46 和 0.44 g·kg⁻¹.土壤易氧化性碳含量主要集中在浅层 0 ~ 60 cm,可占 0 ~ 200 cm 易氧化性碳含量的 49% ~ 66%.对于浅层土壤,天然乔木林、天然灌木林、人工乔木林与撂荒地、农田有显著性差异($P < 0.05$),撂荒地和农田之间无差异;对于深层土壤,天然乔木林、人工乔木林比其他土地利用类型易氧化性碳含量高,且有显著性差异($P < 0.05$)(图 1).由图 2 看出,不同土地利用类型土壤易氧化性碳含量均随土层加深而逐渐降低,除农田表层 20 ~ 40 cm 降低幅度大外,其他土地利用类型土壤易氧化性碳变化幅度最大都在 20 ~ 60 cm,60 cm 以下深层土壤易氧化性碳含量变化趋



不同字母表示不同利用类型间差异显著 ($P < 0.05$);

I: 天然乔木林地, II: 天然灌木林地, III: 人工乔木林地,
IV: 撂荒地, V: 农田

图 1 不同土地利用类型土壤易氧化性碳含量

Fig. 1 LOC content under different land-use types

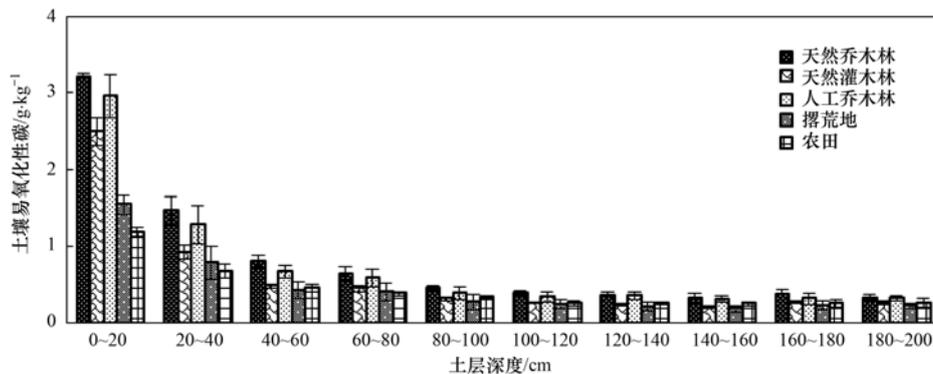
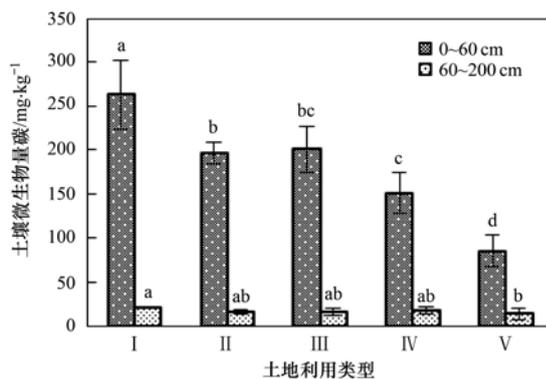


图 2 不同土地利用类型土壤易氧化性碳含量在土壤剖面上的分布

Fig. 2 Distribution of LOC content in the soil profile under different land-use types



I、II、III、IV表示含义与图1相同

图 3 不同土地利用类型土壤微生物量碳含量

Fig. 3 MBC content under different land-use types

土壤 MBC 含量均随土层深度增加而减小,不同土壤类型 20 ~ 60 cm MBC 含量下降最快,与表层 20 cm 相比,下降幅度为 44% ~ 75%,60 ~ 100 cm 土壤 MBC 含量有少量降低,100 ~ 200 cm 土壤 MBC 含量无差异。

于平稳,且林地的含量高于农田和撂荒地。

2.2 不同土地利用类型土壤微生物碳含量及剖面分布特征

研究区天然乔木林、天然灌木林、人工乔木林、撂荒地和农田 0 ~ 200 cm 土壤平均 MBC 含量为 94.22、70.48、71.55、57.83 和 35.88 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。不同土地利用类型土壤浅层(0 ~ 60 cm)和深层(60 ~ 200 cm)MBC 总含量分别占 0 ~ 200 cm 微生物量碳总含量的 71% ~ 84% 和 16% ~ 29%。对于浅层土壤,天然乔木林与其他土地利用类型之间,天然灌木林、人工乔木林、撂荒地与农田之间有显著性差异 ($P < 0.05$);对于深层土壤,除天然乔木林与农田有显著性差异外,其他土地利用类型之间无差异(图 3)。由图 4 可知,在剖面上,不同土地利用类型

2.3 土地利用变化对土壤活性有机碳的影响

不同土地利用转变方式对土壤活性有机碳有显著影响。由图 5、图 6 可知,天然乔木林转变为人工乔木林、天然乔木林转变为农田、天然灌木林转变为撂荒地、天然灌木林转变为农田这 4 种土地利用转变方式 0 ~ 200 cm 土壤活性有机碳均减少,其中浅层(0 ~ 60 cm)土壤 LOC 分别减少了 10%、60%、29%、40%,深层(60 ~ 200 cm)分别减少了 9%、21%、12%、1%;土壤 MBC 浅层分别减少了 24%、73%、23%、56%,深层分别减少了 25%、18%、8%、11%。浅层土壤活性有机碳的减少量显著高于深层,说明土地利用变化对浅层土壤活性有机碳的影响高于深层,且土地利用变化对深层活性有机碳也产生了一定的影响。

由表 2 可知,土壤活性有机碳的变化量随着土壤深度的增加而不断地减少,表层 20 ~ 60 cm 减少的幅度较大,60 cm 以下土层有微小降低,总体差异

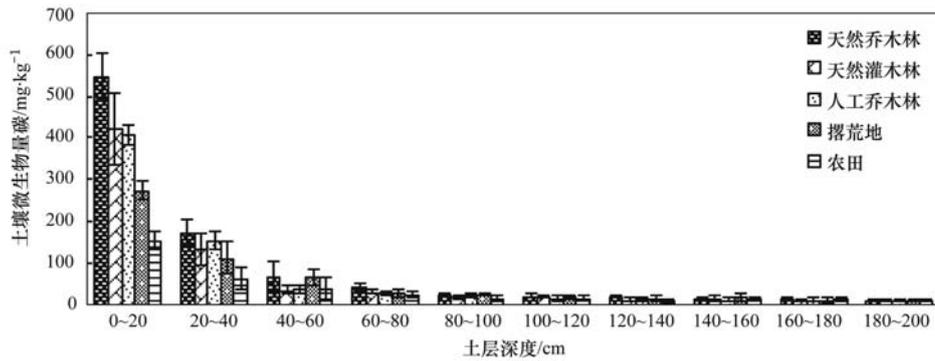
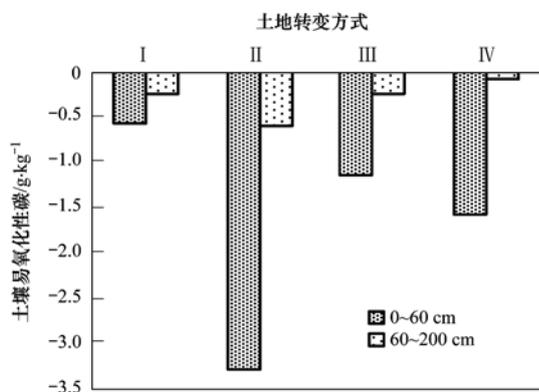


图 4 不同土地利用类型土壤微生物量碳含量在壤剖面上的分布

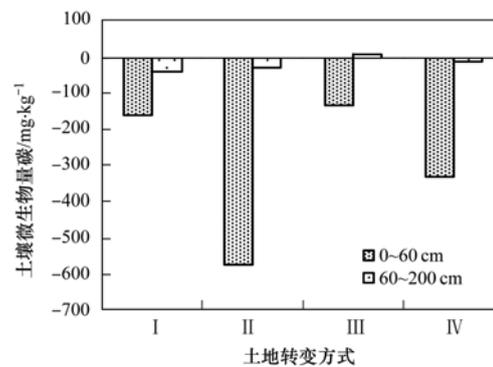
Fig. 4 Distribution of MBC content in the soil profile under different land-use types



I、II、III、IV 表示含义与表 2 相同

图 5 不同土地转变方式易氧化性碳变化量

Fig. 5 LOC variation under different land-use changes



I、II、III、IV 表示含义与表 2 相同

图 6 不同土地转变方式微生物量碳变化量

Fig. 6 MBC variation under different land-use changes

表 2 不同土地利用方式转变后活性有机变化量分布特征

Table 2 Distribution of active organic carbon variation under different land-use changes

土层深度/cm	土壤易氧化性碳变化量/g·kg ⁻¹				土壤微生物量碳变化量/mg·kg ⁻¹			
	I	II	III	IV	I	II	III	IV
0~20	-0.25	-2.08	-0.95	-1.30	-142.02	-429.62	-146.92	-266.69
20~40	-0.19	-0.86	-0.14	-0.25	-18.21	-114.68	-20.06	-67.99
40~60	-0.13	-0.35	-0.06	-0.04	-2.31	-30.20	31.09	3.68
60~80	-0.05	-0.15	-0.04	-0.07	-15.26	-14.80	-3.73	-6.06
80~100	-0.07	-0.11	-0.05	0.01	-2.13	-3.90	4.51	-5.16
100~120	-0.05	-0.10	-0.01	0	-6.36	-6.24	-1.01	-2.95
120~140	0	-0.07	-0.03	0.01	-6.48	-4.25	4.51	-3.87
140~160	-0.01	-0.06	-0.02	0.04	-2.88	-0.18	2.60	-0.87
160~180	-0.05	-0.06	-0.04	-0.01	-3.05	1.31	2.50	4.86
180~200	0	-0.06	-0.04	0	-2.02	0.75	0.03	0.88
总计	-0.82	-3.91	-1.39	-1.60	-226.71	-601.79	-126.47	-345.95

1) I:天然乔木林转变为人工乔木林, II:天然乔木林转变为农田, III:天然灌木林转变为撂荒地, IV:天然灌木林转变为农田

不大. 天然乔木林转变为农田土壤活性有机碳变化幅度最大, 最小为天然乔木林转变为人工乔木林.

2.4 土壤活性碳与总有机碳的比例关系及对 LUCC 的响应

易氧化有机碳分配比例是指其占土壤有机碳含量的多少, 可用于表征土壤有机碳的稳定性, 比例越

高, 说明土壤碳稳定性越差. 由表 3 可知, 不同土地利用类型浅层 LOC/SOC 比例为 16.85% ~ 17.99%, 均高于深层 LOC/SOC 比例 (11.86% ~ 12.72%), 说明深层土壤有机碳比较稳定. 土地利用变化对浅层 LOC/SOC 有显著影响. 天然乔木林和天然灌木林转变成农田浅层 LOC/SOC 比例增

加,有显著差异($P < 0.05$);天然乔木林转变成人工乔木林,天然灌木林转变成撂荒地浅层 LOC/SOC 比例差异不大.天然灌木林地转变成农田和撂荒地深层 LOC/SOC 比例之间无差异.

土壤微生物量碳占有有机碳的百分比称为微生物商.微生物商的变化反映了土壤中输入的有机质向微生物量碳的转化效率、土壤中碳损失和土壤矿物对有机质的固定^[25].不同土地利用类型浅层 MBC/

SOC 比例为 1.98% ~ 2.58%,深层 MBC/SOC 比例为 0.53% ~ 0.87%,浅层 MBC/SOC 比例显著高于深层.土地利用变化对浅层 MBC/SOC 影响较大,天然灌木林转变为农田, MBC/SOC 大幅下降,有显著性差异($P < 0.05$).天然乔木林转变成人工乔木林和农田, MBC/SOC 下降,差异不显著.天然灌木林地转变成农田和撂荒地深层 LOC/SOC 比例之间无差异.

表 3 不同土地利用类型下 LOC/SOC 和 MBC/SOC 比例/%

Table 3 Proportion of LOC/SOC and MBC/SOC under different land-use types/%

土地利用类型	LOC/SOC				MBC/SOC			
	0 ~ 60 cm		60 ~ 200 cm		0 ~ 60 cm		60 ~ 200 cm	
	均值	标准差	均值	标准差	均值	标准差	均值	标准差
I	16.85b	0.98	12.25ab	0.05	2.27ab	0.09	0.65ab	0.08
II	17.06b	0.12	12.35ab	0.15	2.57a	0.59	0.69ab	0.17
III	17.12ab	0.12	12.72a	0.87	2.16ab	0.32	0.56b	0.11
IV	16.87b	0.06	12.58a	0.55	2.52a	0.42	0.87a	0.07
V	17.99a	0.79	11.86b	0.05	1.98bc	0.15	0.53b	0.03

1) 不同字母表示不同利用类型间差异显著($P < 0.05$); I、II、III、IV、V 表示含义与图 1 相同

3 讨论

土地利用类型不同,一方面会导致进入土壤中植物残体的数量和性质发生改变,另一方面会引起土壤水管理、耕作方式等管理措施的差异,由此影响和改变土壤活性有机碳的含量不同^[26].土壤易氧化性碳含量和微生物碳含量主要集中在浅层 60 cm,可占 0 ~ 200 cm 活性有机碳含量的 49% ~ 66% 和 71% ~ 84%,这与许多结果研究相同^[27,28].主要是因为表层土壤根系发达、密集,根系分泌物和衰亡的根是微生物丰富的能源物质,有利于微生物的生长^[29];表层凋落物和根系分泌物经微生物作用的循环,造成土壤上层易氧化态碳含量相对较高^[30].土壤易氧化碳和微生物量碳含量均随着土层深度加深而递减,这主要是由于活性碳含量很大程度上决定于土壤有机碳含量,下层土壤受生物影响少,因而含量低^[31].

土地利用变化对土壤有机碳含量有较大的影响^[32],土壤活性有机碳是土地利用变化比较敏感的部分^[33].许多研究表明,土地利用变化对活性有机碳有影响,如 Blair 等^[34]发现新南威尔士地区的天然植被土壤进行耕作后,土壤有机碳、活性有机碳和非活性有机碳含量都有不同程度地下降,而这些农田再连续两年种植紫花苜蓿 (*Medicago sativa*) 后,碳含量又增加.吴建国等^[35]研究表明 0 ~ 110 cm 农田土壤活性有机碳比天然次生林低 60%,人工林土

壤活性有机碳平均含量比农田高 129%. 本研究表明,林地转变成农田浅层(0 ~ 60 cm)土壤活性有机碳减少 35% ~ 63%;而深层(60 ~ 200 cm)土壤活性有机碳减少 9% ~ 38%,说明土地利用变化对深层土壤活性有机碳有也有明显影响,浅层土壤活性有机碳比深层变化更敏感.原因主要与植物根系分布、产生凋落物数量和质量及其与土壤活性有机碳的相关程度有关^[36].树木根系分布比农作物深,土壤表层形成的残体或分泌物多,土壤活性有机碳形成量比农田多^[37],当森林变成农田后,以前土地利用方式下土壤中的活性有机碳很快被分解完,而在农田中只是在土壤表层补充了部分的土壤活性有机碳.天然乔木林转变为人工林后土壤活性有机碳浅层减少 10% ~ 24%,深层减少 9% ~ 25%,减少的原因之一是天然林地转变为了人工林土壤团聚体结构受到一定的破坏,大水稳性团聚体含量减少,从而使土壤活性有机碳含量减少.灌木林地转变为撂荒地后浅层活性有机碳减少 23% ~ 29%,深层活性有机碳减少 8% ~ 12%,较灌木林地转变为农田浅层和深层活性有机碳减少的幅度小,说明农田撂荒后浅层和深层活性有机碳均有所增加,这与曾从盛等^[38]研究结果相同.

土地利用变化改变了易氧化有机碳和微生物量碳占总有机碳的比例.土壤易氧化有机碳含量占土壤有机碳的比例可用于表征土壤有机碳的稳定性,比例越高,说明土壤碳的活性越大,稳定性越

差^[39,40]. 本研究天然乔木林、天然灌木林浅层(0~60 cm) LOC/SOC 比例显著低于农田, 说明林地转变成农地降低了表层土壤有机碳的稳定性; 天然乔木林、天然灌木林深层(60~200 cm) LOC/SOC 比例略高于农田, 差异不大, 这说明土地利用变化对深层土壤有机碳的稳定性影响不明显. 这与许多研究结果相同^[18,30], 可能是因为农田受人为耕作的影响, 表层土壤中易氧化的活性碳组分暴露, 降低了土壤易氧化碳的稳定性, 加速了其被氧化的进程, 而深层土壤有机碳平均滞留时间长, 矿化速率低和高稳定性, 所以对土地利用变化的响应迟缓. 天然乔木林转变为人工林, 浅层(0~60 cm) 和深层(60~200 cm) LOC/SOC 比例均无明显差异, 说明土地利用变化后对有机碳的稳定性的影响较小, 因为天然乔木林与人工林的主要树种相同, 凋落物组成以及其转化成腐殖质的速率一样, 且林地的土壤温湿度等环境条件随着人工林林龄的增加差异减少. 党亚爱等^[27]对黄土高原典型区域不同土地类型 0~200 cm 土壤微生物量碳研究得出, 同一土壤类型 MBC/SOC 比例均随土层深度增加呈下降趋势, 达一定深度后趋于稳定. 本研究有相同结果, 且表层微生物商均比深层大, 其原因主要是因为微生物主要集中在表层土壤, 且沿剖面变化幅度比有机碳大的原因. 土地利用变化, 林地转变为农地, 表层微生物商不同程度地减少, 其中天然灌木林浅层土壤微生物商与农田有显著性差异, 而深层微生物商没有明显规律, 差异不显著. 说明林地转变为农地降低了浅层有机碳的转化效率, 进而减少了有机碳含量. 吴建国等^[35]对六盘山林区几种土地利用方式下 0~110 cm 土壤活性有机碳研究表明, 土壤活性有机碳占有有机碳的比例在受到土地利用变化后的改变程度比活性有机碳要小得多. 这与本研究结果一致, 即土地利用变化对土壤活性有机碳的影响高于对土壤活性有机碳占有有机碳比例的影响. 这可能是因为土地利用变化后, 一方面使土壤有机质数量发生变化而影响土壤活性有机碳和有机碳含量, 另一方面也使土壤有机质的稳定性和质量发生变化而使土壤活性有机碳与非活性有机碳发生转变^[26,35].

土地利用变化对表层土壤活性有机碳有显著影响, 且深层土壤在一定程度上也参与了碳循环, 深入研究土地利用变化对深层土壤活性有机碳影响有助于了解土壤有机碳的长期稳定固存的机制. 由于大量的有机碳储存于深层土壤, 深层土壤有机碳的长期稳定固存的机制问题仍未明晰, 所以未来应加强

研究深层土壤有机碳的来源、特征, 以及土壤活性碳组分的动态变化.

4 结论

(1) 不同土地利用类型间浅层土壤活性有机碳含量差异显著, 但深层土壤活性有机碳含量差异不大. 不同土地利用类型间 0~200 cm 土壤 LOC 和 MBC 均以天然乔木林和人工林地最高, 其次是天然灌木林地、撂荒地, 农田含量最低. 不同土地利用类型土壤深层(60~200 cm) 活性有机碳占 0~200 cm 活性有机碳含量的 8%~51%, 其所占比例较大, 不可忽视.

(2) 不同土地转变方式不仅对浅层(0~60 cm) 土壤活性有机碳有影响, 对深层(60~200 cm) 也有一定影响. 天然乔木林转变为人工乔木林、天然乔木林转变为农田、天然灌木林转变为撂荒地及农田的 4 种土地利用转变方式, 深层土壤 LOC 减少幅度为 1%~21%; 土壤 MBC 深层减少幅度为 8%~25%.

(3) 土地利用变化改变了土壤活性有机碳占总有机碳的比例, 浅层比深层变化敏感. 天然乔木林和天然灌木林转变成农田浅层 LOC/SOC 比例增加, 深层差异不大; 天然灌木林转变为农田, 浅层 MBC/SOC 降低, 深层差异不大.

参考文献:

- [1] 李秀彬. 全球环境变化研究的核心领域——土地利用/土地覆被变化的国际研究动向[J]. 地理学报, 1996, 51(6): 553-558.
- [2] Watson R T, Noble I R, Bolin B, *et al.* Land use, land-use change and forestry [M]. A special report of the IPCC. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2000. 1-51.
- [3] Hughes R F, Kauffman J B, Jaramillo V J. Ecosystem-scale impacts of deforestation and land use in a humid tropical region of Mexico[J]. Ecological Applications, 2000, 10(2): 515-527.
- [4] Lorenz K, Lal R. The depth distribution of soil organic carbon in relation to land use and management and the potential of carbon sequestration in subsoil horizons[J]. Advances in Agronomy, 2005, 88: 35-66.
- [5] Don A, Schumacher J, Freibauer A. Impact of tropical land-use change on soil organic carbon stocks—a meta-analysis[J]. Global Change Biology, 2011, 17(4): 1658-1670.
- [6] Poeplau C, Don A, Vesterdal L, *et al.* Temporal dynamics of soil organic carbon after land-use change in the temperate zone—carbon response functions as a model approach[J]. Global Change Biology, 2011, 17(7): 2415-2427.
- [7] Wright A L, Dou F, Hons F M. Crop species and tillage effects on carbon sequestration in subsurface soil[J]. Soil Science, 2007, 172(2): 124-131.

- [8] Harrison R B, Footen P W, Strahm B D. Deep soil horizons: contribution and importance to soil carbon pools and in assessing whole-ecosystem response to management and global change[J]. *Forest Science*, 2011, **57**(1): 67-76.
- [9] 吴建国, 张小全, 王彦辉, 等. 土地利用变化对土壤物理组分中有机碳分配的影响[J]. *林业科学*, 2002, **38**(4): 19-29.
- [10] 赵鑫, 宇万太, 李建东, 等. 不同经营管理条件下土壤有机碳及其组分研究进展[J]. *应用生态学报*, 2006, **17**(11): 2203-2209.
- [11] 李太魁, 朱波, 王小国, 等. 土地利用方式对土壤活性有机碳含量影响的初步研究[J]. *土壤通报*, 2012, **43**(6): 1422-1426.
- [12] Fontaine S, Barot S, Barré P, *et al.* Stability of organic carbon in deep soil layers controlled by fresh carbon supply[J]. *Nature*, 2007, **450**(7167): 277-280.
- [13] 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.
- [14] Sanaullah M, Chabbi A, Leifeld J, *et al.* Decomposition and stabilization of root litter in top-and subsoil horizons: what is the difference· [J]. *Plant and Soil*, 2011, **338**(1-2): 127-141.
- [15] Batjes N H. Total carbon and nitrogen in the soils of the world [J]. *European Journal of Soil Science*, 1996, **47**(2): 151-163.
- [16] Wang S Q, Huang M, Shao X M, *et al.* Vertical distribution of soil organic carbon in China[J]. *Environmental Management*, 2004, **33**(1): S200-S209.
- [17] Post W M, Kwon K C. Soil carbon sequestration and land-use change: processes and potential [J]. *Global Change Biology*, 2000, **6**(3): 317-327.
- [18] 姜培坤. 不同林分下土壤活性有机碳库研究[J]. *林业科学*, 2005, **41**(1): 10-13.
- [19] 张剑, 汪思龙, 王清奎, 等. 不同森林植被下土壤活性有机碳含量及其季节变化[J]. *中国生态农业学报*, 2009, **17**(1): 41-47.
- [20] 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.
- [21] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- [22] 林启美, 吴玉光, 刘焕龙. 熏蒸法测定土壤微生物量碳的改进[J]. *生态学杂志*, 1999, **18**(2): 64-67.
- [23] Blair G J, Lefroy R D B, Lisle L. Soil carbon fractions based on their degree of oxidation, and the development of a carbon management index for agricultural systems[J]. *Australian Journal of Agricultural Research*, 1995, **46**(7): 1459-1466.
- [24] 沈宏, 曹志洪, 胡正义. 土壤活性有机碳的表征及其生态效应[J]. *生态学杂志*, 1999, **18**(3): 33-39.
- [25] 张金波, 宋长春. 土地利用方式对土壤碳库影响的敏感性评价指标[J]. *生态环境*, 2003, **12**(4): 500-504.
- [26] Six J, Conant R T, Paul E A, *et al.* Stabilization mechanisms of soil organic matter: implications for C-saturation of soils [J]. *Plant and Soil*, 2002, **241**(2): 155-176.
- [27] 党亚爱, 李世清, 王国栋, 等. 黄土高原典型土壤有机碳和微生物碳分布特征的研究[J]. *自然资源学报*, 2007, **22**(6): 936-945.
- [28] 蓝家程, 傅瓦利, 袁波, 等. 岩溶山区土地利用方式对土壤活性有机碳及其分布的影响[J]. *中国岩溶*, 2011, **30**(2): 175-180.
- [29] Dabral P P, Baithuri N, Pandey A. Soil erosion assessment in a hilly catchment of North Eastern India using USLE, GIS and remote sensing [J]. *Water Resources Management*, 2008, **22**(12): 1783-1798.
- [30] 刘正刚, 裴柏洋, 王宪帅. 岷江上游干旱河谷不同土地利用类型的土壤有机碳和易氧化态碳特征[J]. *水土保持研究*, 2011, **18**(3): 24-27, 31.
- [31] Anderson T H, Domsch K H. Ratios of microbial biomass carbon to total organic carbon in arable soils [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1989, **21**(4): 471-479.
- [32] 刘纪远, 王绍强, 陈镜明, 等. 1990~2000年中国土壤碳氮蓄积量与土地利用变化[J]. *地理学报*, 2004, **59**(4): 483-496.
- [33] Mendham D S, O'connell A M, Grove T S. Organic matter characteristics under native forest, long-term pasture, and recent conversion to Eucalyptus plantations in Western Australia: microbial biomass, soil respiration, and permanganate oxidation [J]. *Australian Journal of Soil Research*, 2002, **40**(5): 859-872.
- [34] Blair G J, Lefroy R D B, Singh B P, *et al.* Development and use of a carbon management index to monitor changes in soil C pool size and turnover rate[A]. In: Cadisch G, Giller K E. *Driven by nature: plant litter quality and decomposition* [M]. Wallingford, UK: CAB International, 1997. 273-281.
- [35] 吴建国, 张小全, 徐德应. 六盘山林区几种土地利用方式下土壤活性有机碳的比较[J]. *植物生态学报*, 2004, **28**(5): 657-664.
- [36] 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.
- [37] Jackson R B, Canadell J, Ehleringer J R, *et al.* A global analysis of root distributions for terrestrial biomes[J]. *Oecologia*, 1996, **108**(3): 389-411.
- [38] 曾从盛, 钟春棋, 仝川, 等. 土地利用变化对闽江河口湿地表层土壤有机碳含量及其活性的影响[J]. *水土保持学报*, 2008, **22**(5): 125-129.
- [39] 朱志建, 姜培坤, 徐秋芳. 不同森林植被下土壤微生物量碳和易氧化态碳的比较[J]. *林业科学研究*, 2006, **19**(4): 523-526.
- [40] 荣丽, 李守剑, 李贤伟, 等. 不同退耕模式细根(草根)分解过程中C动态及土壤活性有机碳的变化[J]. *生态学报*, 2011, **31**(1): 137-144.

CONTENTS

Size Distribution Characteristics of Particulate Mercury on Haze and Non-haze Days	ZHU Qiong-yu, CHENG Jin-ping, WEI Yu-qing, <i>et al.</i> (373)
Impact of Atmospheric Pollutants Transport Pathways on Aerosol Optical Properties at Shangdianzi Background Station	PU Wei-wei, SHI Xue-feng, MA Zhi-qiang, <i>et al.</i> (379)
Chemical Characteristics of 3-year Atmospheric Precipitation in Summer, Taiyuan	GUO Xiao-fang, CUI Yang, WANG Kai-yang, <i>et al.</i> (388)
Pollution Characteristics of Organic and Elemental Carbon in PM _{2.5} in Taiyuan	LIU Shan, PENG Lin, WEN Yan-ping, <i>et al.</i> (396)
Levels and Distribution of Organochlorine Pesticides and Dioxin-Like Polychlorinated Biphenyls in Atmospheric Particulates in Xining and Tianjun, Qinghai Province, China	LI Qiu-xu, HE Chang, MA Zhao-hui, <i>et al.</i> (402)
Particulate Matter Adsorption Capacity of 10 Evergreen Species in Beijing	WANG Bing, ZHANG Wei-kang, NIU Xiang, <i>et al.</i> (408)
Carbon Sources Metabolic Characteristics of Airborne Microbial Communities in Constructed Wetlands	SONG Zhi-wen, WANG Lin, XU Ai-ling, <i>et al.</i> (415)
Spatial Distribution Characteristics of the Physical and Chemical Properties of Water in the Kunes River After the Supply of Snowmelt During Spring	LIU Xiang, GUO Ling-peng, ZHANG Fei-yun, <i>et al.</i> (421)
Composition Characteristics and Source Analysis of Major Ions in Four Small Lake-watersheds on the Tibetan Plateau, China	LI He, LI Jun, LIU Xiao-long, <i>et al.</i> (430)
Seasonal Stratification and Eutrophication Characteristics of a Deep Reservoir, Longtan Reservoir in Subtropical Area of China	ZHANG Lei, LI Qiu-hua, HUANG Guo-jia, <i>et al.</i> (438)
Phosphorus Fractions, Sorption Characteristics and Its Release in the Sediments of Yangtze Estuary Reservoir, China	JIN Xiao-dan, WU Hao, CHEN Zhi-ming, <i>et al.</i> (448)
Spatial-Temporal Distributions of Dissolved Inorganic Carbon and Its Affecting Factors in the Yellow River Estuary	GUO Xing-sen, LÜ Ying-chun, SUN Zhi-gao, <i>et al.</i> (457)
Distributions of Phosphorus Fractions in Suspended Sediments and Surface Sediments of Tiaoxi Mainstreams and Cause Analysis	CHEN Hai-long, YUAN Xu-yin, WANG Huan, <i>et al.</i> (464)
Characteristics of Nitrogen Pollution and the Potential Mineralization in Surface Sediments of Dianchi Lake	MENG Ya-yuan, WANG Sheng-ru, JIAO Li-xin, <i>et al.</i> (471)
Influence of Transient Storage on Solute Transport and the Parameter Sensitivity Analysis in a Suburban Drainage Ditch	LI Ru-zhong, QIAN Jing, DONG Yu-hong, <i>et al.</i> (481)
Sources, Pollution Statue and Potential Ecological Risk of Heavy Metals in Surface Sediments of Aibi Lake, Northwest China	ZHANG Zhao-yong, Jilili Abuduwaili, JIANG Feng-qing (490)
Speciation Distribution and Risk Assessment of Heavy Metals in Sediments in Suburban Outfall of Industrial Oasis Region	ZANG Fei, WANG Sheng-li, NAN Zhong-ren, <i>et al.</i> (497)
Assessment of Sources, Spatial Distribution and Ecological Risk of Heavy Metals in Soils in a Typical Industry-based City of Shandong Province, Eastern China	DAI Bin, LÜ Jian-shu, ZHAN Jin-cheng, <i>et al.</i> (507)
Removal of Triclosan with the Method of UV/ClO ₂ and Its Degradation Products	LI Yu-ying, HE Wen-long, LI Qing-song, <i>et al.</i> (516)
Mechanism of Groundwater As(V) Removal with Ferric Flocculation and Direct Filtration	KANG Ying, DUAN Jin-ming, JING Chuan-yong (523)
Preparation of Nano Zero-valent Iron/ <i>Sargassum horneri</i> Based Activated Carbon for Removal of Cr(VI) from Aqueous Solution	ZENG Gan-ming, WU Xiao, ZHENG Lin, <i>et al.</i> (530)
Adsorption of Cr(VI) on Magnetic Graphene from Aqueous Solution	LIU Wei, YANG Qi, LI Bo, <i>et al.</i> (537)
Adsorption of the TiO ₂ @Yeast Composite Microspheres for Adsorbing Fluorescent Whitening Agent-VBL in Fixed Bed	WU Fei, ZHANG Kai-qiang, BAI Bo, <i>et al.</i> (545)
Preparation and Pb ²⁺ Electrosorption Characteristics of MnO ₂ /CFP Composite Electrode	LIU Fang-yuan, HU Cheng-zhi, LI Yong-feng, <i>et al.</i> (552)
Preparation of Weak Light Driven TiO ₂ Multi Composite Photocatalysts via Adsorption Phase Synthesis	WANG Ting, ZHU Yi-chen, SUN Zhi-xuan, <i>et al.</i> (559)
Photoelectrocatalytic Degradation of Bisphenol A in Water by Fe Doped-TiO ₂ Nanotube Arrays Under Simulated Solar Light Irradiation	XIANG Guo-liang, YU Ze-bin, CHEN Ying, <i>et al.</i> (568)
Oxidation of Cationic Red 3R in Water with H ₂ O ₂ Catalyzed by Mineral Loaded with Fe/Co	MA Nan, LIU Hua-bo, XIE Xin-yuan (576)
Characteristics of Acid Red 3R Wastewater Treatment by Ozone Microbubbles	ZHANG Jing, DU Ya-wei, LIU Xiao-jing, <i>et al.</i> (584)
Effects of Carbon Sources, Temperature and Electron Acceptors on Biological Phosphorus Removal	HAN Yun, XU Song, DONG Tao, <i>et al.</i> (590)
Startup, Stable Operation and Process Failure of EBPR System Under the Low Temperature and Low Dissolved Oxygen Condition	MA Juan, LI Lu, YU Xiao-jun, <i>et al.</i> (597)
Effects of Dissolved Oxygen in the Oxidative Parts of A/O Reactor on Degradation of Organic Pollutants and Analysis of Microbial Community for Treating Petrochemical Wastewater	DING Peng-yuan, CHU Li-bing, ZHANG Nan, <i>et al.</i> (604)
Isolation of Filamentous Fungi Capable of Enhancing Sludge Dewaterability and Study of Mechanisms Responsible for the Sludge Dewaterability Enhancement	ZHOU Yu-jun, FU Hao-yi, FAN Xian-feng, <i>et al.</i> (612)
Impacts of Alkaline Thermal Treatment on Characteristics of Sludge from Sewage Treatment Plant	YANG Shi-dong, CHEN Xia, LIU Cao, <i>et al.</i> (619)
Responses of Ecosystem Carbon Budget to Increasing Nitrogen Deposition in Differently Degraded <i>Leymus chinensis</i> Steppes in Inner Mongolia, China	QI Yu-chun, PENG Qin, DONG Yun-she, <i>et al.</i> (625)
Impacts of Elevated Ozone Concentration on N ₂ O Emission from Arid Farmland	WU Yang-zhou, HU Zheng-hua, LI Cen-zi, <i>et al.</i> (636)
Multi-Year Measurement of Soil Respiration Components in a Subtropical Secondary Forest	LIU Yi-fan, CHEN Shu-tao, HU Zheng-hua, <i>et al.</i> (644)
Spatial Variability of Soil Nitrogen and Related Affecting Factors at a County Scale in Hilly Area of Mid-Sichuan Basin	LUO You-lin, LI Qi-quan, WANG Chang-quan, <i>et al.</i> (652)
Effects of Land Use Change on Soil Active Organic Carbon in Deep Soils in Hilly Loess Plateau Region of Northwest China	ZHANG Shuai, XU Ming-xiang, ZHANG Ya-feng, <i>et al.</i> (661)
Carbon Source Metabolic Diversity of Soil Microbial Community Under Different Climate Types in the Area Affected by Wenchuan Earthquake	ZHANG Guang-shuai, LIN Yong-ming, MA Rui-feng, <i>et al.</i> (669)
Optimization of Electrode Configuration in Soil Electrokinetic Remediation	LIU Fang, FU Rong-bing, XU Zhen (678)
Distribution and Health Risk of HCHs and DDTs in a Contaminated Site with Excavation	ZHANG Shi-lei, XUE Nan-dong, YANG Bing, <i>et al.</i> (686)
Transformation and Mobility of Arsenic in the Rhizosphere and Non-Rhizosphere Soils at Different Growth Stages of Rice	YANG Wen-tao, WANG Ying-jie, ZHOU Hang, <i>et al.</i> (694)
Extraction of Plant Root Apoplast Solution; A Case Study with Polycyclic Aromatic Hydrocarbons	ZHU Man-dang, DU Jiang-xue, YUE Le, <i>et al.</i> (700)
Mechanism of Manganese Binding to Leaf Cell Wall of <i>Phytolacca americana</i> L.	XU Xiang-hua, LIU Cui-ying, LI Ping, <i>et al.</i> (706)
Degradation Characteristics of Naphthalene with a <i>Pseudomonas aeruginosa</i> Strain Isolated from Soil Contaminated by Diesel	LIU Wen-chao, WU Bin-bin, LI Xiao-sen, <i>et al.</i> (712)
Toxic Effects of CdSe/ZnS QDs to Zebrafish Embryos	CHEN Mu-fei, HUANG Cheng-zhi, PU De-yong, <i>et al.</i> (719)
Physiological Response of <i>Neocaridina denticulata</i> to the Toxicity of Cu ²⁺ and Chlorpyrifos	LI Dian-bao, ZHANG Wei, WANG Li-qing, <i>et al.</i> (727)
Determination of Anilines in Environmental Water Samples by Simultaneous Derivatization and Ultrasound Assisted Emulsification Microextraction Combined with Gas Chromatography-Flame Ionization Detectors	TIAN Li-xun, DAI Zhi-xi, WANG Guo-dong, <i>et al.</i> (736)
Adsorption of Calcium Ion from Aqueous Solution Using Na ⁺ -Conditioned Clinoptilolite for Hot-Water Softening	ZHANG Shuo, WANG Dong, CHEN Yuan-chao, <i>et al.</i> (744)
Construction and Application of Economy-Pollution-Environment Three-Dimensional Evaluation Model for District	FAN Xin-gang, MI Wen-bao, MA Zhen-ning (751)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 汤鸿霄 陈吉宁 孟 伟 周宗灿 林金明
欧阳自远 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2015年2月15日 第36卷 第2期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 2 Feb. 15, 2015

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	欧阳自远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行