

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第7期

Vol.35 No.7

2014

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

区域污染对本底地区气溶胶光学特性及辐射强迫影响的地基和卫星遥感观测研究	张小玲, 夏祥鳌, 车慧正, 汤洁, 唐宜西, 孟伟, 董瑶 (2439)
北京上甸子区域大气本底站甲基氯仿在线观测研究	姚波, 周凌晔, 刘钊, 张根, 夏玲君 (2449)
浙江临安大气本底站 CO 浓度及变化特征	方双喜, 周凌晔, 栾天, 马千里, 王红阳 (2454)
南京北郊夏季大气颗粒物中有机碳和元素碳的污染特征	段卿, 安俊琳, 王红磊, 缪青 (2460)
西安冬季非灰霾天与灰霾天 PM _{2.5} 中水溶性有机氮污染特征比较	程玉婷, 王格慧, 孙涛, 成春雷, 孟静静, 任艳芹, 李建军 (2468)
沙尘天气对兰州市 PM ₁₀ 中主要水溶性离子的影响	王芳, 陈强, 张文煜, 郭勇涛, 赵连彪 (2477)
上海大气降水中细菌气溶胶的多样性研究	梁宗敏, 杜睿, 杜鹏瑞, 王亚玲, 李梓铭 (2483)
重庆主城区降水中重金属的分布特征及其沉降量	彭玉龙, 王永敏, 覃蔡清, 王定勇 (2490)
宁波人为源 VOC 清单及重点工业行业贡献分析	李璇, 王雪松, 刘中, 吴梁, 翁燕波, 胡杰 (2497)
包装印刷行业挥发性有机物控制技术评估与筛选	王海林, 王俊慧, 祝春蕾, 聂磊, 郝郑平 (2503)
氨水混合吸收剂脱除 CO ₂ 实验研究	夏芝香, 项群扬, 周旭萍, 方梦祥 (2508)
焦炉烟气中二噁英类物质排放水平研究	孙鹏程, 李晓璐, 成钢, 陆勇, 吴昌敏, 罗锦洪 (2515)
2012 年夏季长江口颗粒有机碳、氮分布特征及其来源	邢建伟, 钱薇微, 绳秀珍 (2520)
千岛湖水体悬浮颗粒物吸收特性及其典型季节差异	王明珠, 张运林, 施坤, 高蕾, 刘刚, 蒋浩 (2528)
千岛湖溶解氧的动态分布特征及其影响因素分析	殷燕, 吴志旭, 刘明亮, 何剑波, 虞左明 (2539)
太湖夏季水体中尿素的来源探析	韩晓霞, 朱广伟, 许海, Steven W. Wilhelm, 秦伯强, 李兆富 (2547)
鄱阳湖阻隔湖泊浮游植物群落结构演化特征: 以军山湖为例	刘霞, 钱奎梅, 谭国良, 邢久生, 李梅, 陈宇炜 (2557)
不同营养湖泊沉积物中 ²¹⁰ Pb _{ex} 和营养盐垂向分布特征及相关性分析	王小雷, 杨浩, 顾祝军, 张明礼 (2565)
地下水硝酸盐污染抽出处理优化方法模拟研究	姜烈, 何江涛, 姜永海, 刘菲 (2572)
预压力混凝沉淀除藻工艺中 DOC 变化规律研究	陈雯婧, 丛海兵, 徐亚军, 王巍, 蒋新跃, 刘玉娇 (2579)
类水滑石 Mg/Zn/Al 焙烧产物对高氯酸盐的吸附	王红宇, 刘艳 (2585)
粉煤灰对阴离子水溶性混合染料的吸附动力学	孙德帅, 郑强强, 张晓东, 方龙 (2590)
SDS 对两性修饰膨润土吸附 Cd ²⁺ 的影响	王建涛, 孟昭福, 杨亚提, 杨淑英, 李彬, 马麟莉, 许绍娥 (2596)
老化的生物质炭性质变化及对非吸持的影响	唐伟, 郭悦, 吴景贵, 黄兆琴, 代静玉 (2604)
TiO ₂ 光催化降解 PFOA 的反应动力学及机制研究	李明洁, 喻泽斌, 陈颖, 王莉, 刘晴, 刘钰鑫, 何丽丽 (2612)
荧光猝灭法研究洛克沙肿与腐殖酸的相互作用	朱江鹏, 梅婷, 彭云, 葛思怡, 李时银, 王国祥 (2620)
改性活性炭纤维电芬顿降解苯酚废水性能研究	马楠, 田耀金, 杨广平, 谢鑫源 (2627)
催化铁强化低碳废水生物反硝化过程的探讨	王梦月, 马鲁铭 (2633)
聚丁二酸丁二醇酯 (PBS) 为反硝化固体碳源的脱氮特性研究	刘佳, 沈志强, 周岳溪, 曹蓉, 李元志 (2639)
某造纸厂废水中二噁英含量及其电子束辐照降解	青宪, 黄锦琼, 余小巍, 张素坤, 杨艳艳, 任明忠, 温玉龙 (2645)
嘉兴市规模化养猪场沼液水质调查研究	卫丹, 万梅, 刘锐, 王根荣, 张讯达, 文晓刚, 赵远, 陈吕军 (2650)
提高污泥碱性发酵挥发酸积累的新方法	李晓玲, 彭永臻, 柴同志, 朱建平, 王淑莹 (2658)
滴水湖及其水体交换区沉积物和土壤中 PAHs 的分布及生态风险评价	郭雪, 毕春娟, 陈振楼, 王薛平 (2664)
舟山近海水体和沉积物中多环芳烃分布特征	江敏, Le Huy Tuan, 梅卫平, 阮慧慧, 吴昊 (2672)
青藏高原湖泊流域土壤与牧草中多环芳烃和有机氯农药的污染特征与来源解析	谢婷, 张淑娟, 杨瑞强 (2680)
福建鹭峰山脉土壤有机氯农药分布特征及健康风险评价	黄焕芳, 祁士华, 瞿程凯, 李绘, 陈文文, 张莉, 胡婷, 石燎 (2691)
不同功能区表层土中全氟化合物污染指纹及其来源解析	张鸿, 赵亮, 何龙, 柴之芳, 沈金灿, 杨波 (2698)
桑沟湾溶解态无机砷的分布、季节变化及影响因素	李磊, 任景玲, 刘素美, 蒋增杰, 杜金洲, 方建光 (2705)
引黄灌区不同尺度农田土壤重金属空间分布及污染评价: 以银川市兴庆区为例	王幼奇, 白一茹, 王建宇 (2714)
三峡水库消落区土壤、植物汞释放及其在斑马鱼体的富集特征	李楚娴, 孙荣国, 王定勇, 赵铮, 张金洋, 马明, 张成 (2721)
广东典型海水养殖区沉积物及鱼体中磺胺类药物的残留及其对人体的健康风险评价	何秀婷, 王奇, 聂湘平, 杨永涛, 程章 (2728)
青岛市区大气降尘重金属对人体健康风险的评价	张春荣, 吴正龙, 姚春卉, 高宗军 (2736)
焦炉排放多环芳烃与人体健康风险评价研究	伯鑫, 王刚, 温柔, 赵春丽, 吴铁, 李时蓓 (2742)
Cd、Cu 和 Pb 复合污染对蚯蚓抗氧化酶活性的影响	王辉, 谢鑫源 (2748)
3 种氯酚对嗜热四膜虫的毒性效应	李雅洁, 崔益斌, 蒋丽娟, 窦静, 李梅 (2755)
施硅方式对稻米镉阻隔潜力研究	陈喆, 铁柏清, 雷鸣, 刘孝利, 叶长城, 罗梅梅, 毛懿德 (2762)
保护性耕作对茬冬小麦土壤 CO ₂ 和 N ₂ O 排放的影响	潘莹, 胡正华, 吴杨周, 孙银银, 盛露, 陈书涛, 肖启涛 (2771)
渭北生草果园土壤有机碳矿化及其与土壤酶活性的关系	贾曼莉, 郭宏, 李会科 (2777)
蒸汽-空气混合注射修复 TCE 污染的二维土箱实验研究	王宁, 彭胜, 陈家军 (2785)
铜离子对双室微生物燃料电池电能输出的影响研究	牟姝君, 李秀芬, 任月萍, 王新华 (2791)
连续流强制通风槽式污泥堆肥工艺的温室气体和氨气排放特征	赵晨阳, 魏源送, 葛振, 钟佳, 才兴, 张媛丽, 李洪枚 (2798)
冬季猪粪固体堆放过程中 NH ₃ 、N ₂ O 和 NO 排放特征研究	丁钢强, 韩圣慧, 袁玉玲, 罗琳, 王立刚, 李虎, 李萍 (2807)
填埋场渗滤液腐殖酸随填埋龄的变化特性及模型研究	黄友福, 许心雅, 范良鑫, 方艺民 (2816)
渗滤液反渗透浓缩液回灌出水水质变化规律的研究	王东梅, 刘丹, 刘庆梅, 陶丽霞, 刘颖 (2822)
中国铅流变化的定量分析	马兰, 毛建素 (2829)
半短程亚硝化与厌氧氨氧化联合脱氮工艺微生物特征研究进展	赵志瑞, 侯彦林 (2834)

渭北生草果园土壤有机碳矿化及其与土壤酶活性的关系

贾曼莉¹, 郭宏¹, 李会科^{1,2*}

(1. 西北农林科技大学资源环境学院, 杨凌 712100; 2. 农业部西北植物与肥料及农业环境重点实验室, 杨凌 712100)

摘要: 通过短期(31 d)室内培养法测定苹果园清耕、苹果/白三叶间作、苹果/小冠花间作这3种管理模式土壤有机碳矿化动态和4种土壤酶活性, 探讨了渭北果园不同生草条件下土壤有机碳矿化规律及其与土壤酶活性的关系。结果表明, 在培养过程中, 3种管理模式土壤有机碳日矿化率均表现出先升高后降低, 后期保持低且比较稳定的趋势。培养31 d后, 与对照处理土壤有机碳矿化累积量为 $367 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 相比较, 白三叶处理最大为 $590 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、小冠花处理为 $541 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 并且3个处理在垂直方向上有机碳累积矿化量均随土层深度增加而减小。由一级动力学方程拟合发现, 生草果园土壤有机碳矿化碳潜力(C_p)和矿化速率常数(k)值分别为 $0.252 \sim 2.74 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $0.019 \sim 0.051 \text{ d}^{-1}$, 果园生草处理 C_p 值与对照处理 C_p 值差异显著, 并且土壤蔗糖酶和纤维素酶与土壤有机碳矿化有较高的相关性。

关键词: 有机碳矿化; 土壤有机碳累积矿化量; 果园生草; 土壤酶活性

中图分类号: X144 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)07-2777-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.2014.07.048

Mineralization of Soil Organic Carbon and Its Relationship with Soil Enzyme Activities in Apple Orchard in Weibei

JIA Man-li¹, GUO Hong¹, LI Hui-ke^{1,2}

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

Abstract: A total of 36 kinds of soil samples were collected from apple orchards under three kinds of management model, including clear tillage model, intercropping white clover model and intercropping small crown flower model, the mineralization of soil organic carbon and four kinds of soil enzymes activities were determined, and the relationship between the two parameters was also analyzed. The results showed that the soil organic carbon mineralization of all the three treatments was almost the same. The daily SOC mineralization rate first increased and then decreased, and finally tended to be stable. After 31 days incubation experiment, the maximum accumulative amount of SOC mineralization occurred in white clover treatment with $590 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, followed by small crown flower treatment with $541 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, and the minimum value was $367 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ in the control treatment, and the accumulative amount of SOC mineralization decreased with increasing soil depth. Discovered by the first-order kinetics, the fitting parameter C_p value ranged from 0.252 to $2.74 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ and k value ranged from 0.019 to 0.051 d^{-1} , and the two grass treatments both showed significant difference in C_p value from the control treatment, and the soil invertase and cellulose activities showed obvious relationship with soil organic carbon mineralization.

Key words: soil organic carbon mineralization; accumulative amount of SOC mineralization; orchard grass; soil enzyme activity

土壤碳库储存量巨大, 约是大气碳库的3倍, 是植被碳库的2倍多^[1], 其较小幅度的变化都可影响到碳向大气的排放量^[2], 进而影响全球气候变化, 因此土壤有机碳动态变化成为陆地生态系统碳循环和全球气候变化研究的热点问题之一^[1~3]。土壤有机碳矿化是土壤有机碳在微生物驱动下由酶作用的生物化学过程, 直接关系到土壤中养分元素的释放与供应、温室气体的形成以及土壤质量的保持等^[4,5], 土壤有机碳矿化受多种因素影响, 如土壤温度、土壤水分、土壤有机碳的性质以及土壤微生物群落组成和活性^[6]等, 土壤酶参与土壤中一切生物化学过程, 是土壤生态系统中物质循环和能量流动中最为活跃的生物活性物质^[7], 土壤酶种类和活性是反映土壤有机碳转化特征的敏感指标^[8], 土壤酶参与土壤碳氮的转

化, 对提高土壤肥力有重要作用^[9]。

果园生草制作为绿色果品生产措施1998年在全国推广^[10], 果园生草可以降低土壤容重, 增大土壤空隙度, 提高土壤有机碳含量、微生物的数量和活性^[11,12]以及土壤酶的活性^[13,14], 这些变化必然会对有机碳矿化产生影响。目前我国对土壤有机

收稿日期: 2013-11-14; 修订日期: 2013-12-30

基金项目: 公益性行业(农业)科研专项(201103005-9, 201303104); “十二五”国家科技支撑计划项目(2014BA16B06, 2014BA16B02); 国家现代农业产业技术体系项目(CARS-28); 国家科技支撑计划项目(2014BAD16B06, 2014BAD16B02)陕西省科技统筹创新工程计划项目(2011KTZB02-02-05); 西北农林科技大学推广专项(Z222021211); 陕西省农业专项(K332021313)

作者简介: 贾曼莉(1986~)女, 硕士研究生, 主要研究方向为生态环境工程, E-mail: jiamanli950128@126.com

* 通讯联系人, E-mail: luhuike@nwsuf.edu.cn

碳矿化的研究侧重于林地^[15]、水稻土^[16]、沙地^[17]和湿地^[18,19]等,关于果园生草土壤有机碳矿化的研究比较少见. 本研究旨在从机制角度了解生草条件下果园土壤肥力状况并筛选出更加适宜改善果园土壤生态环境的草种,以期为进一步探讨生草对果园土壤碳收支的影响、生草果园生态系统对全球碳循环的影响、苹果园土壤生草科学管理、土壤养分的科学管理和果园生草推广提供理论依据和数据支撑.

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验区是白水縣中部杜康鎮塬面西北农林科技大学苹果试验站果园,位于渭北黄土高原苹果代表产区白水县,地处东经 109°16′~109°45′,北纬 35°04′~35°27′,属暖温带大陆性季风气候,平均海拔 850 m 左右,土壤为黄绵土,土层深厚,剖面质地均匀,多年平均气温 11.4℃,多年平均降水量 577.8 mm,降水年际变化大,年内分配不均,日照充足,光热资源丰富,无霜期 207 d. 苹果品种为 13 a 生乔化红富士(富士/新疆野苹果 *Malus demestica* Borkh),栽植密度 3 m×8 m.

1.2 试验设计与土壤样品采集

选取苹果园清耕(clear tillage)、苹果/白三叶(*Trifolium repens*)间作、苹果/小冠花(*Coronilla varia* L.)间作 3 种管理模式(下文分别用对照、白三叶和小冠花简称),每个模式重复 3 次,共 9 个小区,每小区面积是 30 m²(6 棵苹果树),2005 年 3 月进行间生草播种,现已持续生草 7 a,播前深翻整地,开沟条播,播种密度为 0.75 g·m⁻²,每年刈割 2~3 次,覆盖于苹果树行间,各处理区的生态条件和田间

管理措施保持一致.

2012 年 7 月在各处理区随机布设 3 个采样点,清除表层凋落物,用土钻分别采集 0~5 cm、5~10 cm、10~20 cm 和 20~40 cm 土层土样,同一采样点同一层次土壤混匀作为 1 个样品,共 36 个样,土样去除根系、枯落物,分成两个部分,一部分自然风干,用于测定土壤基本理化性质和土壤酶活性,另一部分装入冰袋立即运回实验室用于土壤有机碳矿化的室内培养测定.

1.3 试验方法

土壤有机碳矿化培养:将样品在 30℃ 恒温培养箱中预培养一周,以使土壤从 4℃ 状态下恢复到常温状态,使各种条件相对一致. 称取 20 g 预培养过的鲜土置于广口瓶底部,用蒸馏水调土壤含水量至田间持水量的 60%,在 50 mL 吸收瓶装入 20 mL 0.01 mol·L⁻¹ NaOH 溶液,并置于广口瓶内,加盖密封,置于 30℃ 的恒温培养箱中培养,每个样设置 3 个重复,每次用称重法矫正土壤含水量. 分别在培养的第 1、3、5、7、10、13、17、23、31 d,取出装有碱液的吸收瓶,加入 2 mL 1 mol·L⁻¹ BaCl₂ 溶液和两滴酚酞指示剂用 0.1 mL·L⁻¹ 盐酸滴定至微红色,测定土壤中 CO₂-C 的释放量.

土壤有机碳用重铬酸钾容量法(外加热)测定;土壤 pH 值直接用 pH 计进行测定,水土比 2.5:1;土壤全氮用凯氏法消解,凯氏定氮仪测定;速效钾用醋酸铵浸提,火焰分光光度法测定;轻组有机碳用碘化钠提取,在岛津 TOC-SSM-5000A 碳分析仪上测定;土壤蔗糖酶和纤维素酶用 3,5-二硝基水杨酸比色法测定;过氧化氢酶用高锰酸钾滴定法;土壤脲酶用靛酚比色法测定. 各处理土壤的基本性质见表 1.

表 1 3 个处理土壤理化性质

Table 1 Physicochemical properties of soil in 3 treatments

不同处理	土壤深度 /cm	容重 /g·cm ⁻³	土壤 pH	土壤全氮 /g·kg ⁻¹	土壤有机碳 /g·kg ⁻¹	速效钾 /mg·kg ⁻¹	轻组有机碳 /mg·kg ⁻¹
白三叶	0~5	1.05	8.21	0.99	16.04	115.45	7.99
	5~10	1.19	8.22	0.78	15.02	116.32	6.32
	10~20	1.24	8.19	0.67	13.97	99.56	2.15
	20~40	1.30	8.24	0.52	11.84	81.64	1.45
小冠花	0~5	1.14	8.16	0.92	14.97	93.33	7.05
	5~10	1.27	8.18	0.71	14.93	89.83	5.43
	10~20	1.28	8.19	0.65	13.78	85.33	1.65
	20~40	1.34	8.21	0.58	12.64	77.17	0.57
对照	0~5	1.30	8.16	0.67	11.64	71.33	1.47
	5~10	1.32	8.14	0.62	11.60	66.00	1.08
	10~20	1.39	8.17	0.58	11.58	62.67	0.84
	20~40	1.39	8.18	0.55	10.58	61.00	0.48

1.4 数据处理

应用一级动力学方程分析土壤有机碳矿化动态^[20]:

$$y = C_p(1 - e^{-kt})$$

式中, C_p 为土壤有机碳矿化 C 潜力 ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$), k 为有机碳矿化速率常数 (d^{-1}), t 为天数 (d), y 为培养时间 t 时累积土壤有机碳矿化 C 量 ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$).

所有数据采用 Excel 和 SPSS 18.0 处理.

2 结果与分析

2.1 各处理土壤有机碳矿化动态

2.1.1 土壤有机碳矿化速率

图 1 为不同处理土壤有机碳矿化率随培养时间的动态变化规律. 各处理 4 个土层土壤有机碳日矿化率呈现明显的特征: 培养初期, 土壤有机碳

日矿化率迅速上升, 在第 3 d 达到最大值, 之后大幅度下降, 8 d 后日矿化率较低且趋于稳定. 由于不同处理条件下、不同土层土壤有机碳的数量和稳定性存在差异, 有机碳日矿化率也不同. 在培养初期, 相同处理不同土层有机碳日矿化率表现为: $0 \sim 5 \text{ cm} > 5 \sim 10 \text{ cm} > 10 \sim 20 \text{ cm} > 20 \sim 40 \text{ cm}$, 2 个生草处理 $0 \sim 5 \text{ cm}$ 土层有机碳日矿化率显著高于另 3 层, 这 3 层间差异不显著, 对照处理不同土层有机碳矿化率差异不显著. 不同处理条件下土壤有机碳矿化率大小顺序为: 白三叶 $>$ 小冠花 $>$ 对照, 相同土层, 白三叶和小冠花处理土壤有机碳矿化率差异不显著, 对照处理与 2 个生草处理差异显著. 随着培养时间的增加, 不同处理不同土层间的差异逐渐减小, 土壤有机碳日矿化率趋于稳定.

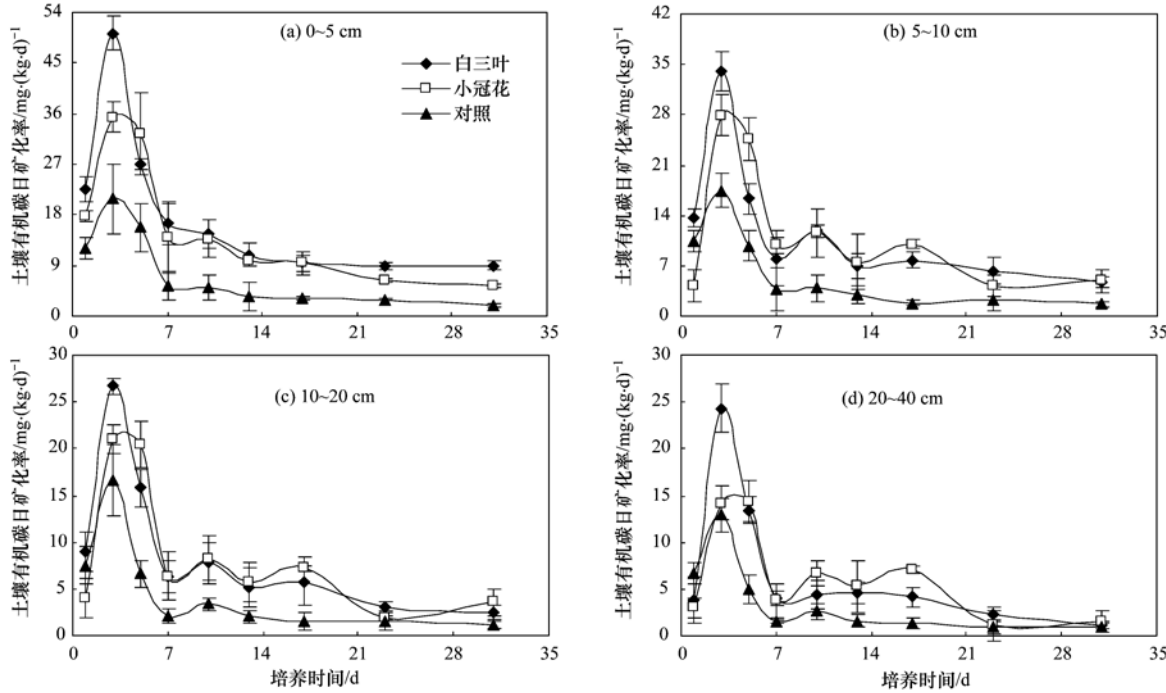


图 1 不同生草果园土壤有机碳日矿化率

Fig. 1 Daily average amount of SOC mineralization in 3 treatments

2.1.2 土壤有机碳累积矿化量

土壤有机碳累积矿化释放的 $\text{CO}_2\text{-C}$ 量是指: 在一定时间内土壤有机碳矿化为无机碳后所释放的 CO_2 数量 (以 $\text{CO}_2\text{-C}$ 释放 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 干土计), 它是土壤有机碳矿化速率的表征之一^[21]. 图 2 表明不同处理土壤有机碳累积矿化量在不同矿化阶段存在一定差异. 3 个处理在垂直方向上变化趋势一致: 土壤有机碳累积矿化量随土层加深而呈不同程度的减小, 增加速率先快后慢, 相同土层不同处理土壤有机

碳累积矿化量大小趋势一致: 白三叶 $>$ 小冠花 $>$ 对照, 大小顺序与 3 个处理有机碳含量 (表 1) 趋势一致. 培养前 3 d, 白三叶、小冠花和对照有机碳累计矿化量的变化范围分别是 $11.6 \sim 318$ 、 $8.9 \sim 278$ 和 $20.2 \sim 188.1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 培养 7 d 后, 3 个处理有机碳累计矿化量的变化范围分别是 $189.6 \sim 590$ 、 $145 \sim 541.23$ 和 $107.8 \sim 367.69 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 与对照比较生草显著提高土壤有机碳累积矿化量, 但是白三叶与小冠花地土壤有机碳累积矿化量差异不显著.

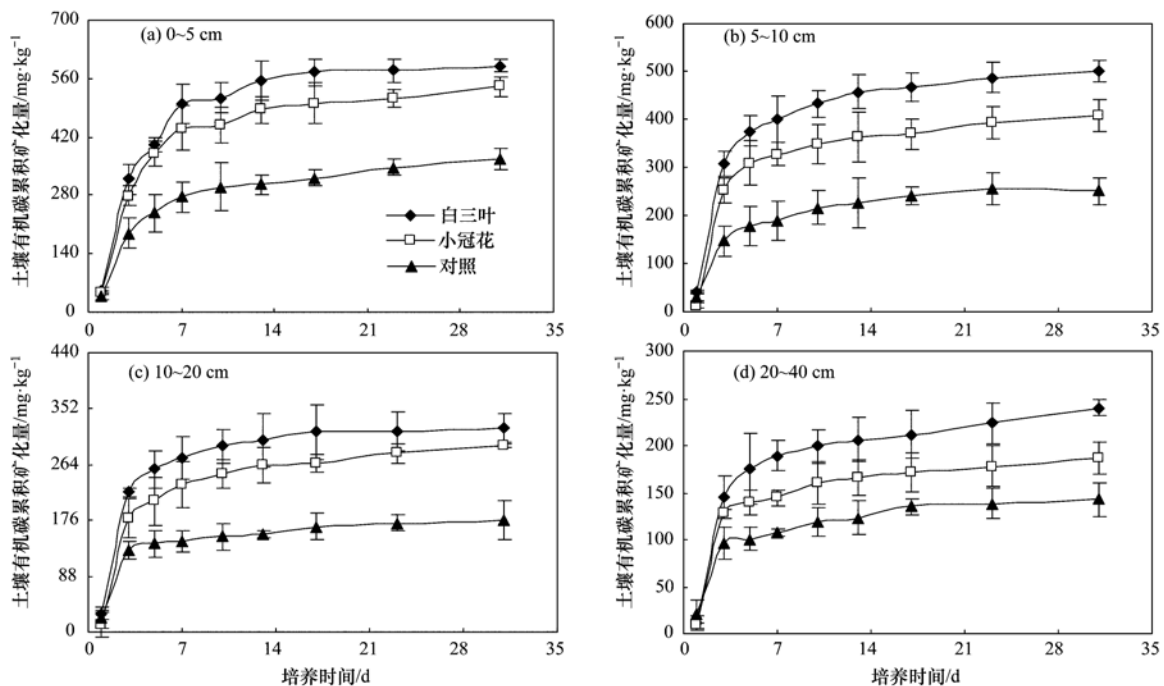


图2 不同生草果园土壤有机碳累积矿化量

Fig. 2 Accumulative amount of SOC mineralization in 3 types of soil

2.2 土壤有机碳矿化拟合

运用一级动力学方程对3个处理土壤有机碳矿化动态进行拟合,拟合参数(C_p 和 k 值)和决定系数见表2,拟合效果较好.不同处理各土层土壤有机碳矿化碳潜力(C_p)存在一定差异,变化范围 $0.252 \sim 2.74 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,相同处理上层土壤有机碳矿化碳潜力显著高于下层土壤,白三叶处理 $0 \sim 5 \text{ cm}$ 与 $5 \sim 10 \text{ cm}$ 之间差异不显著($P > 0.05$),对照处理 $10 \sim 20 \text{ cm}$ 与 $20 \sim 40 \text{ cm}$ 差异不显著($P > 0.05$);相同土层不同处理土壤 C_p 有显著差异,2个生草处理显著高于清耕处理($P < 0.05$),生草显著影响 C_p 值. k 值表示有机碳矿化速率常数,其范围 $0.019 \sim 0.051 \text{ d}^{-1}$. C_p/SOC 值能反映土壤有机碳矿化能力,相同处理不同土层间 C_p/SOC 值大小顺序为: $0 \sim 5 \text{ cm} > 5 \sim 10 \text{ cm} > 10 \sim 20 \text{ cm} > 20 \sim 40 \text{ cm}$,白三叶处理 $0 \sim 5 \text{ cm}$ 土层比 $5 \sim 10 \text{ cm}$ 土层略微偏小,可能因为 $0 \sim 5 \text{ cm}$ 土层有机碳含量较高,相同土层不同处理间 C_p/SOC 值表现为白三叶 $>$ 小冠花 $>$ 对照.

土壤有机碳矿化率是指在一定时间内土壤有机碳矿化释放的 $\text{CO}_2\text{-C}$ 含量占土壤有机碳含量的比例,是表征土壤有机碳矿化速率的指标之一^[22].可以反映土壤的固碳能力,分配比例越低,固碳能力越强,反之能力较弱.3个处理土壤有机碳矿化率在垂直方向上变化趋势: $0 \sim 5 \text{ cm} > 5 \sim 10 \text{ cm} > 10 \sim 20$

$\text{cm} > 20 \sim 40 \text{ cm}$,生草处理和清耕处理随着土层增加土壤固碳能力均增强,变化趋势与有机碳累计矿化量相同,说明果园生草后在垂直水平上没有改变土壤固碳能力变化趋势,相同土层不同处理间土壤有机碳矿化率顺序为:白三叶 $>$ 小冠花 $>$ 对照,对照处理土壤固碳能力最强,小冠花处理次之,白三叶处理最弱,果园生草后减弱了土壤的固碳能力.

2.3 土壤有机碳矿化与土壤酶活性之间的关系

表3为3个处理不同土层土壤酶活性,4种酶活性随着土层加深呈不同程度的减弱,同一土层2个生草处理4种酶活性显著($P < 0.05$)高于对照处理,说明生草明显促进土壤酶活性,过氧化氢酶、蔗糖酶、脲酶和纤维素酶活性各土层大小顺序:白三叶 $>$ 小冠花 $>$ 对照.

土壤中过氧化氢酶、脲酶、蔗糖酶和纤维素酶参与土壤中碳循环,对土壤有机碳的分解和转化起着重要作用^[23],因此对3个处理4种土壤酶活性与土壤有机碳潜在矿化碳潜力(C_p)、矿化速率常数(k)和有机碳累积矿化量进行Pearson相关性分析,结果见表4,3个处理4种酶活性与 C_p 和土壤有机碳累积矿化量分别达到显著($P < 0.05$)或极显著相关($P < 0.01$),只有白三叶处理 C_p 值与过氧化氢酶以及对照处理 C_p 值与蔗糖酶没达到显著水平,2个生草处理4种酶与 C_p 值和土壤有机碳累积矿化

表 2 土壤有机碳矿化拟合参数及决定系数¹⁾

Table 2 Modeling parameters of soil organic carbon mineralization and determinative coefficient						
不同处理	土壤深度 /cm	拟合参数			Cp/SOC /%	有机碳矿化率 /%
		Cp/g·kg ⁻¹	k/d ⁻¹	R ²		
白三叶	0~5	1.672±0.293a	0.031±0.010	0.99	10.4	3.7
	5~10	1.573±0.266a	0.021±0.065	0.99	10.5	3.3
	10~20	1.024±0.246b	0.025±0.006	0.99	7.3	2.3
	20~40	0.607±0.121c	0.034±0.003	0.98	5.1	2.0
小冠花	0~5	2.740±0.667d	0.019±0.006	0.99	18.3	3.6
	5~10	1.527±1.707a	0.023±0.016	0.99	10.2	2.7
	10~20	0.760±0.229c	0.039±0.016	0.99	5.5	2.1
	20~40	0.478±0.195e	0.050±0.034	0.99	3.9	1.5
对照	0~5	0.566±0.077c	0.046±0.008	0.98	4.9	3.2
	5~10	0.429±0.098e	0.045±0.033	0.97	3.7	2.2
	10~20	0.309±0.051f	0.051±0.026	0.96	2.7	1.5
	20~40	0.252±0.141f	0.048±0.027	0.95	2.4	1.4

1) 小写字母表示不同处理不同层次土壤间 Cp 的比较,字母相同的表示差异不显著($P>0.05$),字母不同的表示差异显著($P<0.05$); Cp 和 k 分别为土壤有机碳矿化碳潜力和土壤有机碳矿化速率常数

表 3 不同处理不同土层土壤酶活性¹⁾

Table 3 Soil enzyme activities in different treatments at different depths					
土壤深度/cm	不同处理	过氧化氢酶/mL·g ⁻¹	蔗糖酶/mg·g ⁻¹	脲酶/mg·g ⁻¹	纤维素酶/mg·g ⁻¹
0~5	白三叶	0.672±0.013a	20.521±0.691a	2.555±0.282a	2.328±0.111a
	小冠花	0.652±0.007a	18.086±0.737b	2.024±0.252b	2.020±0.192a
	对照	0.432±0.044b	9.1701±0.720c	0.969±0.078c	0.891±0.043b
5~10	白三叶	0.595±0.096ac	17.337±1.075b	2.135±0.121a	1.729±0.035c
	小冠花	0.585±0.013a	14.807±1.007d	1.659±0.233d	1.412±0.164d
	对照	0.327±0.063d	8.131±0.704ef	0.699±0.057b	0.739±0.040be
10~20	白三叶	0.517±0.043bc	14.620±1.131de	1.855±0.076b	1.270±0.098d
	小冠花	0.508±0.129ab	12.644±0.758e	1.191±0.087c	1.007±0.032b
	对照	0.291±0.047d	6.789±0.856f	0.449±0.019e	0.593±0.129ef
20~40	白三叶	0.428±0.047b	12.583±0.978e	1.183±0.092c	0.900±0.052b
	小冠花	0.397±0.047b	9.999±0.626c	0.895±0.082c	0.624±0.077e
	对照	0.254±0.001d	4.699±0.503g	0.341±0.072e	0.426±0.052f

1) 小写字母表示不同处理不同层次土壤间土壤酶活性的比较,字母相同的表示差异不显著($P>0.05$),字母不同的表示差异显著($P<0.05$)

表 4 土壤 Cp、k 和 SOC 累积矿化量与土壤酶活性之间的关系¹⁾(n=12)

Table 4 Correlations of Cp, k and accumulative amount of SOC mineralization with soil enzymes activity(n=12)									
土壤酶	白三叶			小冠花			对照		
	Cp	k	SOC 累积矿化量	Cp	k	SOC 累积矿化量	Cp	k	SOC 累积矿化量
过氧化氢酶	0.57	0.082	0.763**	0.653*	-0.635*	0.683*	0.576*	0.213	0.636*
蔗糖酶	0.746**	-0.058	0.939**	0.717**	-0.502	0.91**	0.448	-0.024	0.735**
脲酶	0.589*	0.159	0.918**	0.665**	-0.616*	0.896**	0.580*	0.016	0.729**
纤维素酶	0.777**	0.076	0.952**	0.787**	-0.486	0.944**	0.643*	-0.203	0.854**

1) * 表示在 0.05 水平下显著相关, ** 表示 0.01 在水平下显著相关

量的 Pearson 相关系数均大于对照处理, 2 个生草处理 Cp 值和有机碳累积矿化量与蔗糖酶和纤维素酶活性的相关系数大于其与脲酶和过氧化氢酶活性的相关系数,说明蔗糖酶和纤维素酶与土壤有机碳矿化相关性较大,小冠花处理有机碳矿化速率常数与 4 种酶活性是负相关,与过氧化氢酶和脲酶活性

显著负相关($P<0.05$),另 2 个处理土壤酶活性与有机碳矿化速率常数相关性规律不强.

3 讨论

土壤有机碳矿化是土壤中重要的生物化学过程,直接关系到土壤养分元素的释放与供应、CO₂

气体的排放以及土壤质量的维持^[21]。土壤理化性质的差异(尤其是作为有机碳矿化基质的有机碳含量和稳定性的差异)、人为因素的干扰都会对有机碳矿化速率、累积矿化量产生影响。在培养初期,土壤有机碳日矿化率变化幅度较大,先增加后减少,第3 d达到峰值,分析原因可能是在土壤有机碳矿化培养初期,轻组有机碳快速分解,供微生物代谢所需的营养源充足^[21],培养7 d后,日矿化率继续降低,幅度较小,日矿化率低且稳定,因为在培养的中后期,轻组有机碳逐渐分解,较难分解的碳组分开始分解,营养源减少成为限制微生物活动的主要因素^[21],这与多数研究结果相同^[16,22,24~27]。如孙中林等^[16]对水稻土有机碳矿化的研究发现,水稻土有机碳矿化分3个阶段:快速矿化阶段,缓慢矿化阶段和矿化率基本稳定阶段。

不同土层有机碳日矿化率: $0 \sim 5 \text{ cm} > 5 \sim 10 \text{ cm} > 10 \sim 20 \text{ cm} > 20 \sim 40 \text{ cm}$,有机碳日矿化率随土层加深而减小,与不同土层有机碳含量变化趋势相同(表1)。这一结果与多数学者的研究结果相近^[21,26]。2个生草处理表层 $0 \sim 5 \text{ cm}$ 与另3个土层有机碳矿化差异显著($P < 0.05$),土壤表层有机碳含量较高,尤其轻组有机碳含量高,供微生物代谢的营养源充足,土壤有机碳的生物有效性高,有机碳日矿化率较高。 $5 \sim 10 \text{ cm}$ 、 $10 \sim 20 \text{ cm}$ 与 $20 \sim 40 \text{ cm}$ 3个土层间差异不显著($P > 0.05$),可能由于室内培养改变了下层土壤与空气的接触、改变了土壤含水量,促进了下层土壤有机碳的矿化,在田间条件下,下层土壤未扰动,处于厌氧环境下,室内培养设置温度可能比田间条件下高,会促进下层土壤有机碳矿化,下层土壤有机碳矿化率会比实验室条件下测定值小^[28]。

相同土层2个生草处理土壤有机碳累积矿化量与对照处理差异显著($P < 0.05$),2个生草处理间差异不显著。产生差异原因比较复杂,包括微生物种类、数量和活性的差异、土壤理化性质(土壤有机碳含量和稳定性)的差异、凋落物性质和数量的差异、不同草种根系分泌物的差异。许多学者研究^[17,29,30]得出相似结论,凋落物进入土壤后均能促进土壤有机碳矿化。凋落物作为土壤的外源有机物,进入土壤增加土壤有机碳含量、改变土壤理化性质^[31]、改变土壤微生物种群结构、密度和多样性^[32,33]。由于不同凋落物输入到土壤的有机碳质量和数量不同,含有不同凋落物的土壤有机碳矿化存在差异^[34,35]。李会科等^[11]对黄土高原渭北苹果园

生草土壤性状测定的结果表明,生草能显著提高 $0 \sim 20 \text{ cm}$ 土层有机质含量,生草后土壤3大微生物类群数量得到显著提高。生草类型不同,凋落物的质量和数量存在差异,对土壤中有机碳的含量和稳定性影响不同,如种植白三叶改善土壤有机质的效果强于种植黑麦草^[11],对有机碳矿化产生不同影响。

土壤酶在一定程度上反映土壤养分转化的动态,土壤中生化反应的方向与强度,对维持土壤生态系统的碳、氮平衡起着重要作用^[36]。土壤酶^[36]主要来源于土壤微生物和植物根系分泌。生草类型不同其枯落物、根系分布以及根系分泌物的性质也不相同,对土壤酶、土壤微生物和有机碳的空间分布产生影响,而影响有机碳矿化^[29]。有研究表明生草能明显提高土壤酶活性,如幼龄荔枝园生草后土壤转化酶、蛋白酶、脲酶、过氧化物酶活性均明显增加^[37],梨园种植白三叶草可显著提高土壤中脲酶、蔗糖酶活性,提高土壤磷酸酶活性^[14],本研究中2个生草处理土壤酶活性与土壤有机碳累积矿化量和 C_p 值的相关性较好,土壤蔗糖酶、纤维素酶、脲酶和过氧化氢酶活性与土壤有机碳的分解和转化密切相关,土壤酶活性影响土壤微生物对土壤有机碳的作用。

本研究利用一级动力学方程拟合得到的土壤有机碳矿化碳潜力(C_p)变化范围为 $0.252 \sim 2.74 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,与前人研究结果相比偏大,一方面可能因为生草后外源枯落物的输入和根系分泌物的增加导致土壤有机碳库变大,另一方面可能有人为因素的干扰,采集土样中含有大量植物根系,在预处理中去除其中的根系枯枝落叶破坏了土壤团聚体,增加了原来被土壤团聚体保护的有机碳与空气的接触,加速了矿化有机碳的量,导致拟合所得 C_p 值比实际值偏大。

土壤有机碳矿化率某种程度上可以反映土壤的固碳能力^[28]。相同处理在垂直分布上有机碳矿化率随土层的增加而降低,土壤有机碳矿化率的变化与土壤有机碳矿化碳潜力的变化规律一致,说明下层土壤固碳能力高于上层,这与李顺姬等^[21]的研究结果一致,3个处理土壤有机碳矿化率2个生草处理高于对照处理,这表明对照处理固碳能力最强,说明果园生草后反而减弱了土壤的固碳能力。可能因为果园土壤生草后枯落物进入土壤增加土壤有机碳含量,植物根系分泌物促进该层土壤微生物活动和土壤酶活性^[14,37],使得该层轻组有机碳含量明显高

于下层, 生草后果园土壤容重降低、增加土壤空隙^[11,31,38], 增加了土壤有机碳与空气的接触面积, 更加有利于土壤有机碳矿化, 土壤固碳能力变弱。

4 结论

(1) 3 个处理不同土层土壤有机碳矿化规律一致, 在培养初期第 3 d 日矿化率到达最大, 白三叶、小冠花和对照处理分别为 50.3、17.7 和 20.9 $\text{mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$, 接着降低, 后期保持低且比较稳定的趋势。

(2) 3 个处理土壤有机碳累积矿化量的范围分别为 240 ~ 590、186 ~ 541 和 142 ~ 367 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 2 个生草处理显著大于对照处理, 果园生草显著提高土壤有机碳矿化, 3 个处理在垂直方向上的顺序: 0 ~ 5 cm > 5 ~ 10 cm > 10 ~ 20 cm > 20 ~ 40 cm。

(3) 运用一级动力学方程对 3 处理土壤有机碳矿化动态进行拟合, 拟合效果较好, 拟合参数 C_p 值和 k 值分别为 0.252 ~ 2.74 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 0.019 ~ 0.051 d^{-1} 。

(4) 蔗糖酶和纤维素酶与 3 个处理土壤有机碳累积矿化量显著相关, 蔗糖酶和纤维素酶参与土壤碳循环, 且与土壤有机碳矿化密切相关

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 方精云. 全球生态学: 气候变化与生态响应[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000.
- [3] Trumbore S. Carbon respired by terrestrial ecosystem recent progress and challenges[J]. *Global Change Biology*, 2006, **12**(2): 141-153.
- [4] 陈涛, 郝晓晖, 杜丽君, 等. 长期施肥对水稻土土壤有机碳矿化的影响[J]. *应用生态学报*, 2008, **19**(7): 1494-1500.
- [5] Lorenz K, Lal R. Biogeochemical C and N cycles in urban soils[J]. *Environment International*, 2009, **35**(1): 1-8.
- [6] 黄耀, 刘世梁, 沈其荣, 等. 环境因子对农业土壤有机碳分解的影响[J]. *应用生态学报*, 2002, **13**(6): 709-714.
- [7] 周礼恺. 土壤酶学[M]. 北京: 科学出版社, 1987.
- [8] 于建光, 李辉信, 陈小云, 等. 秸秆施用及蚯蚓活动对土壤活性有机碳的影响[J]. *应用生态学报*, 2007, **18**(4): 818-824.
- [9] 沈芳芳, 袁颖红, 樊后保, 等. 氮沉降对杉木人工林土壤有机碳矿化和土壤酶活性的影响[J]. *生态学报*, 2012, **32**(2): 517-527.
- [10] 何庆. 推广绿色果品生产的果园生草技术[J]. *中国食物与营养*, 1998, (6): 40.
- [11] 李会科, 张广军, 赵政阳, 等. 生草对黄土高原旱地苹果园土壤性状的影响[J]. *草业学报*, 2007, **16**(2): 32-39.
- [12] 李会科, 赵政阳, 张广军. 种植不同牧草对渭北苹果园土壤肥力的影响[J]. *西北林学院学报*, 2004, **19**(2): 31-34.
- [13] 李发林, 傅金辉, 刘长全, 等. 果园生草、套种绿肥对红壤幼龄果园土壤酶活性变化的研究[J]. *福建热作科技*, 1999, **24**(4): 1-7.
- [14] 张喜焕, 辛贺明. 生草栽培对梨园土壤养分及土壤酶活性的影响[J]. *河南农业科学*, 2012, **41**(8): 85-88.
- [15] 吴建国, 艾丽, 朱高, 等. 祁连山北坡云杉林和草甸土壤有机碳矿化及其影响因素[J]. *草地学报*, 2007, **15**(1): 20-28.
- [16] 孙中林, 吴金水, 葛体达, 等. 土壤质地和水分对水稻土有机碳矿化的影响[J]. *环境科学*, 2009, **30**(1): 214-220.
- [17] 苏永中, 赵哈林, 张铜会, 等. 不同退化沙地土壤碳的矿化潜力[J]. *生态学报*, 2004, **24**(2): 372-378.
- [18] 张文菊, 童成立, 杨钙仁, 等. 水分对湿地沉积物有机碳矿化的影响[J]. *生态学报*, 2005, **25**(2): 249-253.
- [19] 杨钙仁, 张文菊, 童成立, 等. 温度对湿地沉积物有机碳矿化的影响[J]. *生态学报*, 2005, **25**(2): 243-248.
- [20] Hyvönen, Ågren G I, Dalias P. Analysing temperature response of decomposition of organic matter[J]. *Global Change Biology*, 2005, **11**(5): 770-780.
- [21] 李顺姬, 邱莉萍, 张兴昌. 黄土高原土壤有机碳矿化及其与土壤理化性质的关系[J]. *生态学报*, 2010, **30**(5): 1217-1226.
- [22] Franzluebbers A J, Haney R L, Honeycutt C W, *et al.* Climatic influences on active fractions of soil organic matter[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2001, **33**(7-8): 1103-1111.
- [23] Schimel J P, Weintraub M N. The implications of exoenzyme activity on microbial carbon and nitrogen limitation in soil: a theoretical model[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2003, **35**(4): 549-563.
- [24] Weintraub M N, Schimel P J. Interactions between carbon and nitrogen mineralization and soil organic matter chemistry in arctic tundra soils[J]. *Ecosystems*, 2003, **6**(2): 129-143.
- [25] 李忠佩, 张桃林, 陈碧云. 可溶性有机碳的含量动态及其与土壤有机碳矿化的关系[J]. *土壤学报*, 2004, **41**(4): 544-552.
- [26] 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.
- [27] 路磊, 李忠佩, 车玉萍. 不同利用年限菜地土壤有机碳矿化动态和酶活性变化[J]. *土壤*, 2006, **38**(4): 429-434.
- [28] 姜发艳, 孙辉, 林波, 等. 川西亚高山云杉人工林恢复过程中土壤有机碳矿化研究[J]. *土壤通报*, 2011, **42**(1): 91-97.
- [29] 史学军, 潘剑君, 陈锦盈, 等. 不同类型凋落物对土壤有机碳矿化的影响[J]. *环境科学*, 2009, **30**(6): 1832-1837.
- [30] 李玲, 肖和艾, 吴金水. 红壤旱地和稻田土壤中有有机底物的分解与转化研究[J]. *土壤学报*, 2007, **44**(4): 669-674.
- [31] 罗友进, 赵光, 高明, 等. 不同植被覆盖对土壤有机碳矿化及团聚体碳分布的影响[J]. *水土保持学报*, 2010, **24**(6): 117-122.
- [32] Baler T C, Firestone M K. Linking microbial community

- composition and soil processes in a California annual grassland and mixed-conifer forest[J]. *Biogeochemistry*, 2005, **73**(2): 395-415.
- [33] Murphy D V, Sparling G P, Fillery I R P. Seasonal fluctuations in gross N mineralisation, ammonium consumption, and microbial biomass in a Western Australian soil under different land uses [J]. *Australian Journal of Agricultural Research*, 1998, **49**(3): 523-536.
- [34] Chow A T, Tanji K K, Gao S D, *et al.* Temperature, water content and wet-dry cycle effects on DOC production and carbon mineralization in agricultural peat soils [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2006, **38**(3): 477-488.
- [35] Kadono A, Funakawa S, Kosaki T. Factors controlling mineralization of soil organic matter in the Eurasian steppe[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2008, **40**(4): 947-955.
- [36] 关松荫. 土壤酶及其研究法[M]. 北京: 农业出版社, 1986.
- [37] 林桂志, 丁光敏, 许木土, 等. 幼龄荔枝园种植百喜草改良土壤效果的研究[J]. *亚热带水土保持*, 2006, **18**(4): 4-8.
- [38] 李会科, 张广军, 赵政阳, 等. 渭北黄土高原旱地果园生草对土壤物理性质的影响[J]. *中国农业科学*, 2008, **41**(7): 2070-2076.

CONTENTS

Observation Study on Aerosol Optical Properties and Radiative Forcing Using the Ground-based and Satellite Remote Sensing at Background Station During the Regional Pollution Episodes	ZHANG Xiao-ling, XIA Xiang-ao, CHE Hui-zheng, <i>et al.</i> (2439)
<i>In-situ</i> Measurement of Atmospheric Methyl Chloroform at the Shangdianzi GAW Regional Background Station	YAO Bo, ZHOU Ling-xi, LIU Zhao, <i>et al.</i> (2449)
Distribution of CO at Lin'an Station in Zhejiang Province	FANG Shuang-xi, ZHOU Ling-xi, LUAN Tian, <i>et al.</i> (2454)
Pollution Characteristics of Organic and Elemental Carbon in Atmospheric Particles in Nanjing Northern Suburb in Summer	DUAN Qing, AN Jun-lin, WANG Hong-lei, <i>et al.</i> (2460)
Characteristics of Water-soluble Organic Nitrogen of PM _{2.5} in Xi'an During Wintertime Non-haze and Haze Periods	CHENG Yu-ting, WANG Ge-hui, SUN Tao, <i>et al.</i> (2468)
Effect of Sand Dust Weather on Major Water-soluble Ions in PM ₁₀ in Lanzhou, China	WANG Fang, CHEN Qiang, ZHANG Wen-yu, <i>et al.</i> (2477)
Diversity of Bacterial Areasols in Precipitation of Shanghai Area	LIANG Zong-min, DU Rui, DU Peng-rui, <i>et al.</i> (2483)
Concentrations and Deposition Fluxes of Heavy Metals in Precipitation in Core Urban Areas, Chongqing	PENG Yu-long, WANG Yong-min, QIN Cai-qing, <i>et al.</i> (2490)
Anthropogenic VOC Emission Inventory and Contribution from Industrial Sources in Ningbo	LI Xuan, WANG Xue-song, LIU Zhong, <i>et al.</i> (2497)
Evaluation and Selection of VOCs Treatment Technologies in Packaging and Printing Industry	WANG Hai-lin, WANG Jun-hui, ZHU Chun-lei, <i>et al.</i> (2503)
Experimental Study on CO ₂ Absorption by Aqueous Ammonia-based Blended Absorbent	XIA Zhi-xiang, XIANG Qun-yang, ZHOU Xu-ping, <i>et al.</i> (2508)
Preliminary Investigation on Emission of PCDD/Fs and DL-PCBs Through Flue Gas from Coke Plants in China	SUN Peng-cheng, LI Xiao-lu, CHENG Gang, <i>et al.</i> (2515)
Distribution and Source of Particulate Organic Carbon and Particulate Nitrogen in the Yangtze River Estuary in Summer 2012	XING Jian-wei, XIAN Wei-wei, SHENG Xiu-zhen (2520)
Characteristics of Optical Absorption Coefficients and Their Differences in Typical Seasons in Lake Qiandaohu	WANG Ming-zhu, ZHANG Yun-lin, SHI Kun, <i>et al.</i> (2528)
Dynamic Distributions of Dissolved Oxygen in Lake Qiandaohu and Its Environmental Influence Factors	YIN Yan, WU Zhi-xu, LIU Ming-liang, <i>et al.</i> (2539)
Source Analysis of Urea-N in Lake Taihu During Summer	HAN Xiao-xia, ZHU Guang-wei, XU Hai, <i>et al.</i> (2547)
Phytoplankton Community Structure and Its Succession in Isolated Lakes of Poyang-Junshan Lake	LIU Xia, QIAN Kui-mei, TAN Guo-liang, <i>et al.</i> (2557)
Vertical Distribution and Relationship Between ²¹⁰ Pb _{ex} Activities and Nutrients in Sediment Cores of Two Different Eutrophication Level Lakes	WANG Xiao-lei, YANG Hao, GU Zhu-jun, <i>et al.</i> (2565)
Simulation of Nitrate Pollution in Groundwater Using Pump-and-treat Optimization Method	JIANG Lie, HE Jiang-tao, JIANG Yong-hai, <i>et al.</i> (2572)
Variation of Water DOC During the Process of Pre-pressure and Coagulation Sedimentation Treatment	CHEN Wen-jing, CONG Hai-bing, XU Ya-jun, <i>et al.</i> (2579)
Adsorption of Perchlorate by Calcined Mg/Zn/Al Layered Double Hydroxides	WANG Hong-yu, LIU Yan (2585)
Adsorption Kinetic Mechanism of Ionic Soluble Dye Mixture on Fly Ash	SUN De-shuai, ZHENG Qiang-qiang, ZHANG Xiao-dong, <i>et al.</i> (2590)
Effect of SDS on the Adsorption of Cd ²⁺ onto Amphoteric Modified Bentonites	WANG Jian-tao, MENG Zhao-fu, YANG Ya-ti, <i>et al.</i> (2596)
Structural Changes of Aged Biochar and the Influence on Phenanthrene Adsorption	TANG Wei, GUO Yue, WU Jing-gui, <i>et al.</i> (2604)
Photocatalytic Degradation Kinetics of Perfluorooctanoic Acid (PFOA) in TiO ₂ Dispersion and Its Mechanism	LI Ming-jie, YU Ze-bin, CHEN Ying, <i>et al.</i> (2612)
Characterizing the Interaction Between Roxarsone and Humic Acid by Fluorescence Quenching Experiment	ZHU Jiang-peng, MEI Ting, PENG Yun, <i>et al.</i> (2620)
Modification of Activated Carbon Fiber for Electro-Fenton Degradation of Phenol	MA Nan, TIAN Yao-jin, YANG Guang-ping, <i>et al.</i> (2627)
Investigation of Enhanced Low Carbon Wastewater Denitrification by Catalytic Iron	WANG Meng-yue, MA Lu-ming (2633)
Denitrification Performance of PBS as a Solid Carbon Source of Denitrification	LIU Jia, SHEN Zhi-qiang, ZHOU Yue-xi, <i>et al.</i> (2639)
Concentrations, Distribution Characteristics and Electron Beam Radiolysis Degradation of PCDD/Fs in Waste Water from a Paper Mill	QING Xian, HUANG Jin-qiong, YU Xiao-wei, <i>et al.</i> (2645)
Study on the Quality of Digested Piggery Wastewater in Large-Scale Farms in Jiaxing	WEI Dan, WAN Mei, LIU Rui, <i>et al.</i> (2650)
New Ways to Improve Volatile Fatty Acids Accumulation in Sludge Alkaline Fermentation System	LI Xiao-ling, PENG Yong-zhen, CHAI Tong-zhi, <i>et al.</i> (2658)
Distribution and Ecological Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Surface Sediments and Soils from Dishui Lake and Its Water Exchange Areas	GUO Xue, BI Chun-juan, CHEN Zhen-lou, <i>et al.</i> (2664)
Distribution of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Water and Sediment from Zhoushan Coastal Area, China	JIANG Min, Le Huy Tuan, MEI Wei-ping, <i>et al.</i> (2672)
Contamination Levels and Source Analysis of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Organochlorine Pesticides in Soils and Grasses from Lake Catchments in the Tibetan Plateau	XIE Ting, ZHANG Shu-juan, YANG Rui-qiang (2680)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Organochlorine Pesticides in Soil from Jiufeng Mountain Range in Fujian, China	HUANG Huan-fang, QI Shi-hua, QU Cheng-kai, <i>et al.</i> (2691)
Pollution Fingerprints and Sources of Perfluorinated Compounds in Surface Soil of Different Functional Areas	ZHANG Hong, ZHAO Liang, HE Long, <i>et al.</i> (2698)
Distribution, Seasonal Variation and Influence Factors of Dissolved Inorganic Arsenic in the Sanggou Bay	LI Lei, REN Jing-ling, LIU Su-hui, <i>et al.</i> (2705)
Distribution of Soil Heavy Metal and Pollution Evaluation on the Different Sampling Scales in Farmland on Yellow River Irrigation Area of Ningxia; A Case Study in Xingqing County of Yinchuan City	WANG You-qi, BAI Yi-ru, WANG Jian-yu (2714)
Release of Mercury from Soil and Plant in Water-Level-Fluctuating Zone of the Three Gorges Reservoir Area and Its Accumulation in Zebrafish	LI Chu-xian, SUN Rong-guo, WANG Ding-yong, <i>et al.</i> (2721)
Residues and Health Risk Assessment of Sulfonamides in Sediment and Fish from Typical Marine Aquaculture Regions of Guangdong Province, China	HE Xiu-ting, WANG Qi, NIE Xiang-ping, <i>et al.</i> (2728)
Health Risk Assessment of Heavy Metals in Atmospheric Dust of Qingdao City	ZHANG Chun-rong, WU Zheng-long, YAO Chun-hui, <i>et al.</i> (2736)
Health Risk Assessment of Coke Oven PAHs Emissions	BO Xin, WANG Gang, WEN Rou, <i>et al.</i> (2742)
Effects of Combined Pollution of Cd, Cu and Pb on Antioxidant Enzyme Activities of Earthworm in Soils	WANG Hui, XIE Xin-yuan (2748)
Toxicity of Three Chlorophenols to Protozoa <i>Tetrahymena thermophila</i>	LI Ya-jie, CUI Yi-Bin, JIANG Li-juan, <i>et al.</i> (2755)
Phytoexclusion Potential Studies of Si Fertilization Modes on Rice Cadmium	CHEN Zhe, TIE Bo-qing, LEI Ming, <i>et al.</i> (2762)
Effects of Conservation Tillage on Soil CO ₂ and N ₂ O Emission During the Following Winter-Wheat Season	PAN Ying, HU Zheng-hua, WU Yang-zhou, <i>et al.</i> (2771)
Mineralization of Soil Organic Carbon and Its Relationship with Soil Enzyme Activities in Apple Orchard in Weibei	JIA Man-li, GUO Hong, LI Hui-ke (2777)
Steam and Air Co-injection in Removing TCE in 2D-Sand Box	WANG Ning, PENG Sheng, CHEN Jia-jun (2785)
Effect of Cu ²⁺ on the Power Output of Dual-chamber Microbial Fuel Cell	MU Shu-jun, LI Xiu-fen, REN Yue-ping, <i>et al.</i> (2791)
Emissions of Greenhouse Gas and Ammonia from Sewage Sludge Composting by Continuous Aerated Turning Pile	ZHAO Chen-yang, WEI Yuan-song, GE Zhen, <i>et al.</i> (2798)
Emissions of NH ₃ , N ₂ O, and NO from Swine Manure Solid Storage in Winter	DING Gang-qiang, HAN Sheng-hui, YUAN Yu-ling, <i>et al.</i> (2807)
Variation Characteristics and Mathematical Model of Humic Substances in Landfill Leachates with Different Landfill Ages	HUANG You-fu, XU Xin-ya, FAN Liang-xin, <i>et al.</i> (2816)
Research on the Variation Regularity of Effluent from the Leachate Reverse Osmosis Concentrate Recirculation	WANG Dong-mei, LIU Dan, LIU Qing-mei, <i>et al.</i> (2822)
Quantitative Analysis on the Changes in Anthropogenic Lead Flows of China	MA Lan, MAO Jian-su (2829)
Research Progress in Microbiological Characteristics in Combined N ₂ Removal Process by Partial Nitrification and Anaerobic Ammonium Oxidation	ZHAO Zhi-rui, HOU Yan-lin (2834)

《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)

2014年7月15日 第35卷 第7期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 7 Jul. 15, 2014

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: 90.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行