

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第7期

Vol.36 No.7

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

2013年12月中国中东部地区严重灰霾期间上海市颗粒物的输送途径及潜在源区贡献分析	李莉, 蔡蓓琳, 周敏 (2327)
长三角冬季一次霾过程气溶胶及其水溶性离子的区域分布特征	王曼婷, 朱彬, 王红磊, 薛国强, 何俊, 徐宏辉, 曹锦飞 (2337)
北京城区大气 PM _{2.5} 主要化学组分构成研究	刘保献, 杨懂艳, 张大伟, 陈添, 赵红帅, 陈圆圆, 陆皓昀 (2346)
2014年春季山东省 PM _{2.5} 跨界输送研究	贾海鹰, 程念亮, 何友江, 陈云波, 杜晓惠, 单晓丽 (2353)
燃煤电厂产生和排放的 PM _{2.5} 中水溶性离子特征	马子珍, 李振, 蒋靖坤, 叶芝祥, 邓建国, 段雷 (2361)
南京夏季城市冠层大气 CO ₂ 浓度时空分布规律的观测	高韵秋, 刘寿东, 胡凝, 王淑敏, 邓力琛, 于洲, 张圳, 李旭辉 (2367)
北京市机动车尾气排放因子研究	樊守彬, 田灵娣, 张东旭, 曲松 (2374)
北京不同污染地区园林植物对空气颗粒物的滞纳能力	张维康, 王兵, 牛香 (2381)
长三角地区火电行业主要大气污染物排放估算	丁青青, 魏伟, 沈群, 孙予罕 (2389)
基于区域循环模型 IAP-N 的安徽省农用地 N ₂ O 排放量估算	韩云芳, 韩圣慧, 严平 (2395)
不同源汇信息提取方法对区域 CO ₂ 源汇估算及其季节变化的影响评估	张芳, 周凌晔, 王玉诏 (2405)
实测/预测辽河铬(VI)水生生物基准与风险评估	王晓南, 闫振广, 刘征涛, 张聪, 王伟莉 (2414)
博尔塔拉河河水、表层底泥及河岸土壤重金属的污染和潜在危害评价	张兆永, 吉力力·阿不都外力, 姜逢清 (2422)
岩溶泉水化学性质及 δ ¹³ C _{DIC} 影响因素	赵瑞一, 吕现福, 刘子琦, 吕春艳 (2430)
柳江流域柳州断面水化学特征及无机碳汇通量分析	原雅琼, 何师意, 于爽, 孙平安, 王艳雪, 武招云, 李新桂, 谢明鲜, 刘文, 李瑞, 张华生 (2437)
重庆市主城区次级河流总氮总磷污染特征分析及富营养化评价	庆旭瑶, 任玉芬, 吕志强, 王效科, 庞容, 邓睿, 孟龄, 马慧雅 (2446)
三峡库区消落带土壤邻苯二甲酸二丁酯静态释放特征	王法, 王强, 木志坚, 杨志丹, 宋娇艳 (2453)
干湿循环对三峡支流消落带沉积物中可转化态氮及其形态分布的影响	林俊杰, 张帅, 杨振宇, 何立平, 周依, 张倩茹 (2459)
天山天池夏季叶绿素 a 的分布及富营养化特征研究	王斌, 马健, 王银亚, 尹湘江 (2465)
西大海湖沉积物营养盐垂直分布特征变化分析	段木春, 肖海丰, 臧淑英 (2472)
草街水库蓄水后嘉陵江浮游植物群落特征及水质评价	杨敏, 张晟, 刘朔孺 (2480)
宁波三江口水域原核生物群落结构分析	胡安谊, 李姜维, 杨晓永, 王弘杰, 于昌平 (2487)
全氟化合物对表层沉积物中细菌群落结构的影响	孙雅君, 王铁宇, 彭霞薇, 王佩 (2496)
菹草腐解-金鱼藻生长耦合作用对水质及植物生长的影响	马月, 王国祥, 曹勤, 王小云, 马杰 (2504)
生物滞留设施对城市地表径流低浓度磷吸附基质研究	李立青, 龚燕芳, 颜子钦, 单保庆 (2511)
复合填料生物渗滤系统处理城市雨水径流的研究	王晓璐, 左剑恶, 千里里, 邢薇, 缪恒峰, 阮文权 (2518)
3种典型消毒副产物对细菌抗生素抗性的影响	吕露, 张梦露, 王春明, 林惠荣, 于鑫 (2525)
基于透射光法探讨水流流速对 DNAPL 运移分布的影响	高燕维, 郑菲, 施小清, 孙媛媛, 徐红霞, 吴吉春 (2532)
BDD 和 PbO ₂ 电极电化学氧化苯并三氮唑的对比研究	伍娟丽, 张佳维, 王婷, 倪晋仁 (2540)
开放系统下方解石对邻苯二甲酸的吸附	李振炫, 黄利东, 陈艳芳, 缪晔, 刘大刚, 许正文 (2547)
碳纳米管-羟磷灰石对铅的吸附特性研究	张金利, 李宇 (2554)
刚果红分子印迹聚合物纳米微球的合成及吸附性能	常自强, 陈复彬, 张玉, 时作龙, 杨春艳, 章竹君 (2564)
碱热-酸热法合成二氧化钛-钛酸纳米管复合纳米材料对 Cd(II) 和苯酚的同步去除	雷立, 晋银佳, 王婷, 赵泉, 晏友, 刘文 (2573)
固定化菌剂对污水和牛粪中雌二醇和己烯雌酚的去除作用	李欣, 凌婉婷, 刘静娴, 孙敏霞, 高彦征, 刘娟 (2581)
PN-ANAMMOX 一体化反应器处理电子行业 PCB 废水	袁琬, 李祥, 周呈, 陈宗姮 (2591)
Fenton 氧化深度处理石化废水厂二级出水研究	王翼, 吴昌永, 周岳溪, 张雪, 董波, 陈学民 (2597)
制革废水和印染废水的综合毒性评估及鉴别	黄利, 陈文艳, 万玉山, 郑国娟, 赵远, 蔡强 (2604)
不同溶解氧条件下 A/O 系统的除碳脱氮效果和细菌群落结构变化	陈燕, 刘国华, 范强, 汪俊妍, 齐鲁, 王洪臣 (2610)
利用主要缺氧段 ORP 作为连续流单污泥污水脱氮除磷系统调控参数	王晓玲, 宋铁红, 殷宝勇, 李静文, 李紫棋, 余勇 (2617)
连续流态下以实际低基质生活污水培养好氧颗粒污泥及其脱氮性能	姚力, 信欣, 鲁航, 朱辽东, 谢思建 (2626)
广东清远电子垃圾拆解区农田土壤重金属污染评价	张金莲, 丁疆峰, 卢桂宇, 党志, 易筱筠 (2633)
山东省临沂市土壤有机氯农药滴滴涕残留量与空间分布特征	喻超, 王增辉, 王红晋, 代杰瑞, 庞绪贵, 赵西强, 刘华峰 (2641)
金华市萤石矿区土壤氟污染评价	叶群峰, 周小玲 (2648)
土壤碳收支对秸秆与秸秆生物炭还田的响应及其机制	侯亚红, 王磊, 付小花, 乐毅全 (2655)
黄土区果园和刺槐林生态系统土壤有机碳变化及影响因素	李如剑, 王蕊, 李娜娜, 姜继韶, 张彦军, 王志齐, 刘庆芳, 吴得峰, 郭胜利 (2662)
缙云山土地利用方式对土壤轻组及颗粒态有机碳氮的影响	雷利国, 江长胜, 郝庆菊 (2669)
塔里木河上游典型绿洲土壤酶活性与环境因子相关分析	朱美玲, 贡璐, 张龙龙 (2678)
不同部位玉米秸秆对两种质地黑土 CO ₂ 排放和微生物量的影响	刘四义, 梁爱珍, 杨学明, 张晓平, 贾淑霞, 陈学文, 张士秀, 孙冰洁, 陈升龙 (2686)
1株对叔丁基邻苯二酚降解菌的筛选鉴定及响应面法优化其降解	贺强礼, 刘文斌, 杨海君, 彭晓霞, 关向杰, 黄水娥 (2695)
耐高浓度沼液产油小球藻的分离鉴定与特征分析	杨周, 王文国, 马丹炜, 汤晓玉, 胡启春 (2707)
水介质中 C ₆₀ 纳米晶体颗粒与 Cu ²⁺ 对小鼠腹腔巨噬细胞的复合毒性研究	于叶, 卞为林, 张慧敏, 张波, 何义亮 (2713)
地表水体中同时分析 18 种糖皮质激素方法的建立	郭文景, 常红, 孙德智, 吴丰昌, 杨浩 (2719)
《环境科学》征订启事 (2553) 《环境科学》征稿简则 (2640) 信息 (2546, 2609, 2616, 2647)	

缙云山土地利用方式对土壤轻组及颗粒态有机碳氮的影响

雷利国, 江长胜, 郝庆菊*

(西南大学资源环境学院, 三峡库区生态环境教育部重点实验室, 重庆 400715)

摘要: 选取缙云山阳坡同一海拔处亚热带常绿阔叶林(以下简称林地)、果园、坡耕地和撂荒地这 4 种不同土地利用类型, 在 0~60 cm 深度内每隔 10 cm 采集一个土样, 测定土壤轻组有机碳氮(LFOC、LFON)和颗粒态有机碳氮(POC、PON)含量, 并计算其分配比例和碳氮比。结果表明, 在 0~60 cm 土壤深度范围内, 林地转变为坡耕地后, LFOC 及 LFON 含量分别降低了 71.42% 和 38.46% ($P < 0.05$), 转变为果园后变化不明显, 坡耕地撂荒后其含量分别升高了 3.77 倍和 1.38 倍 ($P < 0.05$); 林地转变为坡耕地或果园后, POC 及 PON 含量均无明显变化, 而坡耕地撂荒后其含量分别增加了 4.12 和 1.25 倍 ($P < 0.05$)。林地转变为坡耕地后土壤 LFOC 及 LFON 分配比例显著降低, 转变为果园后则明显升高, 而 POC 及 PON 分配比例变化均不明显; 坡耕地撂荒后, LFOC、LFON、POC、PON 分配比例均显著增加。土壤 SOC/TN 为撂荒地(12.93) > 林地(8.53) > 果园(7.52) > 坡耕地(4.40), LFOC/LFON 为撂荒地(16.32) > 林地(14.29) > 果园(11.32) > 坡耕地(7.60), POC/PON 为撂荒地(23.41) > 坡耕地(13.85) > 林地(10.30) > 果园(9.64)。以上研究结果表明林地开垦为果园或坡耕地后容易导致土壤轻组有机碳氮的损失, 而坡耕地撂荒则有利于土壤活性有机碳氮的积累; 林地转变为坡耕地减弱了土壤有机碳氮的活性, 而林地转变为果园以及坡耕地撂荒均使土壤有机碳氮活性增强; 林地转变为坡耕地和果园加剧了土壤有机质的矿化, 相对而言, 坡耕地撂荒后有利于土壤有机质的固定。

关键词: 土地利用方式; 轻组有机质; 颗粒态有机质; C/N; 缙云山

中图分类号: X144 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)07-2669-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.2015.07.046

Impacts of Land Use Changes on Soil Light Fraction and Particulate Organic Carbon and Nitrogen in Jinyun Mountain

LEI Li-guo, JIANG Chang-sheng, HAO Qing-ju*

(Key Laboratory of Eco-environments in Three Gorges Reservoir Region, Ministry of Education, College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400715, China)

Abstract: Four land types including the subtropical evergreen broad-leaved forest, sloping farmland, orchard and abandoned land were selected to collect soil samples from 0 to 60 cm depth at the same altitude of sunny slope in the Jinyun Mountain in this study. Soil light fraction organic carbon and nitrogen (LFOC and LFON), and particulate organic carbon and nitrogen (POC and PON) were determined, and the distribution ratios and C/N ratios were calculated. The results showed that the contents of LFOC and LFON decreased significantly by 71.42% and 38.46% after the forest was changed into sloping farmland ($P < 0.05$) but the change was not significant when it was changed into orchard ($P > 0.05$), while the contents of LFOC and LFON increased significantly by 3.77 and 1.38 times after the sloping farmland was changed into abandoned land ($P < 0.05$). The contents of POC and PON did not vary markedly after the forest was converted into orchard or sloping farmland, while the POC and PON contents increased markedly by 4.12 and 1.25 times after the sloping farmland was abandoned. Those above results indicated that abandoned land was easy for active organic carbon and nitrogen accumulation; on the contrary, sloping farmland was easy to lose soil labile carbon and nitrogen. The LFOC and LFON distribution ratios were significantly reduced by 31.20% and 30.08%, respectively after the forest was changed into the sloping farmland, and increased by 18.74% and 20.33% respectively after the forest was changed into the orchard. Nevertheless, the distribution ratios of LFOC and LFON were changed little by converting the forest into the sloping farmland and orchard. The distribution ratios of LFOC, LFON, POC and PON all increased significantly after the farmland was abandoned ($P < 0.05$). Those results showed that the activity of soil organic carbon and nitrogen was enhanced after forest reclamation, while reduced after the sloping farmland was abandoned. The ratios of carbon to nitrogen in soil organic matter, light fraction organic matter and particulate organic matter were in the order of abandoned land (12.93) > forest (8.53) > orchard (7.52) > sloping farmland (4.40), abandoned land (16.32) > forest (14.29) > orchard (11.32) > sloping farmland (7.60), abandoned land (23.41) > sloping farmland (13.85) > forest (10.30) > orchard (9.64), which indicated that the degree of organic nitrogen mineralization was higher after forest cultivation

收稿日期: 2014-12-05; 修订日期: 2015-02-02

基金项目: 国家自然科学基金项目(41275160, 40975095); 中央高校基本科研业务费专项(XDJK2012A005, XDJK2013A009)

作者简介: 雷利国(1989~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为农田生态系统碳氮循环, E-mail: 346939693@qq.com

* 通讯联系人, E-mail: haoqingju@163.com

and lower after the sloping farmland was abandoned.

Key words: land use type; light fraction organic matter; particulate organic matter; C/N; Jinyun Mountain

地表土壤大约含有 2 500 Pg ($1 \text{ Pg} = 10^{15} \text{ g}$) 的碳, 其中 1 550 Pg 为有机碳 (soil organic carbon, SOC) 库^[1], 其储量的微弱变化都会导致大气圈中 CO_2 浓度发生较大变化^[2], 从而对全球碳平衡产生巨大的影响. 土地利用方式的改变对土壤有机碳的地吸存和动态变化有重要作用^[3]. 土壤活性有机碳是土壤中有效性较高、易被土壤微生物分解矿化的有机碳, 能够在土壤总有机碳变化之前反映土壤微小的变化^[4]. 土壤轻组有机碳 (light fraction organic carbon, LFOC) 和颗粒态有机碳 (particulate organic carbon, POC) 分别是活性有机质按其密度和结合颗粒大小分组, 其生物活性高、转换速度较快, 且比土壤有机碳中对土地管理措施反应更迅速的组分^[5,6], 对于准确评价土地利用变化对土壤碳过程的影响和土壤肥力具有重要意义^[7]. 土壤氮素营养是土壤肥力的重要物质基础, 是植物生长必需的营养元素, 而大多数表层土壤中 95% 以上的氮素为有机化合物^[8]. 土壤轻组有机氮 (light fraction organic nitrogen, LFON) 和颗粒态有机氮 (particulate organic nitrogen, PON) 是土壤有机氮中非保护性物理组分, 研究表明^[9], 土壤轻组组分氮含量明显高于全土氮含量, 且 LFON 占全土氮含量的比例较高, LFON 在氮循环中起显著作用, 具有很强的生物学活性, 是土壤养分的重要来源. PON 被认为是土壤有机氮中的非稳定性部分, 所以分析这些土壤颗粒组分中的氮对认识土壤氮的稳定性具有重要意义^[10].

土地利用与覆盖方式的改变对土壤有机碳氮的吸存和动态变化有重要作用^[11], 不仅可以通过影响地表的净初级生产量和植物残体的归还量影响土壤有机碳氮的输入, 也可以通过改变土壤的物理化学和生物过程而影响土壤有机碳氮的输出^[12]. 土地利用方式对不同有机碳组分影响不同^[13], 轻组有机碳和颗粒态有机碳对土地利用变化的响应更为迅速^[14]. Mao 等^[15] 的研究表明, 单一作物制的砂质黏壤土农田退耕还林后土壤 POC 及 PON 含量均显著增加. 吴建国等^[10] 研究也表明, 农田退耕还林能明显增加土壤 LFOC 和 POC 的含量, 而原状草地改变为农田后土壤 LFOC 与 POC 含量则降低^[16], 不同林地类型和管理措施影响土壤有机碳在密度组分和粒径组分中的分配^[17].

缙云山位于我国西南地区的重庆市, 是国家级

自然保护区, 保护区内土地利用形式多样. 缙云山的地带性植被为亚热带常绿阔叶林, 在建国初期, 随着社会的安定人口数量激增, 曾进行过较大规模的垦林开荒, 但自 20 世纪末期以来, 随着经济的快速发展以及 1998 年长江流域洪水的暴发, 引发了退耕还草 (林) 生态环境保护的热潮. 土地利用变化对土壤有机质具有明显的影响^[18], 特别是轻组及颗粒态有机质的数量与组成对土地利用变化具有强烈响应^[19,20], 缙云山土地利用方式的变化无疑会对土壤碳氮的行为产生一定的影响, 但目前这些影响还不是很清楚. “空间换时间”是研究土壤性质对土地利用变化响应的有效手段之一, 本文于缙云山阳坡同一海拔高度处选择本底条件基本一致、土地利用史清晰的亚热带常绿阔叶林、果园、坡耕地以及撂荒地, 分析不同土地利用方式对土壤轻组及颗粒态有机碳氮的影响, 以期增强土壤的固碳固氮能力提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 研究区自然概况

缙云山位于重庆市区西北部, 东经 $106^{\circ}17'43''$ ~ $106^{\circ}24'50''$, 北纬 $29^{\circ}41'08''$ ~ $29^{\circ}52'03''$, 海拔高度为 350 ~ 951.5 m, 土地总面积 7 600 hm^2 . 缙云山地处四川盆地平行岭谷区, 属典型的亚热带温暖湿润季风气候, 年平均气温 13.6°C , 年平均降水 1 611.8 mm, 年均日照 1 293.9 h, 年平均蒸发量 777.1 mm. 缙云山的地质岩层由三叠纪须家河组厚层砂岩夹薄层泥页岩和煤线组成, 其土地类型主要以山地黄壤居多, 此外还有棕黄壤及水稻土. 缙云山的地带性植被为亚热带常绿阔叶林, 林地表层土壤有机碳含量为 $22.89 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 全氮含量为 $1.67 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 碱解氮为 $171.38 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 硝态氮为 $16.06 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 铵态氮为 $6.13 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 全磷为 $140.30 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 有效磷为 $7.10 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 有效硫为 $139.04 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 速效钾为 $81.49 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, pH 为 3.95, 土壤容重为 $1.28 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$.

1.2 样品采集与处理

土壤样品于 2011 年 6 月采自缙云山阳坡同一海拔高度处, 土壤为酸性黄壤. 共选择林地、坡耕地、果园和撂荒地这 4 种土地利用方式. ①林地, 为亚热带常绿阔叶林, 是当地亚热带季风气候下发育

的地带性植被,主要树种为四川大头茶(*Gordonia acuminata*)、白毛新木姜子(*Neolitea aurata*)和四川杨桐(*Adinandra bockiana*);②坡耕地,四季旱地,由亚热带常绿阔叶林开垦而来,约有 60 年的耕作历史,主要种植玉米、红薯以及蚕豆等;③果园,由亚热带常绿阔叶林开垦而来,约有 60 年的栽培历史,为大枣(*Ziziphus jujuba* Mill)和橘子(*Citrus reticulata*)种植园;④撂荒地,由坡耕地弃耕撂荒而形成,弃耕历史约为 14 年,地面植被为生长旺盛的杂草,无灌木和乔木。林地和撂荒地无人为活动的管理和干扰,坡耕地与果园除施加无机肥外,还施有粪肥和绿肥;另外,坡耕地不实施秸秆还田,果园剪枝后移出做薪柴。林地设置 20 m × 20 m,果园设置 10 m × 10 m,坡耕地及撂荒地设置 5 m × 5 m 的样区各 3 个,每个样区里设置 3 个采样点。利用挖剖面取样法在各采样点分层取 0 ~ 10、10 ~ 20、20 ~ 30、30 ~ 40、40 ~ 50、50 ~ 60 cm 的土样,用四分法取出足够的样品,除去砾石和根系风干后研磨,分别过 2 mm 和 0.25 mm 筛。

1.3 项目测定与方法

轻组分离方法参考 Janzen 等^[21]的方法,并进行部分改进:称取过 2 mm 土壤筛的风干土样 10 g 置于 100 mL 离心管中,加入 50 mL NaI 溶液(密度 1.8 g·cm⁻³),用手轻轻摇动离心管,使土壤与重液混合均匀,而后混合物在往复振荡机上振荡 60 min,振速每分钟往复 250 次。分散后的悬浮液在 3 000 r·min⁻¹ 离心 10 min。将混合物表面悬浮的轻组物质轻轻倒于装有 0.45 μm 滤膜的滤斗中抽气过滤,在剩余悬浮液中加入 25 ~ 30 mL NaI,重组残留物在离心管中再次悬浮,重复上述过程 2 ~ 3 次,直至没有可见的轻组物质,至少用 75 mL 0.01 mol·L⁻¹ CaCl₂ 冲洗以除去轻组中 NaI,接着另加 100 ~ 150 mL 去离子水冲洗轻组。然后将滤纸上的轻组洗到预先称重的器皿中,在 65℃ 下烘干,获得轻组干重。每个土样分离轻组时一般 3 次重复,但在轻组物质含量很低时,为获得足够多的轻组物质用于分析,可增加重复次数。每个土壤样品的所有轻组样品合并,土样研磨过 0.25 mm 筛后分别用重铬酸钾-外加热法和半微量凯氏定氮法测定重组土样中的有机碳和全氮含量。

土壤 POC、PON 测定^[5]:取 20.00 g 过 2 mm 筛的干土,放入 250 mL 塑料瓶,加入 100 mL (NaPO₃)₆ (5 g·L⁻¹),先手摇 15 min,再用振荡器 (90 r·min⁻¹) 振荡 18 h。把土壤悬液过 53 μm 筛,

反复用蒸馏水冲洗,把所有留在筛子上的物质(除去植物根系等物质),在 60℃ 下烘 48 h 至恒重,并计算其所占土壤的百分含量(即颗粒态质量分数)。将颗粒态土样研磨过 0.25 mm 筛后分别用重铬酸钾-外加热法和半微量凯氏定氮法测定重组土样中的有机碳和全氮含量。

土壤 SOC 和 TN 分别采用重铬酸钾-外加热法和半微量凯氏定氮法测定^[22];硝态氮-铵态氮:采用 KCl 浸提,流动注射分析仪(FIAstar5000)进行测定;硫酸-高氯酸消解法测定全磷^[22];碳酸氢钠法测定速效磷^[22];火焰光度法测定速效钾^[22];土壤有效硫采用磷酸盐-乙酸浸提-硫酸钡比浊法测定^[22];PSHJ4-A 型酸度计测定 pH,其土水比为 1:2^[22];土壤容重:采用环刀法取样,于 105℃ 烘干测定^[22]。

1.4 数据计算

LFOC 含量(g·kg⁻¹) = 轻组物质中土壤有机碳(g·kg⁻¹) × (轻组物质占土壤的质量分数)

LFON 含量(g·kg⁻¹) = 轻组物质中土壤有机氮(g·kg⁻¹) × (轻组物质占土壤的质量分数)

LFOC 分配比例(%) = LFOC 含量/SOC 含量 × 100%

LFON 分配比例(%) = LFON 含量/TN 含量 × 100%

POC 含量(g·kg⁻¹) = 颗粒物中土壤有机碳含量(g·kg⁻¹) × 颗粒物占土壤的质量分数

PON 含量(g·kg⁻¹) = 颗粒物中土壤全氮含量(g·kg⁻¹) × 颗粒物占土壤的质量分数

POC 分配比例(%) = POC 含量/SOC 含量 × 100%

PON 分配比例(%) = PON 含量/TN 含量 × 100%

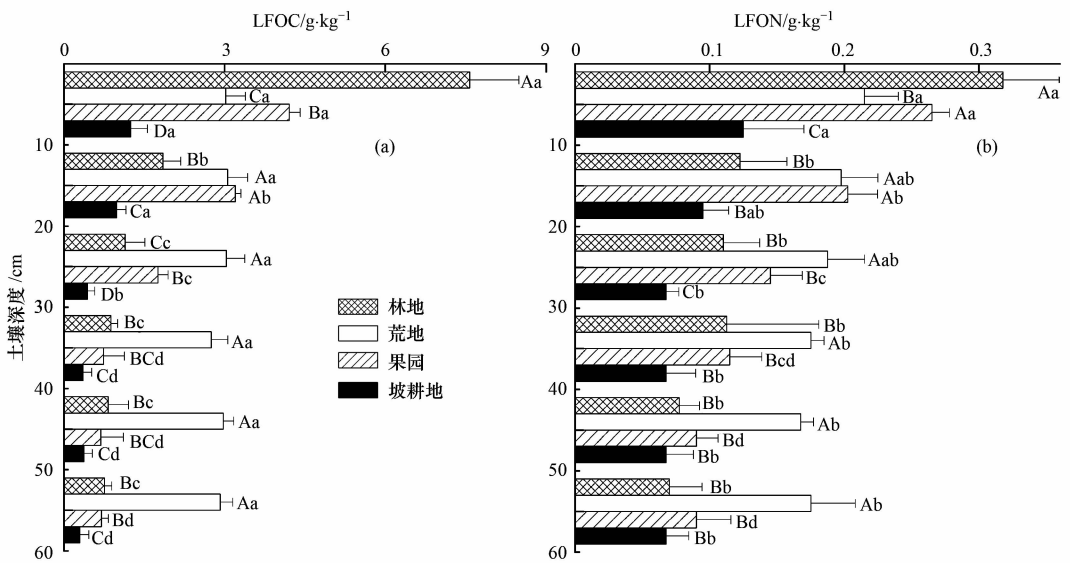
1.5 统计分析

采用 SPSS 19.0 软件对实验数据进行统计分析,当其通过方差齐次性检验时($P > 0.05$),则进行均值间最小差异显著性(LSD)检验;若其不能通过方差齐次性检验($P < 0.05$),则采用 Tamhane's T2 进行差异显著性检验。采用 Origin 8.0 作图。

2 结果与分析

2.1 土地利用方式对 LFOC 和 LFON 的影响

图 1 为不同土地利用方式下各土层 LFOC 和 LFON 含量的剖面分布。图 1(a)可以看出,除撂荒地 LFOC 含量剖面分布变化不明显外,其它 3 种土地利用方式均表现为随土壤深度的增加,LFOC 含



图中不同大写字母表示同一土壤深度不同土地利用类型的 LFOC 及 LFON 在 5% 水平上的差异性,不同小写字母表示同一土地利用类型不同土壤深度的 LFOC 及 LFON 在 5% 水平上的差异性,下同

图 1 不同土地利用类型下 LFOC 及 LFON 含量的剖面分布

Fig. 1 Vertical distributions of LFOC and LFON contents in the different land use types

量降低的趋势. 其中,林地与坡耕地 LFOC 主要富集在 0~20 cm 土层,果园则富集在 0~30 cm 土层.

比较同一土层不同土地利用方式下土壤 LFOC 含量可以看出,不同土地利用方式土壤 LFOC 含量在各土层均存在明显差异($P < 0.05$). 除 0~10 cm 土层林地最高外,其它土层均为撂荒地最高,坡耕地在所有土层上均为最低. 在 0~60 cm 土壤深度内,土壤 LFOC 的平均含量为撂荒地($2.96 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$) > 林地($2.17 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$) > 果园($1.88 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$) > 坡耕地($0.62 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$),方差分析结果表明,林地转变为坡耕地后,土壤中 LFOC 含量显著降低 71.42% ($P < 0.05$),但转变为果园后降低不明显;而坡耕地撂荒后,土壤中 LFOC 含量增加 3.77 倍($P < 0.05$).

图 1(b)可以看出,4 种土地利用方式下 LFON 含量均呈现出随土壤深度增加而降低的趋势. 其中,果园的剖面分布变化最为明显,林地 LFON 呈现明显的表层富集现象,其在 0~10 cm 土层的含量为 10~60 cm 土层的 2.65~4.70 倍,撂荒地和坡耕地土壤 LFON 含量的剖面变化较为平缓.

与 LFOC 相比,土地利用方式对各土层 LFON 含量的影响要小一些. 与 LFOC 相同,除 0~10 cm 土层林地最高外,其它土层均为撂荒地最高,坡耕地在所有土层上均为最低. 在 0~60 cm 土壤深度内,土壤 LFON 的平均含量为撂荒地($0.19 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$) > 果园($0.15 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$) > 林地($0.13 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$) > 坡耕地($0.08 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$),方差分析结果表明,林地转变为果

园后,土壤 LFON 含量变化不明显,而开垦为坡耕地后显著降低了 38.46% ($P < 0.05$);而坡耕地撂荒后,土壤 LFON 含量显著增加 1.38 倍($P < 0.05$).

表 1 为不同土地利用方式下土壤 LFOC、LFON 的分配比例. 从中可以看出,不同土地利用方式下土壤 LFOC、LFON 分配比例的垂直分布规律有所差异. 其中,林地、果园和坡耕地 LFOC、LFON 分配比例随着土壤深度的增加而大致呈下降趋势,而撂荒地 LFOC、LFON 分配比例则在整个剖面上变化不大. 在 0~60 cm 土壤深度内,不同土地利用方式 LFOC 分配比例平均值为撂荒地(20.37%) > 果园(20.13%) > 林地(16.59%) > 坡耕地(11.70%),LFON 为果园(29.53%) > 撂荒地(26.14%) > 林地(24.88%) > 坡耕地(17.12%). 坡耕地土壤 LFOC、LFON 分配比例均显著低于其它 3 种土地利用方式($P < 0.05$);林地转变为果园后,LFOC、LFON 分配比例分别显著增加 18.74% 和 20.33% ($P < 0.05$).

2.2 土地利用方式对 POC 和 PON 的影响

图 2 为不同土地利用方式下各土层 POC 和 PON 含量的分布. 从中可以看出,不同土地利用方式下土壤 POC、PON 含量的垂直分布特征有所差异,但均随着土壤深度的增加大致呈逐渐降低的趋势.

林地、果园和坡耕地 POC、PON 含量均表现出明显的表层富集特征. 其中林地主要在 0~10 cm

表 1 不同土地利用方式土壤 LFOC、LFON 分配比例¹⁾/%

土壤深度 /cm	LFOC/SOC				LFON/TN			
	林地	撂荒地	果园	坡耕地	林地	撂荒地	果园	坡耕地
0~10	33.11±2.00Aa	24.03±3.99Ba	34.75±0.88Aa	22.17±2.81Ba	18.51±1.66Aa	18.93±1.03Aa	22.53±0.56Aa	13.04±2.32Ba
10~20	28.64±2.58Aab	27.22±1.68Aa	30.68±0.51Aa	20.59±1.85Ba	17.68±2.56Aa	21.04±1.30Aa	22.66±1.30Aa	11.55±1.20Aa
20~30	22.25±3.65BCb	27.05±1.55ABa	32.39±1.73Aa	14.98±2.32Ca	17.16±2.19ABa	19.88±1.49Aa	21.54±1.95ABab	10.79±0.71Ba
30~40	20.35±1.48Ab	25.98±1.49Aa	26.86±7.09Aa	15.37±2.36Ba	18.02±5.52ABa	20.84±0.45Aa	18.62±1.71ABb	10.99±1.81Ba
40~50	22.43±5.19Ab	26.31±0.89Aa	25.41±7.74Aa	16.10±3.35Aa	14.34±1.40ABa	20.62±0.55Ca	17.34±1.48ACab	11.74±1.72Ba
50~60	22.43±2.00Ab	29.38±1.20Aa	27.07±2.55Aa	13.46±3.72Ba	14.64±2.22ABa	20.83±2.24Aa	18.04±2.70ABab	12.02±1.29Ba
平均值	24.87±1.46B	26.66±0.82AB	29.53±1.76A	17.11±1.26C	16.72±1.11B	20.36±0.50A	20.12±0.78A	11.69±0.60C

1) 表中不同大写字母表示同一土壤深度不同土地利用类型在 5% 水平上的差异显著性; 不同小写字母表示同一土地利用类型不同土壤深度在 5% 水平上的差异显著性, 下同

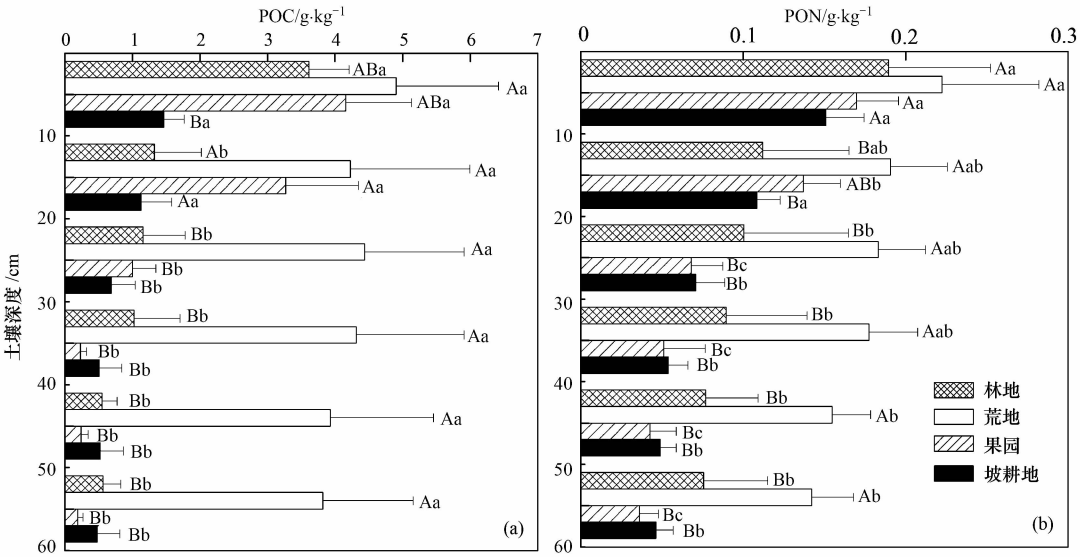


图 2 不同土地利用类型下 POC 和 PON 含量的剖面分布

Fig. 2 Vertical distributions of POC and PON contents in the different land use types

土层富集,其含量为其余各土层的 2.73 ~ 6.40 倍; 果园和坡耕地则主要富集在 0 ~ 20 cm 土层,且显著高于其他土层($P < 0.05$); 撂荒地 POC 含量剖面变化不大,其含量 3.82 ~ 4.90 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间。

与 LFOC、LFON 比较,土地利用方式对 POC、PON 含量的影响相对较小(图 2)。POC 含量在 0 ~ 30 cm 土层内为耕地最低,而在 30 ~ 60 cm 土层内为果园最低; PON 含量在 0 ~ 20 cm 土层内为耕地最低,而在 20 ~ 60 cm 土层内为果园最低。在 0 ~ 60 cm 土壤深度内,土壤 POC 和 PON 的平均含量分别为撂荒地($4.10 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) > 果园($1.51 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) > 林地($1.37 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) > 坡耕地($0.80 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)、撂荒地($0.18 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) > 林地($0.11 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) > 果园($0.08 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) = 坡耕地($0.08 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)。其中林地、果园和坡耕地 POC 及 PON 含量均无显著性差异; 与坡耕地相比,撂荒地 POC、PON 含量分别显著增加

4.12 和 1.25 倍($P < 0.05$)。

表 2 为不同土地利用方式下土壤 POC、PON 的分配比例。从中可以看出,不同土地利用方式下土壤 POC、PON 分配比例的剖面分布规律有所差异。其中,林地和撂荒地 POC、PON 分配比例均随着土壤深度的增加呈先升高后降低趋势,但各土层差异不显著,POC 分配比例变化范围分别为 14.87% ~ 18.53% 和 32.83% ~ 38.63%,PON 分配比例变化范围分别为 11.43% ~ 16.03% 和 18.20% ~ 21.40%; 而果园和坡耕地 POC、PON 分配比例则表现为随土壤深度的增加而大致呈下降趋势,其 POC 分配比例变化范围分别为 6.83% ~ 33.90% 和 17.73% ~ 28.57%,PON 分配比例变化范围分别为 7.60% ~ 15.40% 和 8.60 ~ 15.83%。在 0 ~ 60 cm 土壤深度内,林地、撂荒地、果园及坡耕地 POC 平均分配比例分别为 16.81%、35.79%、17.43% 和

表 2 不同土地利用方式土壤 POC 和 PON 分配比例/%

Table 2 Proportions of POC to total organic carbon and PON to total nitrogen in the different land use types/%

土壤深度 /cm	POC/SOC				PON/TN			
	林地	撂荒地	果园	坡耕地	林地	撂荒地	果园	坡耕地
0~10	15.77±2.51Ba	32.83±6.06Aa	33.90±6.44Aa	28.57±5.36Aa	11.43±2.54Ba	19.40±2.40Aa	14.23±1.13ABab	15.83±0.81ABa
10~20	17.17±5.98Ba	35.20±9.11Aa	29.93±6.29Aab	21.07±4.50Ba	16.03±1.87Ba	20.53±2.14Aa	15.40±0.21Ba	14.40±2.45Bab
20~30	18.50±7.19Ba	38.63±8.25Aa	17.57±4.84Bbc	21.70±2.06Ba	14.53±3.14ABa	20.17±2.12Aa	10.47±2.13Babc	12.13±3.14Bab
30~40	18.53±7.84Ba	38.63±9.15Aa	8.17±3.34Cc	17.83±3.84Ba	13.87±2.49ABa	21.40±2.86Aa	8.93±3.03Bbc	9.47±1.77Bab
40~50	14.87±1.10Ba	32.47±7.21Aa	8.17±3.49Cc	20.40±5.52Ba	14.20±2.26ABa	19.83±2.73Aa	9.10±2.66Babc	9.00±1.90Bb
50~60	16.00±1.75Ba	36.97±10.05Aa	6.83±3.22Cc	17.73±5.36Ba	15.87±4.24ABa	18.20±4.06Aa	7.60±1.90Bc	8.60±1.69Bb
平均值	16.81±1.80B	35.79±2.95A	17.43±3.11B	21.22±1.81B	14.32±1.05B	19.92±0.99A	10.96±1.00B	11.57±0.98B

21.22%；PON 平均分配比例分别为 14.32%、19.92%、10.96% 和 11.57%。其中撂荒地土壤 POC、PON 分配比例显著高于林地、果园、坡耕地 ($P<0.05$)，而后三者差异均不显著。

2.3 不同利用方式土壤轻组和颗粒态组分碳氮比

由图 3 可以看出,林地、撂荒地、果园和坡耕地 SOC/TN 分别为 8.35、12.93、7.52 和 4.40, LFOC/LFON 分别为 14.29、16.32、11.32 和 7.60, POC/PON 分别为 10.30、23.41、9.64 和 13.85。由此可以看出,3 种土壤有机质组分中,颗粒态有机质碳氮比最高,轻组有机质居中,而土壤总有机质最低。4 种土地利用方式中,撂荒地的 3 种土壤有机质组分的碳氮比均最高,坡耕地 SOC/TN 及 LFOC/LFON 均为最低,果园 POC/PON 最低。单因素方差分析结果表明,坡耕地撂荒后土壤 SOC/TN、LFOC/LFON 和 POC/PON 均显著增加 ($P<0.05$),分别为撂荒前的 2.93、2.15 和 1.69 倍;林地转变为坡耕地后,土

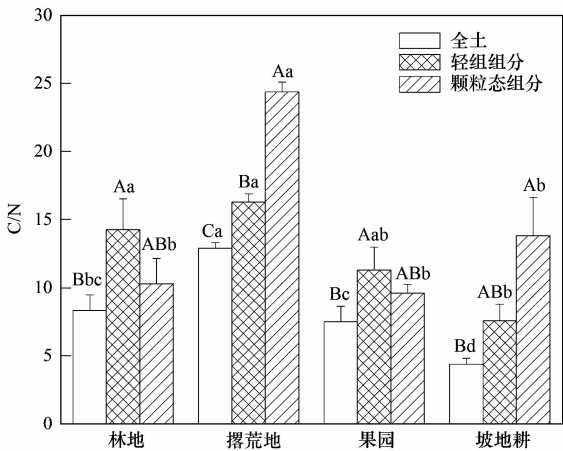
壤 SOC/TN 及 LFOC/LFON 均显著降低 ($P<0.05$),而 POC/PON 则变化不大;林地转变为果园后,其各组分碳氮比均无明显变化。

3 讨论

3.1 土地利用方式对 LFOC 和 LFON 的影响

土壤 LFOC 和 LFON 主要来源是动植物残体和微生物,且其含量反映了土壤中动植物残体的输入、固持和分解的平衡程度与水平,其差异与植被的凋落物和枯死根系的归还量和土壤管理方式有关^[23,24]。本研究表明,不同利用方式下,土壤 LFOC 和 LFON 的剖面分布存在一定的差异,即林地、果园和坡耕地的 LFOC 和 LFON 含量剖面变化较大,而撂荒地剖面变化不明显。这主要是因为,林地和果园土壤表面覆盖的大量枯枝落叶及草被层可为表层土壤提供丰富的轻组组分来源,而表层以下根系粗大难于分解,轻组组分来源缺乏,从而导致 LFOC 和 LFON 含量相对较低;坡耕地 LFOC 和 LFON 表层富集的原因可能是由于施肥所致,如前所述,当地坡耕地除施用化肥外,还施有粪肥和绿肥等有机肥。有研究表明,NPK 肥以及有机肥的添加均能显著提高土壤轻组有机质的含量^[25],这主要是由于施用化肥和有机肥使作物的生物量加大,土壤中的根茬及残落物增多。此外,化肥的施用还可以提高作物残茬和根系向有机质的转化效率,使轻组有机质的增加量大于矿化损失量,从而使得轻组有机质增加^[26,27]。因为化肥和有机肥主要施加在土壤表层,故而导致土壤 LFOC 和 LFON 在 0~20 cm 土层富集;撂荒地地面植被为生长旺盛的草本植物,每年地上植物的枯死为表层土壤提供了大量的轻组组分来源,而且草本植物的根系较细,易于分解腐烂,使表层以下土层也有较多的轻组来源^[28],因而使 LFOC 及 LFON 在 0~60 cm 土层分布较均匀。

不同土地利用方式土壤 LFOC 及 LFON 含量的



图中不同大写字母表示同一土地利用类型不同组分碳氮比在 5% 水平上的差异性,不同小写字母表示同一组分碳氮比不同土地利用类型在 5% 水平上的差异性

图 3 不同利用方式土壤及其轻组和颗粒态组分碳氮比

Fig. 3 Ratios of carbon to nitrogen in soil organic matter, light fraction matter and particulate organic matter in the four land use types

差异, 主要与不同土地利用方式地上植被密度、凋落物数量、地表枯枝落叶现存量、细根的分布以及人为干扰等因素密切相关。研究结果表明, 林地转变为坡耕地后土壤 LFOC 及 LFON 含量显著降低, 转变为果园后变化不明显, 而坡耕地撂荒后 LFOC 及 LFON 含量有明显增加。林地和撂荒地因为没有人类活动的干扰, 地表堆积了厚厚的枯枝落叶层可为土壤轻组有机质提供充足的来源, 而且草本植物根系的转化也是土壤轻组有机质的主要来源; 另外, 林地和撂荒地地表植被生长旺盛, 植被密度大可以提高土壤的湿度, 从而降低有机物的降解速率^[29]。虽然坡耕地在当地有施加绿肥和粪肥等有机肥的习惯, 但由于地处斜坡和常年翻耕, 加剧了土壤有机碳的流失和分解^[30], 加之由于作物的收获以及秸秆的清理, 有机物的归还量少, 缺少 LFOC 及 LFON 的供给来源。

不同土地利用方式和土层深度, 土壤有机碳氮含量和土壤轻组有机碳氮含量都均有所差异, 由于受到影响的程度不同, 这些差异就表现在土壤轻组有机碳氮的分配比例上。土壤轻组有机碳和氮一般富集在土壤表层, 所以轻组有机碳氮分配比例基本上均随土层深度的增加而下降^[31], 吴建国等^[32]对宁夏固原地区不同土地利用方式的研究表明, LFOC 占 SOC 的比例随土层深度增加而降低, 在土壤剖面上表现出明显的层次性。杨玉盛等^[33]对福建三明格氏栲天然林及在其采伐迹地上营造的 33 年生格氏栲人工林和杉木人工林研究表明, LFOC 分配比例均随土壤深度的加深而下降。这些研究结果均与本研究林地、果园及坡耕地的一致, 即 LFOC 及 LFON 分配比例随着土壤深度的增加而大致呈下降趋势。但本研究中撂荒地 LFOC 与 LFON 分配比例则随土壤深度的增加变化并不明显, 这是因为撂荒地土壤 LFOC 及 LFON 在整个剖面分布较均匀, 且其 SOC 与 TN 的剖面变化也不大^[34]。研究结果表明, 坡耕地土壤 LFOC 及 LFON 分配比例显著低于其他 3 种利用方式, 这除了与坡耕地植物残体的归还量较少有关外, 耕作也是一个重要原因, 有研究发现, 耕作可通过降低土壤团聚体稳定性而降低轻组有机碳含量及其分配比例^[35], 本实验数据表明, 林地转变为坡耕地后将导致大团聚体破碎化从而使土壤团聚体稳定性降低^[36]。

3.2 土地利用方式对 POC 和 PON 的影响

POC 是与土壤结构具有密切关系的有机碳组分, 也是一种非保护性有机碳组分。PON 被认为是

土壤有机氮中的非稳定性部分, 与有机碳和氮的矿化速率显著相关, 对 N 矿化和周转有显著的贡献^[37], 是反映土壤供氮能力的重要指标。

不同土地利用方式下, POC、PON 含量的剖面分布变化与 LFOC、LFON 相似, 即林地、果园和坡耕地的 POC 与 PON 含量剖面变化较大, 而撂荒地剖面变化不明显。与 LFOC 及 LFON 不同, 在 0~60 cm 土层, 林地转变为坡耕地和果园后, 其 POC 与 PON 含量降低不显著, 这一定程度上表明 POC、PON 对土地利用方式响应不如 LFOC、LFON 敏感, 与 Carter 等^[38]的研究相似。但也有研究表明^[39], 耕作可以使土壤颗粒态有机碳加速分解。而坡耕地撂荒后, POC 和 PON 含量均显著增加, 这主要归因于坡耕地撂荒后植物残体归还量的增加以及土壤结构的改善等。

POC 与 PON 分配比例反映土壤有机碳氮中非保护性组分的相对数量。土壤 POC 含量反映了土壤中非保护性有机碳数量, POC 分配比例则反映了土壤中非保护性有机碳或非稳定性有机碳的相对数量, 比例越高, 有机碳中不稳定部分就越高^[40], PON 分配比例则用来表征土壤中氮素的稳定性, 其值越大, 表明土壤氮中易分解部分也就越多^[35]。本研究表明, 林地转变为坡耕地和果园后, POC 及 PON 分配比例在 0~60 cm 土层差异不显著, 但在 0~20 cm 土层明显升高。这可能是由于坡耕地和果园表层土壤有机肥的添加所致。而坡耕地撂荒后, POC 及 PON 分配比例几乎在所有土层均显著增加, 这说明坡耕地撂荒后土壤有机碳氮的活性增强, 具有更高的供肥潜力。

3.3 土地利用方式对土壤各有机质组分碳氮比的影响

土壤有机质 C/N 是影响有机质矿化分解速率进而影响有机质供肥能力的重要因素, 是评价土壤微生物活性及有机质矿化程度的重要指标^[41], C/N 介于 25~30 之间, 既不释放也不固定氮; C/N 小于 25 则释放出氮; C/N 大于 30 时, 土壤微生物还要利用土壤中一部分速效氮来构造自己的身体, 所以不但不会释放氮, 反而还发生氮固定现象^[42]。本研究 4 种土地利用方式 0~60 cm 土层中 SOC/TN、LFOC/LFON、POC/PON 均值分别介于 4.40~12.93、7.60~16.32、9.64~23.41 之间, 均低于 25, 说明 4 种土地利用方式下各组分有机质的矿化能力较强。另外, LFOC/LFON、POC/PON 均高于 SOC/TN, 表明相对于土壤总有机质而言, 轻组有机

质及颗粒态有机质中氮的有效性要低. Boone^[43]观测了玉米地、松树林地和栎树林地轻组的净氮矿化势,发现轻组较高的 C/N 导致净氮矿化势较低,从而使得轻组氮的有效性降低,与本文的研究结果相似.

C/N 的升高对土壤微生物的活动能力有一定的限制作用,使有机质和有机氮的分解矿化速度减慢,土壤固定有机碳能力提高^[44]. 林地转为坡耕地后,土壤 SOC/TN、LFOC/LFON 显著降低,而坡耕地撂荒后其 SOC/TN、LFOC/LFON、POC/PON 又显著增加,说明林地转变为坡耕地加剧了土壤有机质的矿化,而坡耕地撂荒后有利于土壤有机质的蓄积,与笔者前期对 SOC 和 TN 的研究结果一致. 笔者前期的研究表明^[34],在 0~60 cm 的土壤深度内,不同土地利用方式下 SOC 储量为撂荒地(108.06 mg·hm⁻²)>林地(62.21 mg·hm⁻²)>果园(54.54 mg·hm⁻²)>坡耕地(31.81 mg·hm⁻²); TN 储量为撂荒地(8.64 mg·hm⁻²)>果园(6.81 mg·hm⁻²)>林地(6.68 mg·hm⁻²)>坡耕地(6.53 mg·hm⁻²). 林地垦殖为坡耕地后导致 SOC 和 TN 储量降低,而坡耕地弃耕为撂荒地后则使 SOC 和 TN 储量显著升高.

4 结 论

(1) 4 种土地利用方式下,土壤 LFOC、LFON、POC、PON 含量均随着土壤深度的增加而呈逐渐降低的趋势,且其在 0~60 cm 土层内的平均含量,均为撂荒地最大,林地和果园次之,坡耕地最小. 表明林地的垦殖导致土壤活性有机碳氮的损失,而坡耕地撂荒有利于土壤活性有机碳氮的积累.

(2) 林地转化为坡耕地后,土壤 LFOC、LFON 分配比例均显著降低,而 POC、PON 分配比例无显著变化;坡耕地撂荒后,LFOC、LFON、POC、PON 分配比例均显著增加. 表明林地转变为坡耕地后土壤有机碳氮活性减弱,而坡耕地撂荒后土壤有机碳氮活性增强.

(3) 林地转为坡耕地后,土壤 SOC/TN、LFOC/LFON 显著降低,而坡耕地撂荒后其 SOC/TN、LFOC/LFON、POC/PON 又显著升高,表明林地转变为坡耕地加剧了土壤有机质的矿化,而坡耕地撂荒后有利于土壤有机质的固定.

参考文献:

[1] Lal R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security[J]. Science, 2004, **304**(5677): 1623-1627.

[2] 苏永红,冯起,朱高峰,等. 土壤呼吸与测定方法研究进展[J]. 中国沙漠, 2008, **28**(1): 57-65.

[3] Tian H, Melillo J M, Kicklighter D W, *et al.* Climatic and biotic controls on annual carbon storage in Amazonian ecosystems[J]. Global Ecology & Biogeography, 2000, **9**(4): 315-335.

[4] Karlen D L, Rosek M J, Gardner J C, *et al.* Conservation reserve program effects on soil quality indicators[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1999, **54**(1): 439-444.

[5] Cambardella C A, Elliott E T. Carbon and nitrogen distribution in aggregates from cultivated and native grassland soils[J]. Soil Science Society of America Journal, 1993, **57**(4): 1071-1076.

[6] Zhang J B, Song C C, Yang W Y. Tillage effects on soil carbon fractions in the Sanjiang Plain, Northeast China [J]. Soil & Tillage Research, 2007, **93**(1): 102-108.

[7] Carter M R, Gregorich E G, Angers D A, *et al.* Organic C and N storage, and organic C fractions, in adjacent cultivated and forested soils of eastern Canada[J]. Soil & Tillage Research, 1998, **47**(3-4): 253-261.

[8] 武冠云. 土壤有机氮的形态、分布及其易分解性[J]. 土壤通报, 1986, **17**(2): 91-95.

[9] Malhi S S, Harapiak J T, Nyborg M, *et al.* Total and light fraction organic C in a thin Black Chernozemic grassland soil as affected by 27 annual applications of six rates of fertilizer N [J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2003, **66**: 33-41.

[10] 吴建国,艾丽. 土壤颗粒组分中氮含量及其与海拔和植被的关系[J]. 林业科学, 2008, **44**(6): 10-19.

[11] Murty D, Kirschbaum M U F, Macmurtrie R E, *et al.* Does conversion of forest to agricultural land change soil carbon and nitrogen? A review of literature [J]. Global Change Biology, 2002, **8**(2): 105-123.

[12] Zhou T, Shi P J. Impacts of land use change on soil organic carbon change in China [J]. Advances in Earth Science, 2006, **21**(2): 138-143.

[13] Del Galdo I, Six J, Peressotti A, *et al.* Assessing the impact of land-use change on soil C sequestration in agricultural soils by means of organic matter fractionation and stable C isotopes[J]. Global Change Biology, 2003, **9**(8): 1204-1213.

[14] 曾宏达,杜紫贤,杨玉盛,等. 城市沿江土地覆被变化对土壤有机碳和轻组有机碳的影响[J]. 应用生态学报, 2010, **21**(3): 701-706.

[15] Mao R, Zeng D H, Li L J, *et al.* Changes in labile soil organic matter fractions following land use change from monocropping to poplar-based agroforestry systems in a semiarid region of Northeast China [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2012, **184**(11): 6845-6853.

[16] 孟凡乔,况星,张轩,等. 土地利用方式和栽培措施对农田土壤不同组分有机碳的影响[J]. 农业环境科学学报, 2009, **28**(12): 2512-2519.

[17] Shang S Y, Jiang P K, Scott X. *et al.* Soil organic carbon in particle size and density fractionations under four forest vegetation-land use types in subtropical China forests [J]. Forest, 2014, **5**(6): 1391-1408.

- [18] 盛浩, 周萍, 李洁, 等. 中亚热带山区深层土壤有机碳库对土地利用变化的响应[J]. 生态学报, 2014, **34**(23): 7004-7012.
- [19] 马昕昕, 许明祥, 张金, 等. 黄土丘陵区不同土地利用类型下深层土壤轻组有机碳剖面分布特征[J]. 植物营养与肥料学报, 2013, **19**(6): 1366-1375.
- [20] 李维福, 解宏图, 何红波, 等. 颗粒有机质的来源、测定及其影响因素[J]. 生态学杂志, 2007, **26**(11): 1849-1856.
- [21] Janzen H H, Campbell C A, Brandt S A, *et al.* Light-fraction organic matter in soils from long-term crop rotations [J]. Soil Science Society of America Journal, 1992, **56**(6): 1799-1806.
- [22] 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.
- [23] 刘梦云, 常庆瑞, 杨香云. 黄土台塬不同土地利用方式下土壤碳组分的差异[J]. 植物营养与肥料学报, 2010, **16**(6): 1418-1425.
- [24] Sodhi G P S, Beri V, Benbi D K. Soil aggregation and distribution of carbon and nitrogen in different fractions under long-term application of compost in rice-wheat system [J]. Soil & Tillage Research, 2009, **103**(2): 412-418.
- [25] 尹云峰, 蔡祖聪, 钦绳武. 长期施肥条件下潮土不同组分有机质的动态研究[J]. 应用生态学报, 2005, **16**(5): 875-878.
- [26] 杨景成, 韩兴国, 黄建辉, 等. 土壤有机质对农田管理措施的动态响应[J]. 生态学报, 2003, **23**(4): 787-796.
- [27] 宋震震, 李絮花, 李娟, 等. 有机肥和化肥长期施用对土壤活性有机氮组分及酶活性的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2014, **20**(3): 525-533.
- [28] 邱莉萍, 张兴昌, 程积民. 土地利用方式对土壤有机质及其碳库管理指数的影响[J]. 中国环境科学, 2009, **29**(1): 84-89.
- [29] Parshotam A, Saggar S, Searle P L, *et al.* Carbon residence times obtained from labelled ryegrass decomposition in soils under contrasting environmental conditions [J]. Soil Biology & Biochemistry, 2000, **32**(1): 75-83.
- [30] Nascente A S, Li Y C, Crusciol C A C. Cover crops and no-till effects on physical fractions of soil organic matter [J]. Soil & Tillage Research, 2013, **130**(8): 52-57.
- [31] 谢锦升, 杨玉盛, 解明曙, 等. 植被恢复对退化红壤轻组有机质的影响[J]. 土壤学报, 2008, **45**(1): 170-175.
- [32] 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.
- [33] 杨玉盛, 刘艳丽, 陈光水, 等. 格氏栲天然林与人工林土壤非保护性有机 C 含量及分配[J]. 生态学报, 2004, **24**(1): 1-8.
- [34] 李鉴霖, 江长胜, 郝庆菊, 等. 缙云山土地利用方式对土壤有机碳及全氮的影响[J]. 西北农林科技大学学报, 2013, **41**(11): 137-145.
- [35] Conteh A, Blair G J, Macleod D A, *et al.* Soil organic carbon changes in cracking clay soils under cotton production as studied by carbon fractionation [J]. Australian Journal of Agricultural Research, 1997, **48**(7): 1049-1058.
- [36] 李鉴霖, 江长胜, 郝庆菊. 土地利用方式对缙云山土壤团聚体稳定性及其有机碳的影响[J]. 环境科学, 2014, **35**(12): 4695-4704.
- [37] Manna M C, Swarup A, Wanjari R H, *et al.* Soil organic matter in a west Bengal Inceptisol after 30 years of multiple cropping and fertilization [J]. Soil Science Society of America Journal, 2006, **70**(1): 121-129.
- [38] Carter M R, Angers D A, Gregorish E G. Characterizing organic matter retention for surface soils in eastern Canada using density and particle size fractions [J]. Soil Science, 2003, **83**(1): 11-23.
- [39] Franzluebbers A J, Arshad M A. Particulate organic carbon content and potential mineralization as affected by tillage and texture [J]. Soil Science Society of America Journal, 1997, **61**(5): 1382-1386.
- [40] 董洪芳, 于君宝, 管博. 黄河三角洲碱蓬湿地土壤有机碳及其组分分布特征[J]. 环境科学, 2013, **34**(1): 288-292.
- [41] 姚槐应, 何振立, 陈国潮, 等. 红壤微生物量在土壤-黑麦草系统中的肥力意义[J]. 应用生态学报, 1999, **10**(6): 725-758.
- [42] Bengtsson G, Bengtson P, Mansson K F. Gross nitrogen mineralization, immobilization, and nitrification rates as a function of soil C/N ratio and microbial activity [J]. Soil Biology & Biochemistry, 2003, **35**(1): 143-154.
- [43] Boone R D. Light-fraction soil organic matter: origin and contribution to net nitrogen mineralization [J]. Soil Biology and Biochemistry, 1994, **26**(1): 1459-1468.
- [44] 张春华, 王宗明, 居为民, 等. 松嫩平原玉米带土壤碳氮比的时空变异特征[J]. 环境科学, 2011, **32**(5): 1407-1414.

CONTENTS

Potential Source Contribution Analysis of the Particulate Matters in Shanghai During the Heavy Haze Episode in Eastern and Middle China in December, 2013	Li Li, CAI Jun-lin, ZHOU Min (2327)
Composition and Regional Characteristics of Atmosphere Aerosol and Its Water Soluble Ions over the Yangtze River Delta Region in a Winter Haze Period	WANG Man-ting, ZHU Bin, WANG Hong-lei, <i>et al.</i> (2337)
Chemical Species of PM _{2.5} in the Urban Area of Beijing	LIU Bao-xian, YANG Dong-yan, ZHANG Da-wei, <i>et al.</i> (2346)
Numerical Study on the Characteristics of Regional Transport of PM _{2.5} in Shandong Province During Spring in 2014	JIA Hai-ying, CHENG Nian-liang, HE You-jiang, <i>et al.</i> (2353)
Characteristics of Water-Soluble Inorganic Ions in PM _{2.5} Emitted from Coal-Fired Power Plants	MA Zi-zhen, LI Zhen, JIANG Jing-kun, <i>et al.</i> (2361)
Direct Observation on the Temporal and Spatial Patterns of the CO ₂ Concentration in the Atmospheric of Nanjing Urban Canyon in Summer	GAO Yun-qiu, LIU Shou-dong, HU Ning, <i>et al.</i> (2367)
Emission Factors of Vehicle Exhaust in Beijing	FAN Shou-bin, TIAN Ling-di, ZHANG Dong-xu, <i>et al.</i> (2374)
Adsorption Capacity of the Air Particulate Matter in Urban Landscape Plants in Different Polluted Regions of Beijing	ZHANG Wei-kang, WANG Bing, NIU Xiang (2381)
Major Air Pollutant Emissions of Coal-Fired Power Plant in Yangtze River Delta	DING Qing-qing, WEI Wei, SHEN Qun, <i>et al.</i> (2389)
Estimation of N ₂ O Emission from Anhui Croplands by Using a Regional Nitrogen Cycling Model IAP-N	HAN Yun-fang, HAN Sheng-hui, YAN Ping (2395)
Evaluation on the Impacts of Different Background Determination Methods on CO ₂ Sources and Sinks Estimation and Seasonal Variations	ZHANG Fang, ZHOU Ling-xi, WANG Yu-zhao (2405)
Measured and Predicted Aquatic Life Criteria and Risk Assessment of Chromium (VI) in Liaohe River	WANG Xiao-nan, YAN Zhen-guang, LIU Zheng-tao, <i>et al.</i> (2414)
Pollution and Potential Ecology Risk Evaluation of Heavy Metals in River Water, Top Sediments on Bed and Soils Along Banks of Bortala River, Northwest China	ZHANG Zhao-yong, Jilili Abuduwalili, JIANG Feng-qing (2422)
Influencing Factors for Hydrochemistry and $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ of Karst Springs	ZHAO Rui-yi, LÜ Xian-fu, LIU Zi-qi, <i>et al.</i> (2430)
Hydrochemical Characteristics and the Dissolved Inorganic Carbon Flux in Liuzhou Section of Liujiang Basin	YUAN Ya-qiong, HE Shi-yi, YU Shi, <i>et al.</i> (2437)
Characteristics of Total Nitrogen and Total Phosphorus Pollution and Eutrophication Assessment of Secondary River in Urban Chongqing	QING Xu-yao, REN Yu-fen, LÜ Zhi-qiang, <i>et al.</i> (2446)
Static Migration and Release of Dibutyl-Phthalate in the Fluctuating Zone of Three Gorges Reservoir	WANG Fa, WANG Qiang, MU Zhi-jian, <i>et al.</i> (2453)
Effect of Drought and Subsequent Re-wetting Cycles on Transferable Nitrogen and Its Form Distribution in the Sediment of Water Level Fluctuating Zone in the Tributary of Three Gorge Reservoir Areas	LIN Jun-jie, ZHANG Shuai, YANG Zhen-yu, <i>et al.</i> (2459)
Distribution of Chlorophyll-a and Eutrophication State in Tianchi Lake of Tianshan Mountains in Summer	WANG Bin, MA Jian, WANG Yin-ya, <i>et al.</i> (2465)
Vertical Distribution Characteristics and Analysis in Sediments of Xidaihai Lake	DUAN Mu-chun, XIAO Hai-feng, ZANG Shu-ying (2472)
Phytoplankton Community Structure and Water Quality Assessment in Jialing River After the Impoundment of Caojie Reservoir	YANG Min, ZHANG Sheng, LIU Shuo-ru (2480)
Analysis of Prokaryotic Community Structure in River Waters of the Ningbo Sanjiang Mouth	HU An-yi, LI Jiang-wei, YANG Xiao-yong, <i>et al.</i> (2487)
Effects of Perfluoroalkyl Substances on the Microbial Community Structure in Surface Sediments of Typical River, China	SUN Ya-jun, WANG Tie-yu, PENG Xia-wei, <i>et al.</i> (2496)
Coupling Effects of Decomposed <i>Potamogeton crispus</i> and Growing <i>Ceratophyllum demersum</i> on Water Quality and Plant Growth	MA Yue, WANG Guo-xiang, CAO Xun, <i>et al.</i> (2504)
Bioretention Media Screening for the Removal of Phosphorus in Urban Stormwater	LI Li-qing, GONG Yan-fang, YAN Zi-qin, <i>et al.</i> (2511)
Treatment of Urban Runoff Pollutants by a Multilayer Biofiltration System	WANG Xiao-lu, ZUO Jian-e, GAN Li-li, <i>et al.</i> (2518)
Effect of Three Typical Disinfection Byproducts on Bacterial Antibiotic Resistance	LÜ Lu, ZHANG Meng-lu, WANG Chun-ming, <i>et al.</i> (2525)
Laboratory Investigation of DNAPL Migration Behavior and Distribution at Varying Flow Velocities Based on Light Transmission Method	GAO Yan-wei, ZHENG Fei, SHI Xiao-qing, <i>et al.</i> (2532)
Comparative Study of Benzotriazole Electrochemical Oxidation at Boron-doped Diamond and PbO ₂ Anodes	WU Juan-li, ZHANG Jia-wei, WANG Ting, <i>et al.</i> (2540)
Sorption of <i>o</i> -Phthalate onto Calcite in Open-System	LI Zhen-xuan, HUANG Li-dong, CHEN Yan-fang, <i>et al.</i> (2547)
Adsorption Behaviors of Lead on Multi-Walled Carbon Nanotube-Hydroxyapatite Composites	ZHANG Jin-li, LI Yu (2554)
Synthesis and Study on Adsorption Property of Congo Red Molecularly Imprinted Polymer Nanospheres	CHANG Zi-qiang, CHEN Fu-bin, ZHANG Yu, <i>et al.</i> (2564)
Simultaneous Removal of Cd(II) and Phenol by Titanium Dioxide-Titanate Nanotubes Composite Nanomaterial Synthesized Through Alkaline-Acid Hydrothermal Method	LEI Li, JIN Yin-jia, WANG Ting, <i>et al.</i> (2573)
Immobilization of Estrogen-degrading Bacteria to Remove the 17 β -estradiol and Diethylstilbestrol from Polluted Water and Cow Dung	LI Xin, LING Wan-ting, LIU Jing-xian, <i>et al.</i> (2581)
Optoelectronic PCB Wastewater Treatment by Partial Nitrification-ANAMMOX Integrative Reactor	YUAN Yan, LI Xiang, ZHOU Cheng, <i>et al.</i> (2591)
Treatment of Petrochemical Treatment Plant Secondary Effluent by Fenton Oxidation	WANG Yi, WU Chang-yong, ZHOU Yue-xi, <i>et al.</i> (2597)
Comprehensive Toxicity Evaluation and Toxicity Identification Used in Tannery and Textile Wastewaters	HUANG Li, CHEN Wen-yan, WAN Yu-shan, <i>et al.</i> (2604)
Carbon/nitrogen Removal and Bacterial Community Structure Change in an A/O Activated Sludge System Under Different Dissolved Oxygen Conditions	CHEN Yan, LIU Guo-hua, FAN Qiang, <i>et al.</i> (2610)
ORP in the Main Anoxic Stage as the Control Parameter for Nitrogen and Phosphorus Removal in the Single Sludge System with a Continuous Flow	WANG Xiao-ling, SONG Tie-hong, YIN Bao-yong, <i>et al.</i> (2617)
Cultivation of Aerobic Granular Sludge with Real Low Concentration Domestic Wastewater and Its Denitrification Performances Under the Continuous Flow	YAO Li, XIN Xin, LU Hang, <i>et al.</i> (2626)
Heavy Metal Contamination in Farmland Soils at an E-waste Disassembling Site in Qingyuan, Guangdong, South China	ZHANG Jin-lian, DING Jiang-feng, LU Gui-ning, <i>et al.</i> (2633)
Residues and Spatial Distribution Characteristics of Organochlorine Pesticides DDTs in Soil of Linyi City, Shandong Province	YU Chao, WANG Zeng-hui, WANG Hong-jin, <i>et al.</i> (2641)
Assessment of Soil Fluorine Pollution in Jinhua Fluorite Ore Areas	YE Qun-feng, ZHOU Xiao-ling (2648)
Response of Straw and Straw Biochar Returning to Soil Carbon Budget and Its Mechanism	HOU Ya-hong, WANG Lei, FU Xiao-hua, <i>et al.</i> (2655)
Changes of Soil Organic Carbon and Its Influencing Factors of Apple Orchards and Black Locusts in the Small Watershed of Loess Plateau, China	LI Ru-jian, WANG Rui, LI Na-na, <i>et al.</i> (2662)
Impacts of Land Use Changes on Soil Light Fraction and Particulate Organic Carbon and Nitrogen in Jinyun Mountain	LEI Li-guo, JIANG Chang-sheng, HAO Qing-ju (2669)
Soil Enzyme Activities and Their Relationships to Environmental Factors in a Typical Oasis in the Upper Reaches of the Tarim River	ZHU Mei-ling, GONG Lu, ZHANG Long-long (2678)
Effects of Different Residue Part Inputs of Corn Straws on CO ₂ Efflux and Microbial Biomass in Clay Loam and Sandy Loam Black Soils	LIU Si-yi, LIANG Ai-zhen, YANG Xue-ming, <i>et al.</i> (2686)
Isolation, Identification of a <i>p</i> - <i>tert</i> -Butylcatechol-Degrading Strains and Optimization for Its Degradation by Response Surface Methodology	HE Qiang-li, LIU Wen-bin, YANG Hai-jun, <i>et al.</i> (2695)
Isolation, Identification and Characteristic Analysis of an Oil-producing <i>Chlorella</i> sp. Tolerant to High-strength Anaerobic Digestion Effluent	YANG Chuang, WANG Wen-guo, MA Dan-wei, <i>et al.</i> (2707)
Coupled Cytotoxicity of C ₆₀ Nano-Crystal Particle with Cu ²⁺ to the Mouse Peritoneal Microphage RAW 264. 7	YU Ye, BIAN Wei-lin, ZHANG Hui-min, <i>et al.</i> (2713)
Simultaneous Analysis of 18 Glucocorticoids in Surface Water	GUO Wen-jing, CHANG Hong, SUN De-zhi, <i>et al.</i> (2719)

《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 刘 毅 汤鸿霄 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 7 月 15 日 第 36 卷 第 7 期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 7 Jul. 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. sciencecp. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencecp. 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 国内邮发代号: 2-821
CN 11-1895/X

国 内 定 价: 120.00 元 国外发行代号: M 205

国 内 外 公 开 发 行