

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第10期

Vol.36 No.10

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

基于细颗粒物来源追踪技术的2013年12月上海市严重污染过程中PM _{2.5} 的源贡献分析·····	李莉, 安静宇, 严茹莎 (3543)
华北地区乡村站点(曲周)夏季PM _{2.5} 中二次无机组分的生成机制与来源解析·····	陈仕意, 曾立民, 董华斌, 朱彤 (3554)
成都市大气PM _{2.5} 中有机磷阻燃剂的污染水平及来源·····	印红玲, 李世平, 叶芝祥, 杨迎春, 梁金凤, 游俊杰 (3566)
不同生物质燃烧排放多环芳烃及糖醇类化合物的模拟研究·····	黄帅, 黄欣怡, 吴水平, 胡清华, 陈晓秋 (3573)
北京地区大气消光特征及参数化研究·····	陈一娜, 赵普生, 何迪, 董璠, 赵秀娟, 张小玲 (3582)
光助芬顿反应催化降解气体中甲苯·····	郑思灿, 陈天虎, 刘海波, 邹雪华, 朱承驻, 陈冬 (3590)
遗体火化二噁英类排放水平及影响因素·····	尹文华, 于晓巍, 韩静磊, 冯桂贤, 付建平, 杨艳艳, 鞠勇明, 张素坤 (3596)
我国餐厨废物生化处理设施恶臭排放特征分析·····	张妍, 王元刚, 卢志强, 韩萌, 商彬彬, 曹阳, 张君 (3603)
太湖湖表反照率时空特征及影响因子·····	曹畅, 李旭辉, 张弥, 刘寿东, 肖薇, 肖启涛, 徐家平 (3611)
基于GOCI影像的太湖水体漫滩系数遥感反演·····	王珊珊, 李云梅, 王桥, 吕恒 (3620)
河口盐度梯度下短叶茳苳沼泽湿地土壤间隙水溶解性甲烷时空特征·····	杨平, 张子川, 杜威宁, 黄佳芳, 全川 (3633)
石家庄市区土壤水分运移的稳定同位素特征分析·····	陈同同, 陈辉, 韩璐, 邢星, 付阳阳 (3641)
长寿湖水库垂直剖面不同形态汞的季节变化特征及其影响因素·····	白薇扬, 张成, 唐振亚, 赵铮, 王定勇 (3649)
三峡库区消落带4种典型植物根际土壤养分与氮素赋存形态·····	王晓峰, 袁兴中, 刘红, 张磊, 尉建军, 岳俊生 (3662)
湖泊水-沉积物界面DIC和DOC交换通量及耦合关系·····	王伟颖, 吕昌伟, 何江, 左乐, 颜道浩 (3674)
水体扰动条件下物质在沉积介质中的迁移·····	李邵龙, 陈道毅 (3683)
城市道路径流的排污特征·····	武俊良, 任玉芬, 王雪梅, 王效科, 陈利顶, 刘刚才 (3691)
杭州市余杭区典型农村暴雨径流污染特征·····	段圣辉, 赵钰, 单保庆, 唐文忠, 张文强, 张淑珍, 郎超 (3697)
海水淡化超滤-反渗透工艺沿程溴代消毒副产物变化规律·····	杨哲, 孙迎雪, 石娜, 胡洪管 (3706)
天然有机物和电解质对水中C ₆₀ 凝聚行为的影响·····	方华, 荆洁, 于江华, 王钰葶 (3715)
铅改性高岭土原位改良技术控制重污染河道底泥磷释放效果·····	王虹, 林建伟, 詹艳慧, 章喆, 王笛入 (3720)
污水管网中无机氮类营养盐变迁规律·····	金鹏康, 焦丁, 任武昂 (3730)
微好氧水解酸化在石化废水预处理中的应用研究·····	朱晨, 吴昌永, 周岳溪, 伏小勇, 陈学民, 邱延波, 吴晓峰 (3738)
倒置A ² /O-MBR组合工艺处理生活污水效能及膜污染特性·····	王旭东, 马亚斌, 王磊, 杨怡婷, 黄丹曦, 夏四清 (3743)
高氨氮对具有回流的PN-ANAMMOX串联工艺的脱氮影响·····	李祥, 崔剑虹, 袁砚, 黄勇, 袁怡, 刘忻 (3749)
苯甲酸盐厌氧驯化体系中三氯乙烯的还原脱氯特性·····	李姜维, 杨晓永, 胡安谊, 于昌平 (3756)
驯化污泥厌氧还原脱氯促进2,4,6-三氯酚矿化及胞外呼吸脱氯途径·····	宋佳秀, 李玲, 盛凡凡, 郭翠香, 张永明, 李祖元, 王天丽 (3764)
苯酚对厌氧氨氧化污泥脱氮效能长短期影响·····	杨朋兵, 李祥, 黄勇, 朱亮, 崔剑虹, 徐彬彬 (3771)
连续流好氧颗粒污泥系统处理低COD/N实际生活污水的工艺优化·····	鲁磊, 信欣, 鲁航, 朱辽东, 谢思建, 武勇 (3778)
FNA对好氧吸磷的长期抑制及污泥吸磷方式转化·····	马娟, 李璐, 俞小军, 孙雷军, 孙洪伟, 陈永志 (3786)
污水处理厂不同工艺的污泥脱水效能分析及其影响因素研究·····	刘吉宝, 李亚明, 吕鑑, 魏源送, 杨敏, 郁达伟 (3794)
残留过氧化氢对微波-过氧化氢-碱预处理后污泥水解酸化的影响·····	贾瑞来, 刘吉宝, 魏源送, 才兴 (3801)
大围山典型森林土壤有机氮垂直分布特征·····	丁咸庆, 马慧静, 朱晓龙, 陈珊, 侯红波, 彭佩钦 (3809)
缙云山不同土地利用方式对土壤活性有机碳、氮组分的影响·····	祁心, 江长胜, 郝庆菊, 李鉴霖 (3816)
三峡库区典型退耕还林模式土壤养分流失控制·····	吴东, 黄志霖, 肖文发, 曾立雄 (3825)
坡位与土层对喀斯特原生林土壤微生物生物量与丰度的影响·····	冯书珍, 苏以荣, 张伟, 陈香碧, 何寻阳 (3832)
不同种植方式对亚热带红壤微生物多样性的影响·····	沈冰洁, 祝贞科, 袁红朝, 葛体达, 王久荣, 陈明利, 吴晓英, 吴金水 (3839)
有色冶金区土壤-玉米系统汞累积及健康风险·····	纪小凤, 郑娜, 王洋, 刘强, 张静静 (3845)
改良剂对4种木本植物的铅锌耐性、亚细胞分布和化学形态的影响·····	陈永华, 张富运, 吴晓英, 梁希, 袁斯文 (3852)
菹草乙酸酯组分抑藻活性物质的分离纯化和鉴定·····	孙颖颖, 苏振霞, 浦寅芳, 肖辉, 王长海 (3860)
血吸虫病疫区水生生物体内氯苯化合物的污染特征与潜在风险·····	李昆, 赵高峰, 周怀东, 赵健, 张盼伟, 刘巧娜, 王兴勋, 刘晓茹 (3866)
生物传感细胞ADP1_pWHLux在水环境急性毒性检测中的应用·····	唐慧, 宋一之, 姜博, 陈光玉, 贾建丽, 张旭, 李广贺 (3872)
虹鳟鱼鳃及肝脏多种CYP1基因表达模式作为生物标志物监测海河水污染状况·····	高锴, 闫佩, 檀翠玲, 罗彦鹤, 孙静, Maria E. Jönsson, Ingvar Brandt, 唐运平 (3878)
纳米氧化锌对斑马鱼肝脏的毒性效应·····	刘林, 赵群芬, 金凯星, 朱帅旗, 王小飞, 吕佳昀 (3884)
黄连根茎浸提物对隆线蚤的急性毒性作用·····	陈亚楠, 袁玲 (3892)
发酵稻壳对亚铁离子和硫离子的吸附-解吸附特性·····	谢晓梅, 廖敏, 华嘉媛, 陈娜, 张楠, 徐培智, 解开治, 徐昌旭, 刘光荣 (3896)
搅拌棒吸附萃取-气相色谱-质谱联用测定海水中邻苯二甲酸酯·····	高晨晨, 李锋民, 卢伦, 孙玥 (3906)
COD组分分析的实验条件及结果可靠性分析·····	李志华, 张银, 韩杏, 余科, 李汝佳 (3913)
养猪废水和污泥中11种兽用抗生素的同时分析技术及其在生物降解过程的应用·····	丁佳丽, 刘锐, 郑炜, 余卫娟, 叶朝霞, 陈吕军, 张永明 (3918)
土壤微生物产电技术及其潜在应用研究进展·····	邓欢, 薛洪婧, 姜允斌, 钟文辉 (3926)
《环境科学》征订启事 (3553)	
《环境科学》征稿简则 (3589)	
信息 (3705, 3755, 3763, 3800)	

缙云山不同土地利用方式对土壤活性有机碳、氮组分的影响

祁心,江长胜,郝庆菊*,李鉴霖

(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:以位于重庆市北碚区的缙云山为研究对象,通过采集亚热带常绿阔叶林(以下简称林地)、撂荒地、果园、坡耕地0~60 cm深度的土壤样品,测定其MBC(微生物生物量碳)、MBN(微生物生物量氮)、DOC(可溶性有机碳)、DON(可溶性有机氮)含量,探讨土地利用方式对土壤活性有机碳、氮组分的影响。结果表明,4种土地利用方式下土壤MBC、MBN、DOC、DON含量均随着土壤深度的增加而降低。在0~60 cm的土壤深度内,土地利用方式对土壤MBC、MBN和DON含量的影响并不明显;撂荒地DOC含量显著高于其它3种土地利用方式,说明坡耕地撂荒能显著提高土壤DOC含量。在0~60 cm土层,林地、撂荒地、果园、坡耕地间MBN、DOC、DON分配比例均无显著差异,但坡耕地MBC分配比例显著高于其它3种土地利用方式,表明坡耕地土壤有机碳具有较高的生物活性,这可能是由于坡耕地施加绿肥以及粪肥等有机肥所致。各土地利用方式下DOC/DON最高,MBC/MBN次之,SOC/TN最低,说明可溶性有机质的生物固化作用最强,而土壤总有机质的矿化作用最明显。4种土地利用方式下SOC/TN、MBC/MBN及DOC/DON均为坡耕地最低,且比值都低于20,表明坡耕地土壤有机质的矿化作用较强,容易造成土壤碳的损失。

关键词:土地利用方式;微生物生物量碳氮;可溶性碳氮;C/N;缙云山

中图分类号:X144 文献标识码:A 文章编号:0250-3301(2015)10-3816-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.2015.10.034

Effects of Different Land Uses on Soil Active Organic Carbon and Nitrogen Fractions in Jinyun Mountain

QI Xin, JIANG Chang-sheng, HAO Qing-ju*, LI Jian-lin

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

Abstract: In this paper, we take Jinyun Mountain where located in Beibei district of Chongqing as the research object and explore the effect of different ways of land use on soil active organic carbon, nitrogen components by collecting the soil samples from 0 to 60 cm depth in subtropical evergreen broad-leaved forest (hereinafter referred to as the forest), abandoned land, orchard, farmland and measuring the content of MBC, MBN, DOC and DON. The research results show that the contents of soil MBC, MBN, DOC, DON are reduced with the increase of soil depth in four types of land using soils. Variance analysis of the single factor shows that four kinds of land uses have no significant difference in the contents of MBC, MBN and DON, but the DOC content of the abandoned land is significantly higher than that of other three kinds. It shows that the different ways of land use have no obvious effects on soil MBC, MBN and DON but the abandonment of slope cropland can significantly increase the content of soil DOC. There is no significant difference among the distribution ratio of MBN, DOC, DON in forest, abandoned land, orchard and farmland within the soil from 0 to 60 cm, but the distribution ratio of slope MBC is significantly higher than that of other three kinds. It means farmland soil organic carbon has a higher biological activity, this could due to the application of green manure, farmland manure and other organic fertilizers. Under different land utilizations, DOC/DON is the highest, MBC/MBN is the second, and SOC/TN is the lowest. It means the biological solidification of dissolved organic matter is the strongest, and the mineralization of soil organic matter is the most obvious. Under the four kinds of land uses, there are the lowest ratios in SOC/TN, MBC/MBN and DOC/DON in the farmland. And all the ratios are less than 20, which suggest that the mineralization of farmland soil organic matter is stronger and it's easy to cause the loss of soil carbon.

Key words: land use type; microbial biomass carbon and nitrogen; dissolved organic carbon and nitrogen; C/N; Jinyun Mountain

土壤微生物生物量是指土壤中体积小于5 000 μm^3 的生物总量(包括细菌、真菌、放线菌和小型动物),是活的土壤有机质部分^[1]。在土壤生态系统中,土壤微生物生物量是土壤有机质和土壤养分转化和循环的动力,并参与有机质的分解、腐殖质的形成,调控土壤中能量和养分循环等各个生化过程,是重要的植物养分储备库^[2]。土壤可溶性有机碳、氮是

微生物生长和分解过程中的重要能量来源,在土壤生态系统碳、氮循环过程中具有重要作用^[3]。土壤微生物

收稿日期:2014-11-25;修订日期:2015-04-17

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(XDJK2013A009)

作者简介:祁心(1989~),女,硕士研究生,主要研究方向为农田生态系统碳氮循环,E-mail: qixin0126@126.com

* 通讯联系人,E-mail: haoqingju@163.com

物生物量碳(SMBC)、土壤微生物生物量氮(SMBN)、可溶性有机碳(DOC)和可溶性有机氮(DON)作为土壤活性组分指标,对土地利用方式的转变非常敏感,是土壤健康和环境变化最敏感的生命指标,对自然和人为干扰的响应快速且具有指示作用^[4]。

近年来,国内对土壤 SMBC、SMBN、DOC 及 DON 开展了较多的研究,但主要集中在森林和农田生态系统。在森林生态系统中,研究了林分^[5]、林龄^[6]、地下根系^[7]、海拔梯度^[8]等对这几种活性组分的影响;在农田生态系统中主要集中于农田管理措施,包括施肥^[9]、耕作^[10]以及秸秆还田^[11]等。关于土地利用变化对土壤 MBC、MBN、DOC 和 DON 的影响研究还比较少,郭芳芳等^[12]研究了纳版河流域土地利用变化对土壤 MBC 和 MBN 的影响,发现自然林转变为旱地、水稻田、橡胶林和茶园后 MBC 和 MBN 均显著下降;黄靖宇等^[13]的研究也表明,沼泽湿地垦殖为农田后,土壤 MBC、MBN、DOC 和 DON 均显著降低,农田弃耕还湿则会使得这些土壤活性组分明显恢复。但也有研究者持不同的结果,比如在广西喀斯特地区土壤 MBC 为稻田 > 林地 > 旱地^[14],黄土丘陵沟壑区的子午岭次生林区土壤 MBC 含量为农田 > 草本 > 乔木 > 弃耕地 > 灌木^[15],研究认为农田土壤施肥促进了土壤微生物的生长发育,对土壤生物活性有保护作用。由此可以看出,土地利用方式对土壤活性碳氮组分的影响比较复杂,还需要开展更多的实验来进行研究。

缙云山位于我国西南地区的重庆市,是国家级自然保护区,保护区内土地利用方式多样。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。土地利用方式是影响农田土壤养分含量的重要因素之一,不同的土地利用方式改变着土壤原有的物质循环过程,由此对陆地生态系统碳、氮循环产生深远的影响。本文以缙云山为研究对象,探讨不同土地利用方式下土壤微生物生物量碳氮及可溶性有机碳氮,以期为增加土壤肥力以及合理利用土地资源提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

实验区位于重庆市北碚区缙云山自然保护区内,以下简称缙云山。缙云山位于重庆市区西北

部,东经 106°17'43" ~ 106°24'50",北纬 29°41'08" ~ 29°52'03",海拔高度为 350 ~ 951.5 m,土地总面积 7 600 hm²。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℃,年平均降水量 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,其土壤类型主要以山地黄壤居多,此外还有棕黄壤以及少量人为利用的水稻土。林地表层土壤有机碳含量为 22.89 g·kg⁻¹,全氮含量为 1.67 g·kg⁻¹,碱解氮为 171.38 mg·kg⁻¹,硝态氮为 16.06 mg·kg⁻¹,铵态氮为 6.13 mg·kg⁻¹,全磷为 140.30 mg·kg⁻¹,有效磷为 7.10 mg·kg⁻¹,有效硫为 139.04 mg·kg⁻¹,速效钾为 81.49 mg·kg⁻¹,pH 值为 3.95,土壤容重为 1.07 g·cm⁻³。

1.2 实验设计与样品采集

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 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。土样采好后,马上带回实验室,除去其中的植物根系、石块和一些可见的植物残体后,取一部分土壤鲜样充分混合后放入 4℃ 冰箱中保存,另外一部分土样风干后研磨,分别过 2 mm 和 0.25 mm 筛。

1.3 测定项目及方法

土壤 MBC、MBN 的测定^[16]:称取相当于烘干

土重 20 g 湿土,放入 100 mL 的小烧杯中,连同盛有 60 mL 左右无酒精氯仿的小烧杯(里面放入少量抗爆沸物质)一起放入真空干燥器内,真空干燥器底部加入少量水和稀碱($1\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}\text{ NaOH}$). 用真空泵抽成真空,使氯仿沸腾,并持续 3 min,关闭真空干燥器的阀门,将真空干燥器放入 25°C 的培养箱中,保持 24 h. 取出氯仿(倒回瓶中重复使用),除尽干燥器底部的碱,再用真空泵反复抽气,直到土壤闻不到氯仿味为止. 加入一定量 $0.5\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}\text{ K}_2\text{SO}_4$ 溶液(1:2 土水比),振荡 30 min(25°C , $300\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$),然后在 $3\,000\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 下离心 5 min,迅速用中速滤纸过滤,同时做未熏蒸土样对照,滤液直接采用 MultiN/C 2100 分析仪(德国耶拿)进行测定. 然后用以下公式计算 MBC、MBN:

$$\text{MBC} = E_{\text{C}}/0.38 \quad (1)$$

$$\text{MBN} = E_{\text{N}}/0.45 \quad (2)$$

式中, E_{C} 为熏蒸和未熏蒸样品浸提液测定的有机碳差值; E_{N} 为熏蒸和未熏蒸样品浸提液测定的有机氮差值; 0.38 和 0.45 分别为 MBC 和 MBN 的校正系数.

土壤 DOC、DON 的测定: 取新鲜土样 10 g 置于 100 mL 离心管中,加入去离子水 20 mL, 25°C 下恒温振荡 30 min 后离心 10 min($4\,000\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$),再用 $0.45\text{ }\mu\text{m}$ 滤膜抽滤,用 MultiN/C 2100 分析仪测定滤液中碳、氮浓度,得到土壤 DOC 和 DTN. DON 的测定主要是差减法,即用总的溶解氮减去铵态氮与硝态氮之和.

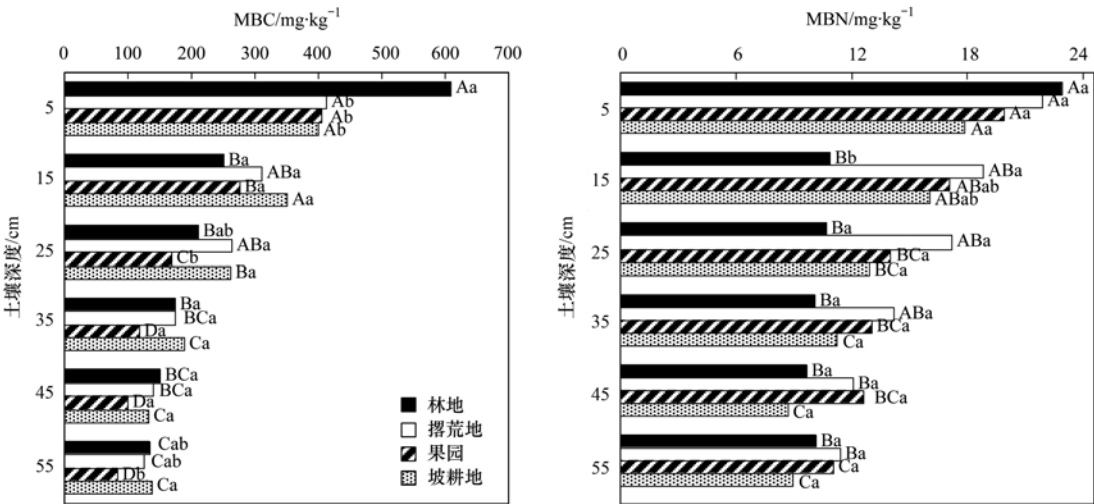
$$\text{DON} = \text{DTN} - (\text{NO}_3^{-}\text{-N} + \text{NH}_4^{+}\text{-N}) \quad (3)$$

采用重铬酸钾氧化法测定土壤有机碳含量^[16]; 凯氏定氮法测定全氮^[16], 硝态氮和铵态氮采用流动注射分析仪(FIAstar 5000)方法盒所提供的分析方法测定; 硫酸-高氯酸消解法测定全磷^[16], 碳酸氢钠法测定速效磷^[16]; 火焰光度法测定速效钾^[16]; pHSJ-4A 型酸度计测定 pH, 其土水比为 1:2^[16]; 土壤有效硫采用磷酸盐-乙酸浸提-硫酸钡比浊法测定^[16]; 土壤容重采用环刀($\phi 50.46\text{ mm}\times 50\text{ mm}$)取样, 105°C 烘干测定^[16].

2 结果与讨论

2.1 不同土地利用方式 MBC、MBN 分布特征

图 1 反映了不同土层深度 4 种土地利用方式下土壤微生物生物量碳、氮含量的变化. 从中可知, 随着土壤深度的增加, MBC 和 MBN 含量逐渐降低. 方差分析表明, 林地 0~10 cm 土层 MBC 和 MBN 含量显著高于其它土层 ($P<0.05$), 撂荒地、果园和坡耕地均为 0~10 cm 土层 MBC 含量显著高于 30~60 cm 土层 ($P<0.05$), 坡耕地和果园表现为 0~10 cm 土层与 20~60 cm 土层 MBN 含量差异显著 ($P<0.05$), 但与 10~20 cm 土层无显著差异; 撂荒地则为 0~10 cm 土层 MBN 含量仅与 40~60 cm 土层差异显著 ($P<0.05$), 与其余土层则无明显差异. 林地、撂荒地、果园和坡耕地土壤 MBC 含量在 0~60 cm 的深度内变化范围分别为 135.16~609.54、125.26~412.90、84.45~405.08 和 132.84~



图中相同小写字母表示同一土壤深度不同土地利用类型的 MBC 在 5% 水平上的差异性, 相同大写字母表示同一土地利用类型不同土壤深度的 MBC 在 5% 水平上的差异性, 不同字母表示差异显著, 下同

图 1 不同土地利用类型下 MBC、MBN 含量的剖面分布

Fig. 1 Vertical distribution of MBC and MBN contents for different land uses

400.13 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, MBN 含量的变化范围分别为 9.70 ~ 22.89、11.41 ~ 21.92、11.09 ~ 19.90 和 8.71 ~ 17.86 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$.

对各土层不同土地利用方式土壤 MBC 和 MBN 含量进行差异显著性检验,结果表明,在 0 ~ 10 cm 土层,林地 MBC 含量显著高于撂荒地、果园和坡耕地 ($P < 0.05$),而后三者间 MBC 含量没有显著差异;在 20 ~ 30 cm 和 50 ~ 60 cm 土层均为果园最低 ($P < 0.05$),而其它 3 种土地利用方式间差异不显著;在 10 ~ 20、30 ~ 40 及 40 ~ 50 cm 土层 4 种土地利用方式间 MBC 含量均无显著差异.除了 10 ~ 20 cm 土层撂荒地 MBN 含量显著高于林地外 ($P < 0.05$),其它土层不同土地利用方式间差异均不显著.在 0 ~ 60 cm 土壤深度内,林地、撂荒地、坡耕地、果园的 MBC 平均含量分别为 271.17、238.03、245.28 及 192.28 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; MBN 的平均含量分别为 12.40、15.94、12.62 及 14.63 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. 方差分析表明,不同土地利用方式间土壤 MBC 与 MBN 平均含量均无显著差异.

凋落物的数量、质量、分解率以及环境因子的变化是影响表层土壤微生物生物量变化的主要原因,而营养元素在土壤中的长期积累以及细根的生产 and 周转是影响下层土壤微生物量的主要原因,因此即使是同一植被不同土层的微生物生物量碳氮变化也是不同的^[17]. 本研究结果表明缙云山土壤微生物量碳氮含量随着土层深度的增加而降低,杨秀娟等^[18]通过采集 0 ~ 100 cm 的新疆盐碱土及盛浩等^[19]通过采集 5 种不同母质发育的亚热带稻田土壤,均发现 MBC 含量随土壤深度的加深而减少,符裕红等^[7]以贵州岩溶区 3 种不同的典型根系地下生境类型土壤作为研究对象,发现 MBC 和 MBN 含量呈现出表层 > 中层 > 下层的特点,赵彤等^[20]在黄土丘陵区也发现,不论是在草原植被区和森林植被区的阴坡还是阳坡,0 ~ 10 cm 土层的 MBC 及 MBN 均高于 10 ~ 30 cm 土层,与本研究结果相一致.大量研究表明,土壤有机碳和总氮是影响 MBC 和 MBN 的主要因素^[19,21],而前期研究也表明,4 种土地利用方式下土壤有机碳和总氮在 0 ~ 60 cm 的范围内随土壤深度的增加而降低^[22]. 表层土壤由于生物归还量大,具有较高的有机质含量和养分(如 N、P、K)含量,地下死根、活根分泌物和脱落细胞、作物残茬、有机肥等新鲜有机物质较多,且表层土壤良好的土壤通气性等条件更有利于微生物的活动^[23]. 而底层土壤由于太过紧实,土壤环境条件相对较差,

微生物生长受到一定限制. 周焱等^[24]通过研究也发现,微生物的生存环境随着土层的加深而恶化,土壤微生物呼吸值降低,说明深层土壤的碳库中活性有机碳所占比例降低,可被微生物消耗利用的少,从而导致微生物生物量呈现递减趋势.

方差分析表明,4 种土地利用方式下土壤 MBC 与 MBN 均无显著差异. 撂荒地和林地地上植被生长旺盛,光合作用强烈,从而通过根系分泌或根皮脱落等为土壤微生物提供活性的碳氮来源^[25];另外,林地和撂荒地无人类活动的干扰,地表覆盖有大量的枯枝落叶,一是为土壤微生物提供丰富的碳源和氮源,二是保持了表层土壤的水分含量,有利于微生物的生长^[26]. 坡耕地 MBC 及 MBN 含量较高可能主要是由施肥造成的. 当地由于地势的原因,山高坡陡,在山腰开垦的坡耕地由于引水技术以及成本的限制等原因,无法获得水利灌溉. 为了解决坡耕地的灌溉问题,当地农民基本上在每块坡耕地的地头上都建有一个水窖来收集雨水,并把田地周边的青草以及作物收获后的秸秆等投入到水窖里面沤肥,然后再用水窖的水来浇灌坡耕地. 这种沤过绿肥的水含有丰富的养分,施入土壤后,增加了新鲜有机能源物质,使微生物迅速繁殖,活动增强. 另外,当地一直都还保留有施加粪肥的习惯,除了施加有机肥外,坡耕地化肥的施用量也是比较高的,毕明丽等^[9]、徐阳春等^[27]的研究认为,施肥(单施化肥或化肥与有机肥配合施用)不仅为作物生长提供了营养,也为土壤微生物提供了大量营养,促进了土壤微生物的生长发育,从而提高了土壤微生物生物量. 果园拥有较高的土壤微生物生物量,一是果园土壤表层具有较厚的枯枝落叶层,林下草本植物生长旺盛,为土壤微生物提供了丰富的代谢底物以及良好的生长环境;二是果园在人为管理控制下,也有施肥的习惯,为土壤微生物的生长提供了养分. 土地利用方式对土壤微生物生物量的影响是复杂的,比如在黄土高原的子午岭地区, MBC 的变化趋势为农田 > 乔木 > 弃耕地,而 MBN 从乔木到农田基本上呈下降趋势^[15];在东北的三江平原,湿地垦殖导致表层土壤 MBC 和 MBN 分别减少了 63.8% ~ 80.5% 和 56.3% ~ 67.1%,而弃耕还湿又会使得土壤微生物生物量得到明显的恢复和升高^[13]. 造成这种差异的原因,可能是由不同研究中的植被类型、弃耕年限以及农田的管理方式不同所致.

2.2 不同土地利用方式 DOC、DON 分布特征

图 2 可以看出,与土壤 MBC、MBN 相似,不同

土地利用方式下土壤 DOC、DON 含量也呈现出垂直分布的特征,即随着土壤深度的增加,DOC 和 DON 含量总体上呈逐渐降低的趋势.林地和果园均为 0~10 cm 土层 DOC 含量最高,且显著高于其余土层($P < 0.05$);撂荒地 DOC 主要分布在 0~20 cm 土层,在 40~60 cm 土层含量较低;坡耕地土壤 DOC 含量的剖面分布变化比较平缓,表现为 0~10 cm 土层显著高于 30 cm 以下土层($P < 0.05$),而 10 cm 以下各土层间的差异不显著.林地土壤 DON 含量剖面变化与 DOC 相似,0~10 cm 土层 DON 含量最高,其次为 20~30 cm 土层,其余土层间差异不明显;撂荒地土壤 DON 含量虽随土壤深度的增加而有所下降,但 DON 含量在整个剖面差异不显著;果园和坡耕地土壤 DON 含量均为表层 0~20 cm 与 40~60 cm 差异显著($P < 0.05$),与其余土层差异不显著.

对同一土层不同土地利用方式间 DOC 和 DON 含量进行比较发现,在 60 cm 深度的所有土层上 DOC 含量均为撂荒地显著高于其他 3 种土地利用方式($P < 0.05$),而林地、果园和坡耕地之间差异均不显著. DON 含量在 0~10 cm 土层为林地显著高于其他 3 种土地利用方式($P < 0.05$),在 40~50 cm 土层为撂荒地显著高于林地($P < 0.05$),而在其余土层上 4 种土地利用方式间差异均不明显.

在 0~60 cm 土壤深度内,林地、撂荒地、坡耕地、果园的 DOC 平均含量分别为: 59.40、100.08、55.23 和 66.83 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,方差分析表明,撂荒地 DOC 含量显著高于林地、坡耕地和果园($P < 0.05$),但后 3 种土地利用方式间差异不显著; DON 平均含量分别为: 4.67、3.21、2.98 和 2.81 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,方差分析表明,4 种土地利用方式间并无显著性差异.

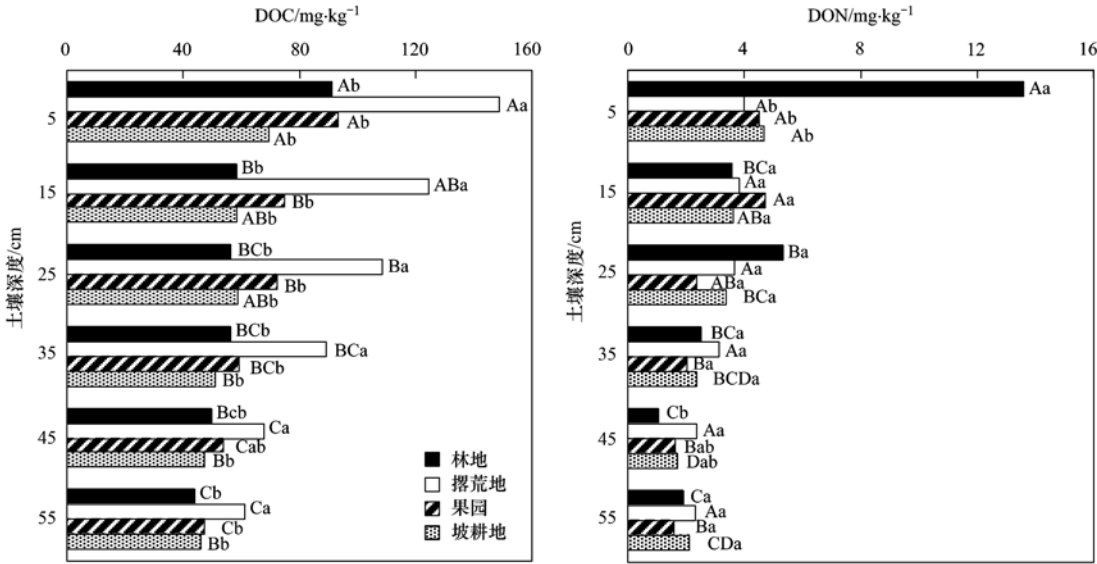


图 2 不同土地利用类型下 DOC、DON 含量的剖面分布

Fig. 2 Vertical distribution of DOC and DON contents for different land uses

本研究中不同土地利用方式下 DOC 及 DON 含量均随土壤深度的增加而降低,与张宏威等^[28]在山东寿光蔬菜地、刘涛泽等^[29]在喀斯特地区草丛坡地以及霍莉莉等^[30]三江平原沼泽湿地、大豆田、水稻田的研究一致.导致土壤可溶性碳氮由上到下逐渐降低的原因与土壤微生物生物量碳氮相似,在此不再赘述.

本研究结果表明,土地利用方式对 DOC 影响显著,但不同土地利用方式间 DON 含量差异不明显,说明 DOC 和 DON 在土壤中的迁移转化等方面存在着差异.有研究发现,虽然 DOC 和 DON 间有一定

的相关性,但相关关系相对较弱^[31],说明二者在土壤中的特性有别.对林地土壤的可溶性物质的化学特性研究发现,含碳有机物含有的疏水基团比例高,而含氮有机化合物所含的亲水基团比例高^[32],而且土壤矿物对有机碳的结合能力大于对有机氮的结合能力^[33].王飞等^[34]研究了红壤坡地上不同土地利用方式(自然林、草地、农作、油茶松和湿地松)下 DOC 及 DON 的含量,发现不同土地利用方式对坡地土壤 DON 含量没有显著影响,而草地土壤 DOC 含量显著高于其他 4 种土地利用方式;黄靖宇等^[13]的研究也表明,土地利用方式对土壤 DOC 的

影响大于对 DON 的影响,均与本文的研究结果一致。造成这种现象的原因可能是因为 DOC 的来源相对单一,植物凋落物和根系是其主要来源,而 DON 的来源除此之外,还与其它氮源(比如农业氮肥、氮沉积、固氮菌等)关系密切^[13]。撂荒地不但地表植被生长旺盛,每年因地上部分枯死而形成的枯枝落叶可为土壤提供大量的碳源,而且草本植物的根系尤其细根发达,根系的腐解转化快,从而导致撂荒地土壤 DOC 含量较其他土地利用方式高。

2.3 不同土地利用方式土壤 MBC、MBN、DOC、DON 分配比例

不同土层深度不同土地利用方式不仅会影响土壤 MBC、MBN、DOC、DON 含量,也显著改变了土壤微生物生物量碳、氮及可溶性碳、氮在总有机碳及全氮中所占的比例。MBC/SOC 的值称为土壤微生物熵,土壤微生物熵的变化反映了土壤中输入的有机质向微生物生物量碳的转化效率、土壤中碳的损失和土壤矿物对有机质的固定^[35]。如表 1 所示,微生物熵比值变化随着土壤深度的增加,林地、果园和坡耕地土壤的微生物熵值均呈先增加后降低的趋势,但撂荒地土壤的微生物熵值则呈逐渐降低的趋势。林地、撂荒地、果园和坡耕地土壤微生物熵值的变化范围分别为 2.66% ~ 4.08%、1.24% ~ 2.89%、2.66% ~ 4.26% 和 5.71% ~ 8.85%。在 0 ~ 60 cm 土壤深度内,土壤微生物熵平均值最高的为长期施用绿肥、粪肥等有机肥的坡耕地(7.21%),其次为林地(3.79%)、果园(3.39%)、撂荒地(2.03%)。Anderson 等^[36]通过总结温带地区 26 个长期定位实验结果认为,有机肥(尤其是秸秆和绿肥)的使用会提高土壤微生物熵,这一结论在本研究中也得到了验证。目前国内关于微生物生物量的研究中对微生物熵的指示作用已有一些报道,有研究认为,土壤微生物熵对土地利用变化的响应更加敏感,可以预示 SOC 的变化方向^[37],但也有研究认为,土壤微生物熵并不能指示土壤有机质含量的积累差异^[38]。通过对缙云山的研究数据分析表明,土壤微生物熵与有机碳的变化并不一致,原因可能如刘守龙等^[39]的研究得出的推论:微生物熵的变化可以作为有机碳变化的早期指标,当土壤有机碳的变化刚刚产生或未达到平衡状态时,该指标具有一定的指示作用,但当土壤有机碳达到了平衡状态后仍以有机碳总量为指标较好。本研究中林地、果园和坡耕地均为建国初期由林地垦殖而来,已有五六十年的历史,撂荒地

为弃耕 14 a 的草地(研究表明^[40],经过 13 a 的恢复,撂荒草地的土壤质量可达到对照水平),因此,4 种土地利用方式土壤有机碳均已达到平衡状态,因而选择土壤有机碳指标来表征土地利用方式的影响更为恰当。观测数据表明,缙云山不同土地利用方式对土壤有机碳具有重要影响:在 0 ~ 60 cm 的土壤深度内,林地土壤有机碳含量及储量均显著高于坡耕地和果园($P < 0.05$),撂荒地土壤有机碳含量及储量显著高于坡耕地($P < 0.05$),表明林地的开垦导致土壤有机碳的损失,而坡耕地撂荒则有利于土壤有机碳的蓄积^[22]。

可溶性碳是有机碳中比较活跃的部分,和土壤微生物熵的变化规律相似。总体上看,随着土壤深度的增加,林地、果园和坡耕地土壤的 DOC/SOC 值均呈先增加后降低的趋势,但撂荒地土壤的 DOC/SOC 值则呈逐渐降低的趋势。林地、撂荒地、果园和坡耕地土壤的 DOC/SOC 值的变化范围分别为 0.4% ~ 1.3%、0.6% ~ 1.11%、0.77% ~ 2.16% 和 1.22% ~ 2.17%。4 种不同土地利用方式 DOC 分配比例分别为林地(1.06%)、撂荒地(0.86%)、果园(1.46%)、坡耕地(1.79%),方差分析结果差异不显著。有学者在广西喀斯特地区的研究结果也显示 DOC 分配比例范围为 0.98% ~ 1.45%^[16],与本研究中的 DOC 分配比例相近。

不同土地利用方式下的 MBN/TN 比值变化具有不同的垂直分布特征,即随着土壤深度的增加,果园和坡耕地土壤的 MBN/TN 比值均呈先增加后降低的趋势,而林地土壤的 MBN/TN 比值却呈逐渐增加的趋势,撂荒地土壤的 MBN/TN 比值则呈逐渐降低的趋势。林地、撂荒地、果园和坡耕地土壤 MBN/TN 比值的变化范围分别为 1.37% ~ 2.11%、1.39% ~ 1.99%、1.67% ~ 2.51% 和 1.5% ~ 2.06%。在 0 ~ 60 cm 土壤深度内,不同土地利用方式 MBN 分配比例平均值的高低顺序依次为果园(2.09%)、坡耕地(1.82%)、撂荒地(1.72%)、林地(1.70%),无显著差异。

4 种土地利用方式下 DON 分配比例随土层深度增加变化规律也有所差异。林地 DON 分配比例在整个剖面上无明显的变化规律,在 20 ~ 30 cm 土层达到一个最高值(0.84%);撂荒地、果园和坡耕地 DON 分配比例随土壤深度的增加大体上呈现为先升高后降低的趋势,撂荒地在 10 ~ 20 cm 土层达到最大,林地和坡耕地则在 20 ~ 30 cm 土层达到最大。在 0 ~ 60 cm 土壤深度内,不

同土地利用方式 DON 分配比例平均值的高低顺序依次为林地(0.53%)、坡耕地(0.43%)、果园(0.37%)和撂荒地(0.35%),差异不显著,吕学军等^[41]研究中也有类似的结论,他认为虽然

施入有机肥会增加土壤 DON 的含量,但同时也增加了 DON 的溶出量,因此有机肥的腐解虽然会产生较多的 DON,但坡耕地的 DON 分配比例并没有显著提高.

表 1 不同土地利用方式土壤活性有机质的分配比例/%

Table 1 Percentages of different active organic matters under different land uses/%

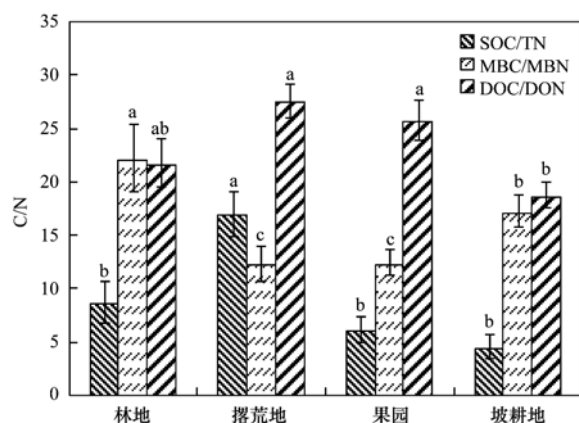
类型	土壤深度/cm	MBC/SOC	MBN/TN	DOC/SOC	DON/TN
林地	0~10	2.66	1.37	0.4	0.81
	10~20	3.88	1.59	0.91	0.52
	20~30	4.08	1.68	1.1	0.84
	30~40	4.04	1.65	1.3	0.42
	40~50	4.08	1.81	1.35	0.19
	50~60	3.99	2.11	1.3	0.4
	平均值	3.79	1.70	1.06	0.53
撂荒地	0~10	2.89	1.92	1.04	0.35
	10~20	2.78	1.99	1.11	0.4
	20~30	2.35	1.86	0.97	0.4
	30~40	1.65	1.68	0.84	0.37
	40~50	1.24	1.51	0.6	0.29
	50~60	1.26	1.39	0.62	0.28
	平均值	2.03	1.72	0.86	0.35
果园	0~10	3.35	1.67	0.77	0.38
	10~20	2.66	1.93	0.72	0.53
	20~30	3.13	2.11	1.33	0.36
	30~40	4.26	2.09	2.16	0.33
	40~50	3.70	2.51	1.98	0.32
	50~60	3.26	2.21	1.82	0.31
	平均值	3.39	2.09	1.46	0.37
坡耕地	0~10	7.12	1.88	1.24	0.49
	10~20	7.34	1.99	1.22	0.45
	20~30	8.85	2.06	1.99	0.54
	30~40	8.04	1.89	2.17	0.4
	40~50	5.71	1.50	2.03	0.29
	50~60	6.22	1.59	2.08	0.38
	平均值	7.21	1.82	1.79	0.43

2.4 不同土地利用方式碳氮比值的变化

整个土壤的微生物量碳氮比平均为 8,当微生物量碳氮比值为 8 时,生物固化与矿化作用理应达到平衡,然而微生物吸收的有机物不仅用于构建细胞,还大量用于产能,实际观察结果表明约 40% 所利用的有机碳会进入生物体,其余均以二氧化碳形式释放,需将 C/N 结果乘以系数 2.5 则刚好与实际情况相符,因此 C/N 比值 20 为生物固化作用与矿化作用的实际平衡值. 当 C/N 值小于 20 时,矿化作用强于固化作用,大于 20 时,生物固定超过矿化作用^[42]. 图 3 为不同土地利用方式下 3 种土壤有机质组分的碳氮比,林地、撂荒地、果园及坡耕地的土壤有机质 C/N 分别为 11.46、12.11、8.96 和 5.35,说明缙云山 4 种土地利用方式下土壤都出现了净矿

化. 但相比而言,坡耕地和果园土壤有机质的矿化程度较高,而林地和撂荒地土壤有机质的矿化程度则相对较低,有利于土壤中有机质的积累. 上述 4 种土地利用方式下 MBC/MBN 分别为 22.22、12.31、12.42 和 17.26,除林地生物固化与矿化作用达到平衡外,其它土地利用方式下均表现为较强的生物矿化作用. 4 种土地利用方式下 DOC/DON 的比值较高,林地、撂荒地、果园和坡耕地分别为 21.77、27.56、25.71 和 18.70,除坡耕地 DOC/DON 低于 20,表现为弱的矿化作用外,其它 3 种土地利用方式均高于 20,表现为平衡作用或弱的生物固化作用. 由图 3 可以看出,不同土地利用方式下 DOC/DON 最高,MBC/MBN 次之,SOC/TN 最低,说明可溶性有机质的生物固化作用最强,而土壤总有机质

的矿化作用最明显. 3 种土壤有机质组分碳氮比总体上坡耕地最低, 表明坡耕地土壤有机质矿化作用强于固化作用, 容易导致土壤有机碳的损失, 不利于土壤有机碳在土壤中的留存, 因此, 在以后的土地管理中, 需要加强对坡耕地土壤有机质的保护和截存, 实施免耕、秸秆还田以及加大有机肥的施用等.



图中相同小写字母表示同一土壤有机质组分 C/N 不同土地利用方式在 5% 水平上的差异性

图 3 不同土地利用方式碳氮比值变化

Fig. 3 C/N for different land uses

3 结论

(1) 缙云山 4 种土地利用方式下, MBC、MBN、DOC、DON 含量均随土层深度的增加而降低, 表层土更有利于土壤活性有机质的积累.

(2) 在 0~60 cm 的土壤深度内, 土地利用方式对土壤 MBC、MBN 和 DON 含量影响不明显; 而撂荒地土壤 DOC 含量显著高于其他 3 种土地利用方式, 表明土地利用方式对土壤 DOC 的影响要高于对其他 3 种活性有机碳氮组分.

(3) 在 0~60 cm 土层内, 坡耕地微生物熵显著高于其它 3 种土地利用方式, 具有较强的生物活性. 但土壤微生物熵与有机碳的变化并不一致, 在土壤有机碳达到平衡状态的条件下, 选择土壤有机碳指标来表征土地利用方式的影响更为恰当.

(4) 4 种土地利用方式下土壤总有机质、微生物生物量有机质及可溶性有机质碳氮比均为坡耕地最低, 且比值都小于 20, 表明坡耕地土壤有机质的矿化作用较强, 容易造成土壤碳的损失.

参考文献:

[1] Jenkinson D S. Determination of microbial biomass carbon and nitrogen in soil [A]. In: Wilson J R (ed.). *Advances in Nitrogen Cycling in Agricultural Ecosystems* [M]. Wallingford: CAB International, 1988. 368-386.

[2] Ruan H H, Zou X M, Scatena F N, et al. Asynchronous

fluctuation of soil microbial biomass and plant litterfall in a tropical wet forest [J]. *Plant and Soil*, 2004, **260**(1-2): 147-154.

[3] 汪景宽, 李丛, 于树, 等. 不同肥力棕壤溶解性有机碳、氮生物降解特性[J]. *生态学报*, 2008, **28**(12): 6165-6171.

[4] Magill A H, Aber J D. Dissolved organic carbon and nitrogen relationships in forest litter as affected by nitrogen deposition [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2000, **32**(5): 603-613.

[5] 张彪, 高人, 杨玉盛, 等. 万木林自然保护区不同林分土壤可溶性有机氮含量[J]. *应用生态学报*, 2010, **21**(7): 1635-1640.

[6] 杨凯, 朱教君, 张金鑫, 等. 不同林龄落叶松人工林土壤微生物生物量碳氮的季节变化[J]. *生态学报*, 2009, **29**(10): 5500-5507.

[7] 符裕红, 黄宗胜, 喻理飞, 等. 岩溶区根系地下生境对土壤微生物生物量的影响[J]. *水土保持研究*, 2012, **19**(4): 91-100.

[8] 丛静, 刘晓, 卢慧, 等. 神农架自然保护区土壤微生物生物量碳、氮沿海拔梯度的变化及其影响因素[J]. *生态学杂志*, 2014, **33**(12): 3381-3387.

[9] 毕明丽, 宇万太, 姜子绍, 等. 施肥和土壤管理对土壤微生物生物量碳、氮和群落结构的影响[J]. *生态学报*, 2010, **30**(1): 32-42.

[10] 郭晓霞, 刘景辉, 张星杰, 等. 免耕对旱作燕麦田耕层土壤微生物生物量碳、氮、磷的影响[J]. *土壤学报*, 2012, **49**(3): 575-582.

[11] 刘骁蓓, 涂仕华, 孙锡发, 等. 秸秆还田与施肥对稻田土壤微生物生物量及固氮菌群落结构的影响[J]. *生态学报*, 2013, **33**(17): 5210-5218.

[12] 郭芳芳, 李永梅, 李朝丽, 等. 纳板河流域土地利用变化对土壤有机碳及微生物生物量碳和氮的影响[J]. *生态学杂志*, 2012, **31**(10): 2473-2478.

[13] 黄靖宇, 宋长春, 宋艳宇, 等. 湿地垦殖对土壤微生物量及土壤溶解有机碳、氮的影响[J]. *环境科学*, 2008, **29**(5): 1380-1387.

[14] 李新爱, 肖和艾, 吴金水, 等. 喀斯特地区不同土地利用方式对土壤有机碳、全氮以及微生物生物量碳和氮的影响[J]. *应用生态学报*, 2006, **17**(10): 1827-1831.

[15] 陈小燕, 吕家珑, 张红, 等. 子午岭不同植被类型土壤微生物量与有机酸含量[J]. *干旱地区农业研究*, 2008, **26**(3): 167-170.

[16] 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.

[17] Tonon G, Boldreghini P, Gioacchini P. Seasonal changes in microbial nitrogen in an old broad leaf forest and in a neighbouring young plantation [J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2005, **41**(2): 101-108.

[18] 杨秀娟, 胡玉昆, 房飞, 等. 不同类型盐碱土有机碳及微生物生物量碳的垂直分布特征[J]. *生态学杂志*, 2013, **32**(5): 1208-1214.

[19] 盛浩, 周萍, 袁红, 等. 亚热带不同稻田土壤微生物生物量碳的剖面分布特征[J]. *环境科学*, 2013, **34**(4): 1576-

- 1582.
- [20] 赵彤, 蒋跃利, 闫浩, 等. 黄土丘陵区不同坡向对土壤微生物生物量和可溶性有机碳的影响[J]. 环境科学, 2013, **34**(8): 3223-3230.
- [21] 李胜蓝, 方晰, 项文化, 等. 湘中丘陵区 4 种森林类型土壤微生物生物量碳氮含量[J]. 林业科学, 2014, **50**(5): 8-16.
- [22] 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(自然科学版), 2013, **41**(11): 137-145.
- [23] 张成娥, 陈小莉, 郑粉莉. 子午岭林区不同环境土壤微生物生物量与肥力关系研究[J]. 生态学报, 1998, **18**(2): 218-222.
- [24] 周焱, 徐宪根, 王丰, 等. 武夷山不同海拔梯度土壤微生物生物量、微生物呼吸及其商值(q_{MB} , q_{CO_2}) [J]. 生态学杂志, 2009, **28**(2): 265-269.
- [25] Swinnen J, Van Venn J A, Merckx R. Carbon fluxes in the rhizosphere of winter wheat and spring barley with conventional versus integrated farming [J]. Soil Biology and Biochemistry, 1995, **27**(6): 811-820.
- [26] 王晓龙, 胡锋, 李辉信, 等. 红壤小流域不同土地利用方式对土壤微生物量碳氮的影响[J]. 农业环境科学学报, 2006, **25**(1): 143-147.
- [27] 徐阳春, 沈其荣, 冉炜. 长期免耕与施用有机肥对土壤微生物生物量碳、氮、磷的影响[J]. 土壤学报, 2002, **39**(1): 89-96.
- [28] 张宏威, 康凌云, 梁斌, 等. 长期大量施肥增加设施菜田土壤可溶性有机氮淋溶风险[J]. 农业工程学报, 2013, **29**(21): 99-107.
- [29] 刘涛泽, 刘丛强, 张伟, 等. 喀斯特地区坡地土壤可溶性有机碳的分布特征[J]. 中国环境科学, 2009, **29**(3): 248-253.
- [30] 霍莉莉, 邹元春, 郭佳伟, 等. 垦殖对湿地土壤有机碳垂直分布及可溶性有机碳截留的影响[J]. 环境科学, 2013, **34**(1): 283-287.
- [31] Michalzik B, Matzner E. Dynamics of dissolved organic nitrogen and carbon in a Central European Norway spruce ecosystem [J]. European Journal of Soil Science, 1999, **50**(4): 579-590.
- [32] Qualls R G, Haines B L, Swank W T. Fluxes of dissolved organic nutrients and humic substances in a deciduous forest [J]. Ecology, 1991, **72**(1): 254-266.
- [33] Kaier K, Zech W. Sorption of dissolved organic nitrogen by acid subsoil horizons and individual mineral phases [J]. European Journal of Soil Science, 2000, **51**(3): 403-411.
- [34] 王飞, 王卫, 陈安磊, 等. 红壤坡地不同土地利用方式下表层土壤活性碳、氮特征[J]. 水土保持学报, 2014, **28**(2): 215-220.
- [35] 骆坤, 胡荣桂, 张文菊, 等. 黑土有机碳、氮及其活性对长期施肥的响应[J]. 环境科学, 2013, **34**(2): 676-684.
- [36] 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.
- [37] 王小利, 苏以荣, 黄道友, 等. 土地利用对亚热带红壤低山区土壤有机碳和微生物碳的影响[J]. 中国农业科学, 2006, **39**(4): 750-757.
- [38] 徐华勤, 章家恩, 冯丽芳, 等. 广东省不同土地利用方式对土壤微生物量碳氮的影响[J]. 生态学报, 2009, **29**(8): 4112-4118.
- [39] 刘守龙, 苏以荣, 黄道友, 等. 微生物商对亚热带地区土地利用及施肥制度的响应[J]. 中国农业科学, 2006, **39**(7): 1411-1418.
- [40] 汪青, 张平究, 孟向东. 不同退耕年限对菜子湖湿地表土有机碳组分与质量的影响[J]. 生态学杂志, 2012, **31**(8): 2038-2043.
- [41] 吕学军, 刘庆, 陈印平, 等. 黄河三角洲土地利用方式对土壤可溶性有机碳、氮的影响[J]. 农业现代化研究, 2011, **32**(4): 505-508.
- [42] 黄昌勇. 土壤学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000. 50-64.

CONTENTS

Source Contribution Analysis of the Fine Particles in Shanghai During a Heavy Haze Episode in December, 2013 Based on the Particulate Matter Source Apportionment Technology	LI Li, AN Jing-yu, YAN Ru-sha (3543)
Transformation Mechanism and Sources of Secondary Inorganic Components in PM _{2.5} at an Agriculture Site (Quzhou) in the North China Plain in Summer	CHEN Shi-yi, ZENG Li-min, DONG Hua-bin, <i>et al.</i> (3554)
Pollution Level and Sources of Organic Phosphorus Esters in Airborne PM _{2.5} in Chengdu City	YIN Hong-ling, LI Shi-ping, YE Zhi-xiang, <i>et al.</i> (3566)
Simulation Study of the Emission of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Sugar Alcohols from Biomass Burning	HUANG Shuai, HUANG Xin-yi, WU Shui-ping, <i>et al.</i> (3573)
Characteristics and Parameterization for Atmospheric Extinction Coefficient in Beijing	CHEN Yi-na, ZHAO Pu-sheng, HE Di, <i>et al.</i> (3582)
Photocatalytic Degradation of Gaseous Toluene by a Photo-Fenton Reaction	ZHENG Si-can, CHEN Tian-hu, LIU Hai-bo, <i>et al.</i> (3590)
Emission of PCDD/Fs from Crematories and Its Influencing Factors	YIN Wen-hua, YU Xiao-wei, HAN Jing-lei, <i>et al.</i> (3596)
Odor Emission Characteristics from Biochemical Treatment Facilities of Kitchen Waste in China	ZHANG Yan, WANG Yuan-gang, LU Zhi-qiang, <i>et al.</i> (3603)
Temporal and Spatial Characteristics of Lake Taihu Surface Albedo and Its Impact Factors	CAO Chang, LI Xu-hui, ZHANG Mi, <i>et al.</i> (3611)
Remote Sensing Inversion of Diffuse Attenuation Coefficient in Lake Taihu Based on the GOCI Images	WANG Shan-shan, LI Yun-mei, WANG Qiao, <i>et al.</i> (3620)
Porewater Dissolved Methane in <i>Cyperus malaccensis</i> Marshes Along Salinity Gradient in the Minjiang River Estuary	YANG Ping, ZHANG Zi-chuan, DU Wei-ning, <i>et al.</i> (3633)
Stable Isotopes Characters of Soil Water Movement in Shijiazhuang City	CHEN Tong-tong, CHEN Hui, HAN Lu, <i>et al.</i> (3641)
Seasonal Variations in Vertical Profile of Hg Species and the Influential Factors in Changshou Reservoir	BAI Wei-yang, ZHANG Cheng, TANG Zhen-ya, <i>et al.</i> (3649)
Nutrient Characteristics and Nitrogen Forms of Rhizosphere Soils Under Four Typical Plants in the Littoral Zone of TGR	WANG Xiao-feng, YUAN Xing-zhong, LIU Hong, <i>et al.</i> (3662)
Exchange Fluxes and Coupling Relationship of Dissolved Inorganic Carbon and Dissolved Organic Carbon Across the Water-Sediment Interface in Lakes	WANG Wei-ying, LÜ Chang-wei, HE Jiang, <i>et al.</i> (3674)
Mass Transport in Porous Sediments During a Turbulent Disturbance	LI Shao-long, CHEN Dao-yi (3683)
Characterization of Pollutant Wash-off in the Urban Stormwater	WU Jun-liang, REN Yu-fen, WANG Xue-mei, <i>et al.</i> (3691)
Research of the Stormwater Runoff and Pollution Characteristics in Rural Area of Yuhang District, Hangzhou	DUAN Sheng-hui, ZHAO Yu, SHAN Bao-qing, <i>et al.</i> (3697)
Formation and Variation of Brominated Disinfection By-products in A Combined Ultrafiltration and Reverse Osmosis Process for Seawater Desalination	YANG Zhe, SUN Ying-xue, SHI Na, <i>et al.</i> (3706)
Effect of Natural Organic Matter and Electrolytes on the Aggregation of C ₆₀ Nanoparticles in Aquatic Systems	FANG Hua, JING Jie, YU Jiang-hua, <i>et al.</i> (3715)
Efficiency of Sediment Amendment with Zirconium-Modified Kaolin Clay to Control Phosphorus Release from Sediments in Heavily Polluted Rivers	WANG Hong, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i> (3720)
Transformation of Nitrogen Nutrients in the Urban Sewage Pipe Network	JIN Peng-kang, JIAO Ding, REN Wu-ang (3730)
Application of Micro-aerobic Hydrolysis Acidification in the Pretreatment of Petrochemical Wastewater	ZHU Chen, WU Chang-yong, ZHOU Yue-xi, <i>et al.</i> (3738)
Efficacy of A ² /O-MBR Combined Process in Wastewater Treatment and the Characteristics of Membrane Fouling	WANG Xu-dong, MA Ya-bin, WANG Lei, <i>et al.</i> (3743)
Effect of High Ammonium on Nitrogen Removal in an Partial Nitrification-ANAMMOX Process with Reflux System	LI Xiang, CUI Jian-hong, YUAN Yan, <i>et al.</i> (3749)
Reductive Dechlorination of Trichloroethylene by Benzoate-Enriched Anaerobic Cultures	LI Jiang-wei, YANG Xiao-yong, HU An-yi, <i>et al.</i> (3756)
2,4,6-Trichlorophenol Mineralization Promoted by Anaerobic Reductive Dechlorination of Acclimated Sludge and Extracellular Respiration Dechlorination Pathway	SONG Jia-xiu, LI Ling, SHENG Fan-fan, <i>et al.</i> (3764)
Short or Long Term Influence of Phenol on Nitrogen Removal Efficiency of ANAMMOX Sludge	YANG Peng-bing, LI Xiang, HUANG Yong, <i>et al.</i> (3771)
Process Optimization of Aerobic Granular Sludge Continuous-Flow System for the Treatment of Low COD/N Ratio Sewage	LU Lei, XIN Xin, LU Hang, <i>et al.</i> (3778)
Long-Term Inhibition of FNA on Aerobic Phosphate Uptake and Variation of Phosphorus Uptake Properties of the Sludge	MA Juan, LI Lu, YU Xiao-jun, <i>et al.</i> (3786)
Performance and Factors Analysis of Sludge Dewatering in Different Wastewater Treatment Processes	LIU Ji-bao, LI Ya-ming, LÜ Jian, <i>et al.</i> (3794)
Effect of Residual Hydrogen Peroxide on Hydrolysis Acidification of Sludge Pretreated by Microwave -H ₂ O ₂ -Alkaline Process	JIA Rui-lai, LIU Ji-bao, WEI Yuan-song, <i>et al.</i> (3801)
Vertical Distribution Characteristics of Typical Forest Soil Organic Nitrogen in Dawei Mountain	DING Xian-qing, MA Hui-jing, ZHU Xiao-long, <i>et al.</i> (3809)
Effects of Different Land Uses on Soil Active Organic Carbon and Nitrogen Fractions in Jinyun Mountain	QI Xin, JIANG Chang-sheng, HAO Qing-ju, <i>et al.</i> (3816)
Control of Soil Nutrient Loss of Typical Reforestation Patterns Along the Three Gorges Reservoir Area	WU Dong, HUANG Zhi-lin, XIAO Wen-fa, <i>et al.</i> (3825)
Effects of Slope Position and Soil Horizon on Soil Microbial Biomass and Abundance in Karst Primary Forest of Southwest China	FENG Shu-zhen, SU Yi-rong, ZHANG Wei, <i>et al.</i> (3832)
Effects of Different Plantation Type on the Abundance and Diversity of Soil Microbes in Subtropical Red Soils	SHEN Bing-jie, ZHU Zhen-ke, YUAN Hong-zhao, <i>et al.</i> (3839)
Accumulation of Mercury in Soil-maize System of Non-ferrous Metals Smelting Area and Its Related Risk Assessment	JI Xiao-feng, ZHENG Na, WANG Yang, <i>et al.</i> (3845)
Effects of Different Modifier Concentrations on Lead-Zinc Tolerance, Subcellular Distribution and Chemical Forms for Four Kinds of Woody Plants	CHEN Yong-hua, ZHANG Fu-yun, WU Xiao-fu, <i>et al.</i> (3852)
Isolation, Purification and Identification of Antialgal Activity Substances of Ethyl Acetate Extracts from the Submerged Macrophytes <i>Potamogeton crispus</i>	SUN Ying-ying, SU Zhen-xia, PU Yin-fang, <i>et al.</i> (3860)
Distribution Characteristics and Potential Risk of CBs in Aquatic Organisms from Typical Epidemic Areas of Schistosomiasis Prevalence	LI Kun, ZHAO Gao-feng, ZHOU Huai-dong, <i>et al.</i> (3866)
Application of Whole-cell Biosensor ADPI _p WHlux for Acute Toxicity Detection in Water Environment	TANG Hui, SONG Yi-zhi, JIANG Bo, <i>et al.</i> (3872)
Application of Rainbow Trout CYP1 Gene Expression Patterns in Gill and Liver for Haihe River Bio-monitoring	GAO Kai, YAN Pei, TAN Cui-ling, <i>et al.</i> (3878)
Toxic Effect of Nano-ZnO in Liver of Zebrafish	LIU Lin, ZHAO Qun-fen, JIN Kai-xing, <i>et al.</i> (3884)
Acute Toxicity of <i>Coptis chinensis</i> Rhizome Extracts to <i>Daphnia carinata</i>	CHEN Ya-nan, YUAN Ling (3892)
Adsorption-desorption Characteristics of Fermented Rice Husk for Ferrous and Sulfur Ions	XIE Xiao-mei, LIAO Min, HUA Jia-yuan, <i>et al.</i> (3896)
Application of Stir Bar Sorptive Extraction and Gas Chromatograph Mass Spectrometer to the Phthalic Acid Esters Analysis in Seawater	GAO Chen-chen, LI Feng-min, LU Lun, <i>et al.</i> (3906)
Experimental Conditions and Reliability Analysis of Results of COD Components	LI Zhi-hua, ZHANG Yin, HAN Xing, <i>et al.</i> (3913)
Method for Simultaneous Determination of 11 Veterinary Antibiotics in Piggery Wastewater and Sludge and Its Application in Biological Treatment	DING Jia-li, LIU Rui, ZHENG Wei, <i>et al.</i> (3918)
Research Progress in Technology of Using Soil Micro-organisms to Generate Electricity and Its Potential Applications	DENG Huan, XUE Hong-jing, JIANG Yun-bin, <i>et al.</i> (3926)

《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10月15日 第36卷 第10期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 10 Oct. 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