

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第9期

Vol.36 No.9

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

长江三角洲 PM _{2.5} 质量浓度遥感估算与时空分布特征	徐建辉, 江洪 (3119)
宁波市 PM _{2.5} 中碳组分的时空分布特征和二次有机碳估算	杜博涵, 黄晓锋, 何凌燕, 胡敏, 王川, 任宇超, 应红梅, 周军, 汪伟峰, 许丹丹 (3128)
青岛大气中酸碱气体及 PM _{2.5} 中水溶性离子的浓度特征和气粒平衡关系	周佳佳, 石金辉, 李丽平, 姚小红, 高会旺 (3135)
北京雾霾天大气颗粒物中微生物气溶胶的浓度及粒谱特征	胡凌飞, 张柯, 王洪宝, 李娜, 王洁, 杨文慧, 殷喆, 焦周光, 温占波, 李劲松 (3144)
2015 年春节北京市空气质量分析	程念亮, 陈添, 张大伟, 李云婷, 孙峰, 魏强, 刘嘉林, 刘保献, 孙瑞雯 (3150)
上海市大气挥发性有机化学消耗与臭氧生成的关系	王红丽 (3159)
生物滴滤塔净化氯代烃混合废气的研究	陈东之, 缪孝平, 欧阳杜娟, 叶杰旭, 陈建孟 (3168)
一种基于 GOCI 数据的叶绿素 a 浓度三波段估算模型	郭宇龙, 李云梅, 李渊, 吕恒, 刘阁, 王旭东, 张思敏 (3175)
巢湖溶解性有机物时空分布规律及其影响因素	叶琳琳, 吴晓东, 刘波, 闫德智, 张玫琪, 周阳 (3186)
河北洺河溶解性有机物光谱学特性	虞敏达, 张慧, 何小松, 檀文炳, 张媛, 马丽娜, 席北斗, 党秋玲, 高如泰 (3194)
东山岛地下水“三氮”空间分布特征	吴海燕, 傅世锋, 蔡晓琼, 汤坤贤, 曹超, 陈庆辉, 梁修雨 (3203)
重庆典型岩溶区地下河中溶解态正构烷烃、脂肪酸来源、迁移及转化	梁作兵, 孙玉川, 王尊波, 师阳, 江泽利, 张媚, 谢正兰, 廖昱 (3212)
硫酸对乌江中上游段岩溶水化学及 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 的影响	黄奇波, 覃小群, 刘朋雨, 张连凯, 苏春田 (3220)
阆中市思依镇水化学特征及其成因分析	张艳, 吴勇, 杨军, 孙厚云 (3230)
东南沿海河流-水库系统藻类生长营养盐限制季节变动	陈聪聪, 饶拉, 黄金良, 白敏冬 (3238)
水体氮磷营养盐水平与氯霉素浓度复合水体对苦草的生理生化影响	胡珍珍, 崔益斌, 李梅, 余静 (3248)
溶藻活性物质对棕囊藻溶藻及其脂肪酸影响的模拟	杨秋婵, 赵玲, 尹平河, 谭烁, 舒万姣, 侯少玲 (3255)
坡岸截留强化处理设施在不同运行条件下对农业面源污染物去除效果	李怀正, 陈珂莉, 危忠, 王卫刚 (3262)
典型材料屋面积尘重金属形态分布与风险评估	李敦柱, 管运涛, 刘安, 李思远 (3269)
南水北调丹江口水库水氯(胺)化消毒副产物产生特性与消毒工艺对比	张民盛, 徐斌, 张天阳, 程拓, 夏圣骥, 楚文海 (3278)
臭氧-混凝交互作用对混凝效果的影响	刘海龙, 郭雪峰, 王敏慧, 焦茹媛, 石健 (3285)
含溴水臭氧化过程阴离子对溴酸盐生成的影响	吴悦, 吴纯德, 刘吕刚, 袁博杰 (3292)
厌氧环境雌黄溶解产物形态的 XAS 研究	王莹, 许丽英, 王少锋, 肖翻, 贾永峰 (3298)
印染及染料行业废水生物处理系统中的 AOX 污染研究	申洋洋, 刘锐, 徐灿灿, 舒小铭, 许江军, 兰亚琼, 陈吕军 (3304)
螺旋霉素制药废水处理过程中耐药菌和抗性基因的转归特征	覃彩霞, 佟娟, 申佩弘, 魏源送 (3311)
两种膜生物反应器处理养猪沼液的比较研究	税勇, 川岸朋树, 宋小燕, 刘锐, 陈吕军 (3319)
农村污水膜生物反应器系统中微生物群落解析	孔晓, 崔丙健, 金德才, 吴尚华, 杨波, 邓晔, 庄国强, 庄绪亮 (3329)
四区一体反应器冬季启动脱氮特性及硝化菌群结构分析	张岩, 孙凤侠, 谢杭冀, 陈敬, 睦稀, 甘志明, 王修平, 史扬 (3339)
从亚硝酸还原厌氧氨氧化转变为硫酸盐型厌氧氨氧化	刘正川, 袁林江, 周国标, 李晶 (3345)
提高有机负荷对好氧颗粒污泥形成与稳定过程的影响	刘小鹏, 王建芳, 钱飞跃, 王琰, 陈重军, 沈耀良 (3352)
常规施肥条件下农田不同途径氮素损失的原位研究: 以长江中下游地区夏玉米季为例	桑蒙蒙, 范会, 姜珊珊, 蒋静艳 (3358)
水氮组合模式对双季稻甲烷和氧化亚氮排放的影响	傅志强, 龙攀, 刘依依, 钟娟, 龙文飞 (3365)
厌氧条件下砂壤水稻土 N ₂ 、N ₂ O、NO、CO ₂ 和 CH ₄ 排放特征	曹娜, 王睿, 廖婷婷, 陈诺, 郑循华, 姚志生, 张海, Klaus Butterbach-Bahl (3373)
黄土丘陵区不同有机碳背景下侵蚀坡面土壤呼吸特征	陈盖, 许明祥, 张亚锋, 王超华, 樊会敏, 王闪闪 (3383)
生物炭添加对半干旱地区土壤温室气体排放的影响	郭艳亮, 王丹丹, 郑纪勇, 赵世伟, 张兴昌 (3393)
宁南山区林地土壤原位矿化过程中碳氮转化耦合特征	倪银霞, 黄懿梅, 牛丹, 赵彤, 闫浩, 蒋跃利 (3401)
石漠化山地植被恢复过程土壤团聚体氮分布及与氮素矿化关系研究	胡宁, 马志敏, 蓝家程, 伍宇春, 陈高起, 傅瓦利, 文志林, 王文净 (3411)
江汉平原农田土壤有机碳分布与变化特点: 以潜江市为例	王玉竹, 肖和艾, 周萍, 童成立, 葛体达, 曾冠军, 吴金水 (3422)
缙云山不同土地利用方式下土壤团聚体中活性有机碳分布特征	李睿, 江长胜, 郝庆菊 (3429)
西北典型工矿型城市街道尘埃重金属污染的环境磁学响应	聂燕, 王新, 王博, 许淑婧, 高福元, 余晔, 夏敦胜, 夏听鸣 (3438)
电镀厂周边环境重金属分布特征及人体健康暴露风险评价	郭鹏然, 雷永乾, 周巧丽, 王畅, 潘佳钊 (3447)
典型电力电容器污染土壤中多氯联苯水平及特性	刘洁, 李晓东, 赵中华, 祁志福, 陈彤, 严建华 (3457)
紫色土对硫丹的吸附与解吸特征	赵炎, 郑国灿, 朱恒, 张进忠, 朱秀英, 胡淑春, 吴娅林 (3464)
紫茉莉对石油污染盐碱土壤微生物群落与石油烃降解的影响	焦海华, 崔丙健, 吴尚华, 白志辉, 黄占斌 (3471)
4 株外生菌根真菌对 Al ³⁺ 吸收与吸附的研究	王明霞, 袁玲, 黄建国, 周志峰 (3479)
长春市郊区蔬菜有机磷农药残留与健康风险评价	于锐, 刘景双, 王其存, 刘强, 王洋 (3486)
北京市北神树生活垃圾填埋场产甲烷菌的群落结构和演替规律	宋立娜, 王磊, 夏孟婧, 苏月, 李振山 (3493)
城市分散式粪便颗粒化有机肥用作叶菜肥的肥力及环境影响	吕文洲, 乔宇祥, 余宁, 史荣华, 王光明 (3501)
V ₂ O ₅ -WO ₃ /TiO ₂ 催化剂与活性炭混合降解气相二噁英	任咏, 纪莎莎, 俞明峰, 李晓东, 严建华 (3508)
基于出行服务的纯电动公交车节能减排效益分析	林晓丹, 田良, 吕彬, 杨建新 (3515)
我国挥发性有机物定义和控制指标的探讨	江梅, 邹兰, 李晓倩, 车飞, 赵国华, 李刚, 张国宁 (3522)
异化铁还原对土壤中重金属形态转化及其有效性影响	司友斌, 王娟 (3533)
《环境科学》征订启事 (3297) 《环境科学》征稿简则 (3303) 信息 (3127, 3202, 3277, 3318)	

宁南山区林地土壤原位矿化过程中碳氮转化耦合特征

倪银霞, 黄懿梅*, 牛丹, 赵彤, 闫浩, 蒋跃利

(西北农林科技大学资源环境学院, 农业部西北植物营养与农业环境重点实验室, 杨凌 712100)

摘要: 为了解宁南山区典型植被恢复模式之一——人工林地土壤碳氮转化的特征以及二者的关系, 运用 PVC 顶盖埋管法进行 1 a 的原位矿化培养实验, 每隔 2 个月采样, 研究柠条、山桃、山杏林地中土壤有机碳、可溶性有机碳和微生物量碳与土壤有机氮、无机氮以及净氨化速率、净硝化速率、净矿化速率和微生物固定速率在一年中的变化特征以及碳氮耦合关系。结果表明在原位培养过程中, 61 ~ 120 d 碳氮的变化最明显, 主要受到土壤水分的影响; 土壤有机碳和全氮极显著正相关, 土壤微生物量碳氮、可溶性有机碳氮显著正相关; 土壤有机碳转化速率显著影响净氨化速率、净硝化速率和 MBN 转化速率, 且符合一元线性回归方程; 柠条地培养一年后土壤微生物商 (MBC/SOC)、MBN/SON 显著升高, 而且净硝化速率、净矿化速率显著大于山桃和山杏。

关键词: 碳氮变化; 人工林地; 原位培养; 碳氮耦合; 线性回归

中图分类号: X171 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)09-3401-10 DOI: 10.13227/j.hjxx.2015.09.036

Characteristics and Coupling Relationship of Soil Carbon and Nitrogen Transformation During *In-situ* Mineralization Cultivation in Forestlands in the Mountain Area of Southern Ningxia

NI Yin-xia, HUANG Yi-mei*, NIU Dan, ZHAO Tong, YAN Hao, JIANG Yue-li

(Key Laboratory of Plant Nutrition and the Agri-environment in Northwest China, Ministry of Agriculture, College of Natural Resource and Environmental, Northwest A&F University, Yangling 712100, China)

Abstract: The study aimed to investigate the characteristics and relationship between soil carbon and nitrogen transformation of artificial forestlands, which is one type of vegetation restoration in the mountain area of Southern Ningxia. Soil samples were collected every two months in a year from three forestlands, and the characteristics of soil organic carbon, dissolved carbon, microbial biomass carbon, organic nitrogen, inorganic nitrogen, soil ammonification, nitrification and mineralization rates, microbial immobilization rates and coupling of soil carbon and nitrogen were studied by the *in-situ* closed-top PVC tube incubation methods. The results showed that: in the process of *in-situ* incubation, the most obvious changes of carbon and nitrogen were in 61-120 days which was mainly affected by soil moisture; There were significantly positive correlations between the soil organic carbon and the total nitrogen, microbial biomass carbon and microbial biomass nitrogen, dissolved carbon and dissolved nitrogen; Transformation rates of soil organic carbon had significant effects on the soil ammonification, nitrification and microbial immobilization rates. It can be well simulated by model of linear regression equation; Microbial quotient, MBN/SON were significantly increased in soil of *Caragana korshinskii* land. Net nitrification rates, net mineralization rates in *Caragana korshinskii* land were significantly higher than that in *Prunus davidiana* and *Prunus mandshurica* lands.

Key words: change of soil carbon and nitrogen; artificial forestlands; *in-situ* incubation; coupling of carbon and nitrogen; linear regression

土壤碳、氮含量及其动态平衡直接影响着土壤肥力和林地生产力, 有机碳氮的矿化是土壤中重要的生物化学过程, 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。氮素是限制植物生长的重要营养元素, 土壤中氮含量的改变对陆地生态系统碳循环过程有不同程度的影响^[1]。陆地生态系统中, 碳循环和氮循环紧密相连, 表现出相互耦合作用, 进行土壤碳氮养分研究具有重要的现实意义。氮素可限制植物光合、有机质分解、同化产物的分配以及生态系统对大气 CO₂ 浓度升高的响应, 碳氮耦合循环模型分为静态

模型、土壤氮限制模型和叶氮限制模型^[2]。不同碳循环过程模型表达方法的不确定性主要是由于无法深入了解氮素在呼吸作用和同化物分配过程中的作用^[1]。我国农田土壤碳氮耦合特征存在区域差异, 耕层土壤有机碳和全氮含量之间存在显著耦合关系^[3]。不同施肥措施下碳氮功能的耦合效应不同^[4,5]。国内外对土壤碳氮转化耦合特征的研究多

收稿日期: 2014-12-25; 修订日期: 2015-05-13

基金项目: 国家自然科学基金项目(41101254)

作者简介: 倪银霞(1989~), 女, 硕士, 主要研究方向为环境化学, E-mail: 925796584@qq.com

* 通讯联系人, E-mail: ymhuang1971@nwsuaf.edu.cn

集中在森林和农田^[6~10],很少涉及植被恢复模式下的林地.宁夏南部山区地处内陆,气候干旱,地面多山,下垫面复杂,生态环境脆弱.在国家退耕还林政策支持下,生态环境得到了改善.但是,关于不同退耕还林方式下,土壤中碳氮耦合关系尚不清楚.因此,本文选择宁南山区典型人工林地中的柠条、山桃和山杏林地土壤作为研究对象,采用PVC顶盖埋管法进行为期1 a的原位矿化培养实验,探究土壤矿化过程中林木类型及温度、水分对土壤碳氮转化速率的影响,以期为宁南山区生态系统的保护、恢复及重建工作提供理论依据.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于中国科学院水土保持研究所固原生

态站上黄试验区(海拔1 534~1 822 m),它属于典型的黄土高原丘陵沟壑区,为半干旱中温带向暖温带过渡季风气候,年均气温6.9℃,年均降水量420 mm,干燥度1.55.土壤类型主要是黄土母质上发育的淡黑垆土和黄绵土^[11].主要植被恢复模式有人工草地(苜蓿 *Leguminosae*),天然草地(长芒草 *Pseudoraphis bungeana* Trin, 百里香 *Thymus mongolicus*, 茼蒿 *Artemisia* 等),人工林地(柠条 *Caragana korshinskii*、山桃 *Prunus davidiana*, 山杏 *Prunus mandshurica* 等)和自然恢复草地等.

1.2 样地设置与实验设计

在野外调查的基础上,结合当地植被恢复的特点,选择柠条、山桃和山杏这3种典型人工林地作为研究样地,样地地理特性与植被概况如表1所示.

表1 样地植被与地理概况

Table 1 Vegetation and geography status of the sampling sites

植被类型	优势种	盖度/%	伴生种	退耕年份	坡度/(°)	经纬度	海拔/m
柠条	柠条和长芒草	65	洋冰草和茼蒿	1983	9	N36°00'35.98", E106°27'28.47"	1 649
山桃	山桃	45	长芒草	1983	18	N36°00'0.36", E106°27'53.77"	1 632
山杏	山杏和长芒草	58	猪毛蒿	2002	4	N35°59'50.61", E106°28'1.51"	1 617

于2012年4月中旬分别在每个样地中设置3个样方(20 m×20 m)作为3个野外重复,各样方均按“S”形多点采集0~10 cm土样混合后作为各样地背景土样.同时,采用PVC顶盖埋管法,在每个选定的样方内选择5个采样点,在每个选定的采样点,除去表层凋落物后,打入内径7 cm,高11 cm的PVC管,小心取出含有原状土柱的PVC管,顶部用透气不透水的塑料薄膜封口,下端用脱脂棉和纱布封口后放回原位,表层再恢复覆盖物.依次于2012年6月、8月、10月、12月和2013年4月中旬各采集一批PVC埋管土,同时采集2012年4月背景土作为对照,共6批土壤,相当于分别原位矿化培养0、60、120、180、240和360 d.采样时对应时间的土壤平均温度分别为11.5、19、21、9、-4和11.5℃.

土壤样品带回室内后分成2份,一部分冷冻保存,保存温度为-20℃,测定各项指标.一部分于阴凉处自然风干.进行室内分析前,将土样中的根系、石块等物质挑除,按照测定项目的需要,过不同粒径的土筛.

1.3 测定指标及其分析方法

土壤微生物生物量碳(MBC)采用氯仿熏蒸-

K₂SO₄提取-TOC仪测定,未熏蒸土壤的TOC即为土壤可溶性有机碳(DOC);微生物生物量氮(MBN)用氯仿熏蒸-K₂SO₄浸提后用碱性过硫酸钾氧化-紫外分光光度法测定^[12].铵态氮(NH₄⁺-N)、硝态氮(NO₃⁻-N)用KCl浸提后连续流动分析仪测定,土壤有机氮(SON)采用不包含硝态氮和亚硝态氮的半微量凯氏法测定土壤全氮,减去铵态氮后得到. pH用无CO₂水溶解振荡, pH计测定;土壤水分用烘干法;土壤有机碳(SOC)采用重铬酸钾-外加热法;可溶性有机氮(DON)是根据总可溶性氮和无机氮(NH₄⁺-N+NO₃⁻-N)的差值得^[13],其中总可溶性氮是用测定微生物生物量氮时未熏蒸土壤测出.所有测定均做3个平行.

1.4 数据分析

采用Microsoft Excel 2007进行作图分析,并对碳氮相关指标作线性回归分析,得出相关系数;用SPSS(19.0)软件对3种不同林地同一培养时间和同一林地不同培养时间土壤理化指标和微生物性质分别进行方差分析,多重比较采用Scheffe法.

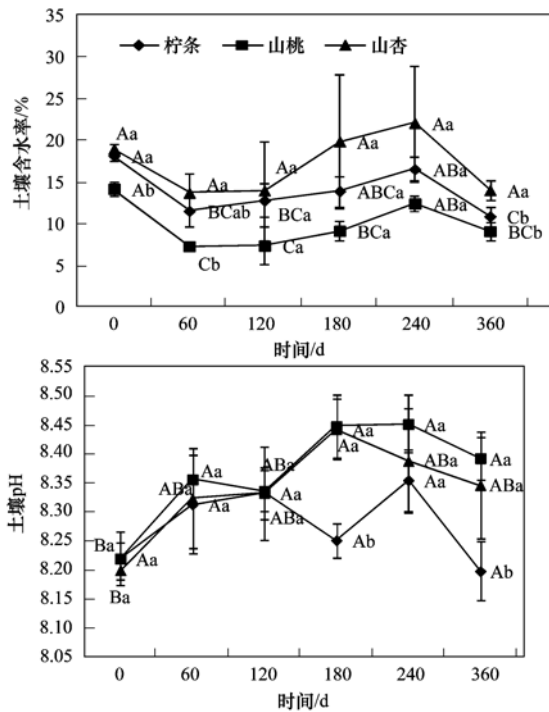
净氨化速率 $[\text{mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{d})^{-1}] = (\text{培养后 } \text{NH}_4^+ - \text{N} - \text{培养前 } \text{NH}_4^+ - \text{N}) / \text{天数}$

净硝化速率 $[\text{mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{d})^{-1}] = (\text{培养后 } \text{NO}_3^- - \text{N} - \text{培养前 } \text{NO}_3^- - \text{N}) / \text{天数}$

- 培养前 $\text{NO}_3^- \text{-N}$)/天数
净矿化速率 $[\text{mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{d})^{-1}]$
= $[(\text{培养后}\text{NH}_4^+ \text{-N} + \text{NO}_3^- \text{-N}) - (\text{培养前}\text{NH}_4^+ \text{-N} + \text{NO}_3^- \text{-N})] / \text{天数}$
SOC、SON、MBC 和 MBN 的转化速率与上述计算相同,即分别为培养后对应含量减去培养前含量,差值再除以培养天数,共 5 个时间段。

2 结果与分析

2.1 原位矿化过程中土壤水分和 pH 值的变化特征
如图 1 所示,土壤平均含水率在柠条、山桃和山杏地分别为 13.99%、9.95% 和 17.13%。山杏地中显著高于柠条和山桃地;整体上都在 61~120 d (6~8 月) 较低,初始值(4 月)较高。最低值都出现在 60 d,分别比初始低 6.63%、6.88% 和 5.28%,且前两个林地差异显著 ($P < 0.05$)。最高值在柠条和山桃地都出现在 0 d,而山杏林地在 240 d,且比初始增加了 16.28%。矿化期间土壤平均 pH 值在柠条、山桃和山杏地分别为 8.28、8.37 和 8.34,山桃和山杏变化趋势基本一致,都在 180 d 最高,0 d 最低,之间分别相差 0.23、0.19,差异不显著。而柠条在 240 d 达到最大值,0 d 最低,二者相差 0.13,差异



不同大写字母表示同一植被类型不同矿化时间下差异显著,不同小写字母表示不同植被类型同一矿化时间差异显著,下同

图 1 人工林地基本理化性质

Fig. 1 Soil basic physiochemical characters in different artificial forestlands

显著 ($P < 0.05$)。
2.2 原位矿化过程中土壤碳素的变化特征
2.2.1 碳素含量的变化(有机碳、可溶性有机碳、微生物量碳)
如图 2 所示,土壤有机碳含量在矿化期间变化不显著,夏季(60 d)普遍较高,秋冬季(121~240 d)普遍较低。土壤有机碳平均含量在山杏、柠条和山桃地分别为 10.08、9.17 和 8.12 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。土壤 DOC 含量在培养后期显著增加,在 360 d 达最大,较培养初始增加了 1.93~3.39 倍;120 d 最低,比初始下降 41.42%~63.36%。培养期间,柠条和山桃林地 DOC

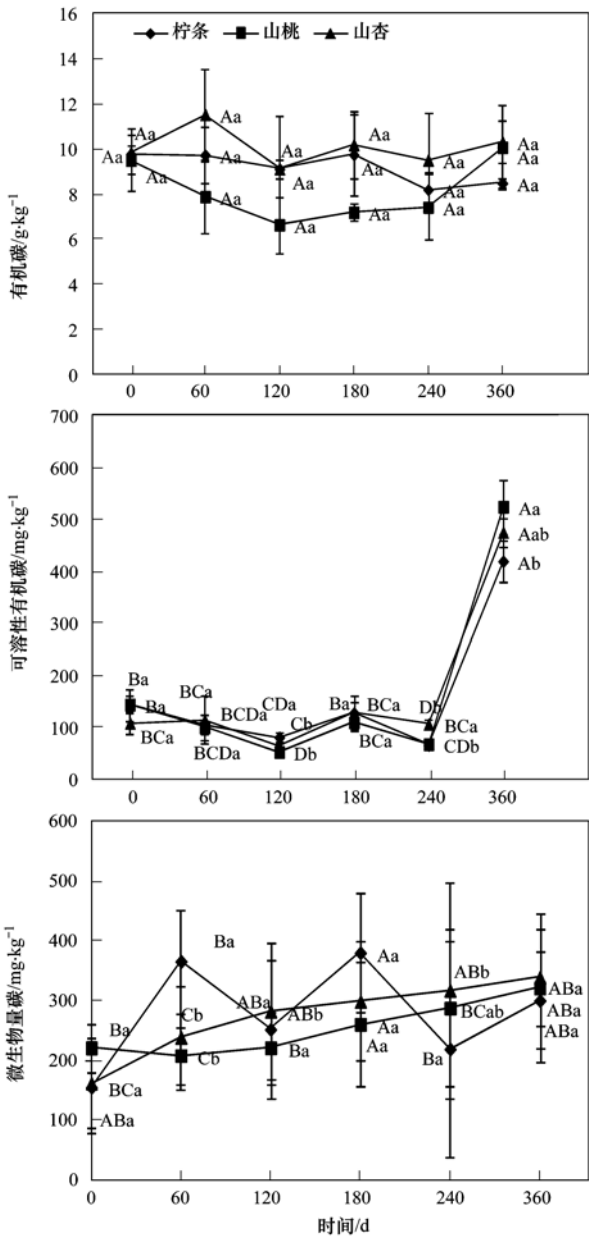


图 2 土壤原位矿化过程中碳素的变化

Fig. 2 Soil carbon distribution in soil in-situ mineralization cultivation

的平均含量显著高于山杏林地($P < 0.05$). 土壤微生物量碳(MBC)含量大体呈现出0 d、360 d和121~180 d大于60 d、240 d,即春、秋季>夏、冬季的趋势. 都在培养60 d(6月)时达到最小值,比0 d降低了71.3%~90.4%,山杏地显著大于山桃和柠条($P < 0.05$). 培养180 d(10月)时均达到最大值,比0 d分别增加了145.12%、139.25%和106.53%,柠条和山桃增加显著($P < 0.05$). 360 d时3种林地土壤MBC的含量都大于0 d,在柠条、山桃和山杏林地中增幅分别为27.41%、119.72%和140.16%.

2.2.2 有机碳和微生物量碳转化速率的变化

如图3所示,柠条、山桃和山杏土壤SOC的平均

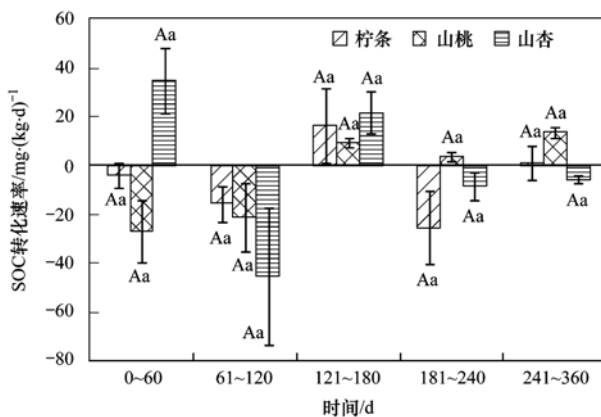


图3 有机碳和微生物量碳转化速率的动态

Fig. 3 Dynamics of soil organic carbon and microbial carbon rates

2.2.3 MBC/SOC 的变化

如图4所示,土壤MBC/SOC在3个林地的平均值分别为0.03、0.04和0.02,且山桃显著高于柠条和山杏. 培养过程中,柠条的增幅最大,为1.18倍,山桃和山杏林地分别增加了29.7%和80.4%. MBC/SOC初始值在山杏林地显著小于柠条和山桃林地,其他时间段无显著差异.

2.3 原位矿化过程中土壤氮素的变化特征

2.3.1 无机氮的变化及其转化速率

如图5所示,土壤铵态氮(NH_4^+-N)在整个培养阶段呈Z型变化,整体上降低. 在61~120 d降低显著,与培养初始(0 d)相比,培养120 d时柠条土壤铵态氮含量降幅最大为76.02%. 培养120 d以后其含量保持相对稳定. 3种林地的平均值分别为5.10、5.35和5.07 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,在121~240 d之间含量有显著差异. 土壤硝态氮(NO_3^--N)的含量整体上降低,同一林地的不同培养时期呈现出显著的差异($P < 0.05$). 3种林地硝态氮平均值分别为11.62、2.95和3.21 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,其中柠条林地的硝态氮含量

均转化速率分别为-5.45、-4.17和-0.47 $\text{mg}\cdot(\text{kg}\cdot\text{d})^{-1}$,3种林地差异不显著. 3种林地有机碳的转化速率在培养61~120 d之间都为负值,而在121~180 d为正值. 其余时间,除了山杏在0~60 d、山桃在241~360 d为正外,基本都为负值. 即培养过程中,有机碳总体上固定较少,矿化较多. 柠条、山桃和山杏林地土壤MBC的平均转化速率分别为0.35、0.028和0.10 $\text{mg}\cdot(\text{kg}\cdot\text{d})^{-1}$. 且都在0~60 d、121~180 d和241~360 d为正值,即微生物数量增加,碳素被固定于微生物体内. 61~120 d,181~240 d MBC变化速率为负值,即MBC被转化利用而减少.

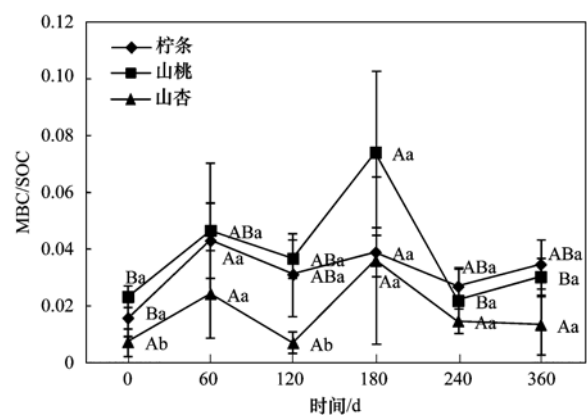
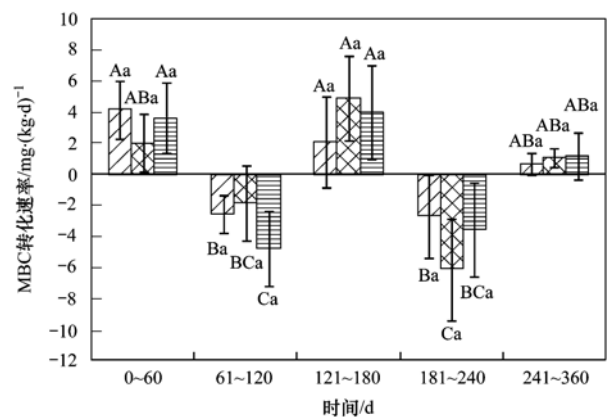


图4 MBC/SOC 的变化

Fig. 4 Changes of MBC/SOC

显著大于山桃和山杏,而且变化幅度最大,出现两个峰值,最大值为18.52 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$.

土壤中的氮同时进行2个过程转化,一是矿化作用,即在微生物作用下将有机氮转化为无机氮,为正值;另一个是腐殖化过程,即已矿化的氮被土壤中微生物同化而形成有机氮,这一过程称为矿化氮的固持作用,为负值. 如图6所示,3种林地土壤的

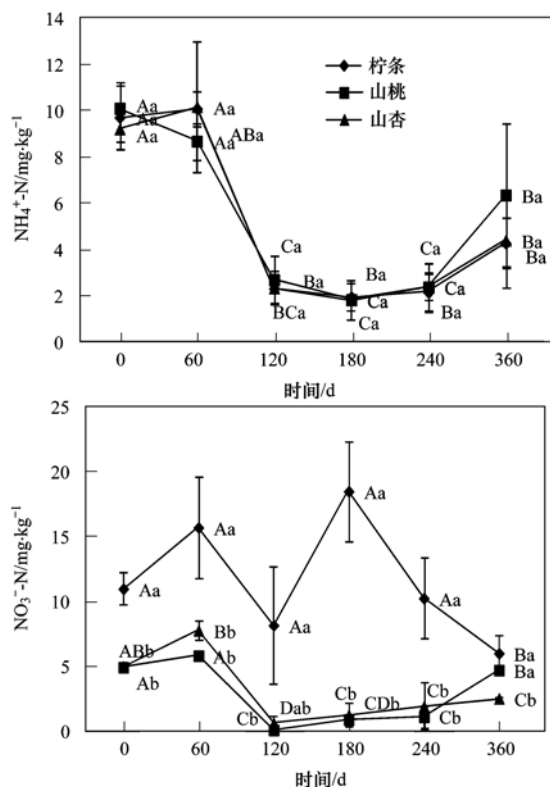


图5 土壤矿化过程中无机氮的变化

Fig. 5 Changes of inorganic nitrogen content during soil mineralization

净氨化速率相差不大,在培养期间,61 ~ 120 d 的净氨化速率最低且均为负值,241 ~ 360 d 土壤净氨化速率最大,为 $0.017 \sim 0.033 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{d})^{-1}$. 土壤净硝化速率最小值也出现在 61 ~ 120 d,其他时段的净硝化速率均显著大于 61 ~ 120 d. 土壤净硝化速率表现为柠条 > 山杏 > 山桃. 3 种林地土壤净矿化速率的变化趋势与净硝化速率基本一致. 在整个培养过程中,最小值也出现在 61 ~ 120 d,且显著小于其他时段 ($P < 0.05$). 柠条在 121 ~ 180 d 净硝化速率和净矿化速率显著大于山桃和山杏.

2.3.2 有机氮的变化及其转化速率

如图 7 所示,土壤有机氮含量表现为柠条和山桃显著大于山杏 ($P < 0.05$),平均含量分别为 0.98 、 0.71 和 $0.92 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$. 同一样地不同的培养时间差异很小,整体上为下降的趋势,降幅为 $1.03\% \sim 17.57\%$. 土壤可溶性有机氮 (DON) 原位培养 1 a 在 3 种林地都呈典型的 Z 型变化,且最小值出现在 120 d,之后都快速增加,3 种林地平均含量分别为 50.93 、 23.37 和 $23.46 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$. 整个培养期间除了 360 d,3 种林地 DON 差异不显著,其他时间段都表现为柠条地显著大于山桃和山杏. 3 种植被 DON

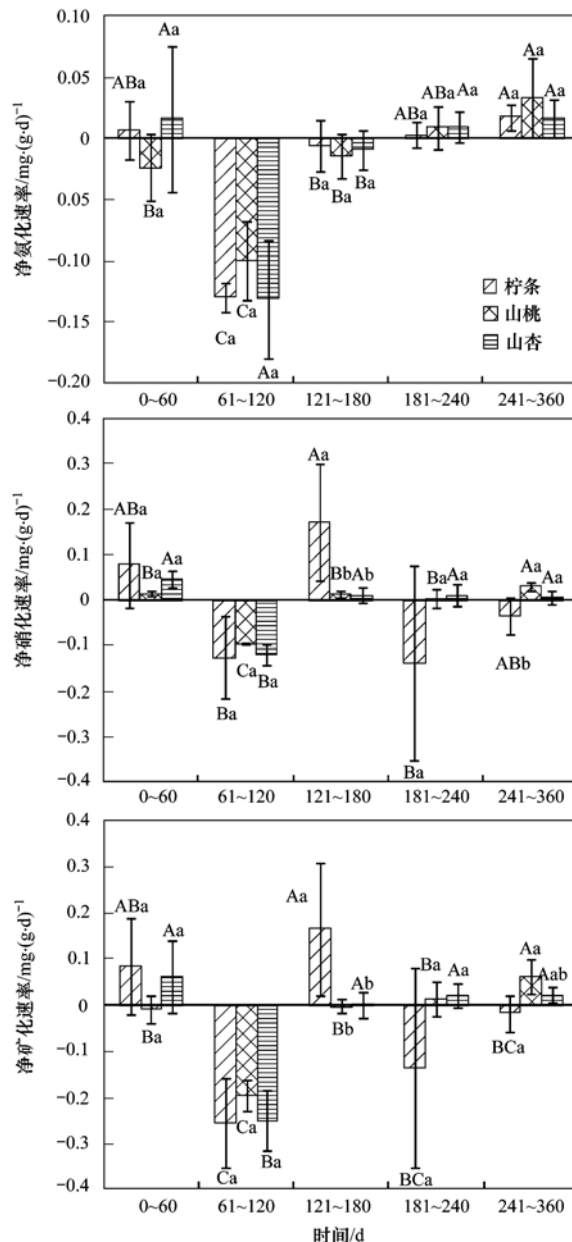


图6 不同林地土壤净氨化、净硝化、净矿化速率动态

Fig. 6 Dynamics of soil ammonification, nitrification and mineralization rates in different artificial forestlands

在 360 d 后分别比初始值增加了 1.3 倍、10.84 倍和 9.07 倍. 土壤微生物生物量氮 (MBN) 含量原位培养 360 d 后总体上增加,比初始值增加了 1 ~ 4.28 倍,且平均含量表现为柠条 > 山杏 > 山桃. 在培养期间,MBN 含量在柠条林和山杏林地变化趋势一致,120 d 时 (8 月) 达到各自的最小值,分别比 0 d 降低了 28.5% 和 63.8%. 180 d 时,柠条地 MBN 达到最高值,比初始增加了 10.45 倍,培养 360 d 时显著大于 0 d,增加了 4.28 倍. 而山杏到 240 d 达到最大值,为 $92.222 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$. 山桃林地在培养初期 0 ~ 120 d 呈下降趋势,120 d 达到最小值,与初始和 60

d 时差异显著 ($P < 0.05$), 比初始值降低了 81.45%, 360 d 时达到最大值, 为 $92.533 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 增加了 1.0 倍。

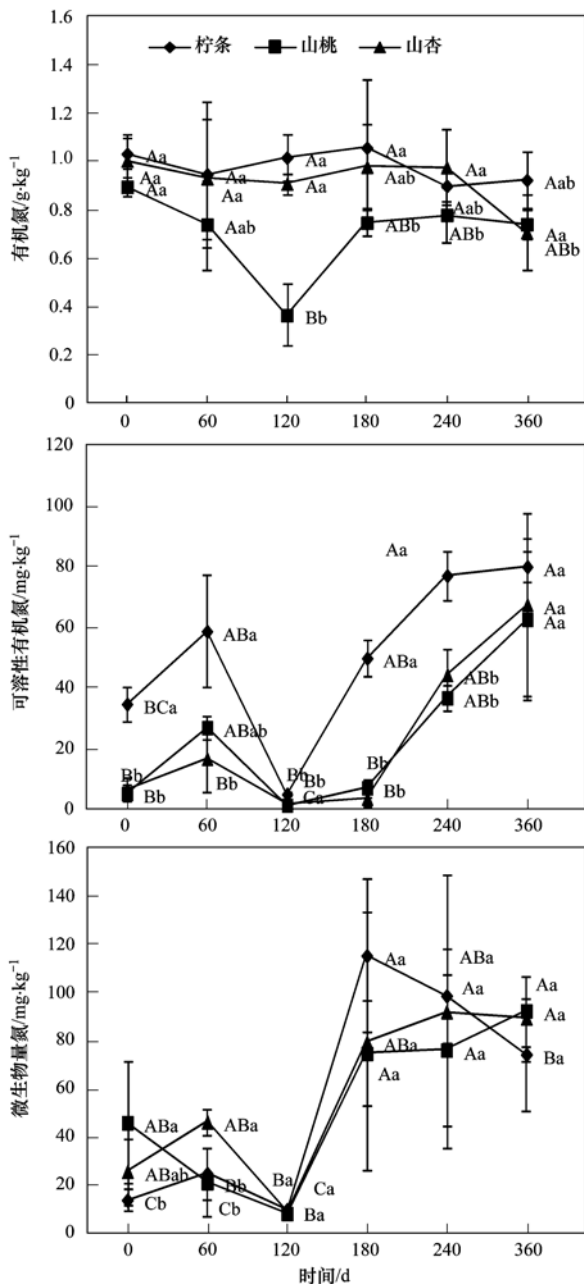


图 7 土壤矿化过程中有机氮变化

Fig. 7 Changes of organic carbon during soil mineralization

如图 8 所示, 柠条、山桃和山杏的 SON 转化速率平均值分别为 -0.36 、 -0.52 和 $0.58 \text{ mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$, 山杏地显著高于柠条和山桃. 整体上 $0 \sim 180 \text{ d}$ 转化速率较大, 而 180 d 后较低, 但是差异不显著. 土壤微生物量氮的转化速率在 3 种林地的平均值分别为 0.23 、 0.12 和 $0.33 \text{ mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$, 山杏地显著高于柠条和山桃. 3 种植

被都在 $61 \sim 120 \text{ d}$ 为负值, 即微生物数量减少或微生物量氮被转化, $121 \sim 180 \text{ d}$ 为正值, 这个时期微生物数量增加, 氮素被固定。

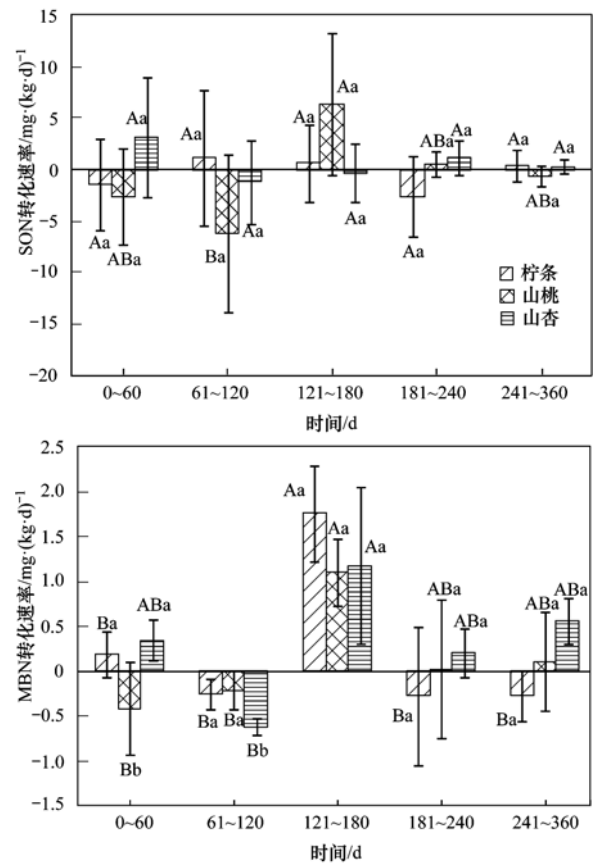


图 8 有机氮和微生物量氮的转化速率动态

Fig. 8 Dynamics of soil organic nitrogen and microbial nitrogen rates

2.3.3 MBN/SON 的变化

如图 9 所示, 柠条、山杏和山桃地土壤 MBN/SON 的平均值分别为 0.058 、 0.056 和 0.075 , 山杏显著大于柠条和山桃, MBN/SON 值在 3 种林地都于 120 d 达到最小值 0.01 , $181 \sim 360 \text{ d}$ 较高. 培养

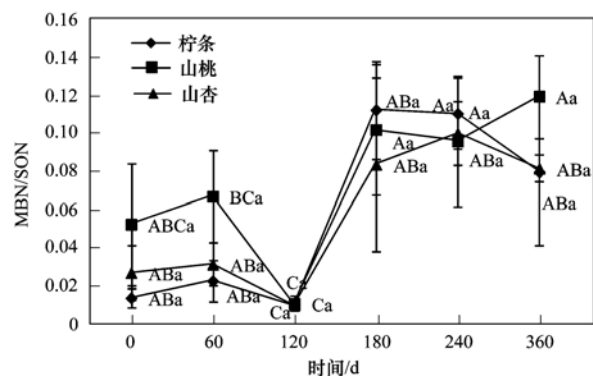


图 9 MBN/SON 的变化

Fig. 9 Changes of MBN/SON

期间都呈增加的趋势,增幅为 1.28 ~ 4.78 倍,其中柠条的增幅最大.

2.4 碳氮转化的耦合关系

培养期间,土壤有机碳与全氮、微生物量碳氮、土壤可溶性碳氮、有机碳转化速率与净氨化速率、净硝化速率和 MBN 转化速率的相关性存在明显不同,说明不同形式的碳发生变化,不同形式的氮反应

能力并不相同. 设土壤全氮、MBN、DON、净氨化速率、净硝化速率和 MBN 转化速率这 6 个自变量分别为 x_1 、 x_2 、 x_3 、 x_4 、 x_5 和 x_6 ,对应的应变变量分别为有机碳(y_1)、MBC(y_2)、DOC(y_3)、SOC 转化速率(y_4). 其耦合结果如表 2 所示,土壤有机碳与全氮含量、土壤微生物量碳氮之间都呈极显著正相关,而土壤可溶性有机碳氮之间呈显著正相关.

表 2 碳氮转化的耦合关系¹⁾

Table 2 Coupling between transformation of soil carbon and nitrogen			
变量		线性方程	相关系数 R
自变量 x	应变变量 y		
全氮(x_1)	有机碳(y_1)	$y_1 = 7.6957x_1 + 2.1012$	$R_1 = 0.669^{**}$
MBN(x_2)	MBC(y_2)	$y_2 = 1.6761x_2 + 94.8059$	$R_2 = 0.793^{**}$
DON(x_3)	DOC(y_3)	$y_3 = 3.0310x_3 + 64.2792$	$R_3 = 0.582^*$
净氨化速率(x_4)	SOC 转化速率(y_4)	$y_4 = 0.1243x_4 + 0.0002$	$R_4 = 0.625^*$
净硝化速率(x_5)		$y_4 = 0.1717x_5 - 0.0019$	$R_5 = 0.677^{**}$
MBN 转化速率(x_6)		$y_4 = 0.0222x_6 - 0.0084$	$R_6 = 0.700^{**}$

1) * 表示存在显著相关($P < 0.05$), ** 表示存在极显著相关($P < 0.01$),下同

将 3 种林地所有时间段的土壤相关指标进行相关性分析,结果如表 3 所示,土壤 MBC 与 DOC、MBN 极显著正相关,与铵态氮极显著负相关,而土壤 MBN 与土壤水分和铵态氮极显著负相关,MBC/MBN 与土壤水分极显著正相关,与 DOC 和有机氮显著负相关,MBC/SOC 与有机氮极显著负相关.

MBN/SON 与土壤水分和铵态氮极显著负相关,与 MBC 和 DOC 极显著正相关. 净氨化速率与 pH 和 MBC、硝态氮、MBN 显著相关. 而净硝化速率和净矿化速率一致,与水分和铵态氮极显著正相关,与 MBC 和 MBN 显著负相关,说明氮素矿化与铵态氮和 MBN 这两种氮素形态密切相关.

表 3 土壤碳氮转化速率与土壤理化性质的关系

Table 3 Correlation coefficients of rates of carbon and nitrogen transformation and soil basic physiochemical characters								
	MBC	MBN	MBC/MBN	MBC/SOC	MBN/SON	净氨化速率	净硝化速率	净矿化速率
pH	0.186	0.201	-0.086	0.195	0.222	0.299 *	0.135	0.018
水分	-0.026	-0.368 * *	0.506 * *	0.194	-0.450 * *	0.509	0.486 * *	0.529 * *
SOC	0.024	0.123	-0.133	-0.290 * *	0.074	0.120	0.013	0.059
DOC	0.262 * *	-0.138	-0.232 *	-0.007	0.278 * *	-0.185	-0.099	-0.149
NH ₄ ⁺ -N	-0.414 * *	-0.520 * *	0.178	-0.146	-0.377 * *	0.290 * *	0.427 * *	0.434 * *
NO ₃ ⁻ -N	-0.064	0.018	-0.005	0.033	0.142	-0.254 *	0.035	-0.078
有机氮	0.027	0.097	-0.226 *	-0.289 * *	0.203 *	-0.067	0.013	-0.017
MBC	1	0.793 * *	-0.197	0.377 * *	0.554 * *	-0.267 *	-0.276 * *	-0.312 * *
MBN		1	-0.405 * *	0.056	0.580 * *	-0.422 * *	-0.380 * *	-0.053 * *

3 讨论

土壤中有机碳是微生物活动的能源,氮是构成微生物细胞的要素,碳氮含量的大小,决定于土壤碳氮输入、输出及相关土壤性质和过程. 土壤中的氮绝大部分是以有机态形式存在,约占土壤全氮量的 92% ~ 98%. 但有机态氮不能被植物直接吸收利用,必须通过矿化作用转化为无机态氮才可以被植物所吸收、利用. 本研究采用顶盖埋管法保持了原有土壤的水分、通气性,理论上排除了植物对碳氮的吸收和无机氮淋溶,能较好地反映土壤自然矿化

特征.

3.1 土壤矿化过程中碳氮转化的耦合关系

本实验得出有机碳和全氮之间存在极显著正相关关系,相关系数为 0.669^{**},这一结论与文献[5, 14]的研究一致,说明有机碳是影响土壤氮素的主要因子,其含量变化能够影响到土壤微生物对氮的转化. 杜满义等^[7]对不同深度土壤有机碳和全氮含量进行拟合,两者遵循三次多项式拟合模型,与本研究结果不一致,可能与土壤深度有关. 土壤中碳氮的相互关系是通过微生物连接起来的,土壤微生物的活性对土壤有机质的分解非常重要,土壤微生物

与土壤有机碳、全氮有显著相关性^[15]。氮素的增加可以提高土壤微生物的活性,加速土壤有机质的分解^[16]。本实验中,土壤微生物量碳氮之间存在着极显著正相关关系,相关系数达到 0.793**,这说明 MBN 和 MBC 作为生物指标时具有协同性^[17]。可溶性有机碳、氮是土壤中重要的两个元素,它们在土壤中的含量、营养物质循环供给以及植物的生长等方面有紧密的联系。本实验中可溶性有机碳、氮之间存在着显著正相关关系,相关系数为 0.582*。由于其最大的特点是可溶性,可以被植物吸收利用,所以一方值降低,另一方会相应地减少;SOC 转化速率与净氨化速率显著正相关,相关系数为 0.625*,与净硝化速率和 MBN 转化速率极显著正相关,相关系数分别为 0.677** 和 0.700**,说明土壤碳氮的转化关系密切,两个过程同时进行且相互影响。

3.2 温度和水分对土壤碳氮转化及其耦合关系的影响

本研究土壤有机碳变化不显著,而 MBC 含量变化较大,因为与土壤有机碳相比,微生物量碳库的周转率更大,周转时间更短,所以 MBC 比有机碳变化更快^[18]。有机碳的动态变化过程主要体现在积累/矿化过程上,61~120 d 转化速率为负,即这个时期有机碳的矿化大于积累,此时 MBC 的转化速率与 SOC 同步也为负值,说明此时有机碳的矿化主要是由 MBC 引起,可能是由于此时土壤水分含量较低,而且土壤温度最高,土壤处于干旱缺水状态,不利于微生物的活动。研究指出,土壤温度在 0~35℃ 范围内,微生物活动会随着温度的升高而明显增强。在干旱缺水的情况下,水分状况将成为影响土壤微生物生物量的重要因素,水分的可利用性直接影响微生物的活性。土壤严重干旱时,土壤中微生物的活性会受到影响,微生物开始死亡或休眠^[19]。土壤 MBC 在培养 60 d 时含量最低,由于这个时期处于原位培养的初期,一方面原位埋管限制了正常土壤中根系分泌物对土壤养分的供给,微生物的环境瞬间改变,导致土壤微生物群落组成及数量重新调整,对环境敏感的微生物会通过数量的变化来适应新的环境。另一方面土壤中的有机物质和无机物的减少,使得向微生物提供的营养物质减少,减慢了微生物的自身合成代谢,从而导致 MBC 的降低。61~120 d 除了柠条林地外,有机氮的转化速率全为负值,说明此时有机氮的矿化大于固定,但是这个时期 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 都显著降低,即有机氮降解形成的无机氮素很快被微生物利用或者淋失,也有可能被

植物根系吸收,而此时 MBN 同步降低,则基本排除微生物的吸收利用。由于本研究埋管深度为 15 cm,处在表层土壤中,而人工林地中植被根系较深,植物根系可以从管口下端吸收淋失的无机氮素,导致无机氮素降低,其具体原因有待进一步研究。61~120 d 时土壤净氨化、净硝化和净矿化速率都为负值,说明这个时期微生物对氮素的同化作用强于矿化,这是因为 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量大于 $\text{NO}_3^-\text{-N}$, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 较 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 更易于为土壤微生物同化利用^[20]。

121~180 d 时 SOC、MBC 转化速率都为正,氮素的转化速率中 MBN 最明显,其积累量显著大于其他时间段,土壤碳氮累积大于矿化,微生物活性最大,土壤温度下降,但是水分含量最高,此时温度和水分含量适宜微生物的生长;180 d 时 MBC、MBN 最高,这可能是因为某些微生物群落成员在较高的温度时有能力代谢那些在较低温度时不能被利用的基质^[21]。说明碳氮变化同步,在土壤矿化过程中二者互相制约。

微生物商增大,说明土壤中可供微生物利用的碳增多,从而使微生物活性增大。本研究中,3 种植被土壤微生物商为 1%~7%,这个比例高于陈国潮等人测定的南方酸性红壤中的值^[22],这说明植被恢复对黄土高原生态破坏有一定的改善作用。土壤 DOC 是土壤有机碳中较易被微生物利用的部分,有机碳的解聚和溶解是其矿化的先决条件。本研究中,DOC 含量在 0~240 d 并无显著变化,所以水分含量对 DOC 并无显著影响,这与李忠佩等^[23]的研究结果不一致;241~360 d DOC 含量显著增加,而且 MBC 转化速率由负值变为正值,说明此时微生物活性增强,固定的有机碳增加。

研究表明,温度在 5~25℃ 范围内,氮矿化速率和硝化速率与温度和水分呈正相关^[24]。本研究中,净硝化速率、净矿化速率都与土壤水分呈极显著正相关关系,这与刘杏认等^[25]的研究结果一致,但是土壤水分与净氨化速率相关性不大,这是因为土壤氨化作用是氮素矿化的一个中间过程,土壤中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量的变化受到氨化作用和硝化作用共同影响。所以,土壤净氨化速率的变化仅能从一个侧面反映土壤氮氨化作用的强弱。土壤氮素矿化作用的产物包括 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$,二者在土壤中可以相互转化,并受到多重因素的影响,因此二者之和的变化速率即净矿化速率更能比较客观地反映土壤氮素的矿化作用。硝化作用强度基本等同于氮素矿化作用强度^[26]。

3.3 林地类型对土壤碳氮转化及其耦合关系的影响

3 种植被土壤在原地矿化一年后 MBC/SOC、MBN/SON 升高,随着植被类型的不同而不同,其中柠条地增加最显著。这可能是因为山杏和山桃地的地上草本数量较少,植被总盖度小,太阳光投射面积大,使得在夏季土壤表层温度相对高于柠条地,这种较高的土壤温度明显抑制微生物生长繁殖。而柠条地与之相反,其地表草本密集,使地温不至于过高,从而对微生物生长起正向促进作用。而山杏地 MBC 在 0 d、180 d 较低,这可能是因为此时山杏林地土壤含水率较高,造成氧气向土壤中扩散受阻,微生物呼吸受到抑制,土壤微生物呼吸速率较低,不利于微生物生长繁殖和生态系统的物质周转,其具体原因有待进一步研究。

研究发现,林型对氮素矿化有重要影响^[27]。环境因素中温度、湿度,以及凋落物供给的差异等最终是通过影响到林下不同的微生物类群的数量、种类和活力来影响氮素矿化。植被是影响土壤氮素转化的重要因素^[28]。本研究中柠条林地土壤净硝化速率、净矿化速率明显高于山桃和山杏林地,这主要是因为柠条是豆科植物,根表根瘤菌的大量存在使得根际土壤氮素养分充沛^[29]。其次,不同植被恢复方式显著影响土壤有机碳和氮含量,在整个培养过程中,山桃林地的有机碳、氮含量最低,这可能与山桃林地输入土壤中枯落物量和降解难易程度有关^[30]。

4 结论

(1) 整个培养过程中有机碳的转化与 MBC 的转化基本一致,说明有机碳含量的变化主要由 MBC 引起,土壤水分是影响二者含量变化的主要因素。DOC 在 241 ~ 360 d 显著增加,主要与土壤温度上升有关。

(2) 整个培养过程中,有机氮的矿化大于固定,部分无机氮素损失。柠条土壤氮素矿化速率显著高于山桃和山杏。

(3) 土壤有机碳与全氮含量、土壤微生物量碳氮之间都呈极显著正相关,而土壤可溶性有机碳氮之间呈显著正相关。土壤有机碳转化速率与净氨化速率显著正相关,与净硝化速率和 MBN 转化速率极显著正相关。

参考文献:

[1] 任书杰,曹明奎,陶波,等. 陆地生态系统氮状态对碳循环的限制作用研究进展[J]. 地理科学进展, 2006, **25**(4): 58-

67.

- [2] 李雷,黄玫,顾峰雪,等. 氮素影响陆地生态系统碳循环过程的模型表达方法[J]. 自然资源学报, 2013, **28**(11): 2012-2022.
- [3] 许泉,芮雯奕,刘家龙,等. 我国农田土壤碳氮耦合特征的区域差异[J]. 生态与农村环境学报, 2006, **22**(3): 57-60.
- [4] 刘畅,唐国勇,童成立,等. 不同施肥措施下亚热带稻田土壤碳、氮演变特征及其耦合关系[J]. 应用生态学报, 2008, **19**(7): 1489-1493.
- [5] 王宏燕,王晶莹,宋立娟,等. 不同培肥作用下黑土碳氮功能耦合效应的研究[J]. 东北农业大学学报, 2011, **42**(11): 130-137.
- [6] 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.
- [7] 杜满义,范少辉,漆良华,等. 不同类型毛竹林土壤碳、氮特征及其耦合关系[J]. 水土保持学报, 2010, **24**(4): 198-202.
- [8] 梁浩,胡克林,李保国,等. 土壤-作物-大气系统水热碳氮过程耦合模型构建[J]. 农业工程学报, 2014, **30**(24): 54-66.
- [9] Xue J M, Sands R, Clinton P W, *et al.* Carbon and net nitrogen mineralisation in two forest soils amended with different concentrations of biuret [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2003, **35**(6): 855-866.
- [10] Ross D J, Newton P C D, Tate K R, *et al.* Impact of a low level of CO₂ enrichment on soil carbon and nitrogen pools and mineralization rates over ten years in a seasonally dry, grazed pasture [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2013, **58**: 265-274.
- [11] 安韶山,李国辉,陈利顶. 宁南山区典型植物根际与非根际土壤微生物功能多样性[J]. 生态学报, 2011, **31**(18): 5225-5234.
- [12] 杨绒,赵满兴,周建斌. 过硫酸钾氧化法测定溶液中全氮含量的影响条件研究[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2005, **33**(12): 107-111.
- [13] 周建斌,李生秀. 碱性过硫酸钾氧化法测定溶液中全氮含量氧化剂的选择[J]. 植物营养与肥料学报, 1998, **4**(3): 299-304.
- [14] 王青山,何利平. 土壤有机质与氮素供应的相关关系[J]. 山西林业科技, 2003, (S1): 25-27.
- [15] 张社奇,王国栋,张蕾. 黄土高原刺槐林对土壤养分时空分布的影响[J]. 水土保持学报, 2008, **22**(5): 91-95.
- [16] Mann L K. Changes in soil carbon storage after cultivation[J]. *Soil Science*, 1986, **142**(5): 279-288.
- [17] 李国辉,陈庆芳,黄懿梅,等. 黄土高原典型植物根际对土壤微生物生物量碳、氮、磷和基础呼吸的影响[J]. 生态学报, 2010, **30**(4): 976-983.
- [18] Van Veen J A, Merckx R, Van De Geijn S C. Plant-and soil related controls of the flow of carbon from roots through the soil microbial biomass [J]. *Plant and Soil*, 1989, **115**(2): 179-188.
- [19] Davidson E A, Janssens I A, Luo Y Q. On the variability of

- respiration in terrestrial ecosystems: Moving beyond Q_{10} [J]. *Global Change Biology*, 2006, **12**(2): 154-164.
- [20] 沈善敏. 无机氮对土壤氮矿化与固定的影响——兼论土壤氮的“激发效应”[J]. *土壤学报*, 1986, **23**(1): 10-16.
- [21] 肖辉林, 郑习健. 土壤变暖对土壤微生物活性的影响[J]. *土壤与环境*, 2001, **10**(2): 138-142.
- [22] 陈国潮, 何振立. 红壤不同利用方式下的微生物量研究[J]. *土壤通报*, 1998, **29**(6): 276-278.
- [23] 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.
- [24] 周才平, 欧阳华. 温度和湿度对暖温带落叶阔叶林土壤氮矿化的影响[J]. *植物生态学报*, 2001, **25**(2): 204-209.
- [25] 刘杏认, 董云社, 齐玉春, 等. 温带典型草地土壤净氮矿化作用研究[J]. *环境科学*, 2007, **28**(3): 633-639.
- [26] Tahovská K, Kaňa J, Bárta J, *et al.* Microbial N immobilization is of great importance in acidified mountain spruce forest soils [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2013, **59**: 58-71.
- [27] 王瑾. 森林生态系统中养分循环特征的比较研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2002.
- [28] 庄舜尧, 刘国群, 徐梦洁, 等. 不同海拔高度下森林土壤中氮的矿化[J]. *土壤学报*, 2008, **45**(6): 1194-1198.
- [29] 张文婷, 来航线, 王延平, 等. 黄土高原不同植被坡地土壤微生物区系特征[J]. *生态学报*, 2008, **28**(9): 4228-4234.
- [30] 李君剑, 刘峰, 周小梅. 矿区植被恢复方式对土壤微生物和酶活性的影响[J]. *环境科学*, 2015, **36**(5): 1836-1841.

CONTENTS

Estimation of PM _{2.5} Concentration over the Yangtze Delta Using Remote Sensing: Analysis of Spatial and Temporal Variations	XU Jian-hui, JIANG Hong (3119)
Seasonal and Spatial Variations of Carbon Fractions in PM _{2.5} in Ningbo and the Estimation of Secondary Organic Carbon	DU Bo-han, HUANG Xiao-feng, HE Ling-yan, <i>et al.</i> (3128)
Concentrations of Acidic Gases, Ammonia and Related Water-Soluble Ions in PM _{2.5} and Gas-Particle Partitioning in Qingdao	ZHOU Jia-jia, SHI Jin-hui, LI Li-ping, <i>et al.</i> (3135)
Concentration and Particle Size Distribution of Microbiological Aerosol During Haze Days in Beijing	HU Ling-fei, ZHANG Ke, WANG Hong-bao, <i>et al.</i> (3144)
Air Quality Characteristics in Beijing During Spring Festival in 2015	CHENG Nian-liang, CHEN Tian, ZHANG Da-wei, <i>et al.</i> (3150)
Chemical Loss of Volatile Organic Compounds and Its Impact on the Formation of Ozone in Shanghai	WANG Hong-li (3159)
Removal of Waste Gas Containing Mixed Chlorinated Hydrocarbons by the Biotrickling Filter	CHEN Dong-zhi, MIAO Xiao-ping, OUYANG Du-juan, <i>et al.</i> (3168)
A Three Band Chlorophyll-a Concentration Estimation Model Based on GOCI Imagery	GUO Yu-long, LI Yun-mei, LI Yuan, <i>et al.</i> (3175)
Temporal and Spatial Distribution Characteristics of Dissolved Organic Matter and Influencing Factors in Lake Chaohu	YE Lin-lin, WU Xiao-dong, LIU Bo, <i>et al.</i> (3186)
Spectral Characteristic of Dissolved Organic Matter in Xiaohe River, Hebei	YU Min-da, ZHANG Hui, HE Xiao-song, <i>et al.</i> (3194)
Spatial Variation of Ammonia-N, Nitrate-N and Nitrite-N in Groundwater of Dongshan Island	WU Hai-yan, FU Shi-feng, CAI Xiao-qiong, <i>et al.</i> (3203)
Sources, Migration and Conversion of Dissolved Alkanes, Dissolved Fatty Acids in a Karst Underground River Water, in Chongqing Area	LIANG Zuo-bing, SUN Yu-chuan, WANG Zun-bo, <i>et al.</i> (3212)
Influence of Sulfuric Acid to Karst Hydrochemical and $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ in the Upper and Middle Reaches of the Wujiang River	HUANG Qi-bo, QIN Xiao-qun, LIU Peng-yu, <i>et al.</i> (3220)
Hydrochemical Characteristic and Reasoning Analysis in Siyi Town, Langzhong City	ZHANG Yan, WU Yong, YANG Jun, <i>et al.</i> (3230)
Seasonal Variation on Nutrient Limitation for Phytoplankton Growth in a Coastal River-Reservoir System, Southeast China	CHEN Cong-cong, RAO La, HUANG Jin-liang, <i>et al.</i> (3238)
Physiological Effect of <i>Vallisneria natans</i> Under Different Concentrations of Nitrogen, Phosphorus and Chloramphenicol	HU Zhen-zhen, CUI Yi-bin, LI Mei, <i>et al.</i> (3248)
Effects of Algicidal Substance on <i>Phaeocystis globosa</i> and Its Fatty Acids by the Simulation Experiment	YANG Qiu-chan, ZHAO Ling, YIN Ping-he, <i>et al.</i> (3255)
Agricultural Non-Point Source Pollutants Removal by Enhanced Riverbank Interception Facilities Under Different Operating Conditions	LI Huai-zheng, CHEN Ke-li, WEI Zhong, <i>et al.</i> (3262)
Speciation Distribution and Risk Assessment of Heavy Metals in Typical Material Roof Dusts	LI Dun-zhu, GUAN Yun-tao, LIU An, <i>et al.</i> (3269)
Formation of Disinfection By-Products During Chlor(am)ination of Danjiangkou Reservoir Water and Comparison of Disinfection Processes	ZHANG Min-sheng, XU Bin, ZHANG Tian-yang, <i>et al.</i> (3278)
Effects of Interaction of Ozonation and Coagulation on Coagulation Results	LIU Hai-long, GUO Xue-feng, WANG Min-hui, <i>et al.</i> (3285)
Effects of Anions on Bromate Formation During Ozonation of Bromide-Containing Water	WU Yue, WU Chun-de, LIU Li-gang, <i>et al.</i> (3292)
XAS Analysis upon Dissolved Species of Orpiment in Anoxic Environment	WANG Ying, XU Li-ying, WANG Shao-feng, <i>et al.</i> (3298)
AOX Pollution in Wastewater Treatment Process of Dyeing and Dyestuff Chemical Industries	SHEN Yang-yang, LIU Rui, XU Can-can, <i>et al.</i> (3304)
Fate of ARB and ARGs During Wastewater Treatment Process of Spiramycin Production	QIN Cai-xia, TONG Juan, SHEN Pei-hong, <i>et al.</i> (3311)
A Comparative Study on Two Membrane Bioreactors for the Treatment of Digested Piggery Wastewater	SHUI Yong, Kawagishi Tomoki, SONG Xiao-yan, <i>et al.</i> (3319)
Analysis of Microbial Community in the Membrane Bio-Reactor (MBR) Rural Sewage Treatment System	KONG Xiao, CUI Bing-jian, JIN De-cai, <i>et al.</i> (3329)
Start-up Characteristics of Four-zone Integrated Reactor for Nitrogen Removal in Winter and Analysis of Nitrobacteria Community	ZHANG Yan, SUN Feng-xia, XIE Hang-ji, <i>et al.</i> (3339)
Achievement of Sulfate-Reducing Anaerobic Ammonium Oxidation Reactor Started with Nitrate-Reducing Anaerobic Ammonium Oxidation	LIU Zheng-chuan, YUAN Lin-jiang, ZHOU Guo-biao, <i>et al.</i> (3345)
Effect of Increasing Organic Loading Rate on the Formation and Stabilization Process of Aerobic Granular Sludge	LIU Xiao-peng, WANG Jian-fang, QIAN Fei-yue, <i>et al.</i> (3352)
Nitrogen Loss Through Different Ways in Cropland Under Conventional Fertilization: An <i>In-situ</i> Study of Summer Maize Season in the Middle and Lower Reaches of the Yangtze River	SANG Meng-meng, FAN Hui, JIANG Shan-shan, <i>et al.</i> (3358)
Effects of Water and Nitrogenous Fertilizer Coupling on CH ₄ and N ₂ O Emission from Double-Season Rice Paddy Field	FU Zhi-qiang, LONG Pan, LIU Yi-yi, <i>et al.</i> (3365)
Characteristics of N ₂ , N ₂ O, NO, CO ₂ and CH ₄ Emissions in Anaerobic Condition from Sandy Loam Paddy Soil	CAO Na, WANG Rui, LIAO Ting-ting, <i>et al.</i> (3373)
Characteristics of Soil Respiration along Eroded Sloping Land with Different SOC Background on the Hilly Loess Plateau	CHEN Gai, XU Ming-xiang, ZHANG Ya-feng, <i>et al.</i> (3383)
Effect of Biochar on Soil Greenhouse Gas Emissions in Semi-arid Region	GUO Yan-liang, WANG Dan-dan, ZHENG Ji-yong, <i>et al.</i> (3393)
Characteristics and Coupling Relationship of Soil Carbon and Nitrogen Transformation During <i>In-situ</i> Mineralization Cultivation in Forestlands in the Mountain Area of Southern Ningxia	NI Yin-xia, HUANG Yi-mei, NIU Dan, <i>et al.</i> (3401)
Nitrogen Fraction Distributions and Impacts on Soil Nitrogen Mineralization in Different Vegetation Restorations of Karst Rocky Desertification	HU Ning, MA Zhi-min, LAN Jia-cheng, <i>et al.</i> (3411)
Distribution and Dynamics of Cropland Soil Organic Carbon in Jiangnan Plain: A Case Study of Qianjiang City	WANG Yu-zhu, XIAO He-ai, ZHOU Ping, <i>et al.</i> (3422)
Impact of Land Utilization Pattern on Distributing Characters of Labile Organic Carbon in Soil Aggregates in Jinyun Mountain	LI Rui, JIANG Chang-sheng, HAO Qing-ju (3429)
Magnetic Responses of Heavy Metals in Street Dust of Typical Mine-Based City, Northwest China	NIE Yan, WANG Xin, WANG Bo, <i>et al.</i> (3438)
Distribution Characteristics of Heavy Metals in Environmental Samples Around Electroplating Factories and the Health Risk Assessment	GUO Peng-ran, LEI Yong-qian, ZHOU Qiao-li, <i>et al.</i> (3447)
Homologues Levels and Distribution Pattern of Polychlorinated Biphenyls in Typical Capacitor Contaminated Soil	LIU Jie, LI Xiao-dong, ZHAO Zhong-hua, <i>et al.</i> (3457)
Adsorption and Desorption Characteristics of Endosulfan in Purple Soil	ZHAO Yan, ZHENG Guo-can, ZHU Heng, <i>et al.</i> (3464)
Influence of <i>Mirabilis jalapa</i> Linn. Growth on the Microbial Community and Petroleum Hydrocarbon Degradation in Petroleum Contaminated Saline-alkali Soil	JIAO Hai-hua, CUI Bing-jian, WU Shang-hua, <i>et al.</i> (3471)
Al ³⁺ Absorption and Assimilation by Four Ectomycorrhizal Fungi	WANG Ming-xia, YUAN Ling, HUANG Jian-guo, <i>et al.</i> (3479)
Contamination of Organophosphorus Pesticides Residue in Fresh Vegetables and Related Health Risk Assessment in Changchun, China	YU Rui, LIU Jing-shuang, WANG Qi-cun, <i>et al.</i> (3486)
Community Structure and Succession of Methanogens in Beishenshu Landfill, Beijing	SONG Li-na, WANG Lei, XIA Meng-jing, <i>et al.</i> (3493)
Fertility and Environmental Impacts of Urban Scattered Human Feces Used as Organic Granular Fertilizer for Leaf Vegetables	LÜ Wen-zhou, QIAO Yu-xiang, YU Ning, <i>et al.</i> (3501)
Degradation of PCDD/Fs by the Mixture of V ₂ O ₅ -WO ₃ /TiO ₂ Catalyst and Activated Carbon	REN Yong, JI Sha-sha, YU Ming-feng, <i>et al.</i> (3508)
Energy Conservation and Emissions Reduction Benefits Analysis for Battery Electric Buses Based on Travel Services	LIN Xiao-dan, TIAN Liang, LÜ Bin, <i>et al.</i> (3515)
Definition and Control Indicators of Volatile Organic Compounds in China	JIANG Mei, ZOU Lan, LI Xiao-qian, <i>et al.</i> (3522)
Influence of Dissimilatory Iron Reduction on the Speciation and Bioavailability of Heavy Metals in Soil	SI You-bin, WANG Juan (3533)

《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9月15日 第36卷 第9期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 9 Sep. 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