

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第6期

Vol.35 No.6

2014

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

北京地区冬夏季持续性雾-霾发生的环境气象条件对比分析·····	廖晓农, 张小玲, 王迎春, 刘伟东, 杜佳, 赵玲慧 (2031)
阜康大气气溶胶中水溶性无机离子粒径分布特征研究·····	苗红妍, 温天雪, 王跃思, 刘子锐, 王丽, 兰中东 (2045)
上海地铁站台大气颗粒物中过渡金属研究·····	包良满, 雷前涛, 谈明光, 李晓林, 张桂林, 刘卫, 李燕 (2052)
七一冰川地区苔藓中重金属元素含量研究·····	马娟娟, 李真 (2060)
冬季东海、南黄海中 DMS 和 DMSP 浓度分布及影响因素研究·····	宋以柱, 张洪海, 杨桂朋 (2067)
大亚湾石化排污海域重金属污染及生态风险评价·····	徐姗姗, 李纯厚, 徐娇娇, 肖雅元, 林琳, 黄小平 (2075)
深圳水库群表层水中全氟化合物的分布特征·····	王鑫璇, 张鸿, 何龙, 沈金灿, 柴之芳, 杨波, 王艳萍 (2085)
表层岩溶泉水中多环芳烃污染特征及来源解析·····	孙玉川, 沈立成, 袁道先 (2091)
桂江主要离子及溶解无机碳的生物地球化学过程·····	唐文魁, 陶贞, 高全洲, 毛海若, 姜光辉, 焦树林, 郑雄波, 张乾柱, 马赞文 (2099)
汾河源区不同景观带水文过程研究·····	杨永刚, 李彩梅, 秦作栋, 邹松兵 (2108)
北京市通州区地下水分层质量评价及水化学特征·····	郭高轩, 琚宜文, 翟航, 许亮, 沈媛媛, 纪轶群 (2114)
光透法定量两相流中流体饱和度的模型及其应用·····	章艳红, 叶淑君, 吴吉春 (2120)
紫色土坡耕地氮淋溶过程及其环境健康效应·····	陈维梁, 高扬, 林勇明, 朱波, 徐亚娟, 于贵瑞, 吴承祯 (2129)
基于非点源溶解态氮负荷估算的率水流域土地利用结构优化研究·····	陆宇超, 毕孟飞, 李泽利, 沙健, 王玉秋, 钱丽萍 (2139)
镇江老城区古运河沉积物氮及有机质垂向分布及污染评价·····	周晓红, 李义敏, 周艺, 卫安平, 周广顺, 肖思思 (2148)
两种沉水植物对上覆水和间隙水中可溶性无机氮的影响·····	杨文斌, 李阳, 孙共献 (2156)
湖泊沉积物短时间反复扰动下悬浮物上生物有效磷的动态变化·····	武晓飞, 李大鹏 (2164)
不同扰动强度下城市重污染河道底泥对磷吸收和固定的影响·····	王尚, 李大鹏 (2171)
池塘残饵对底泥氮、磷释放影响的模拟研究·····	吕元蛟, 李瑞娇, 张念, 赵峰, 谢从新, 张敏 (2178)
再悬浮过程中河流底泥 PAHs 的迁移与释放·····	王晓慧, 毕春娟, 韩景超 (2185)
低分子有机酸对汞氧化还原反应的影响·····	赵士波, 孙荣国, 王定勇, 王小文, 张成 (2193)
活性炭催化过氧化氢去除荧光增白剂·····	刘海龙, 张忠民, 赵霞, 焦茹媛 (2201)
准分子灯光照降解水中烷基酚的动力学·····	刘玉海, 叶招莲, 文颖频, 毕承路 (2209)
AF + BAF 用于处理树脂化工集中区废水厂尾水的研究·····	涂勇, 刘伟京, 张耀辉, 徐军, 唐敏, 陈勇, 白永刚 (2216)
镉(II)-8-羟基喹啉分子印迹聚合物微球的合成及吸附性能研究·····	杨春艳, 陈复彬, 赵慧, 常自强, 章竹君 (2223)
微气泡曝气生物膜反应器同步硝化反硝化研究·····	刘春, 年永嘉, 张静, 张明, 张磊, 龚鹏飞, 肖太民, 李星 (2230)
聚乳酸/淀粉固体缓释碳源生物反硝化研究·····	唐丹琦, 王娟, 郑天龙, 刘建国, 汪群慧 (2236)
丝状菌膨胀对无纺布生物反应器处理效果及膜污染特征的影响·····	侍宽, 薛罡, 高品, 吴凡 (2241)
聚合氯化铝去除污泥水中磷的工艺优化·····	周振, 胡大龙, 乔卫敏, 陈冠翰, 蒋玲燕, 李震, 麦穗海 (2249)
鄱阳湖持久性有机污染物(POPs)长距离传输潜力模拟·····	弓晓峰, 向洪锐, 陈春丽, 周文斌, 王佳佳, 刘春英, 曾艳 (2256)
基于不确定性分析的垃圾焚烧烟气中重金属的土壤沉积及生态风险评估·····	廖志恒, 孙家仁, 吴兑, 范绍佳, 任明忠, 吕家扬 (2264)
农药企业场地土壤中苯系物污染风险及管理对策·····	谭冰, 王铁宇, 李奇峰, 张海燕, 庞博, 朱朝云, 王道涵, 吕永龙 (2272)
渤海湾海域 10 种鱼类中二噁英类及指示性多氯联苯的污染特征研究及风险评价·····	王莎莎, 高丽荣, 田益玲, 朱帅, 张芹 (2281)
基于荧光传感器 Frex 的特性检测水质环境中生物毒性物质·····	赵巍, 汪钊, 蔡强, 欧文斌, 孟凡国 (2287)
对苯二酚抑制铜绿微囊藻生长下藻毒素的产生与释放·····	张元春, 梁文艳, 赵远, 李飞贞, 曹敬灿, 胡绍杰 (2294)
基于沼液的培养基及产油小球藻藻种选育·····	赵凤敏, 梅帅, 曹有福, 丁进锋, 徐嘉杰, 李树君 (2300)
酸性矿山废水库周边土壤微生物多样性及氨氧化菌群落研究·····	刘莹, 王丽华, 郝春博, 李璐, 李思远, 冯传平 (2305)
河蚬(<i>Corbicula fluminea</i>)扰动对表层沉积物中氨氧化菌群落结构和丰度的影响·····	王雪, 赵大勇, 曾巾, 余多慰, 吴庆龙 (2314)
海洋油气田沉积物产甲烷活性及微生物生态·····	田琪, 王佳, 范晓蕾, 罗生军, 郭荣波, 邱艳玲 (2322)
DGGE 及 T-RFLP 分析光照下电位对细菌群落的影响·····	吴义诚, 邓欢, 肖勇, 赵峰 (2328)
重金属抗性解磷细菌的磷溶解特性研究·····	田江, 彭霞薇, 李霞, 孙雅君, 冯红梅, 江泽平 (2334)
1 株耐冷兼性嗜碱好氧反硝化菌的分离鉴定及反硝化特性·····	王兆阳, 陈国耀, 姜珂, 许培雅 (2341)
黑麦草-丛枝菌根对不同番茄品种抗氧化酶活性、镉积累及化学形态的影响·····	江玲, 杨芸, 徐卫红, 王崇力, 陈蓉, 熊仕娟, 谢文文, 张进忠, 熊治庭, 王正银, 谢德体 (2349)
黄河三角洲区土壤活性氮对盐分含量的响应·····	李玲, 仇少君, 陈印平, 赵西梅, 刘京涛, 陆兆华 (2358)
宁南山区不同草地土壤原位矿化过程中氮素的变化特征·····	蒋跃利, 赵彤, 闫浩, 黄懿梅 (2365)
长期施用四环素残留猪粪对土壤中耐药菌及抗性基因形成的影响·····	张俊, 杨晓洪, 葛峰, 王娜, 焦少俊, 叶波平 (2374)
长期不同耕作方式对紫色水稻土重金属含量及有效性的影响·····	常同举, 崔孝强, 阮震, 赵秀兰 (2381)
伊犁河流域土壤重金属环境地球化学基线研究及污染评价·····	赵新儒, 特拉津·那斯尔, 程永毅, 詹江渝, 杨剑虹 (2392)
江苏如东互花米草盐沼湿地重金属分布及其污染评价·····	张龙辉, 杜永芬, 王丹丹, 高抒, 高文华 (2401)
小流域农业面源氮污染时空特征及与土壤呼吸硝化关系分析·····	欧阳威, 蔡冠清, 黄浩波, 耿晓君 (2411)
保护性耕作下小麦田土壤呼吸及碳平衡研究·····	张赛, 王龙昌, 黄召存, 贾会娟, 冉春燕 (2419)
米楮天然林和人工林土壤呼吸的比较研究·····	吴君君, 杨智杰, 翁发进, 刘小飞, 陈朝琪, 林伟盛, 王小红, 陈坦 (2426)
水力停留时间对复合式厌氧折流板反应器乙醇型发酵制氢系统的影响·····	刘晓桦, 张洪, 李永峰 (2433)
《环境科学》征订启事 (2208)	
《环境科学》征稿简则 (2400)	
信息 (2084, 2200, 2229, 2391)	

宁南山区不同草地土壤原位矿化过程中氮素的变化特征

蒋跃利, 赵彤, 闫浩, 黄懿梅*

(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: 用顶盖埋管法对宁南山区天然草地、人工草地和自然恢复草地中有机氮、微生物生物量氮、可溶性有机氮、铵态氮、硝态氮、亚硝态氮含量和土壤氮素矿化速率在原位培养中的动态变化特征进行了研究。结果表明, 微生物生物量氮、可溶性有机氮、铵态氮、硝态氮、亚硝态氮含量, 总体上在培养 60 d 时(4~6 月)基本保持不变, 60~120 d(6~8 月)明显降低, 120 d(8 月)后有所回升, 各种氮素含量均在培养 120 d(8 月)时最低。有机氮含量在整个培养过程中基本保持不变。土壤氮净矿化速率、净硝化速率、净氨化速率均在 60~120 d(6~8 月)时最低。各种氮素占总氮的比例随培养时间的延长而变化; 有机氮、亚硝态氮占总氮的比例相对稳定, 微生物量氮、可溶性有机氮、硝态氮、铵态氮占总氮的比例在培养 0~120 d(4~8 月)时降低, 培养 120 d(8 月)后升高。土壤有机碳、pH、容重与氮素含量极显著相关, 各种氮素间极显著正相关。不同草地间, 各种氮素含量均表现为天然草地 > 自然恢复草地 > 人工草地。

关键词: 顶盖埋管法; 草地土壤; 氮形态; 氮素矿化; 宁南山区

中图分类号: X144 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)06-2365-09 DOI: 10.13227/j.hjks.2014.06.045

Variation of Soil Nitrogen During *in situ* Mineralization Process Under Different Grasslands in the Mountainous Area of Southern Ningxia, Northwest China

JIANG Yue-li, ZHAO Tong, YAN Hao, HUANG Yi-mei

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

Abstract: Variations in organic nitrogen, microbial biomass nitrogen, soluble organic nitrogen, NH_4^+ -N, NO_3^- -N, NO_2^- -N and N mineralization were investigated under three different grasslands in the mountainous area of southern Ningxia, Northwest China (natural grassland, artificial turf and abandoned land) using the close-top tube incubation method. Microbial biomass nitrogen, soluble organic nitrogen, NH_4^+ -N, NO_3^- -N, NO_2^- -N and N mineralization exhibited significant seasonal variations. The nitrogen levels remained essentially unchanged from April to June, significantly decreased in July-August, rebounded after August, and were lowest in August. The organic nitrogen content remained unchanged in the whole training process. The soil mineralization rates, nitrification and ammonification rate were lowest in June-August. The ratios of each N fraction to total N responded differently to seasonal changes. The ratios of organic N, NO_2^- -N to total N did not change, in contrast, the ratios of nitrate N, microbial biomass nitrogen and soluble organic nitrogen, to total soil N decreased from April to August, and increased from August to December. The soil organic matter, pH, and bulk density were closely related to soil N. There was a significant positive correlation among the six N fractions. The soil nitrogen content of the different grassland types followed the order of natural grassland > abandoned land > artificial turf.

Key words: close-top tube incubations; grassland soil; nitrogen forms; N mineralization; mountainous area of southern Ningxia

植物在其正常生长发育过程中需要从土壤中吸收足够的氮素营养。但是占土壤氮库总量 95% 以上的有机态氮不能被植物直接利用, 这些氮素只有通过微生物的矿化作用转化为土壤中的无机形态(NO_3^- -N、 NH_4^+ -N)才能被植物吸收利用。因此土壤中铵态氮和硝态氮的含量以及有机氮化合物转化为铵态氮和硝态氮的速率直接影响着土壤的氮素供给能力^[1]。陆地生态系统中, 土壤有效氮通常是限制植物生长的主要因素^[2]。而氮素可利用性限制着植物对土壤氮养分利用效率, 进而影响到物种组成、物种多样性和生态系统的初级生产力^[3], 并且与水分利用效率、土壤有机质动态、系统物质循环、群落演替之间存在反馈关系^[4]。因此, 研究土壤中有

机氮、无机氮的状况和氮矿化速率及其影响因素对探讨草地生产力和氮素转化具有重要意义。国内外学者对草地土壤的氮素矿化速率及其影响因素进行了研究。李玉中等^[5]发现东北不同草地土壤氮素矿化速率存在显著的季节性变化, 刘杏仁等^[6]发现内蒙古不同草地矿化过程中土壤水分变化量与土壤氮矿化速率呈正相关, Mazzarino 等^[7]发现巴塔哥尼亚东北草原的降雨与土壤氮素矿化速率间存在显著正相

收稿日期: 2013-10-31; 修订日期: 2013-12-18

基金项目: 国家自然科学基金项目(41101254); 中央高校基本科研业务费专项(QN2011020); 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室基金项目(K318009902-1321)

作者简介: 蒋跃利(1988~), 女, 硕士, 主要研究方向为环境生态工程, E-mail: shuijinglongxiang@163.com

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

关. 杨小红等^[8]发现锡林河流域草地中铵态氮、硝态氮含量随土壤温度、水分的变化而波动明显. 至于西北半干旱温带草原不同草地类型土壤氮素形态的特征以及在原位矿化过程中的变化目前尚不清楚.

宁南山区地处宁夏回族自治区南部,黄土高原西北端,面积 30.5 万 km²,占全区总面积的 58.9%,该地区基本上属于温带大陆性干旱与半干旱、半阴湿气候,年降水量约 186 ~ 675 mm,95% 的地区年均降水量小于 450 mm,属于黄土高原向干旱风沙区的过渡地带,生态环境稳定性差. 再加上历史上的不合理开发,致使水资源匮乏,水土流失、沙漠化严重,生态环境遭到极大破坏. 而生态问题已严重影响到该地区的社会经济发展,使其成为我国北方典型的贫困地区之一^[9]. 为了改善生态环境,自 2000 年开始实施退耕还林还草工程,按照生态优先的原则,实行乔灌草合理配置,在不同区域进行不同的退耕措施. 截止 2002 年 5 月,耕地面积减少了 5.54×10^4 hm²,林地面积增加了 9.89×10^4 hm²,草地面积增加了 0.42×10^4 hm²,生态环境得到明显改善^[9]. 该区域草地属于中纬度半干旱温带草地类型,在温带草原中具有代表性,是全球变化最为敏感的区域^[9]. 但是不同的退耕还草措施对土壤氮素的影响尚不清楚. 因此,本研究选择宁南山区分布较为普遍的 3 种草地类型作为研究对象,用顶盖埋管法对草地土壤中氮素含量在矿化过程中的动态变化特征和矿化速率进行分析,揭示不同草地类型、培养时间及季节变化对土壤氮素转化的影响,以期为提高草地生产力、更好地进行植被恢复,保护生态环境提供理论依据.

表 1 采样点地理信息和植被情况

Table 1 Geographic information and vegetation situation of the sampling sites

土地利用类型	优势种及盖度	主要半生种	退耕时间 (年)	面积 /m ²	坡向 /(°)	坡度 /(°)	经纬度	海拔 /m
天然草地	长芒草 50%	阿尔泰狗娃花和芨芨菜		3 000	东偏北 37	29	N36°00'3.93", E106°27'53.52"	1 615
人工草地	苜蓿 30%	长芒草	2 002	1 800	北偏东 20	26	N36°00'2.90", E106°27'54.87"	1 605
自然恢复草地	长芒草 35%	猪毛蒿	2 002	900	北偏东 32	4	N35°59'50.61", E106°28'1.51"	1 615

采用顶盖埋管法^[11],在选定的样区内第一次取样时,先把 PVC 管垂直打入土中(以土壤装满 PVC 管为准),然后小心取出装满土样的 PVC 管(以免土样从管的底部漏出),再把 PVC 管顶部用塑料布封住,底部用纱布封住(均以橡皮筋固定),并写上编号后放回原处(此过程为埋管);于 2012 年 4 月 15 日将 PVC 管一次性布设于选定的 3 种草地样地内. 同时用 PVC 管在所埋管旁边对应取 9 个原状土,分别装入袋中,带回实验室,分析初始 NH₄⁺-N 和 NO₃⁻-N.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

供试区域选在黄土丘陵区固原市东部的河川乡上黄村(东经 106°26' ~ 106°30',北纬 35°59' ~ 36°3',海拔 1 534.3 ~ 1 822 m),位于泾河水系支流小川河的中游. 年均降水量 420 mm,年均气温 7℃,干燥度 1.55 ~ 2.0,属半干旱中温带向暖温带过渡季风气候. 土壤类型主要是黄土母质上发育的淡黑垆土和黄绵土. 覆盖的主要植被类型为人工灌木林(主要植物有柠条、山桃、山杏)、天然草地长芒草(*Stipa bungeana*)、阿尔泰狗娃花(*Heteropappus altaicus*)、茼蒿(*Artemisia giraldii*)、百里香(*Thymus mongolicus*)等. 人工草地(苜蓿)和农地(主要以小麦、玉米、荞麦为主). 20 年来,上黄试区土地利用结构明显改善,1982 年上黄试区仅有林地 9.73 hm²,人工草地 4.53 hm²,林草覆盖率 1.87%. “六五”以后林草覆盖率上升到 24.5%. “八五”期间又新造柠条灌木林 66.7 hm²,使林草覆盖率达 58.18%,而到“十五”的时候耕地面积所占比重下降为 10.4%,林草覆盖率上升为 75.5%^[10].

1.2 样地设置与实验方案

在充分调查的基础上,根据当地植被恢复的特点,选择典型的 3 种草地恢复类型:天然草地、人工草地和自然恢复草地作为研究对象,分别设置 20 m × 20 m 的研究样地. 在每块样地内分别建立一条 15 m 长的样线,每 5 m 选取一个样带(共 3 个样带),每个样带埋入 5 个 PVC 管(每根管间隔 1 m). 采样点地理信息和植被情况如表 1 所示.

然后每隔两个月,即分别于 6 月 15 日、8 月 15 日、10 月 15 日、12 月 15 日、2013 年 4 月 15 日在每种草地样地内的每个样带内各取出一个管,将管筒连同土柱从土体中取出,装入干净的塑封袋中,装入冰盒,再用上次同样的方法取对应的原状土带回实验室.

1.3 测定项目与方法

pH 用无 CO₂ 水浸提,pH 计测定;土壤容重用环刀法,土壤温度用土壤温度传感器测定;土壤水分用烘干法测定;土壤有机碳采用重铬酸钾-外加热

法;土壤有机氮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;土壤铵态氮、硝态氮和亚硝态氮采用新鲜土样用 1 mol·L⁻¹ KCl 浸提,流动分析仪测定;微生物生物量氮用氯仿熏蒸-K₂SO₄ 浸提后用碱性过硫酸钾氧化-紫外分光光度法^[12]测定;可溶性有机氮是根据可溶性全氮和无机氮(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。

1.4 数据处理方法

数据分析采用 Microsoft Excel 2003 和 SAS 8.0 软件,进行方差分析和相关性分析,多重比较采用 Duncan 法。

所有的数据均换算成以烘干土重来计:

净氨化速率 = (培养后铵态 N -

培养前铵态 N) / 培养天数

净硝化速率 = (培养后硝态 N -

培养前硝态 N) / 培养天数

净矿化速率 = [(培养后铵态 N + 硝态 N) -

(培养前铵态 N + 硝态 N)] / 培养天数

2 结果与分析

2.1 土壤基本理化性质

不同类型草地土壤的基本理化性质见表 2。土壤有机碳含量在相应时期均表现为天然草地 > 自然恢复草地 > 人工草地,其中同一草地有机碳含量在还没开始培养(0 d)时最高。土壤 C/N 在相应的培养时期,自然恢复草地均显著高于天然草地和人工草地。pH 值在 3 种草地不同培养时间变化不大,均在 8.5 左右,同一草地不同培养时间也未表现出显著的差异性。土壤水分的变化在 0.07 ~ 0.16 g·g⁻¹ 之间,60 d、120 d 时水分含量显著低于其它时期。人工草地土壤容重高于天然草地和自然恢复草地。相同培养时间不同草地土壤有机碳、容重差异显著。这可能与不同草地的草种特性、凋落物的量以及人类活动的影响有关。

表 2 土壤基本理化性质¹⁾

Table 2 Soil physicochemical properties

类型	时间/d	有机碳/g·kg ⁻¹	C/N	pH	水分/g·g ⁻¹	容重/g·cm ⁻³	温度/℃
天然草地	0	14.27 ± 3.17Aa	9.49 ± 1.27Ba	8.15 ± 0.14Aa	0.16 ± 0.020Aa	1.12 ± 0.01Aa	3.21 ± 1.21Ad
	60	11.08 ± 2.34Ac	9.00 ± 1.45Bab	8.28 ± 0.27Aa	0.07 ± 0.003Ab	1.15 ± 0.02Aa	15.7 ± 8.01Ab
	120	11.98 ± 1.98Abc	8.77 ± 1.28Bb	8.33 ± 0.19Aa	0.08 ± 0.005Ab	1.20 ± 0.01Aa	25.3 ± 9.27Aa
	180	11.91 ± 2.09Abc	9.33 ± 1.10Ba	8.26 ± 0.11Aa	0.10 ± 0.002Ab	1.19 ± 0.03Aa	7.67 ± 3.10Ac
	240	12.61 ± 3.05Ab	9.05 ± 0.11Bab	8.15 ± 0.21Aa	0.14 ± 0.003Aa	1.21 ± 0.04Aa	2.11 ± 1.21Ad
	360	13.05 ± 0.98Ab	9.15 ± 1.16Ba	8.36 ± 0.31Aa	0.11 ± 0.004Ab	1.21 ± 0.03Aa	4.01 ± 2.23Ad
人工草地	0	5.00 ± 0.34Ca	9.70 ± 2.06Ba	8.12 ± 0.29Aa	0.11 ± 0.002Aab	1.23 ± 0.02Ba	2.56 ± 1.11Ad
	60	4.53 ± 0.12Cab	8.77 ± 1.09Bbc	8.57 ± 0.10Aa	0.04 ± 0.004Bb	1.25 ± 0.01Ba	16.5 ± 4.21Ab
	120	4.09 ± 0.18Cb	8.23 ± 1.05Bc	8.44 ± 0.04Aa	0.07 ± 0.008Ab	1.27 ± 0.04ABa	24.1 ± 9.89Aa
	180	4.35 ± 0.26Cab	9.08 ± 2.03Bb	8.36 ± 0.31Aa	0.13 ± 0.009ABa	1.28 ± 0.02Ba	6.78 ± 2.23Ac
	240	3.69 ± 0.19Cc	8.97 ± 1.08Bb	8.50 ± 0.09Aa	0.16 ± 0.010Aa	1.27 ± 0.01Ba	1.34 ± 1.00Be
	360	4.23 ± 0.45Cb	9.24 ± 1.21Bb	8.41 ± 0.14Aa	0.10 ± 0.003Aab	1.26 ± 0.02Ba	3.87 ± 2.23Ad
自然恢复草地	0	10.91 ± 1.24Ba	9.92 ± 1.21Aa	8.09 ± 0.21Aa	0.17 ± 0.007Aa	1.06 ± 0.04Ca	3.62 ± 1.01Ad
	60	9.03 ± 0.98Bc	9.58 ± 1.11Aa	8.40 ± 0.29Aa	0.10 ± 0.002Ab	1.09 ± 0.03Ca	14.38 ± 4.23Ab
	120	9.23 ± 1.12Bbc	9.17 ± 1.34Ab	8.41 ± 0.14Aa	0.09 ± 0.004Ab	1.05 ± 0.01Ca	25.7 ± 5.39Aa
	180	9.37 ± 0.76Bbc	9.37 ± 1.29Ab	8.28 ± 0.19Aa	0.16 ± 0.008Ba	1.06 ± 0.01Ca	5.47 ± 2.19Bc
	240	9.37 ± 0.81Bbc	9.84 ± 1.19Aa	8.34 ± 0.11Aa	0.16 ± 0.004Aa	1.03 ± 0.02Ca	1.89 ± 0.89Ae
	360	9.89 ± 0.27Bb	9.65 ± 1.23Aa	8.33 ± 0.19Aa	0.13 ± 0.002Ab	1.04 ± 0.03Ca	3.21 ± 2.23Bd

1) 不同大写字母表示不同草地之间在 0.05 水平上差异显著,不同小写字母表示不同培养时间之间在 0.05 水平上差异显著

2.2 不同草地原位矿化过程中有机氮、微生物量氮、可溶性有机氮的变化特征

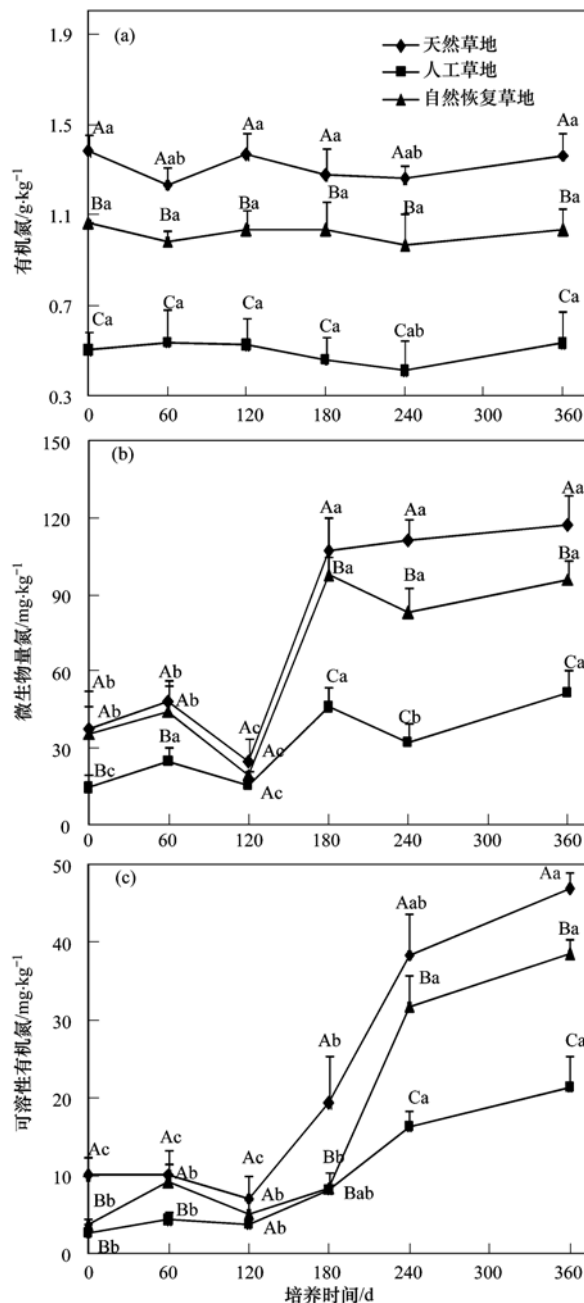
由图 1(a)可知,在整个培养过程中土壤有机氮含量在同一草地各个时期之间没有表现出显著的差异性。而不同草地之间差异显著,同自然恢复草地相比,天然草地土壤有机氮含量显著高于自然恢复草地,在各个时期分别高出 15.33%、20.32%、

24.26%、18.90%、23.2%、19.8%。人工草地有机氮含量显著低于天然草地和自然恢复草地,整体上比自然恢复草地低了 114.4%。

3 种草地土壤不同培养时期微生物生物量氮的含量如图 1(b)所示,就不同草地来看,天然草地 > 自然恢复草地 > 人工草地。不同培养时间微生物生物量氮含量变化显著,在天然草地中表现为先略有

升高,再降低,再显著升高的趋势,培养 120 d 时含量最低,比初始值(0 d)低了 50.1%,培养 360 d 时达到最高 $161.34 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$. 人工草地、自然恢复草地表现为升高-降低-升高-降低的趋势,培养 120 d 时含量最低,分别比初始值(0 d)低了 7.56%、55.54%.

可溶性有机氮(SON)的变化特征如图 1(c)所



不同大写字母表示不同草地之间在 0.05 水平上差异显著,不同小写字母表示不同培养时间之间在 0.05 水平上差异显著,下同

图 1 不同草地土壤有机氮、微生物量氮、可溶性有机氮含量随时间的变化

Fig. 1 Changes of soil organic nitrogen, microbial biomass nitrogen and SON content over time in different grassland

示,不同草地土壤比较,天然草地在培养的各个时期 SON 含量最高,自然恢复草地居中,人工草地最低. 培养过程中,3 种草地 SON 含量在培养了 60 d 时有小幅的增加趋势,60~120 d 大幅下降,降幅分别为 30%、13%、44%,培养 120~360 d 显著增加. 培养 360 d 时天然草地、人工草地、自然恢复草地 SON 含量均为最高,分别比初始值(0 d)高了 3.82、5.95、8.53 倍.

2.3 不同草地原位矿化过程中铵态氮、硝态氮、亚硝态氮季节动态

3 种草地土壤中铵态氮、硝态氮和亚硝态氮含量的变化如图 2 所示. 由图 2(a)可知,土壤铵态氮含量在 0~60 d 没有表现出显著的差异性,随后在 60~120 d 大幅下降. 与培养起始(0 d)相比,培养 120 d 时人工草地土壤铵态氮含量降幅最大为 621.6%,其次是自然恢复草地为 360.0%,天然草地为 204.4%. 培养 120 d 以后其含量保持相对恒定. 可见,土壤铵态氮含量在天然草地最高,其次是自然恢复草地,人工草地相对较低.

从图 2(b)可以看出,同一草地不同培养时期,硝态氮的含量呈现出显著的差异性. 天然草地、自然恢复草地硝态氮含量在 0~120 d 降低,降幅分别为 7.8%、5.5%. 人工草地 0~60 d 硝态氮含量变化不显著,60~120 d 显著下降,且 120 d 时含量达到最小值,仅为 $0.75 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$. 之后 120~360 d 其含量均又显著增加. 就不同草地来看,除培养初始(0 d)之外,天然草地中硝态氮的含量都显著高于自然恢复草地,人工草地硝态氮含量在各个时期均显著低于天然草地和自然恢复草地.

如图 2(c)为亚硝态氮含量,在培养的 0~180 d,天然草地土壤亚硝态氮含量大幅下降(降幅为 84.5%),180 d 时其含量仅为 $0.11 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,随后随着培养时间的延长亚硝态氮含量显著增加. 自然恢复草地、人工草地亚硝态氮在 60~120 d 显著降低,降幅分别为 76.4%、67.8%,之后到培养结束,人工草地硝态氮含量呈缓慢的上升趋势,自然恢复草地则是先上升后下降,其含量均是在培养 120 d 时达到最小. 就不同草地来看,培养 180 d 时,3 种草地之间亚硝态氮含量相差无几,培养 120、240、360 d 时自然恢复草地与人工草地之间相差无几,其它月份亚硝态氮的含量均是在天然草地中最高、自然恢复草地居中,人工草地最低.

2.4 不同草地土壤氮素矿化特征

图 3(a)为不同培养时段土壤氮净矿化速率.

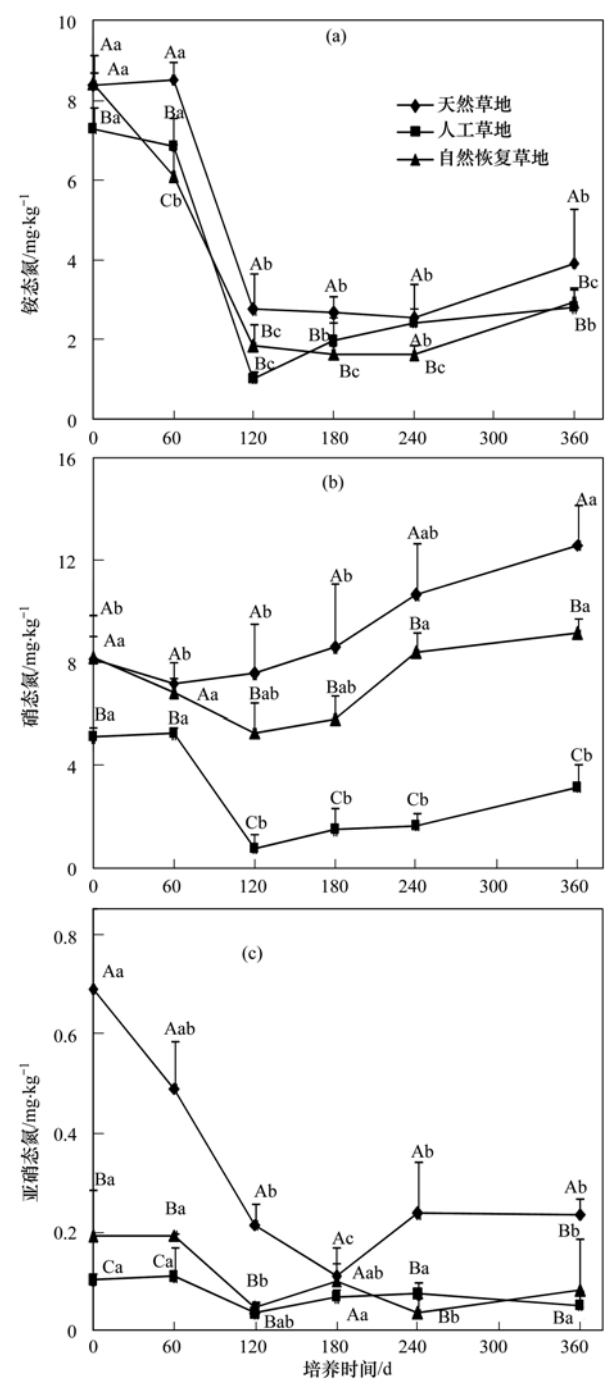


图2 不同草地土壤无机氮含量随时间的变化
Fig. 2 Changes of soil inorganic nitrogen content over time in different grassland

其中所示的净矿化速率有正有负,正值说明土壤有机氮矿化产生的无机氮经微生物和土壤动物固持后仍有剩余,而负值则表示矿化产生的无机氮均已被微生物和土壤动物固持,没有剩余^[8]。天然草地、人工草地、自然恢复草地土壤氮净矿化速率最小值均出现在60~120 d,且均为负值。这段时间(6~8月)土壤温度比较高,较高的温度增强了微生物的

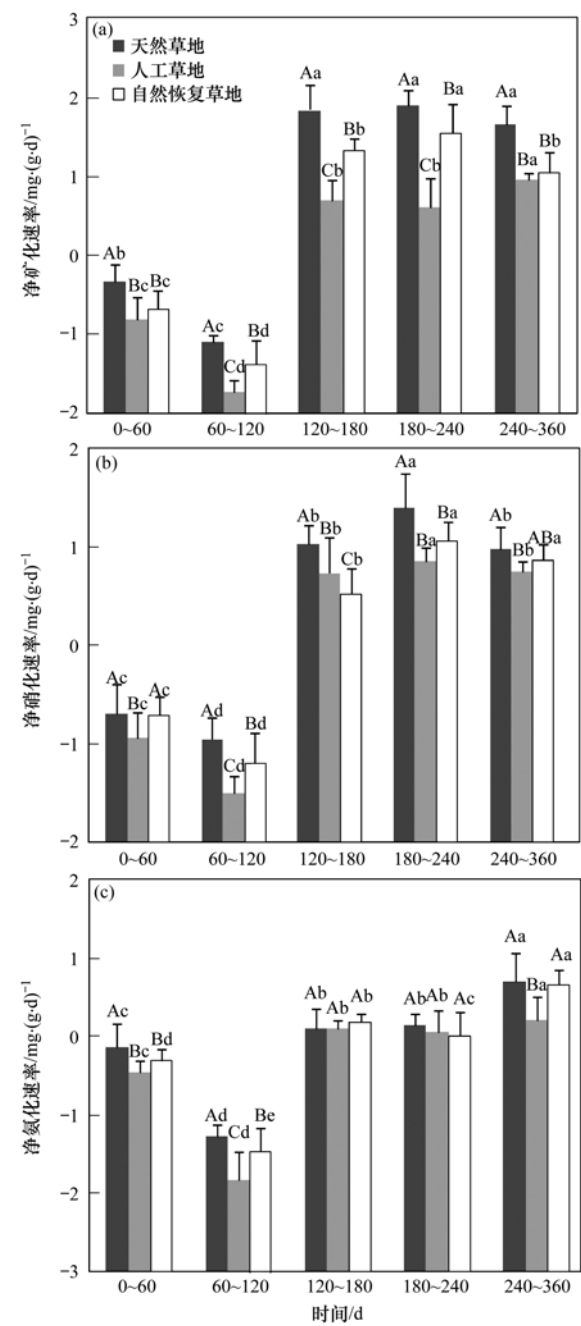


图3 不同草地土壤净矿化、净硝化和净氨化速率动态
Fig. 3 Soil mineralization, nitrification and ammonification rate dynamics in different grassland

活性,有利于微生物对无机氮的固持。120~180 d、180~240 d、240~360 d 不同草地土壤氮净矿化速率均显著高于60~120 d,180~240 d 净矿化速率最大。就不同草地来看土壤平均净矿化速率大小为天然草地[1.13 mg·(g·60 d)⁻¹] > 自然恢复草地[0.58 mg·(g·60 d)⁻¹] > 人工草地[0.37 mg·(g·60 d)⁻¹]。可见,随着植被覆盖度降低,土壤有机质含量减少,土壤氮净矿化速率降低。

从图3(b)可以看出,土壤氮净硝化速率的变

化趋势与土壤氮净矿化速率基本一致. 在整个培养过程中,净硝化速率的最小值也出现在 60 ~ 120 d. 这可能是因为 6 ~ 8 月,温度较高、水分蒸发迅速,其硝化作用受到了抑制. 除 0 ~ 60 d 外,其它培养时段的净硝化速率均显著高于 60 ~ 120 d, 180 ~ 240 d 达到最大. 不同草地土壤净硝化速率表现为天然草地最高,自然恢复草地居中、人工草地最低.

如图 3(c)所示土壤净氨化速率在 3 种草地间相差不大. 不同培养时期,60 ~ 120 d 的 3 种土壤氮净氨化速率均为最低且为负值,这与土壤铵态氮含量在 60 ~ 120 d 显著降低规律一致. 120 ~ 180 d、180 ~ 240 d、240 ~ 360 d 土壤氮净氨化速率均显著高于 60 ~ 120 d, 240 ~ 360 d 土壤净氨化速率最大.

2.5 各种氮素形态在总氮中的比例

土壤总氮(TN)即为有机氮和无机氮的和,不同

矿化时期各种氮素占土壤总氮的比例如表 3 所示. 有机氮占总氮的比例在不同草地各个培养时期基本保持恒定,均在 92.5% 左右,这可能与有机氮在整个培养过程中无显著变化有关. 微生物生物量氮占总氮比例(MBN/TN)、可溶性有机氮占总氮比例(SON/TN)、铵态氮占总氮比例($\text{NH}_4^+ \text{-N/TN}$)、硝态氮占总氮比例($\text{NO}_3^- \text{-N/TN}$)均表现为 0 ~ 120 d 降低、之后 120 ~ 360 d 升高,其最小值均出现在培养 120 d 时,这与微生物生物量氮、可溶性有机氮、硝态氮、铵态氮含量的变化规律相一致(图 1 和图 2). 硝态氮占总氮的比例在 0.66% ~ 1.33% 之间,大于铵态氮占总氮的比例(0.1% ~ 0.7%). 就不同草地看,这 4 种氮占总氮的比值均在自然恢复草地最高,人工草地次之,天然草地最低. 亚硝态氮占总氮的比值比较小,均在 0.02% 左右,在 3 种草地不同培养时期相差无几.

表 3 有机氮、微生物量氮、无机氮占总氮的比值

Table 3 Proportions of organic nitrogen, microbial biomass nitrogen, inorganic nitrogen in total nitrogen

类型	时间/d	有机氮/TN/%	MBN/TN/%	SON/TN/%	$\text{NH}_4^+ \text{-N/TN}/\%$	$\text{NO}_3^- \text{-N/TN}/\%$	$\text{NO}_2^- \text{-N/TN}/\%$
天然草地	0	92.7	5.3	0.67	0.60	0.84	0.020
	60	92.7	3.21	0.83	0.69	0.89	0.019
	120	93.2	2.11	0.52	0.10	0.80	0.016
	180	92.8	6.02	1.44	0.19	0.94	0.008
	240	92.9	6.80	3.04	0.16	1.12	0.019
	360	92.6	6.98	3.89	0.21	1.21	0.018
人工草地	0	91.9	4.97	0.76	1.16	1.33	0.020
	60	92.0	5.10	0.78	1.37	1.37	0.020
	120	93.6	3.33	0.56	0.30	0.42	0.015
	180	93.1	6.10	1.89	0.43	0.66	0.015
	240	93.2	5.87	3.96	0.60	0.71	0.018
	360	93.2	6.20	4.10	0.71	0.83	0.019
自然恢复草地	0	92.5	4.40	0.60	0.71	1.06	0.015
	60	92.5	3.79	0.81	0.65	0.93	0.019
	120	93.5	2.97	0.51	0.15	0.71	0.014
	180	93.2	4.37	0.85	0.25	0.74	0.009
	240	92.9	5.21	3.36	0.16	1.11	0.004
	360	92.8	5.59	3.89	0.23	1.20	0.006

2.6 土壤氮素与基本理化性质的相关性

3 种草地土壤氮素与其基本理化性质间的相关性如表 4 所示,土壤有机碳、水分、温度与总氮、有机氮、微生物生物量氮、可溶性有机氮、铵态氮、硝态氮和亚硝态氮均显著正相关,与 pH、容重显著负相关. 与 C/N 值间没有表现出显著的相关性. 氮素各项指标之间极显著相关,相关系数均介于 -0.89 ~ 0.98 之间,这就说明氮循环的各个环节都是密切相关的.

3 讨论

3.1 季节变化对土壤矿化过程中氮素转化的影响

本研究结果表明,在整个培养过程中土壤有机氮含量相对稳定,这可能是因为土壤性质的变化滞后于地上植物的变化,且土壤的氮库有相当的弹性,使得土壤有机氮含量在短期内变化不明显. 这也与高英志等^[14]和刘宾等^[15]的研究结果一致. 土壤中微生物生物量氮含量在培养 120 d(8 月)时最低,120 ~ 180 d(8 ~ 10 月)显著升高,这与高英志等^[14]的研究结果相似. 这主要是因为微生物生物量氮含量随培养时间的延长受温度、水分和植物生长的影响所致. 一般认为,微生物生物量氮是土壤中最活跃的有机氮库,一般占全氮的 1% ~ 5%,和植物生长密切相关,能反映土壤近期内的氮素供应情况.

Garcia 等^[16]的研究发现,早春微生物生物量氮较高. 随植物生长对氮素的吸收,微生物生物量氮下降;在夏、秋季之交,微生物生物量氮恢复到较高的水平,减少的微生物生物量氮与植物的吸氮量有关. 本研究也发现随着植物生长(120~180 d)土壤

中微生物生物量氮含量降低,到植物枯黄期(180 d 后)会有所回升. 可溶性有机氮作为土壤氮素较为活跃的组分之一^[17],在本研究中表现出了和微生物生物量氮较为一致的变化规律,这也就说明可溶性有机氮与土壤氮素供应关系密切^[18].

表 4 土壤基本理化性质与不同形态氮含量的相关系数

Table 4 Correlation coefficients of physicochemical properties and N contents								
	样本数	总氮	有机氮	微生物量氮	可溶性有机氮	铵态氮	硝态氮	亚硝态氮
有机碳	54	0.976 4 **	0.987 6 **	0.697 1 *	0.875 4 **	0.716 9 **	0.838 1 **	0.911 7 **
pH	54	-0.624 6 *	-0.799 1 *	-0.611 9 *	-0.749 8 **	-0.752 5 *	-0.898 2 **	-0.596 4 *
水分	54	0.534 9 *	0.535 3 *	0.645 5 *	0.696 7 *	0.709 9 **	0.570 8 **	0.903 1 **
温度	54	0.643 8 *	0.817 7 **	0.837 1 **	0.897 2 **	0.957 3 **	0.917 0 **	0.876 4 **
容重	54	-0.641 2 *	-0.430 3 *	-0.815 1 **	-0.712 7 **	-0.611 3 **	-0.629 2 **	-0.605 7 *
土壤 C/N	54	-0.112 4	-0.075 6	-0.231 4	-0.097 8	-0.128 9	-0.073 4	-0.067 9
总氮	54	1	0.995 6 **	0.854 3 **	0.796 3 **	0.805 4 **	0.915 6 **	0.871 2 **
有机氮	54		1	0.792 3 **	0.875 6 **	0.912 5 **	0.897 6 **	0.882 1 **
微生物量氮	54			1	0.694 3 *	0.714 5 **	0.921 4 **	0.904 5 **
可溶性有机氮	54				1	0.813 4 **	0.884 5 **	0.796 3 **
铵态氮	54					1	0.786 9 **	-0.765 4 **
硝态氮	54						1	-0.895 6 **
亚硝态氮	54							1

铵态氮的含量在整个培养过程中呈现 Z 型变化,与已有的研究结果不同^[19]. 已有的研究发现铵态氮在植物生长初期(0~60 d)含量比较低,随植物的生长逐渐升高,到枯黄期含量最高. 而本研究中则是在 0~60 d(4~6 月)含量较高,这可能是因为植物达到生长旺盛期之前,生长缓慢. 土壤中积累的铵态氮足以供应植物的生长,所以土壤中盈余的铵态氮可以维持较高水平. 60~120 d(6~8 月)显著下降,60~120 d(6~8 月)植物进入生长旺盛期,已有研究表明铵态氮对绿色生物量的形成贡献较大^[14],这种贡献除通过植物对铵态氮的直接吸收外,还通过微生物调控土壤铵态氮的转化来实现^[20]. 土壤微生物在同化氮素时,常常对铵态氮表现出一定的偏好^[21],60~120 d(6~8 月)温度升高,微生物活性增强,相应的对铵态氮的同化作用也会增强. 进而使得土壤中铵态氮含量降低,而培养 120 d(8 月)后铵态氮含量略有升高,说明随植物生长季的推移土壤微生物对氮的固持减少,而矿化加强.

硝态氮含量在人工草地中出现了显著的季节变化,表现为 60~120 d(6~8 月)较低,0~60 d(4~6 月)较高,120 d(8 月)后维持在一个较低的水平. 这种变化与因降雨和植物生长引起的土壤水分含量季节变化和植物对硝态氮的吸收利用有密切关系. 60~120 d(6~8 月)是苜蓿生长的旺盛时期,需要吸收较多的氮素,已有研究表明,土壤硝态氮与植

被地上绿色生物量呈显著的负相关^[14],说明草原植物优先利用土壤硝态氮形成绿色生物量,使土壤中的硝态氮含量减少,而且这一时期土壤水分亏缺可能限制了土壤微生物对有机氮的矿化能力,使硝态氮的补充受到限制. 而 8 月后土壤硝态氮受作物吸收的影响较小,较高的水分势必增强了土壤有机氮的矿化,形成硝态氮. 120~180 d(8~10 月)土壤硝态氮略有回升的原因可能与前期硝态氮的积累有关. 所以,硝态氮含量出现大幅度的季节变化是作物利用与季节性气候变化共同作用下的必然结果. 这与 MacDonald 等^[21]的研究结果相同.

天然草地亚硝态氮的含量在培养起始(4 月)显著高于撂荒地和人工草地. 这可能是因为其中有些土壤专性和兼性细菌利用 NO₃⁻ 进行酵解,把 NO₃⁻ 经过一系列步骤异化还原为 NH₄⁺ 和 NO₂⁻^[22]. 而亚硝酸盐的积累又会抑制硝化菌的活性^[23],因此亚硝态氮含量相对较高.

本研究中 3 种草地土壤氮净矿化速率、净硝化速率、净氨化速率均表现出明显的季节性变化. 净矿化速率的季节变化是多方面环境因素综合作用的结果. 由于氮素矿化是一个微生物参与的过程,因此土壤温度和湿度的季节变化是其中重要原因之一^[24]. 本研究中土壤氮素净矿化速率、净硝化速率、净氨化速率的最小值均出现在 60~120 d(6~8 月),这与已有的研究结果不一致^[25]. 结合土壤的

理化性质可以发现,在这一时期,土壤温度几乎是最高的,但是水分含量也是最低的,再加上植被生长需求的影响,所以,在宁南山区影响土壤矿化过程季节变化的重要原因是土壤水分含量。

3.2 草地类型对土壤矿化过程中氮素转化的影响

不同的土地利用方式,对土壤性质有很大的影响。合理的土地利用方式能够使得土壤的结构得到改善,进而增强土壤对外界环境变化的抵御能力^[26]。本研究中,各种氮素含量均是天然草地 > 自然恢复草地 > 人工草地。天然草地植被覆盖度比较高,植物生长产生的枯落物和根系腐解物较多,这些枯落物和根系在土壤中积累、矿化,一方面把大部分无机营养元素归还土壤,另一方面改善了土壤的物理性质、质地和通气状况,从而导致微生物活动强度变大,对氮素的固定、转化能力增强^[27]。而且,植物残体腐解过程中所产生的酸类物质还可以促进土壤中难溶性物质向有效性方向转化,从而促进氮素的增加^[28]。自然恢复草地地面裸露,只有较少的杂草,虽然对土壤中养分吸收少,但每年直接和间接归还到土壤中的有机质也少,因此土壤氮含量较低。人工草地种植的苜蓿虽然能通过共生固氮,固定大气中游离的氮气,增加土壤中的氮源。但受土壤氮素累计消耗的影响,土壤氮素条件并没有得到根本的改善^[29]。而且人工草地由于连年收割,植物地上部分几乎全部被带出该生态系统,造成系统物质(资源)输入和输出的不平衡,土壤速效养分的亏缺,最终导致人工草地生态系统退化,特别是在相对脆弱的干旱和半干旱生态区^[30,31],人工草地由于人为的践踏导致土壤板结,使得太阳辐射、气温、地表温度、土壤通气状况均比天然草地差,从而限制了微生物的活性,使得对氮素的固定转化能力降低。所以本研究认为人工草地不宜作为提高土壤养分循环效率的恢复措施。

天然草地中较高的净矿化速率与高的有机质含量有关,有机质含量高的土壤能为矿化提供充足的物质基础,这也与赵成章等^[32]的研究结果一致。土壤硝化速率在 pH 较高的土壤中主要受铵态氮供应的限制,且硝化速率与矿化速率之间存在显著的正相关^[1]。本研究区土壤 pH 均在 8.5 左右,而且在 3 种草地中,天然草地的铵态氮浓度和净矿化速率均为最高,因此,它的硝化速率也最高。

3.3 土壤氮素含量与土壤理化性质的关系

土壤有机碳、水分、温度与各形态氮素显著正相关,土壤容重和 pH 与之显著负相关。这与王斌

等^[33]的研究结果一致。土壤有机碳是土壤氮素的基质,因此其含量与土壤氮矿化潜能显著正相关^[34]。而充足的水分和适当的温度是土壤氮素矿化必不可少的条件。土壤容重决定了土壤的通透性,容重升高使得土壤中 O_2 含量降低,对微生物活动造成了不利影响^[35]。因此对氮素的转化具有反作用。一般认为,土壤 pH 与氮矿化作用正相关,因为土壤 pH 值的升高增加了土壤有机质的可溶性,为微生物的活动提供了大量富含 C 和 N 基团的物质,从而可以促进氮的矿化^[36]。而本研究区域内的土壤均为碱性,pH 越低的土壤,越接近中性,越有利于微生物增加活性,因此 pH 同氮素表现出了显著的负相关关系。土壤各形态氮含量与土壤 C/N 没有表现出显著的相关性,这与大多数学者的研究结果不符。研究普遍发现,土壤矿质氮与 C/N 负相关^[34,37]。这是因为本研究区域,土壤 C/N 稳定且较低(8.23~9.84),碳含量相对不足,因此当 C/N 发生微小变化时,不足以影响微生物活性。土壤中各项氮素指标之间均具有极显著的正相关关系,可见氮循环的各个环节是密切相关的,总氮含量的升高使得可矿化基质升高,进而引起微生物数量增多,活性增强,一方面自身固持的氮素增加,另一方面,转化得到的铵态氮、硝态氮含量增加。

4 结 论

(1) 在整个培养过程中,土壤有机氮含量基本保持不变,其它氮素形态均随培养时间的延长变化显著,其含量均是在培养 120 d(8 月)时最低。净矿化速率、净硝化速率、净氨化速率在 60~120 d 时最低且均为负值,这与这一时期土壤水分含量最低有关,另外,植被生长固持较多也是原因之一。有机氮、亚硝态氮占总氮的比例比较恒定,可溶性有机氮、微生物生物量氮、硝态氮、铵态氮占总氮的比例表现出与其在土壤中含量的变化规律。氮素循环的各个环节密切相关,氮素指标之间相关性显著。

(2) 不同草地,各氮素含量及净矿化速率、净硝化速率、净氨化速率均是天然草地 > 自然恢复草地 > 人工草地。初步结果表明天然草地有助于促进土壤中各种氮素的富集,能有效改善黄土丘陵区土壤氮素养分状况。

参考文献:

- [1] Binkley D, Hart S C. The components of nitrogen availability assessments in forest soils [J]. *Advances in Soil Science*, 1989, 10: 57-112.
- [2] Chapin FS III, Maston P A, Mooney H A. *Principles of*

- Terrestrial Ecosystem Ecology [M]. New York: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2002. 202-215.
- [3] Ross D S, Lawrence G B, Fredriksen G. Mineralization and nitrification patterns at eight northeastern USA forested research sites [J]. *Forest Ecology and Management*, 2004, **188**(1-3): 317-335.
- [4] 陈伏生, 曾德慧, 范志平, 等. 章古台沙地樟子松人工林土壤有效氮的研究[J]. *北京林业大学学报*, 2005, **27**(3): 6-11.
- [5] 李玉中, 祝廷成, Redmann R E. 羊草草地土壤氮的总矿化、硝化和无机氮消耗速率研究[J]. *中国农业科学*, 2002, **35**(11): 1428-1431.
- [6] 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): 634-641.
- [7] Mazzarino M J, Bertiller M B, Sain C. Soil nitrogen dynamics in northeastern Patagonia Steppe under different precipitation regimes [J]. *Plant and Soil*, 1998, **202**(1): 125-131.
- [8] 杨小红, 董云社, 齐玉春, 等. 锡林河流域羊草草原暗栗钙土矿质动态变化[J]. *地理研究*, 2005, **24**(3): 388-395.
- [9] 陈丽, 米文宝, 杨蓉. 宁南山区退耕还林还草工程实施措施研究——以固原市原州区为例[J]. *水土保持研究*, 2005, **12**(3): 191-193.
- [10] 郝仕龙, 曹连海, 李壁成. 宁南山区土地利用/土地覆盖变化研究——以固原市黄试区为例[J]. *水土保持研究*, 2010, **17**(2): 213-217.
- [11] Binkley D, Hart S C. The components of nitrogen availability assessments in forest soils [J]. *Advances in Soil Science*, 1989, **10**: 57-112.
- [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. 碱性过硫酸钾法氧化法测定溶液中全氮含量法氧化剂的选择[J]. *植物营养与肥料学报*, 1998, **4**(3): 299-304.
- [14] 高英志, 汪诗平, 韩兴国, 等. 退化草地恢复过程中土壤氮素状况以及及与植被地上绿色生物量形成关系的研究[J]. *植物生态学报*, 2004, **28**(3): 285-293.
- [15] 刘宾, 李辉信, 朱玲, 等. 接种蚯蚓对潮土氮素矿化特征的影响[J]. *土壤学报*, 2007, **44**(1): 99-103.
- [16] Garcia F O, Rice C W. Microbial biomass dynamics in tallgrass prairie [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1994, **58**(3): 816-823.
- [17] Hagedorn F, Kaiser R, Feyen H, *et al.* Effects of redox conditions and flow processes on the mobility of dissolved organic carbon and nitrogen in a forest soil [J]. *Journal of Environmental Quality*, 2000, **29**(1): 288-297.
- [18] Bronk D A. Biogeochemistry of marine dissolved organic matter [M]. New York: Academic Press, 2002. 153-247.
- [19] Schimel J P, Jackson L E, Firestone M K. Spatial and temporal effects on plant microbial competition for inorganic nitrogen in a California annual grassland [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1989, **21**(8): 1059-1066.
- [20] Jackson L E, Schimel J P, Firestone M K. Short-term partitioning of ammonium and nitrate between plants and microbes in an annual grassland [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1989, **21**(3): 409-415.
- [21] MacDonald A J, Powlson D S, Poulton P R, *et al.* Unused fertilizer nitrogen in arable soils—its contribution to nitrate leaching [J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 1989, **46**(4): 407-419.
- [22] Tiedje J M. Ecology of denitrification and dissimilatory nitrate reduction tammonium. In: Zehnder A J B (Ed.). *Biology of Anaerobic Microorgaisms* [M]. New York: Wiley, 1988. 179-244.
- [23] 刘芳芳, 周德平, 吴淑杭, 等. 养殖废水中异养硝化细菌的分离筛选和鉴定[J]. *农业环境科学学报*, 2010, **29**(11): 2232-2237.
- [24] 孟盈, 薛敬意, 沙丽清, 等. 西双版纳不同热带森林下土壤铵态氮和硝态氮动态研究[J]. *植物生态学报*, 2001, **25**(1): 99-104.
- [25] 周才平, 欧阳华. 长白山两种主要林型下土壤氮矿化速率与温度的关系[J]. *生态学报*, 2001, **21**(9): 1469-1473.
- [26] 沙丽清, 邱学忠, 甘建民, 等. 云南保山西庄山地流域土地利用方式与土壤肥力关系研究[J]. *生态学杂志*, 2003, **22**(2): 9-11, 23.
- [27] Rutigliano F A, Castaldi S, D'Ascoli R, Papa S. Soil activities related to nitrogen cycle under three plant cover types in Mediterranean environment [J]. *Applied Soil Ecology*, 2009, **43**(1): 40-46.
- [28] Maithani K, Arunachalam A, Tripathib R S, *et al.* Nitrogen mineralization as influenced by climate, soil and vegetation in a subtropical humid forest in northeast India [J]. *Forest Ecology and Management*, 1998, **109**(1-3): 91-101.
- [29] 万素梅, 韩清芳, 胡守林, 等. 黄土高原半湿润区苜蓿草地土壤氮素消耗特征研究[J]. *植物营养与肥料学报*, 2008, **14**(1): 84-89.
- [30] 李金华, 李镇清, 任继周. 放牧对草原植物的影响[J]. *草业学报*, 2002, **11**(1): 4-11.
- [31] 杜睿, 王庚辰, 吕达仁. 放牧对草原土壤 N_2O 产生及微生物的影响[J]. *环境科学*, 2001, **22**(4): 11-15.
- [32] 赵成章, 樊胜岳, 殷翠琴. 祁连山区天然草原退化原因分析与可持续利用对策[J]. *中国沙漠*, 2004, **24**(2): 207-210.
- [33] 王斌, 陈亚明, 周至于. 贺兰山西坡不同海拔梯度上土壤氮素矿化作用的研究[J]. *中国沙漠*, 2007, **27**(3): 483-490.
- [34] Chu H Y, Paul G. Soil microbial biomass, nutrient availability and nitrogen mineralization potential among vegetation-types in a low arctic tundra landscape [J]. *Plant and Soil*, 2010, **329**(1-2): 411-420.
- [35] Jonathan D. Nitrogen mineralization potential in important agricultural soils of Hawaii I [J]. *Soil and Crop Management*, 2006, **15**: 1-5.
- [36] Curtin D, Campbell C A, Jalil A. Effects of acidity on mineralization: pH-dependence of organic matter mineralization in weakly acidic soils [J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 1998, **30**(1): 57-64.
- [37] 王常慧, 邢雪荣, 韩兴国. 草地生态系统中土壤氮素矿化影响因素的研究进展[J]. *应用生态学报*, 2004, **15**(11): 2184-2188.

CONTENTS

Comparative Analysis on Meteorological Condition for Persistent Haze Cases in Summer and Winter in Beijing	LIAO Xiao-nong, ZHANG Xiao-ling, WANG Ying-chun, <i>et al.</i> (2031)
Size Distributions of Water-Soluble Inorganic Ions in Atmospheric Aerosols in Fukang	MIAO Hong-yan, WEN Tian-xue, WANG Yue-si, <i>et al.</i> (2045)
Study on Transition Metals in Airborne Particulate Matter in Shanghai City's Subway	BAO Liang-man, LEI Qian-tao, TAN Ming-guang, <i>et al.</i> (2052)
Heavy Metal Concentrations in Mosses from Qiye Glacier Region	MA Juan-juan, LI Zhen (2060)
Distributions of Dimethylsulfide and Dimethylsulfoniopropionate and Influencing Factors in the East China Sea and the Southern Yellow Sea During the Winter	SONG Yi-zhu, ZHANG Hong-hai, YANG Gui-peng (2067)
Pollution by Heavy Metals in the Petrochemical Sewage Waters of the Sea Area of Daya Bay and Assessment on Potential Ecological Risks	XU Shan-nan, LI Chun-hou, XU Jiao-jiao, <i>et al.</i> (2075)
Distribution of Perfluorinated Compounds in Surface Water of Shenzhen Reservoir Groups	WANG Xin-xuan, ZHANG Hong, HE Long, <i>et al.</i> (2085)
Contamination and Source of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Epikarst Spring Water	SUN Yu-chuan, SHEN Li-cheng, YUAN Dao-xian (2091)
Biogeochemical Processes of the Major Ions and Dissolved Inorganic Carbon in the Guijiang River	TANG Wen-kui, TAO Zhen, GAO Quan-zhou, <i>et al.</i> (2099)
Hydrologic Processes of the Different Landscape Zones in Fenhe River Headwater Catchment	YANG Yong-gang, LI Cai-mei, QIN Zuo-dong, <i>et al.</i> (2108)
Assessment of Groundwater Quality of Different Aquifers in Tongzhou Area in Beijing Plain and Its Chemical Characteristics Analysis	GUO Gao-xuan, JU Yi-wen, ZHAI Hang, <i>et al.</i> (2114)
Models for Quantification of Fluid Saturation in Two-Phase Flow System by Light Transmission Method and Its Application	ZHANG Yan-hong, YE Shu-jun, WU Ji-chun (2120)
Nitrogen Leaching and Associated Environmental Health Effect in Sloping Cropland of Purple Soil	CHEN Wei-liang, GAO Yang, LIN Yong-ming, <i>et al.</i> (2129)
Research on Land Use Structure Optimization Based on Nonpoint Source Dissolved Nitrogen Load Estimation in Shuashui Watershed	LU Yu-chao, BI Meng-fei, LI Ze-li, <i>et al.</i> (2139)
Nitrogen and Organic Matter Vertical Distribution Characteristics and Evaluation in Ancient Canal Sediments of Zhenjiang Old Town	ZHOU Xiao-hong, LI Yi-min, ZHOU Yi, <i>et al.</i> (2148)
Effects of Two Submerged Macrophytes on Dissolved Inorganic Nitrogen in Overlying Water and Interstitial Water	YANG Wen-bin, LI Yang, SUN Gong-xian (2156)
Bioavailable Phosphorus on Suspended Solids of Lake Under Short-term and Repeated Sediment Disturbance	WU Xiao-fei, LI Da-peng (2164)
Influence of Different Disturbance Intensity on the Phosphorus Adsorption and Immobilization by the Sediments from an Inner City Heavily Polluted Canal	WANG Shang, LI Da-peng (2171)
Effect of Feed Residues on the Release of Nitrogen and Phosphorus of Pond Sediment	LÜ Yuan-jiao, LI Rui-jiao, ZHANG Nian, <i>et al.</i> (2178)
Delivery and Release of Sediment PAHs During Resuspension	WANG Xiao-hui, BI Chun-juan, HAN Jing-chao (2185)
Effects of Low Molecular Weight Organic Acids on Redox Reactions of Mercury	ZHAO Shi-bo, SUN Rong-guo, WANG Ding-yong, <i>et al.</i> (2193)
Removal of Fluorescent Whitening Agent by Hydrogen Peroxide Oxidation Catalyzed by Activated Carbon	LIU Hai-long, ZHANG Zhong-min, ZHAO Xia, <i>et al.</i> (2201)
Kinetics of Alkylphenols Degradation in Aqueous Phase with Excilamp Irradiation	LIU Yu-hai, YE Zhao-lian, WEN Ying-pin, <i>et al.</i> (2209)
AF + BAF for Treating Effluent in the Sewage Plant of the Resin and Chemical Industry Park	TU Yong, LIU Wei-jing, ZHANG Yao-hui, <i>et al.</i> (2216)
Synthesis and Adsorption Property of Cd(II)-8-hydroxyquinoline Molecularly Imprinted Polymer Microspheres	YANG Chun-yan, CHEN Fu-bin, ZHAO Hui, <i>et al.</i> (2223)
Simultaneous Nitrification and Denitrification in a Microbubble-aerated Biofilm Reactor	LIU Chun, NIAN Yong-jia, ZHANG Jing, <i>et al.</i> (2230)
Effect of PLA/Starch Slow-Release Carbon Source on Biological Denitrification	TANG Dan-qi, WANG Juan, ZHENG Tian-long, <i>et al.</i> (2236)
Impacts of Filamentous Bulking on Treatment Effect and Fouling Characteristics of Nonwoven Bioreactor	SHI Kuan, XUE Gang, GAO Pin, <i>et al.</i> (2241)
Optimization for Phosphorous Removal in Thickening and Dewatering Sludge Water by Polyaluminum Chloride	ZHOU Zhen, HU Da-long, QIAO Wei-min, <i>et al.</i> (2249)
Simulation of Long-Range Transport Potential of POPs in Poyang Lake	GONG Xiao-feng, XIANG Hong-rui, CHEN Chun-li, <i>et al.</i> (2256)
Uncertainty Analysis of Ecological Risk Assessment Caused by Heavy-metals Deposition from MSWI Emission	LIAO Zhi-heng, SUN Jia-ren, WU Dui, <i>et al.</i> (2264)
Risk Assessment and Countermeasures of BTEX Contamination in Soils of Typical Pesticide Factory	TAN Bing, WANG Tie-yu, LI Qi-feng, <i>et al.</i> (2272)
Levels Distribution and Risk Assessment of the Indicator and Dioxin-Like Polychlorinated Biphenyls in Ten Different Species of Marine Fish of Bohai Bay, China	WANG Sha-sha, GAO Li-rong, TIAN Yi-ling, <i>et al.</i> (2281)
Detection of Biohazardous Materials in Water upon the Characteristics of Fluorescent Sensor Frex	ZHAO Wei, WANG Zhao, CAI Qiang, <i>et al.</i> (2287)
Generation and Release of Microcystin-LR by <i>Microcystis aeruginosa</i> Under Hydroquinone Inhibition	ZHANG Yuan-chun, LIANG Wen-yan, ZHAO Yuan, <i>et al.</i> (2294)
Culture Medium Based on Biogas Slurry and Breeding of Oil Chlorella	ZHAO Feng-min, MEI Shuai, CAO You-fu, <i>et al.</i> (2300)
Microbial Diversity and Ammonia-Oxidizing Microorganism of a Soil Sample Near an Acid Mine Drainage Lake	LIU Ying, WANG Li-hua, HAO Chun-bo, <i>et al.</i> (2305)
Effects of <i>Corbicula fluminea</i> Bioturbation on the Community Composition and Abundance of Ammonia-Oxidizing Archaea and Bacteria in Surface Sediments	WANG Xue, ZHAO Da-yong, ZENG Jin, <i>et al.</i> (2314)
Methanogenic Activity and Methanogen Diversity in Marine Gas Field Sediments	TIAN Qi, WANG Jia, FAN Xiao-lei, <i>et al.</i> (2322)
Effect of the Potential on Bacterial Community Under Illumination by DGGE and T-RFLP	WU Yi-cheng, DENG Huan, XIAO Yong, <i>et al.</i> (2328)
Isolation and Characterization of Two Bacteria with Heavy Metal Resistance and Phosphate Solubilizing Capability	TIAN Jiang, PENG Xia-wei, LI Xia, <i>et al.</i> (2334)
Identification and Denitrification Characteristics of a Psychrotolerant Facultative Basophilic Aerobic Denitrifier	WANG Zhao-yang, CHEN Guo-yao, JIANG Ke, <i>et al.</i> (2341)
Effects of Ryegrass and Arbuscular Mycorrhiza on Activities of Antioxidant Enzymes, Accumulation and Chemical Forms of Cadmium in Different Varieties of Tomato	JIANG Ling, YANG Yun, XU Wei-hong, <i>et al.</i> (2349)
Response of Active Nitrogen to Salinity in a Soil from the Yellow River Delta	LI Ling, QIU Shao-jun, CHEN Yin-ping, <i>et al.</i> (2358)
Variation of Soil Nitrogen During <i>in situ</i> Mineralization Process Under Different Grasslands in the Mountainous Area of Southern Ningxia, Northwest China	JIANG Yue-li, ZHAO Tong, YAN Hao, <i>et al.</i> (2365)
Effects of Long-Term Application of Pig Manure Containing Residual Tetracycline on the Formation of Drug-Resistant Bacteria and Resistance Genes	ZHANG Jun, YANG Xiao-hong, GE Feng, <i>et al.</i> (2374)
Long-Term Effects of Tillage Methods on Heavy Metal Accumulation and Availability in Purple Paddy Soil	CHANG Tong-ju, CUI Xiao-qiang, RUAN Zhen, <i>et al.</i> (2381)
Environmental Geochemical Baseline of Heavy Metals in Soils of the Ili River Basin and Pollution Evaluation	ZHAO Xin-ru, Telajin Nasier, CHENG Yong-yi, <i>et al.</i> (2392)
Distribution Patterns and Pollution Assessments of Heavy Metals in the <i>Spartina alterniflora</i> Salt-Marsh Wetland of Rudong, Jiangsu Province	ZHANG Long-hui, DU Yong-fen, WANG Dan-dan, <i>et al.</i> (2401)
Temporal-Spatial Distribution of Agricultural Diffuse Nitrogen Pollution and Relationship with Soil Respiration and Nitrification	OUYANG Wei, CAI Guan-qing, HUANG Hao-bo, <i>et al.</i> (2411)
Soil Respiration and Carbon Balance in Wheat Field Under Conservation Tillage	ZHANG Sai, WANG Long-chang, HUANG Zhao-cun, <i>et al.</i> (2419)
Comparison of Soil Respiration in Natural <i>Castanopsis carlesii</i> Forest and Plantation Forest	WU Jun-jun, YANG Zhi-jie, WENG Fa-jin, <i>et al.</i> (2426)
Influences of Hydraulic Retention Time on the Ethanol Type Fermentation Hydrogen Production System in a Hybrid Anaerobic Baffled Reactor	LIU Xiao-ye, ZHANG Hong, LI Yong-feng (2433)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

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

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2014年6月15日 第35卷 第6期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 6 Jun. 15, 2014

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

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 90.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行