

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第39卷 第6期

Vol.39 No.6

2018

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

北京市二次有机气溶胶生成潜势的日变化规律	刘俊, 楚碧武, 贺泓 (2505)
太原冬季 PM _{2.5} 影响霾污染的关键尺度谱特征	杨素英, 余欣洋, 赵秀勇, 李义宇, 孙洪娉, 田芷洁, 李岩, 吴尚, 王梓航 (2512)
盘锦市冬季 PM _{2.5} 水溶性离子特征及来源分析	张蕾, 姬亚芹, 王士宝, 赵静琦, 张军, 李越洋, 张伟 (2521)
广州市天河区 2016 年雨季挥发性有机物污染特征及来源解析	古颖纲, 虞小芳, 杨闻达, 田智林, 李梅, 程鹏 (2528)
热带树木燃烧颗粒物中脱水糖和醋基烯的排放特征	金诚妙, 崔敏, 韩勇, 陈颖军, 唐娇, 李军, 张干 (2538)
天津地区污染天气分析中垂直扩散指标构建及运用	蔡子颖, 韩素芹, 张敏, 姚青, 刘敬乐 (2548)
亚热带农田和林地大气氨湿沉降与混合沉降比较	朱潇, 王杰飞, 沈健林, 肖润林, 王娟, 吴金水, 李勇 (2557)
京津冀地区黄标车政策的总量减排效益评估	卢亚灵, 周佳, 程曦, 张伟, 蒋洪强 (2566)
北京北运河河流生态系统健康评价	顾晓昀, 徐宗学, 刘麟菲, 殷旭旺, 王汨 (2576)
长江武汉段丰水期水体和沉积物中多环芳烃及邻苯二甲酸酯类有机污染物污染特征及来源分析	董磊, 汤显强, 林莉, 郇超, 黎睿, 吴敏 (2588)
福建省敖江下游抗生素抗性基因分布特征	张丹丹, 郭亚平, 任红云, 周昕原, 黄福义, 张炯 (2600)
三峡库区支流河口沉积物重金属分布特征及风险评价	方志青, 陈秋禹, 尹德良, 王志康, 孙涛, 王永敏, 谢德体, 王定勇 (2607)
三峡水库蓄水至 175 m 后干流沉积物理化性质与磷形态分布特征	潘婊娟, 黎睿, 汤显强, 夏振尧, 李青云, 杨文俊, 许文年 (2615)
基于水化学和稳定同位素的白洋淀流域地表水和地下水硝酸盐来源	孔晓乐, 王仕琴, 丁飞, 梁慧雅 (2624)
天目湖沙河水库热分层变化及其对水质的影响	孙祥, 朱广伟, 笄文怡, 余茂蕾, 杨文斌, 朱梦圆, 许海, 国超旋, 余丽, 李恒鹏, 李慧赞 (2632)
重庆雪玉洞滴水水文地球化学时空变化特征及其环境意义	曾泽, 蒋勇军, 吕现福, 曾思博, 胡刘焯, 雷佳琪 (2641)
岩溶地表河旱季有色溶解有机质组成及来源: 以金佛山碧潭河为例	刘跃, 贺秋芳, 刘宁坤, 刘九雄, 王正雄, 段世辉 (2651)
托来河流域不同海拔降水稳定同位素的环境意义	李永格, 李宗省, 冯起, 肖莲桂, 吕越敏, 桂娟, 袁瑞丰, 张百娟 (2661)
五里峡水库初级生产力对水气界面二氧化碳和甲烷排放速率时空变化的影响	彭文杰, 李强, 宋昂, 靳振江 (2673)
西南山区典型河道型水库藻类功能群时空演替特征及其影响因素: 以紫坪铺水库为例	张耀文, 李洪, 李嘉, 宋洋, 张陵蕾, 李永, 蒲迅赤, 黄文典 (2680)
四明湖水库浮游植物功能类群的季节演替及其影响因子	郑诚, 陆开宏, 徐镇, 郑志明, 朱津永 (2688)
营养盐添加对水华蓝藻——卵孢金胞藻生长和竞争影响的原位实验	王梦梦, 张伟, 张军毅, 尚光霞, 杜彩丽, 王丽卿 (2698)
植物配置与进水碳氮比对沉水植物塘水质净化效果的影响	刘森, 陈开宁 (2706)
江汉平原水稻季灌排单元沟渠中氮磷变化特征及其环境风险	华玲玲, 张富林, 翟丽梅, 刘宏斌, 范先鹏, 王洪媛 (2715)
冀西北典型北方小城镇污水处理厂中抗生素的分布和去除	柴玉峰, 张玉秀, 陈梅雪, 王瑞, 柳蒙蒙, 郑嘉熹, 魏源送 (2724)
臭氧-粉末炭联用作为预处理缓解膜污染的效果与机制	董秉直, 高昊旻, 胡孟柳 (2732)
中试 SAD-ASBR 系统处理含盐废水的启动与工艺特性	于德爽, 唐佳佳, 张军, 王晓霞, 赵红, 韩长民, 孙捷 (2740)
海藻酸钙/聚 N-异丙基丙烯酰胺半互穿网络凝胶球的除磷性能	曾学阳, 骆华勇, 张耀坤, 荣宏伟, 曾子君, 钟广汇 (2748)
玉米淀粉废水短程硝化快速启动及其稳定性	龙北生, 刘迅雷, 刘红波, 杨靖新, 袁树森 (2756)
硝化细菌的培养及包埋固定化中试	杨宏, 胡银龙 (2763)
不同运行策略下厌氧氨氧化的脱氮性能	安芳娇, 彭永臻, 董志龙, 邵兆伟, 赵智超, 黄剑明, 陈永志 (2770)
高含固污泥厌氧消化中蛋白质转化规律	詹瑜, 施万胜, 赵明星, 许之扬, 阮文权, 宋联, 朱葛 (2778)
污泥富磷堆肥前后重金属赋存形态及释放能力变化	李玉, 方文, 祁光霞, 魏勇红, 刘建国, 李润东 (2786)
丝状菌污泥膨胀对脱氮除磷功能菌群的影响	高晨晨, 游佳, 陈轶, 郑兴灿, 尚巍, 张文安 (2794)
同步去除并富集磷酸盐生物膜驯化过程中微生物种群分析	孟璇, 潘杨, 章豪, 廖恒弘, 徐林建, 冯鑫, 单捷 (2802)
四环素对人工粪堆好氧堆肥过程及微生物群落演替的影响	时红蕾, 王晓昌, 李倩, 刘源 (2810)
长期定位有机物还田对关中平原夏玉米-冬小麦轮作土壤 NO 排放的影响	袁梦轩, 王晋峰, 谭跃慧, 魏静, 杨学云, 顾江新 (2819)
菌渣还田量对紫色水稻土净温室气体排放的影响	祁乐, 高明, 周鹏, 王富华, 高泳钦, 陈仕奇, 吴思琪, 邓静霖, 文婷 (2827)
¹³ C 脉冲标记法定量冬小麦光合碳分配及其向地下的输入	孙昭安, 陈清, 韩笑, 吴文良, 孟凡乔 (2837)
西南喀斯特区植被恢复对土壤氮素转化通路的影响	杨怡, 欧阳运东, 陈浩, 肖孔操, 李德军 (2845)
江苏海岸带土壤重金属来源解析及空间分布	吕建树, 何华春 (2853)
黄河下游典型区域土壤重金属来源解析及空间分布	于元赫, 吕建树, 王亚梦 (2865)
典型小城市土壤重金属空间异质性及其风险评价: 以临安市为例	郑晴之, 王楚栋, 王诗涵, 林于也, 赵科理, 吴东涛, 傅伟军 (2875)
西南某铅锌矿区农田土壤重金属空间主成分分析及生态风险评价	周艳, 陈楠, 邓绍坡, 王金忠, 张胜田, 龙涛, 李群, 林玉锁, 吴运金 (2884)
典型山核桃产区土壤重金属空间异质性及其风险评价	张红桔, 赵科理, 叶正钱, 许斌, 赵伟明, 顾晓波, 张华锋 (2893)
生物炭添加对湿地植物生长及氧化应激响应的影响	黄磊, 陈玉成, 赵亚琦, 肖广全, 杨志敏 (2904)
厌氧条件水稻土铁对砷释放的影响	王欣, 钟松雄, 陈志良, 何宏飞, 董家华, 陈晓丽 (2911)
矿业活动影响稻田土壤和稻米中重金属含量及健康风险	田美玲, 钟雪梅, 张云霞, 余元元, 庞瑞, 周浪, 宋波 (2919)
硅酸钙和生物腐殖肥复配对葱生长和镉吸收的影响	刘德玲, 尹光彩, 陈志良, 林亲铁, 刘千钧, 钟松雄, 黄玲, 张建强 (2927)
吉林四平设施土壤和蔬菜中重金属的累积特征	李莲芳, 朱昌雄, 曾希柏, 李红娜, 叶婧, 李峰, 吴翠霞 (2936)
喷施锌肥对油菜镉锌生物可给性的影响	王林, 谷朋磊, 李然, 徐应明, 孙约兵, 梁学峰, 代晶晶 (2944)
贵州草海底栖动物汞分布及其对沉积物汞的响应特征	许议元, 曾玲霞, 何天容, 陈梦瑜, 钱晓莉, 李振吉 (2953)
废旧轮胎翻新过程中多环芳烃排放及健康风险	付建平, 赵波, 黎玉清, 刘沙沙, 尹文华, 黄锦琼, 周长风, 张素坤, 贺德春, 韩静磊 (2963)
县级尺度的重庆市碳排放时空格局动态	孙秀峰, 施开放, 吴健平 (2971)
颗粒尺寸对纳米氧化物环境行为的影响	严玉鹏, 唐亚东, 万彪, 王小明, 刘凡, 冯雄汉 (2982)
防晒剂的海洋环境行为与生物毒性	朱小山, 黄静颖, 吕小慧, 杜永芬, 蔡中华 (2991)
《环境科学》征订启事 (2527)	《环境科学》征稿简则 (2723)
信息 (2826, 2852, 2910)	

西南喀斯特区植被恢复对土壤氮素转化通路的影响

杨怡^{1,2,3}, 欧阳运东⁴, 陈浩^{1,2*}, 肖孔操^{1,2}, 李德军^{1,2}

(1. 中国科学院亚热带农业生态研究所, 亚热带农业生态过程重点实验室, 长沙 410125; 2. 中国科学院环江喀斯特农业生态系统研究观测站, 环江 547200; 3. 中国科学院大学, 北京 100049; 4. 湖南省邵阳市第二中学, 邵阳 422000)

摘要: 氮素是生态系统重要的限制性养分元素之一。研究氮素转化特征对于了解生态系统功能具有重要意义。然而, 目前对喀斯特地区氮素转化特征的认识十分有限。同时, 喀斯特地区正开展一系列的生态恢复工程措施, 生态恢复将对土壤氮素转化过程产生何种影响尚不清楚。为此, 本研究在广西环江县喀斯特区域选取 3 种典型的植被恢复阶段(草地、灌丛、次生林), 以农田为参照, 采集 0~10 cm 深度的土壤样品, 测定了土壤净氨化速率(净氨化率、真菌氨化和细菌氨化)、净氮矿化速率(净氮矿化、真菌矿化和细菌矿化)、净硝化速率(净硝化、自养硝化、异养硝化、真菌硝化、细菌硝化)及相关土壤理化指标, 研究喀斯特区植被恢复对土壤氮素转化速率的影响。结果表明, 总体上喀斯特生态系统硝化速率很高, 土壤无机氮主要以硝态氮形式为主, 其中自养硝化和异养硝化分别占净硝化速率的 80% 和 20%。添加真菌和细菌抑制剂后, 氨化速率增加, 而硝化速率下降。另外, 随着植被的恢复, 土壤氮矿化和硝化速率逐渐增加, 而氨化速率逐渐下降。其原因与不同植被恢复阶段的土壤有机碳、总氮、硝态氮、微生物量及氮获取酶的活性有密切关系。这些发现为认识喀斯特生态系统氮素循环特征提供了关键的信息。

关键词: 植被恢复; 氮素转化; 氮矿化; 自养硝化; 异养硝化; 喀斯特

中图分类号: X144 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2018)06-2845-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.201710066

Effects of Vegetation Restoration on Soil Nitrogen Pathways in a Karst Region of Southwest China

YANG Yi^{1,2,3}, OUYANG Yun-dong⁴, CHEN Hao^{1,2*}, XIAO Kong-cai^{1,2}, LI De-jun^{1,2}

(1. Key Laboratory of Agro-ecological Processes in Subtropical Region, Institute of Subtropical Agriculture, Chinese Academy of Sciences, Changsha 410125, China; 2. Huanjiang Experimental Station of Karst Ecosystem, Chinese Academy of Sciences, Huanjiang 547200, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 4. Shaoyang No. 2 Middle School, Shaoyang 422000, China)

Abstract: Nitrogen (N) is an important element for plant growth in terrestrial ecosystems. Studying soil N cycling is crucial for understanding the structures and functions of an ecosystem. However, our knowledge of soil N dynamics in karst regions is still limited. In addition, while China's karst regions have conducted a series of vegetation restoration projects, the vegetation restoration effects on soil N pathways are still largely unknown. Therefore, this study selected four typical ecosystems representing four main vegetation restoration stages (i. e., cropland, grassland, shrubland, and forest) in a karst region in Huanjiang Province, southwest China. In these ecosystems, soil N pathways, including net ammonification rate (net ammonification, fungal ammonification, and bacterial ammonification), net nitrification rate (i. e., net nitrification, heterotrophic nitrification, autotrophic nitrification, fungal nitrification, and bacterial nitrification), net N mineralization rate (net N mineralization, fungal mineralization, and bacterial mineralization), and soil properties were measured. Our results showed that nitrification rate was high in all ecosystems, but the ammonification rate was low, resulting in nitrite being the main inorganic N form in karst soil. Autotrophic and heterotrophic nitrification rates accounted for 80% and 20% of the net nitrification rate, respectively. After the addition of fungal and bacterial inhibitors, ammonification rates increased for all treatments, but the nitrification rates decreased. Following vegetation restoration, soil N mineralization and nitrification rates all increased, but the ammonification rates significantly decreased. This pattern was significantly correlated with soil organic carbon, total nitrogen, nitrate, microbial biomass, and the activity of N-acquisition enzymes in these ecosystems. Our findings provide very useful information for understanding soil N cycling in the karst regions.

Key words: vegetation restoration; nitrogen transformation; nitrogen mineralization; heterotrophic nitrification; autotrophic nitrification; karst

收稿日期: 2017-10-12; 修订日期: 2017-12-01

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0502404); 国家自然科学基金项目(31400462, 31500405); 中国科学院百人计划项目(Y523101030)

作者简介: 杨怡(1993~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为全球变化生态学, E-mail: haugtessa2010@live.cn

* 通信作者, E-mail: chen hao10902@isa.ac.cn

氮是植物生长的必需元素,也是陆地生态系统最主要的限制性营养元素^[1].由于生态系统碳、氮循环之间的密切耦合关系,土壤氮素供应能力很大程度上决定着全球变化背景下生态系统的固碳潜力及退耕后植被演替的方向和进程^[2].同时,土壤中某些形态氮也是环境中重要的污染物质,比如排放到水体中的可溶性氮可导致水体富营养化^[3],排放到大气中的 NO_x 可导致光化学烟雾^[4].可见,生态系统氮状况的研究对于评估全球变化背景下生态系统的固碳潜力、预测生态恢复方向与进程及污染防治等一系列重大生态环境问题均具有重要意义.土壤有效氮的生产包括了一系列过程,如氨化、硝化和氮矿化过程等^[5].这些过程是由一系列的真菌和细菌参与的^[6].以硝化作用为例,铵态氮氧化为硝态氮的过程是由自养和异养微生物共同驱动的.相比之下,有机氮硝化为硝态氮的过程则主要是由异养微生物驱动.一般地,自养硝化主要是由氨氧化细菌(AOB)和硝氧化细菌(NO_B)主导,而异养硝化则是比较广泛的细菌和真菌主导^[7].通过添加生物抑制剂,自养硝化、异养硝化、真菌硝化和细菌硝化过程是可以被区分开的^[8],而这样的区分对更好地理解生态系统氮循环过程有重要的意义.

生态系统氮素转化过程受多种全球变化因素的影响,土地利用方式改变是其中重要的影响因素之一^[9,10].目前关于土地利用方式改变后(如:退耕后植被恢复)土壤氮素转化过程变化的研究已有不少报道.然而结果并不一致,Li等^[11]的研究发现净氮矿化和硝化速率随演替而下降,而氨化速率则不断增加;Yan等^[12]的研究发现氮净矿化速率在演替初期和后期高,中期低,而净硝化速率则呈现随演替进程不断增加,且不同季节变化趋势差异明显.生态系统类型、土壤母质和土壤类型是导致这些差异的主要原因.然而,目前的研究主要集中在酸性土壤区域,对中性偏碱性的喀斯特石灰土壤的氮素转化特征的认识还十分不足.此外,对氮转化速率的研究多数只关心净(或总)氮转化速率,对其具体的通路,如自养、异养硝化过程的研究缺乏深入了解.

喀斯特是地表生态系统的重要组成部分,其中中国西南喀斯特区是世界最大、最集中连片的喀斯特区^[13].喀斯特山区独特的土壤条件(如高pH、高钙与高缓冲能力、特殊水文条件等)决定了生态系统过程对于全球变化的响应有别于其他地区.如前期的研究表明,该地区的土壤氮含量很高,硝态氮

淋失严重,意味着该地区土壤氮饱和的可能性极大^[14].同时,该地区正开展大规模的植被恢复工程,其带来的对土壤氮转化过程的影响也不甚清楚.为此,本文选取喀斯特地区4种不同土地利用方式的土壤(农田、草地、灌丛、次生林)为研究对象,通过对喀斯特地区不同植被恢复阶段的氮矿化、氨化、硝化、真菌矿化、细菌矿化、真菌氨化、细菌氨化、真菌硝化、细菌硝化、自养硝化和异养硝化进行测定,分析植被恢复过程对氮转化速率的影响及机制.本研究一方面可获取区域代表性数据,另一方面可揭示喀斯特山区土壤肥力的供应和保持机制,以期为喀斯特生态恢复实践提供理论支撑.

1 材料与方法

1.1 研究样地概况

研究区位于广西环江县(107°53'~108°05'E, 25°06'~25°12'N),具有典型喀斯特峰丛洼地景观,属亚热带季风气候区.年平均气温为19.6~21.6℃,最低温出现在1月,约为3.4~8.7℃,最高温出现在7月,约为23.0~26.7℃.年均降雨量为1530~1820 mm,分干湿季,4~8月属于湿季,9月至次年3月属于旱季.研究区基岩主要为石灰岩和白云岩,土壤主要为石灰土^[15].

1.2 土壤样品采集

土壤采集时间在2014年7月.选择典型的农田、草地、灌丛和次生林这4种不同的植被恢复阶段.其中农田种植的是玉米.草地的恢复年限为10 a左右,优势物种以五节芒(*Miscanthus floridulus*)、类芦(*Neyraudia reynaudiana*)等为主;灌丛封育年限为15~20 a,主要优势种为火棘(*Pyracantha fortuneana*)、金丝桃(*Hypericum monogynum*)和小果蔷薇(*Rosa cymosa*)等.次生林封育年限为30 a以上,主要的优势种有伞花木(*Eurycorymbus cavaleriei*)、樟树(*Cinnamomum camphora*)、厚壳桂(*Cryptocarya chinensis*)等.

每个植被恢复阶段建立3个10 m×10 m的样方,每个样方按S型布设5个样点,采集表层(0~10 cm)土壤样品.将5个样点采取的土壤样品混成一个混合土样,总共12个土壤样品.新鲜土样放于冰盒中带回实验室,先用镊子挑去根和石块,过2 mm筛后分两部分保存.一部分保存在4℃冰箱内用于土壤氮转化速率测定,另一部分经自然风干后用于土壤理化性质分析(表1).

表 1 不同植被恢复阶段下的土壤属性¹⁾

Table 1 Soil properties in different vegetation restoration stages

土壤属性	农田	草地	灌丛	次生林
SOC/g·kg ⁻¹	36.07 ± 1.72 ab	26.47 ± 1.79 b	33.31 ± 3.35 ab	40.85 ± 5.45 a
TN/g·kg ⁻¹	2.08 ± 0.38 b	2.27 ± 0.22 b	3.49 ± 0.53 a	3.64 ± 0.20 a
C/N	17.79 ± 3.74 a	11.77 ± 1.81 a	9.61 ± 0.63 b	11.20 ± 0.97 ab
K/cmole·kg ⁻¹	0.23 ± 0.07 a	0.19 ± 0.01 a	0.29 ± 0.08 a	0.21 ± 0.03 a
Ca/cmole·kg ⁻¹	12.91 ± 2.23 b	18.60 ± 2.26 a	18.39 ± 2.31 a	19.08 ± 4.38 a
Na/cmole·kg ⁻¹	0.31 ± 0.03 a	0.34 ± 0.04 a	0.38 ± 0.03 a	0.33 ± 0.02 a
Mg/cmole·kg ⁻¹	2.80 ± 1.77 b	2.04 ± 0.10 b	4.74 ± 2.08 ab	6.27 ± 1.52 a
pH	6.66 ± 0.30 ab	6.92 ± 0.11 a	6.36 ± 0.16 b	6.58 ± 0.08 ab
黏粒/%	13.53 ± 1.76 ab	15.95 ± 1.02 a	12.62 ± 5.51 ab	10.92 ± 0.64 b
粉粒/%	77.43 ± 3.52 a	71.79 ± 3.06 a	74.46 ± 0.56 a	73.99 ± 1.68 a
砂粒/%	9.04 ± 5.22 a	12.26 ± 2.07 a	12.92 ± 5.00 a	15.09 ± 2.16 a
微生物 C/mg·kg ⁻¹	288 ± 8 c	293 ± 33 bc	365 ± 17b	836 ± 51 a
微生物 N/mg·kg ⁻¹	38 ± 0.5c	58 ± 10 bc	62 ± 8 b	198 ± 16 a
BG/nmol·(g·h) ⁻¹	29.5 ± 1.4c	43.6 ± 2.6 b	49.9 ± 5.8b	86.1 ± 11.8a
CBH/nmol·(g·h) ⁻¹	4.3 ± 0.7c	6.2 ± 0.6c	10.2 ± 2.5b	15.2 ± 2.1a
LAP/nmol·(g·h) ⁻¹	0.8 ± 0.1c	1.1 ± 0.3c	2.7 ± 0.6b	3.4 ± 0.9a
NAG/nmol·(g·h) ⁻¹	11.2 ± 1.5c	30.3 ± 3.6bc	26.4 ± 3.1b	40.8 ± 6.3a
Urease/nmol·(g·h) ⁻¹	135.4 ± 8.0ab	126.9 ± 44.6b	183.7 ± 12.0a	268.0 ± 64.3a

1) 表中数值为平均值 ± 标准差; 不同字母表示差异性显著; BG:β-葡萄糖苷酶; CBH:α-纤维素酶; LAP:亮氨酸氨基肽酶; NAG:β-乙酰葡萄糖胺糖苷酶; Urease:脲酶

1.3 实验方法

1.3.1 土壤潜在净氮转化速率测定

土壤潜在净氮转化速率的测定参考文献[16]的方法. 具体步骤如下:将新鲜土样分为ABCDE 5组. A组:称5 g土测定土壤NH₄⁺和NO₃⁻浓度作为培养的初始值. B组:将10 g土壤放入250 mL培养瓶中,不添加任何物质;C组:将10 g土壤放入250 mL培养瓶中,添加纯度为99%的乙炔.乙炔的注入量为2%(体积比),用以抑制微生物的自养硝化;D组:将10 g土壤放入250 mL培养瓶中,添加2 mL的放线菌酮试剂,用以抑制土壤的真菌活动;E组:将10 g土壤放入250 mL培养瓶中,添加2 mL的链霉素试剂,用以抑制土壤的细菌活动.

所有土壤样品,调节含水量至土壤最大持水率的85%.用聚乙烯膜将B-E组的瓶口包扎.除B组的外,C-E组在膜上扎5个小孔以保证透气性,然后将B-E组所有土壤置于25℃培养室中培养7 d.培养期间,每隔两天调节一次含水率.培养结束后,加入2 mol·L⁻¹ KCl溶液100 mL,于温度为25℃的恒温振荡机内振荡1 h后进行过滤,滤液用AA3连续流动分析仪(Fiastar 5000)测定土壤中的NH₄⁺和NO₃⁻含量.土壤潜在净氮转化速率[以N计,mg·(kg·d)⁻¹]的计算如下^[16,17].

$$\text{净氮矿化速率} = [(B \text{ 组的 } NH_4^+ + NO_3^-) - (A \text{ 组的 } NH_4^+ + NO_3^-)] / 7 \text{ d}$$

$$\text{净氨化率} = \frac{[(B \text{ 组的 } NH_4^+) - (A \text{ 组 } NH_4^+)]}{7 \text{ d}}$$

$$\text{净硝化率} = \frac{[(B \text{ 组 } NO_3^-) - (A \text{ 组 } NO_3^-)]}{7 \text{ d}}$$

$$\text{自养硝化速率} = [(C \text{ 组的 } NO_3^- \text{ 浓度}) - (A \text{ 组的 } NO_3^- \text{ 浓度})] / 7 \text{ d}$$

$$\text{异养硝化速率} = \text{净硝化速} - \text{自养硝化速率}$$

$$\text{细菌异养硝化速率} = [(D \text{ 组的 } NO_3^- \text{ 浓度}) - (A \text{ 组的 } NO_3^- \text{ 浓度})] / 7 \text{ d}$$

$$\text{真菌异养硝化速率} = [(E \text{ 组的 } NO_3^- \text{ 浓度}) - (A \text{ 组的 } NO_3^- \text{ 浓度})] / 7 \text{ d}$$

$$\text{细菌氨化速率} = [(D \text{ 组的 } NH_4^+ \text{ 浓度}) - (A \text{ 组的 } NH_4^+ \text{ 浓度})] / 7 \text{ d}$$

$$\text{真菌氨化速率} = [(E \text{ 组的 } NH_4^+ \text{ 浓度}) - (A \text{ 组的 } NH_4^+ \text{ 浓度})] / 7 \text{ d}$$

1.3.2 土壤的理化指标分析

土壤理化指标的测定参考刘光崧等的方法^[18].土壤pH采用pH计测定(土水比为1:2.5);土壤有机碳(SOC)采用重铬酸钾氧化-外加热法(油浴)测定;全氮(TN)采用半微量开氏法-流动注射仪(FIAstar 5000)测定;交换性K⁺、Ca²⁺、Na⁺、Mg²⁺采用乙酸铵交换-原子吸收分光光度法测定.土壤机械组成采用激光衍射粒度分析仪(Mastersizer,

2000, Malvern, UK) 测定. 土壤微生物量 C 和 N (MBC 和 MBN) 采用氯仿熏蒸法测定. 此外还测定了与土壤有机氮分解相关的 5 种酶的活性. 这些酶包括 β -葡萄糖苷酶 (BG)、 α -纤维素酶 (CBH)、亮氨酸氨基肽酶 (LAP)、 β -乙酰葡萄糖胺糖苷酶 (NAG) 和脲酶 (Urease). 这些酶的测定方法和功能见文献 [19~21].

1.4 数据处理与分析

利用单因素方差分析 (One-way ANOVA) 检验不同土地利用方式下土壤氮转化速率的差异, 并采用 LSD 方法进行显著性多重比较, 差异显著性水平

为 $P < 0.05$. 利用线性回归分析土壤氮转化速率与土壤理化指标之间的相关性. 以上分析在 SPSS 19.0 软件中进行.

2 结果与分析

在 4 个喀斯特生态系统中, 土壤无机氮均以硝态氮为主, 占到总无机氮的 (65%~93%) (表 2, A 组). 土壤培养 7d 后, 硝态氮在所有处理中均升高, 其中 B 组的升高幅度最大; C 组、D 组和 E 组相比 B 组有明显的下降. 铵态氮在所有处理中也均显著升高, 其中 C 组、D 组和 E 组的升高幅度大于 B 组.

表 2 不同处理下土壤硝态氮和氨态氮浓度的差异¹⁾/mg·kg⁻¹

Table 2 Concentrations of soil nitrate and ammonia under different treatments/mg·kg⁻¹

处理	A 组(0 d)		B 组(7 d)		C 组(7 d)		D 组(7 d)		E 组(7 d)	
	硝氮	氨氮	硝氮	氨氮	硝氮	氨氮	硝氮	氨氮	硝氮	氨氮
农田	9.5(0.9)	2.2(1.0)	42.7(4.2)	7.8(3.5)	16.8(1.2)	13.3(2.1)	34.69(2.1)	32.5(7.8)	26.00(1.9)	29.5(8.7)
草地	2.8(0.4)	1.5(0.2)	16.2(1.9)	6.0(0.5)	5.0(0.9)	9.0(0.5)	11.82(1.8)	27.7(5.6)	10.02(0.7)	36.4(3.4)
灌丛	18.2(0.6)	5.7(0.3)	75.3(1.7)	6.2(0.9)	28.1(0.9)	14.8(2.5)	46.21(3.5)	34.0(7.6)	38.33(2.3)	36.1(8.9)
次生林	36.4(3.0)	2.5(0.4)	188.8(23.3)	1.0(0.2)	71.7(9.3)	3.7(1.6)	94.59(15.2)	3.4(0.5)	76.63(8.6)	5.8(1.5)

1) 括号内数字表示平均值, 括号外表示标准差

2.1 土壤的净氨化、细菌氨化与真菌氨化速率

4 种喀斯特生态系统类型的土壤净氨化速率均较低, 介于 $-0.16 \sim 0.63 \text{ mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$ (图 1). 方差分析结果表明, 随着植被的恢复, 土壤净氨化速率显著降低, 甚至在次生林阶段表现为负值 (图 1). 通过添加细菌和真菌抑制剂计算出来的细菌氨化 [$0.37 \sim 3.88 \text{ mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$] 与真菌氨化速率 [$0.11 \sim 3.37 \text{ mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$] 均高于总的净氨化速率 (图 1). 细菌氨化速率在次生林阶段显著低于农田、草地和灌丛, 而后 3 个阶段之间没有显著差异. 真菌氨化速率表现出和细菌氨化速率一致的规律 (图 1).

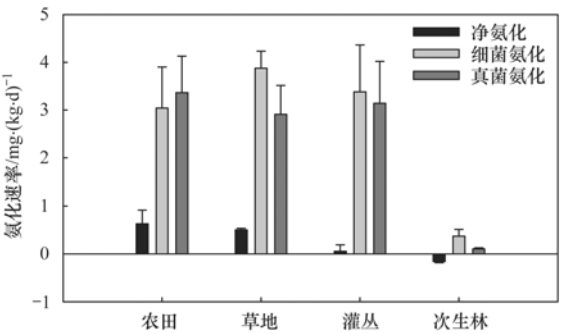


图 1 不同土地利用方式对土壤的净氨化、细菌与真菌氨化速率的影响

Fig. 1 Effect of different land use types on the net rates of ammonification, fungal and bacterial ammonification

2.2 土壤的总硝化、自养与异养硝化、真菌硝化和细菌硝化速率

4 种喀斯特生态系统类型的土壤净硝化速率均较高, 介于 $1.49 \sim 16.94 \text{ mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$, 其中自养硝化 [$1.24 \sim 13.02 \text{ mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$] 相比异养硝化 [$0.25 \sim 3.92 \text{ mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$] 占到总净氨化速率比重的 76.8%~83.3% (图 2). 细菌硝化介于 $0.80 \sim 4.46 \text{ mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$ 之间, 平均约占净氨化速率的 41%; 真菌硝化速率介于 $1 \sim 6.46 \text{ mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$ 之间, 平均约占 59% (图 3). 以上几种硝化速率类型均表现为随着植被恢复不断增加的趋势, 其中在草地最低, 次生林最高.

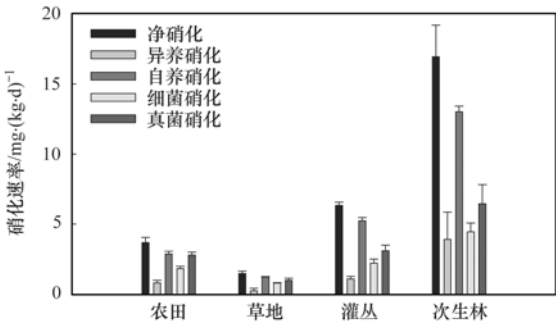


图 2 不同土地利用方式对土壤的总硝化、自养与异养硝化和真菌与细菌硝化的影响

Fig. 2 Effects of different land-use types on the net rates of soil nitrification, autotrophic and heterotrophic nitrification and fungal and bacterial nitrification

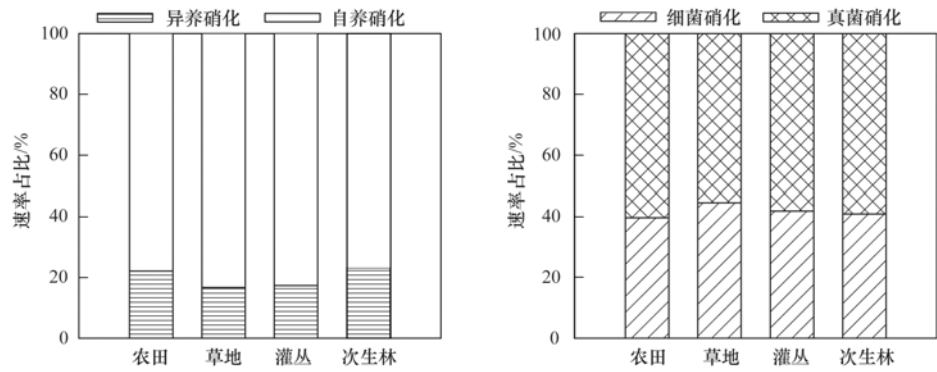


图3 异养硝化、自养硝化、细菌硝化和真菌硝化占总净硝化的占比

Fig. 3 Contributions of heterotrophic, autotrophic, bacterial, and fungal nitrification to the total net nitrification

2.3 土壤的总氮矿化、真菌氮矿化与细菌氮矿化速率

土壤净氮矿化速率介于 2.00 ~ 16.78 $\text{mg}\cdot(\text{kg}\cdot\text{d})^{-1}$, 在次生林阶段显著低于农田、草地和灌丛 (图 4). 细菌氮矿化 $[0.37 \sim 3.88 \text{ mg}\cdot(\text{kg}\cdot\text{d})^{-1}]$ 与真菌氮矿化速率 $[0.11 \sim 3.37 \text{ mg}\cdot(\text{kg}\cdot\text{d})^{-1}]$ 也表现出相同的规律. 而且除了次

生林外, 真菌和细菌氮矿化均高于总的净氮矿化速率.

2.4 土壤氮转化速率与土壤属性的关系

相关性分析的结果显示, 土壤氮转化速率与土壤有机碳、总氮、硝态氮、微生物量 C、微生物量 N 及 5 种与氮获取相关的酶的活性关系密切, 而与土壤 pH、碳氮比、铵态氮、土壤钾钙钠镁的含量无显著相关 (表 3). 其中, 土壤有机碳与净氮矿化、真菌矿化、细菌矿化、净硝化、异养硝化、自养硝化、真菌硝化和细菌硝化呈显著正相关; 土壤总氮与净氮矿化、真菌矿化、细菌矿化、净氨化、净硝化、异养硝化、自养硝化、真菌硝化和细菌硝化呈显著正相关; 而土壤硝态氮与测定的所有氮转化速率均成正相关. 微生物量 C 与净氮矿化、细菌矿化、净氨化、细菌氨化、净硝化、自养硝化成正相关. 微生物量 N 与净氮矿化、净氨化成正相关. 5 种酶中, LAP 的相关性最强, 与净氮矿化、真菌矿化、细菌矿化、细菌氨化、净硝化、异养硝化、自养硝化和细菌硝化均呈显著正相关.

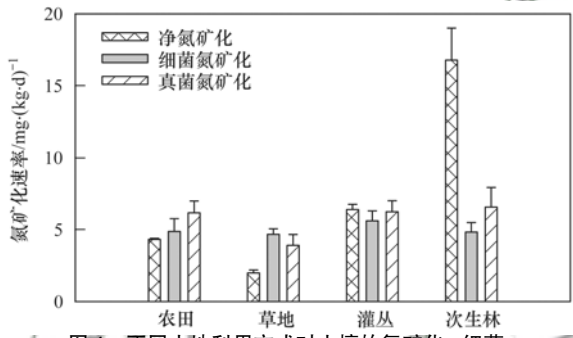


图4 不同土地利用方式对土壤的氮矿化、细菌和真菌氮矿化的影响

Fig. 4 Effects of different land-use types on the net rates of soil nitrogen-mineralization, bacterial and fungal nitrogen-mineralization

表3 土壤氮转化速率与土壤属性的相关分析结果¹⁾ (P 值)

	pH	SOC	TN	NO ₃ ⁻	NH ₄ ⁺	MBC	MBN	BG	CBH	LAP	NAG	Urease
净氮矿化	0.761	0.001	0.001	0.000	0.752	0.007	0.027	0.018	0.001	0.005	0.073	0.002
真菌矿化	0.488	0.001	0.002	0.000	0.315	0.247	0.308	0.279	0.058	0.047	0.350	0.171
细菌矿化	0.547	0.002	0.001	0.000	0.199	0.025	0.143	0.019	0.018	0.001	0.014	0.059
净氨化	0.536	0.128	0.032	0.004	0.556	0.007	0.016	0.009	0.040	0.192	0.014	0.031
真菌氨化	0.431	0.060	0.062	0.008	0.459	0.394	0.342	0.379	0.126	0.157	0.241	0.501
细菌氨化	0.966	0.078	0.128	0.005	0.441	0.049	0.200	0.029	0.077	0.014	0.009	0.161
净硝化	0.741	0.001	0.001	0.000	0.734	0.047	0.105	0.087	0.010	0.012	0.221	0.015
异养硝化	0.742	0.001	0.002	0.000	0.727	0.135	0.189	0.218	0.053	0.025	0.383	0.062
自养硝化	0.748	0.003	0.001	0.000	0.773	0.038	0.096	0.072	0.007	0.011	0.198	0.011
真菌硝化	0.719	0.000	0.001	0.000	0.532	0.315	0.507	0.395	0.160	0.182	0.769	0.111
细菌硝化	0.647	0.002	0.003	0.000	0.540	0.336	0.468	0.425	0.127	0.033	0.708	0.176

1) 黑体数据为显著相关(P<0.05); 氮转化速率与土壤钾钙钠镁的含量、土壤质地无显著相关, 故分析结果没放在表内

3 讨论

3.1 喀斯特地区土壤氮转化的特征

喀斯特钙质土壤的无机氮主要以硝态氮形式存在,而铵态氮所占比例很低(表2)。该结果与其他钙质土壤地区的研究一致^[22],而与酸性土壤的研究相反:一般酸性土壤中的无机氮以铵态氮为主^[23]。偏碱性的钙质土壤硝态氮含量高的原因可能是较高的硝化速率导致的^[24]。一般认为,硝化作用在 $\text{pH} < 5$ 的时候很低,而随着土壤 pH 值的升高(从4升至8)硝化作用不断增加^[25]。以此相符,本研究中喀斯特钙质土壤的硝化速率很高,相反地,氨化速率非常低,甚至在次生林中表现出负值。较高的硝化速率使得氨化产生的铵态氮很快被消耗。当总硝化速率超过了总氨化速率时,净氨化速率则会表现为负值。

研究发现在添加了真菌或细菌抑制剂后,无论是真菌还是细菌氨化都比总的净氨化速率高。这和一般的认知相反。一般地添加抑制剂后,氨化速率都会下降。比如,Trap等^[16]的研究发现,在添加抑制剂后,真菌氨化和细菌氨化均比净氨化速率低。导致本研究中真菌氨化和细菌氨化均高于对照的净氨化速率的原因还不清楚。推测可能是由于添加生物抑菌剂在杀死硝化细菌的同时也杀死了氨化细菌。由于喀斯特地区的硝化速率较高,相同比例的硝化细菌被杀死后,可能导致硝化速率下降,使得铵态氮累积,最终表现为净氨化速率的上升。本研究确实发现添加真菌和细菌抑制剂后铵态氮增加了,但硝化速率和硝态氮浓度均下降(表2),这个结果支持了上述的解释。

本研究还发现自养硝化相比异养硝化占更重要的地位。这和目前的认知是一致的。自养硝化细菌在低 pH 的环境中含量很低,所以一般认为在酸性土壤中自养硝化很弱,相反地,在中性或碱性土壤(pH 为7~8),自养硝化速率达到最高^[4]。此外,在喀斯特生态系统中细菌和真菌对硝化的贡献均较高,分别占41%和59%。之前的研究结果表明,喀斯特地区土壤的细菌约占总微生物量的11.3%~63.6%^[26],略低于真菌的比例。这部分支持了以上的结果。然而,进一步的研究有待揭示起作用的真菌与细菌的具体种类及其作用机制。

3.2 植被恢复对喀斯特土壤氮素转化速率的影响

随着植被恢复,土壤净氮矿化速率(包括其子通路)和净硝化速率(包括其子通路)从农田到森林

不断增加,而净氨化作用(包括其子通路)不断下降。氮矿化速率和硝化速率随着植被恢复不断上升的规律与之前的研究一致。比如,刘欣等的研究发现^[27],随着植被的正向演替(草丛→灌丛→次生林→原生林),土壤氮净矿化速率、净硝化速率均呈增加趋势。然而,其测定的净氨化速率也呈现增加的趋势,这与本研究的结果相反。目前关于喀斯特地区土壤氮素转化特征随植被恢复变化的研究较少。因此,到底氨化速率随植被恢复后如何改变还需进一步的研究。本研究推测净氨化作用下降可能是由于总硝化作用的上升幅度高过了总氨化作用,从而导致氨氮的生成赶不上其消耗,最终表现为净氨化作用的下降。虽然本研究并没有测定总氨化和总硝化速率,但是相关分析显示,土壤净氨化与土壤硝态氮成显著负相关关系。这个结果部分支持了上述解释。

而导致净氮矿化和硝化速率上升的原因可能有两个。第一个原因与土壤碳氮水平有关。一般认为土壤中的有机碳和氮的增加会导致总氮矿化或者硝化的作用增加,因为其增加了微生物的能量和底物来源^[27]。本研究中土壤有机碳,有机碳与净矿化硝化有显著的正相关关系,说明土壤有机碳、氮含量的增加确实对土壤净矿化消化速率的上升有显著贡献。与本研究的结果一致,刘欣等^[27]及周练川等^[28]也发现相似的结果。第二,微生物量及酶活性也是导致土壤氮矿化和硝化速率上升的关键因素。微生物是土壤生物化学循环的主要驱动者^[29],因此土壤微生物量的大小直接决定了土壤氮素转化的速率。本研究发现土壤氮矿化和硝化速率与土壤微生物量C有显著的正相关关系,支持了上述观点。同时,土壤有机氮的释放是在一系列氮获取酶的催化下进行的^[20]。这些酶对土壤有机氮的降解被认为是土壤氮循环的主要限速步骤^[20]。通过测定与土壤有机氮分解相关的酶的活性(包括BG、CBH、LAP、NAG、Urease),发现这些酶的活性均与土壤氮转化速率有极强的相关性,尤其是蛋白质水解酶(LAP酶)相关性最高(表3),说明蛋白质的降解可能是土壤氮矿化的最重要的限速步骤。

4 结论

(1)喀斯特区土壤硝化作用强烈,导致土壤无机氮主要以硝态氮为主。

(2)喀斯特土壤硝化作用主要以自养硝化为主,真菌和细菌均对土壤硝化有重要贡献。

(3)随着植被恢复,土壤净氮矿化速率(包括其子通路)和净硝化速率(包括其子通路)从农田到森林不断增加,而净氨化作用(包括其子通路)不断下降。

参考文献:

- [1] LeBauer D S, Treseder K K. Nitrogen limitation of net primary productivity in terrestrial ecosystems is globally distributed[J]. *Ecology*, 2008, **89**(2): 371-379.
- [2] Reich P B, Hungate B A, Luo Y Q. Carbon-nitrogen interactions in terrestrial ecosystems in response to rising atmospheric carbon dioxide[J]. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 2006, **37**: 611-636.
- [3] Ryther J H, Dunstan W M. Nitrogen, phosphorus, and eutrophication in the coastal marine environment[J]. *Science*, 1971, **171**(3975): 1008-1013.
- [4] Fabian P. Photochemischer smog und seine einwirkung auf die biosphäre[J]. *Forstwissenschaftliches Centralblatt*, 1987, **106**(1): 223-235.
- [5] 方运霆, 莫江明, Gundersen P, 等. 森林土壤氮素转换及其对氮沉降的响应[J]. *生态学报*, 2004, **24**(7): 1523-1531.
Fang Y T, Mo J M, Gundersen P, *et al.* Nitrogen transformations in forest soils and its responses to atmospheric nitrogen deposition: a review[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, **24**(7): 1523-1531.
- [6] Hayatsu M, Tago K, Saito M. Various players in the nitrogen cycle: diversity and functions of the microorganisms involved in nitrification and denitrification[J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2008, **54**(1): 33-45.
- [7] De Boer W, Kowalchuk G A. Nitrification in acid soils: microorganisms and mechanisms[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2001, **33**(7-8): 853-866.
- [8] Brierley E D R, Wood M. Heterotrophic nitrification in an acid forest soil: isolation and characterisation of a nitrifying bacterium[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2001, **33**(10): 1403-1409.
- [9] Booth M S, Stark J M, Rastetter E. Controls on nitrogen cycling in terrestrial ecosystems: a synthetic analysis of literature data[J]. *Ecological Monographs*, 2005, **75**(2): 139-157.
- [10] Barnes R T, Raymond P A. Land-use controls on sources and processing of nitrate in small watersheds: insights from dual isotopic analysis[J]. *Ecological Applications*, 2010, **20**(7): 1961-1978.
- [11] Li M, Zhou X H, Zhang Q F, *et al.* Consequences of afforestation for soil nitrogen dynamics in central China[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2014, **183**: 40-46.
- [12] Yang Y H, Luo Y Q, Finzi A C. Carbon and nitrogen dynamics during forest stand development: a global synthesis[J]. *New Phytologist*, 2011, **190**(4): 977-989.
- [13] 彭晚霞, 王克林, 宋同清, 等. 喀斯特脆弱生态系统复合退化控制与重建模式[J]. *生态学报*, 2008, **28**(2): 811-820.
Peng W X, Wang K L, Song T Q, *et al.* Controlling and restoration models of complex degradation of vulnerable Karst ecosystem[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, **28**(2): 811-820.
- [14] Wen L, Li D J, Yang L Q, *et al.* Rapid recuperation of soil nitrogen following agricultural abandonment in a karst area, southwest China[J]. *Biogeochemistry*, 2016, **129**(3): 341-354.
- [15] Zhang W, Zhao J, Pan F J, *et al.* Changes in nitrogen and phosphorus limitation during secondary succession in a karst region in southwest China[J]. *Plant and Soil*, 2015, **391**(1-2): 77-91.
- [16] Trap J, Bureau F, Akpa-Vinceslas M, *et al.* Changes in humus forms and soil N pathways along a 130-year-old pure beech forest chronosequence[J]. *Annals of Forest Science*, 2011, **68**(3): 595-606.
- [17] Trap J, Bureau F, Vincelas-Akpa M, *et al.* Changes in soil N mineralization and nitrification pathways along a mixed forest chronosequence[J]. *Forest Ecology and Management*, 2009, **258**(7): 1284-1292.
- [18] 刘光崧, 蒋能慧, 张连第, 等. 土壤理化分析与剖面描述[M]. 北京: 中国标准出版社, 1996. 137-183.
Liu G S, Jiang N H, Zhang L D, *et al.* Soil physical and chemical analysis & description of soil profiles[M]. Beijing: Standards Press of China, 1996. 137-183.
- [19] Chen H, Luo P, Wen L, *et al.* Determinants of soil extracellular enzyme activity in a karst region, southwest China[J]. *European Journal of Soil Biology*, 2017, **80**: 69-76.
- [20] Chen H, Li D J, Zhao J, *et al.* Effects of nitrogen addition on activities of soil nitrogen acquisition enzymes: a meta-analysis[J]. *Agriculture, Ecosystem & Environment*, 2018, **252**: 126-131.
- [21] 刘璐, 陈浩, 李德军, 等. 喀斯特山区植被恢复过程中土壤水解酶和氧化酶活性的响应[J]. *环境科学学报*, 2017, **37**(9): 3528-3534.
Liu L, Chen H, Li D J, *et al.* Changes of soil hydrolytic and oxidized enzyme activities under the process of vegetation restoration in a karst area, southwest China[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2017, **37**(9): 3528-3534.
- [22] Zhu T B, Zeng S M, Qin H L, *et al.* Low nitrate retention capacity in calcareous soil under woodland in the karst region of southwestern China[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2016, **97**: 99-101.
- [23] Chen H, Gurmessa G A, Zhang W, *et al.* Nitrogen saturation in humid tropical forests after 6 years of nitrogen and phosphorus addition: hypothesis testing[J]. *Functional Ecology*, 2016, **30**(2): 305-313.
- [24] Sibbald I R, Bowland J P, Robblee A R, *et al.* The influence of the nitrogen source on the food intake and nitrogen retention of weanling rats[J]. *The Journal of Nutrition*, 1957, **62**(2): 185-200.
- [25] McGrath S P, Rorison I H. The influence of nitrogen source on the tolerance of *Holcus lanatus* L. * and *Bromus erectus* huds. to manganese[J]. *New Phytologist*, 1982, **91**(3): 443-452.
- [26] 宋敏, 邹冬生, 杜虎, 等. 不同土地利用方式下喀斯特峰丛洼地土壤微生物群落特征[J]. *应用生态学报*, 2013, **24**(9): 2471-2478.
Song M, Zou D S, Du H, *et al.* Characteristics of soil microbial populations in depressions between karst hills under different land use patterns[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2013, **24**(9): 2471-2478.
- [27] 刘欣, 黄运湘, 袁红, 等. 植被类型与坡位对喀斯特土壤氮转化速率的影响[J]. *生态学报*, 2016, **36**(9): 2578-2587.

- Liu X, Huang Y X, Yuan H, *et al.* Effects of vegetation type and slope position on soil nitrogen transformation rate in Karst regions[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, **36**(9): 2578-2587.
- [28] 周炼川, 陈效民, 李孝良, 等. 西南喀斯特地区典型石漠化阶段土壤氮素变异研究[J]. *农业环境科学学报*, 2009, **28**(8): 1753-1757.
- Zhou L C, Chen X M, Li X L, *et al.* Variability of soil nitrogen in karst regions under typical rocky desertification stage, southwest China [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, **28**(8): 1753-1757.
- [29] Cusack D F, Silver W L, Torn M S, *et al.* Changes in microbial community characteristics and soil organic matter with nitrogen additions in two tropical forests [J]. *Ecology*, 2011, **92**(3): 621-632.

《环境科学》连续 6 次荣获 “中国最具国际影响力学术期刊”称号

2017 年 11 月 22 日,中国学术期刊(光盘版)电子杂志社(CNKI)等机构发布“2017 中国最具国际影响力学术期刊”评选结果.《环境科学》荣获“2017 中国最具国际影响力学术期刊”称号,是唯一入选的环境科学与资源科学类中文期刊,也是自首次评选以来连续 6 次获此殊荣. 评选以期刊国际影响力指数进行排序,遴选出排名前 5% (Top5%) 的期刊获评“中国最具国际影响力学术期刊”.

环境科学

CONTENTS

Diurnal Variation of SOA Formation Potential from Ambient Air at an Urban Site in Beijing	LIU Jun, CHU Bi-wu, HE Hong (2505)
Characteristics of Key Size Spectrum of PM _{2.5} Affecting Winter Haze Pollution in Taiyuan	YANG Su-ying, YU Xin-yang, ZHAO Xiu-yong, <i>et al.</i> (2512)
Characteristics and Source Apportionment of Water-soluble Ions in PM _{2.5} During Winter in Panjin	ZHANG Lei, JI Ya-qin, WANG Shi-bao, <i>et al.</i> (2521)
Characteristics and Source Apportionment of Volatile Organic Compounds in the Rainy Season of Guangzhou City	GU Ying-gang, YU Xiao-fang, YANG Wen-da, <i>et al.</i> (2528)
Emission Characteristics of Dehydrated Sugar and Acephenanthrylene in Particles from Tropical Forest Burning	JIN Cheng-miao, CUI Min, HAN Yong, <i>et al.</i> (2538)
Construction and Application of Vertical Diffusion Index for Analyzing Weather During Pollution Events in Tianjin	CAI Zi-ying, HAN Su-qin, ZHANG Min, <i>et al.</i> (2548)
Comparison Between Atmospheric Wet-only and Bulk Nitrogen Depositions at Two Sites in Subtropical China	ZHU Xiao, WANG Jie-fei, SHEN Jian-lin, <i>et al.</i> (2557)
Emission Reduction Benefits When Eliminating Yellow-label Vehicles in the Jing-jin-ji Region	LU Ya-ling, ZHOU Jia, CHENG Xi, <i>et al.</i> (2566)
Health Assessment of the Stream Ecosystem in the North Canal River Basin, Beijing, China	GU Xiao-yun, XU Zong-xue, LIU Lin-fei, <i>et al.</i> (2576)
Pollution Characteristics and Source Identification of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Phthalic Acid Esters During High Water Level Periods in the Wuhan Section of the Yangtze River, China	DONG Lei, TANG Xian-qiang, LIN Li, <i>et al.</i> (2588)
Characteristics of Antibiotic Resistance Genes in Downstream Areas of the Aojiang River, Fujian Province	ZHANG Dan-dan, GUO Ya-ping, REN Hong-yun, <i>et al.</i> (2600)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metals in the Sediments of the Estuary of the Tributaries in the Three Gorges Reservoir, SW China	FANG Zhi-qing, CHEN Qiu-yu, YIN De-liang, <i>et al.</i> (2607)
Assessment of Physico-chemical Properties and Phosphorus Fraction Distribution Characteristics in Sediments after Impounding of the Three Gorges Reservoir to 175 m	PAN Chan-juan, LI Rui, TANG Xian-qiang, <i>et al.</i> (2615)
Source of Nitrate in Surface Water and Shallow Groundwater Around Baiyangdian Lake Area Based on Hydrochemical and Stable Isotopes	KONG Xiao-le, WANG Shi-qin, DING fei, <i>et al.</i> (2624)
Thermal Stratification and Its Impacts on Water Quality in Shahe Reservoir, Liyang, China	SUN Xiang, ZHU Guang-wei, DA Wen-yi, <i>et al.</i> (2632)
Spatial and Temporal Variation Characteristics of Drip Water Hydrogeochemistry in the Xueyu Cave of Chongqing and Its Implications for Environmental Research	ZENG Ze, JIANG Yong-jun, LÜ Xian-fu, <i>et al.</i> (2641)
Distinguishing the Compositions and Sources of the Chromophoric Dissolved Organic Matter in a Typical Karst River During the Dry Season; A Case Study in Bitan River, Jinfo Mountain	LIU Yue, HE Qiu-fang, LIU Ning-kun, <i>et al.</i> (2651)
Environmental Significance of the Stable Isotopes in Precipitation at Different Altitudes in the Tuolai River Basin	LI Yong-ge, LI Zong-xing, GAO Hao-yang, FENG Qi, <i>et al.</i> (2661)
Spatial-Temporal Variations of CO ₂ and CH ₄ Flux Through a Water-air Interface Under the Effect of Primary Productivity in Wulixia Reservoir	PENG Wen-jie, LI Qiang, SONG Ang, <i>et al.</i> (2673)
Spatiotemporal Succession Characteristics of Algal Functional Groups and Its Impact Factors for a Typical Channel-Type Reservoir in a Southwest Mountainous Area	ZHANG Yao-wen, LI Hong, LI Jia, <i>et al.</i> (2680)
Seasonal Succession of Phytoplankton Functional Groups and Their Driving Factors in the Siminghu Reservoir	ZHENG Cheng, LU Kai-hong, XU Zhen, <i>et al.</i> (2688)
Effects of Nutrient Addition on the Growth and Competition of Bloom Forming Cyanobacterium <i>Chrysosporum ovalisporum</i> ; An In-situ Experiment	WANG Meng-meng, ZHANG Wei, ZHANG Jun-yi, <i>et al.</i> (2698)
Purification Effect of Submerged Macrophyte System with Different Plants Combinations and C/N Ratios	LIU Miao, CHEN Kai-ning (2706)
Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Concentration Dynamics in Natural Ditches Under an Irrigation-Drainage Unit in the Jiangnan Plain	HUA Ling-ling, ZHANG Fu-lin, ZHAI Li-mei, <i>et al.</i> (2715)
Distribution and Treatment of Antibiotics in Typical WWTPs in Small Towns in China	CHAI Yu-feng, ZHANG Yu-xiu, CHEN Mei-xue, <i>et al.</i> (2724)
Effects and Mechanism of the Combination of Ozone-PAC as a Pretreatment for the Reduction of Membrane Fouling	DONG Bing-zhi, GAO Hao-yang, HU Meng-liu (2732)
Start-up and Process Characteristics of Simultaneous ANAMMOX and Denitrification (SAD) in a Pilot-scale Anaerobic Sequencing Batch Reactor (ASBR)	YU De-shuang, TANG Jia-jia, ZHANG Jun, <i>et al.</i> (2740)
Phosphate Removal on Zirconium Alginate/Poly(<i>N</i> -isopropyl acrylamide) Hydrogel Beads with a Semi-interpenetrating Network	ZENG Xue-yang, LUO Hua-yong, ZHANG Yao-kun, <i>et al.</i> (2748)
Shortcut Nitrification Rapid Start and Stability of Corn Starch Wastewater	LONG Bei-sheng, LIU Xun-lei, LIU Hong-bo, <i>et al.</i> (2756)
Nitrifying Bacteria Culture in Entrapment Immobilization	YANG Hong, HU Yin-long (2763)
Performance of the Removal of Nitrogen During Anaerobic Ammonia Oxidation Using Different Operational Strategies	AN Fang-jiao, PENG Yong-zhen, DONG Zhi-long, <i>et al.</i> (2770)
Transformation of Protein in Sludge During High Solids Anaerobic Digestion	ZHAN Yu, SHI Wan-sheng, ZHAO Ming-xing, <i>et al.</i> (2778)
Changes in Heavy Metal Speciation and Release Behavior Before and After Sludge Composting Under a Phosphate-rich Atmosphere	LI Yu, FANG Wen, QI Guang-xia, <i>et al.</i> (2786)
Effect of Denitrification and Phosphorus Removal Microorganisms in Activated Sludge Bulking Caused by Filamentous Bacteria	GAO Chen-chen, YOU Jia, CHEN Yi, <i>et al.</i> (2794)
Microbial Population Dynamics During Domestication and Cultivation of Biofilm to Remove and Enrich Phosphate	MENG Xuan, PAN Yang, ZHANG Hao, <i>et al.</i> (2802)
Effects of Elevated Tetracycline Concentrations on Aerobic Composting of Human Feces: Composting Behavior and Microbial Community Succession	SHI Hong-lei, WANG Xiao-chang, LI Qian, <i>et al.</i> (2810)
Effect of Long-term Organic Amendments on Nitric Oxide Emissions from the Summer Maize-Winter Wheat Cropping System in Guanzhong Plain	YUAN Meng-xuan, WANG Jin-feng, TAN Yue-hui, <i>et al.</i> (2819)
Effects of Mushroom Residue Application Rates on Net Greenhouse Gas Emissions in the Purple Paddy Soil	QI Le, GAO Ming, ZHOU Peng, <i>et al.</i> (2827)
Estimation of Winter Wheat Photosynthesized Carbon Distribution and Allocation Belowground via ¹³ C Pulse-labeling	SUN Zhao-an, CHEN Qing, HAN Xiao, <i>et al.</i> (2837)
Effects of Vegetation Restoration on Soil Nitrogen Pathways in a Karst Region of Southwest China	YANG Yi, OUYANG Yun-dong, CHEN Hao, <i>et al.</i> (2845)
Identifying the Origins and Spatial Distributions of Heavy Metals in the Soils of the Jiangsu Coast	LÜ Jian-shu, HE Hua-chun (2853)
Source Identification and Spatial Distribution of Heavy Metals in Soils in Typical Areas Around the Lower Yellow River	YU Yuan-he, LÜ Jian-shu, WANG Ya-meng (2865)
Spatial Variation of Soil Heavy Metals in Lin'an City and Its Potential Risk Evaluation	ZHENG Jing-zhi, WANG Chu-dong, WANG Shi-han, <i>et al.</i> (2875)
Principal Component Analysis and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Farmland Soils around a Pb-Zn Mine in Southwestern China	ZHOU Yan, CHEN Qiang, DENG Shao-po, <i>et al.</i> (2884)
Spatial Variation of Heavy Metals in Soils and Its Ecological Risk Evaluation in a Typical <i>Carya cathayensis</i> Production Area	ZHANG Hong-ju, ZHAO Ke-li, YE Zheng-qian, <i>et al.</i> (2893)
Influence of Biochar Application on Growth and Antioxidative Responses of Macrophytes in Subsurface Flow Constructed Wetlands	HUANG Lei, CHEN Yu-cheng, ZHAO Ya-qi, <i>et al.</i> (2904)
Effect of Iron on the Release of Arsenic in Flooded Paddy Soils	WANG Xin, ZHONG Song-xiong, CHEN Zhi-liang, <i>et al.</i> (2911)
Concentrations and Health Risk Assessments of Heavy Metal Contents in Soil and Rice of Mine Contaminated Areas	TIAN Mei-ling, ZHONG Xue-mei, ZHANG Yun-xia, <i>et al.</i> (2919)
Effect of Calcium Silicate-biological Humus Fertilizer Composite on Uptake of Cd by Shallots from Contaminated Agricultural Soil	LIU De-ling, YIN Guang-cai, CHEN Zhi-liang, <i>et al.</i> (2927)
Accumulation Characteristics of Heavy Metals in Greenhouse Soil and Vegetables in Siping City, Jilin Province	LI Lian-fang, ZHU Chang-xiong, ZENG Xi-hai, <i>et al.</i> (2936)
Effect of Foliar Zinc Application on Bioaccessibility of Cadmium and Zinc in Pakchoi	WANG Lin, GU Peng-lei, LI Ran, <i>et al.</i> (2944)
Mercury Distribution of Benthonic Animals and Response to Mercury in Sediments in Caohai Wetland, Guizhou Province	XU Yi-yuan, ZENG Ling-xia, HE Tian-rong, <i>et al.</i> (2953)
Discussion of Emissions and Health Risk of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) from the Retreading Process of Waste Tires	FU Jian-ping, ZHAO Bo, LI Yu-qing, <i>et al.</i> (2963)
Spatiotemporal Dynamics of CO ₂ Emissions in Chongqing: An Empirical Analysis at the County Level	SUN Xiu-feng, SHI Kai-fang, WU Jian-ping (2971)
Impact of Size on Environmental Behavior of Metal Oxide Nanoparticles	YAN Yu-peng, TANG Ya-dong, WAN Biao, <i>et al.</i> (2982)
Fate and Toxicity of UV Filters in Marine Environments	ZHU Xiao-shan, HUANG Jing-ying, LÜ Xiao-hui, <i>et al.</i> (2991)