

ISSN 1000-0933

CN 11-2031/Q

生态学报

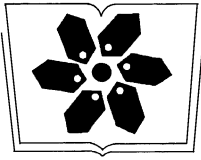
Acta Ecologica Sinica



第32卷 第5期 Vol.32 No.5 **2012**

中国生态学学会
中国科学院生态环境研究中心
科学出版社

主办
出版



中国科学院科学出版基金资助出版

生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

第 32 卷 第 5 期 2012 年 3 月 (半月刊)

目 次

淀山湖富营养化过程的统计学特征	程 曦, 李小平, 陈小华 (1355)
拟水狼蛛对食物中镉的吸收和排泄及生物学响应	张征田, 张光铎, 张虎成, 等 (1363)
接种后共培养时间对丛枝菌根喜树幼苗喜树碱含量的影响	于 洋, 于 涛, 王 洋, 等 (1370)
沙尘暴发生日数与空气湿度和植物物候的关系——以民勤荒漠区为例	常兆丰, 王耀琳, 韩福贵, 等 (1378)
西藏牦牛 mtDNA D-loop 区的遗传多样性及其遗传分化	张成福, 徐利娟, 姬秋梅, 等 (1387)
红松阔叶混交林林隙土壤水分分布格局的地统计学分析	李 猛, 段文标, 陈立新, 等 (1396)
黄土丘陵区子午岭不同植物群落下土壤氮素及相关酶活性的特征	邢肖毅, 黄懿梅, 黄海波, 等 (1403)
毛竹高速生长期土壤碳氮动态及其微生物特性	王雪芹, 张奇春, 姚槐应 (1412)
长期 N 添加对典型草原几个物种叶片性状的影响	黄菊莹, 余海龙, 袁志友, 等 (1419)
接种 AMF 对菌根植物和非菌根植物竞争的影响	张宇亭, 王文华, 申 鸿, 等 (1428)
福州大叶榕隐头果内的小蜂群落结构与多样性	吴文珊, 陈友铃, 蔡美满, 等 (1436)
不同生境朝鲜淫羊藿生长与光合特征	张永刚, 韩 梅, 韩忠明, 等 (1442)
基于日均温度的华山松径向生长敏感温度研究	封晓辉, 程瑞梅, 肖文发, 等 (1450)
长江三峡库区蝶类群落的等级多样性指数	马 琦, 李爱民, 邓合黎 (1458)
甜瓜幼苗叶片光合变化特性	韩瑞锋, 李建明, 胡晓辉, 等 (1471)
双季稻田种植不同冬季作物对甲烷和氧化亚氮排放的影响	唐海明, 肖小平, 帅细强, 等 (1481)
古尔班通古特沙漠西部地下水位和水质变化对植被的影响	曾晓玲, 刘 彤, 张卫宾, 等 (1490)
流溪河水库颗粒有机物及浮游动物碳、氮稳定同位素特征	宁加佳, 刘 辉, 古滨河, 等 (1502)
采用本土蔬菜种子替代水藓评价污泥有机腐熟度	刘颂颂, 许田芬, 吴启堂, 等 (1510)
人为营养物质输入对汉丰湖不同营养级生物的影响——稳定 C、N 同位素分析	李 斌, 王志坚, 金 丽, 等 (1519)
流沙湾海草床海域浮游植物的时空分布及其影响因素	张才学, 陈慧妍, 孙省利, 等 (1527)
福寿螺的过冷却研究	赵本良, 章家恩, 罗明珠, 等 (1538)
水稻生育期对褐飞虱和白背飞虱卵巢发育及起飞行为的影响	陈 宇, 傅 强, 赖凤香, 等 (1546)
绿盲蝽越冬卵的耐寒能力	卓德干, 李照会, 门兴元, 等 (1553)
陆桥岛屿环境下社鼠种群数量的估算方法	张 旭, 鲍毅新, 刘 军, 等 (1562)
北京市居民食物消费碳足迹	吴 燕, 王效科, 逯 非 (1570)
社会经济系统磷物质流分析——以安徽省含山县为例	傅银银, 袁增伟, 武慧君, 等 (1578)
内陆河流域试验拍卖水权定价影响因素——以黑河流域甘州区为例	邓晓红, 徐中民 (1587)
专论与综述	
台风对森林的影响	刘 斌, 潘 澜, 薛 立 (1596)
海洋酸化对珊瑚礁生态系统的影响研究进展	张成龙, 黄 晖, 黄良民, 等 (1606)
三种外来入侵斑潜蝇种间竞争研究进展	相君成, 雷仲仁, 王海鸿, 等 (1616)
沉积物生源要素对水体生态环境变化的指示意义	于 宇, 宋金明, 李学刚, 等 (1623)
异化 Fe(III) 还原微生物研究进展	黎慧娟, 彭静静 (1633)
问题讨论	
锡林郭勒盟生态脆弱性	徐广才, 康慕谊, Marc Metzger, 等 (1643)
研究简报	
哥斯达黎加外海夏季表层浮游动物种类组成及分布	刘必林, 陈新军, 贾 涛, 等 (1654)



封面图说: 气候变暖下的北极冰盖——自从 1978 年人类对北极冰盖进行遥感监测以来, 北极冰正以平均每年 8.5% 的速度持续缩小, 每年 1500 亿吨的速度在融化。这使科学家相信, 冰盖缩小的根本原因是全球变暖。北极的冰盖消失, 让更大面积的深色海水暴露出来, 使海水吸收更多太阳热辐射反过来又加剧冰盖融化。由于北极冰的加速融化, 北冰洋的通航已经成为 21 世纪初全球最重要的自然地理事件和生态事件。从这张航片可以看到北极冰缘正在消融、开裂崩塌的现状。

彩图提供: 陈建伟教授 北京林业大学 E-mail: cites.chenjw@163.com

DOI: 10.5846/stxb201101090035

邢肖毅, 黄懿梅, 黄海波, 安韶山, 刘栋. 黄土丘陵区子午岭不同植物群落下土壤氮素及相关酶活性的特征. 生态学报, 2012, 32(5): 1403-1411.
Xing X Y, Huang Y M, Huang H B, An S S, Liu D. Soil nitrogen and enzymes involved in nitrogen metabolism under different vegetation in Ziwuling mountain in the Loess Plateau, China. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(5): 1403-1411.

黄土丘陵区子午岭不同植物群落下土壤氮素 及相关酶活性的特征

邢肖毅¹, 黄懿梅^{1,*}, 黄海波¹, 安韶山², 刘 栋¹

(1. 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;

2. 西北农林科技大学 水土保持研究所, 杨凌 712100)

摘要:以黄土丘陵区子午岭林区裸露地为对照, 选择撂荒地、白羊草草地、油松、山杨和辽东栎林地五种典型植被群落下 0—10 cm 和 10—20 cm 土层的土壤为研究对象, 对土壤无机氮、有机氮、微生物量氮含量和脲酶、蛋白酶以及硝酸还原酶的活性进行了研究。结果表明, 土壤中各种氮素基本表现为乔木林, 尤其是辽东栎和油松下含量最高, 而有机氮则在白羊草地富集明显。铵态氮为子午岭林区速效氮的主要形式。土壤铵态氮与微生物氮极显著正相关; 有机氮和亚硝态氮、矿化氮、微生物氮均显著正相关。脲酶和硝酸还原酶活性在辽东栎群落下最高, 蛋白酶在白羊草地下较高, 且脲酶活性在土壤上层高于下层, 而蛋白酶和硝酸还原酶并没有表现出明显规律。脲酶活性和铵态氮、有机氮含量显著正相关, 与微生物量氮极显著正相关; 硝酸还原酶活性与铵态氮含量显著正相关; 蛋白酶活性和土壤各种氮素含量无相关性。

关键词:植物群落; 氮素形态; 酶活性; 子午岭

Soil nitrogen and enzymes involved in nitrogen metabolism under different vegetation in Ziwuling mountain in the Loess Plateau, China

XING Xiaoyi¹, HUANG Yimei^{1,*}, HUANG Haibo¹, AN Shaoshan², LIU Dong¹

1 Key Laboratory of Plant Nutrition and the Agri-environment in Northwest China, Ministry of Agriculture, College of Resource and Environmental Science, Northwest Agriculture and Forestry University, Yanglin 712100, China

2 Institute of Soil and Water Conservation, Northwest Agriculture and Forestry University, Yanglin 712100, China

Abstract: The Loess Plateau is an important site for many ecological restoration studies in China. Different vegetation types change the soil environment to different extents, influencing the biogeochemical cycles of materials, such as nitrogen. Recently, a growing amount of attention has been paid to the relationship between vegetation and nitrogen forms in natural ecological systems to provide a theoretical basis for ecological restoration in these areas. Determining the relationship between soil enzymes and soil nitrogen forms under different vegetation types can provide useful information for vegetation restoration in the Loess Plateau. To investigate the transformation of soil nitrogen and its relationships with enzymes involved in nitrogen metabolism under different vegetation in the Loess Plateau, we collected 0—10 cm and 10—20 cm soil profiles under four typical vegetation types (*Bothriochloa ischaemun* (L.) Keng, *Populus davidiana* Dode, *Quercus liaotungensis* and *Pinus tabulaeformis* Carr), and from abandoned land, one of the main land use types, in the Ziwuling region. Bare fallow land, where little vegetation grows, was chosen as the control. Ziwuling (107°30'—109°40' E, 33°50'—36°50'

基金项目:国家自然科学基金项目(41030532, 41101254); 西北农林科技大学“青年学术骨干支持计划”项目

收稿日期: 2011-01-09; 修订日期: 2011-11-28

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: ymhuang1971@nwsuaf.edu.cn

N), is situated at 1300—1700 m above the sea, in the transitional zone between forest steppe and semiarid grasslands. The climate is mild and humid. Soil basic physicochemical properties, different nitrogen form contents, urease activity, protease activity and nitric acid reductase activity were measured. The results indicated that all forms of nitrogen were greater under forest vegetation compared with control, especially, under *Q. liaotungensis* and *P. tabulaeformis*; while organic N was markedly increased under *B. ischaemun*, reaching 2.18 g/kg in the topsoil and 1.52 g/kg in the subsoil. Ammonium N was the dominant inorganic N in the study area. Ammonium N content correlated with microbial biomass N, while organic N content correlated with nitrous N, mineralizable N and microbial biomass N. Vegetation type and soil layer did not influence urease activity, protease activity and nitric acid reductase activity. Urease activity correlated with ammonium N ($r=0.66$) and organic N ($r=0.69$), and significantly correlated with microbial biomass N ($r=0.75$). Protease activity did not affect any form of nitrogen content. Nitric acid reductase activity correlated with ammonium N. Urease activity was highest under *Q. liaotungensis*, and it was higher in topsoil than in subsoil. By contrast, protease activity and nitric acid reductase activity did not show any significant differences among vegetation types or soil layers. These findings suggest that forest vegetation increases soil nitrogen content. Thus, this role of forest vegetation should be considered during ecological restoration projects in the Loess Plateau region. In addition, enzymes play an important role in the nitrogen transformation process. Further research is still required to explore the processes of vegetation change and nitrogen transformation and the relationship between enzymes and nitrogen forms.

Key Words: vegetation community; soil nitrogen; enzyme activity involved nitrogen metabolisms; Ziwuling

氮是大气圈中含量最丰富的元素,也是各种植物生长和发育所需的大量营养元素,是调节陆地生态系统生产量、结构和功能的关键元素,能够限制群落初级和次级生产力,在全球碳氮循环中至关重要^[1]。同时,土壤氮是最易耗竭和限制植物生长的营养元素之一,因此,植被与土壤氮素的关系也愈来愈受到研究者的重视^[2]。在土壤氮素循环研究的最初阶段,氮素作为土壤肥力指标,在农田生态系统中的特性备受关注,直到20世纪70年代后期,森林、草地和湿地等自然、半自然生态系统的氮素转化才受到关注。Rutigliano 等对地中海的植被与氮素关系的研究表明,土壤总氮和矿质氮与植被类型无显著关系^[3]。Kristensen 等在丹麦的研究发现,石南向栎树的演替过程中,矿质氮库显著增大,净矿化速率明显提高^[4]。刘爽等发现我国东北地区温带森林林型之间微生物量氮差异显著^[5]。在氮转化的每一阶段,均有专性的酶类参与,土壤酶直接参与土壤中营养元素的有效化过程^[6]。薛立等发现,脲酶活性与土壤的微生物数量、有机质、全氮和速效氮含量正相关,可用来表征土壤中有机态氮的转化状况^[7];Watanabe K 等认为蛋白酶可作为氮矿化的一种指示剂,是土壤中氮矿化过程的限速酶^[8]。岳忠辉等发现,速效氮对硝酸还原酶活性的影响极为显著^[9]。然而,黄土丘陵区实施退耕还林还草以后,不同的植被群落对土壤氮素影响如何以及相关酶活性与氮素的转化关系及其指示作用怎样,这些问题并不清楚。为此,本研究选择黄土丘陵区典型区域的不同植物群落下的土壤氮素、相关酶活性为研究对象,探讨二者随植被变化的分布特征及相关关系,以期丰富人们对陆地生态系统土壤氮素循环的认识,为区域植被恢复重建提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 野外土壤样品采集

1.1.1 研究区域概况

子午岭地跨陕西、甘肃两省,处于黄土高原的腹地。子午岭林区是黄土高原目前保存较好的一块天然植被区,是黄土高原中部地带重要的次生原始森林^[10]。子午岭地理坐标为 107°30′—109°40′ E, 33°50′—36°50′ N。地势南高北低,自西向东北倾斜,海拔为 1300—1700 m,相对高差 400 m。该区处于森林草原和半干旱草原的过渡区,气候温和湿润,其北小半部属陇中北部温带半干旱气候,南大半部属陇中南部温带半湿润气候,年平均气温为 7.4—8.5 °C,极端最低温度为 -27.7 °C,极端最高气温为 36.7 °C,年降水量 500—620 mm,年

平均相对湿度 63%—68%,地带性土壤以石灰性灰褐土为主。

1.1.2 供试土壤采集点植被情况

供试土壤取自于子午岭土壤侵蚀与生态环境观测站附近,采样点分布于裸露地(简化为 BG),撂荒地(Abandoned land)(简化为 AL)和另外 4 种典型植被群落,分别为白羊草地(*Bothriochloa ischaemun* (L.) Keng)(简化为 BIK)、山杨(*Populus dividiana* Dode)(简化为 PDD)、辽东栎(*Quercus liaotungensis*)(简化为 QL)、油松(*P. tabulaeformis* Carr)(简化为 PTC)。裸露地是观测站自 1993 年来,人为翻耕除去地表植被的土地。植被群落基本情况如表 1 所示。

表 1 采样点植被基本情况

Table 1 Living habits of the six vegetations

植被类型 Vegetation types	生活习性 Living habits
撂荒地(AL) Abandoned land	经耕种,肥力下降,荒废的土地称为撂荒地;撂荒地的撂荒年限为 10a,其上有植被生长,但没有形成明显的优势种群
裸露地(BG) Bare ground	按照土地利用现状分类 GB/T 21010—2007,裸露地指表层为土质,基本无植被覆盖的土地;或表层为岩石、石砾,其覆盖面积 $\geq 70\%$ 的土地
白羊草地(BIK) <i>Bothriochloa ischaemun</i> (L.) Keng	白羊草属于丛生多年生暖季型植物,其秆丛生,根系发达。对旱生境具有较强的生态适应性,固水保水能力强,以白羊草为建群种组成的群落黄土丘陵沟壑区形成了一种较稳定的地带性植被 ^[11]
山杨(PDD) <i>Populus dividiana</i> Dode	山杨,杨柳科,落叶乔木,成年植株高度可达 25m 最喜光,生长快,25—30a 可培育成大、中径材;耐寒性强,耐干旱瘠薄,根系发达,抗风力强
辽东栎(QL) <i>Quercus liaotungensis</i>	辽东栎,多年生落叶乔木。高 10—20m,属阳性树种,是我国暖温带落叶阔叶林地带的优势乔木树种之一,在子午岭林区常与山杨、白桦混交生长 ^[12]
油松(PTC) <i>P. tabulaeformis</i> Carr	油松,乔木,树为阳性树种,深根性,8 月份,凋落物的量少,但含有的 N、P、K 丰富;油松林是子午岭林区主要的森林类型

1.1.3 样品采集方法

供试土壤样品采集于 2008 年 8 月,在每一个植被群落内选择有代表性的 3 个 10 m×10 m 样方,每个样方内以 S 形选取 5 个点,用土钻按 0—10 cm 和 10—20 cm 分层采集土壤样品,将采集的土样混合,密封后带回实验室内,仔细除去其中可见植物残体及土壤动物,一部分风干,一部分-10℃冷冻保存。

1.2 分析项目及测定方法

土壤有机质采用重铬酸钾-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,减去铵态氮后所得;土壤铵态氮、硝态氮和亚硝态氮采用新鲜土样用 1 mol/L KCl 浸提,流动分析仪测定;矿化氮采用好气培养法培养 2 周^[13],流动分析仪测定;土壤微生物氮采用氯仿熏蒸 K_2SO_4 提取-茚三酮比色法^[14]。脲酶活性采用尿素苯酚钠比色法^[15];蛋白酶采用关松荫茚三酮法^[15],硝酸还原酶采用 2,4-DNP 法^[16]。

1.3 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。

2 结果和分析

2.1 不同植被群落下土壤基本理化性质特征

不同植被群落下土壤的基本理化性质见表 2。研究区域土壤呈弱碱性,土壤 pH 值在 0—10 cm 土层为撂荒地最高,白羊草地最低;在 10—20 cm 土层,各植被间变化量不大。土壤下层 pH 值高于上层。辽东栎下土壤的电导率在两个层次都显著高于其它植被,白羊草地下的值相对较小。4 种植被群落土壤中的有机质都显著高于裸露地,其中,油松土壤中的有机质含量显著高于其他植被群落;白羊草地土壤中显著低于 3 种乔木。土壤 C/N 表现为:裸露地最高,其他植被群落土壤均有不同程度的降低,白羊草降低最为显著。

2.2 不同植被群落下土壤无机氮含量特征

不同植被群落下土壤硝态氮、铵态氮和亚硝态氮在两个土层的含量见表 3。硝态氮含量在 0—10 cm 土

层为 2.72—7.74 mg/kg, 且含量由高到低依次为: 撂荒地 > 山杨 > 辽东栎 > 油松 > 裸露地 > 白羊草地。10—20 cm 土层中的硝态氮含量为 1.96—5.83 mg/kg, 撂荒地中含量最高, 高于裸露地, 除辽东栎外, 其余 3 种植被下土壤中硝态氮的含量都显著低于裸露地, 山杨最低。除白羊草地外, 土壤硝态氮含量在土样上层均显著高于下层。

表 2 土壤基本理化性质

Table 2 Soil basic physicochemical characteristics under different vegetation types

植被群落 Vegetation types	土壤 pH Soil pH		电导率/($\mu\text{s}/\text{cm}$) Electrical conductivity		有机质/(g/kg) Organic matter		土壤 C/N Soil C/N	
	0—10 cm	10—20 cm	0—10 cm	10—20 cm	0—10 cm	10—20 cm	0—10 cm	10—20 cm
裸露地	8.56 ± 0.00bc	8.67 ± 0.00a	127 ± 0c	122 ± 0c	26.5 ± 0.3d	23.6 ± 1.0c	25.2 ± 1.3a	31.8 ± 2.1a
撂荒地	8.64 ± 0.03a	8.62 ± 0.01bc	132 ± 4c	137 ± 4ab	34.8 ± 0.1c	26.2 ± 0.6bc	16.7 ± 0.3c	16.0 ± 0.7cd
白羊草地	8.52 ± 0.03c	8.63 ± 0.03abc	149 ± 0b	130 ± 2bc	54.3 ± 2.1b	36.8 ± 0.1ab	14.4 ± 1.0d	14.0 ± 0.1d
山杨	8.58 ± 0.00b	8.60 ± 0.00c	153 ± 0b	132 ± 0ab	55.2 ± 0.1b	40.3 ± 1.0a	15.7 ± 0.1cd	19.3 ± 0.9c
辽东栎	8.57 ± 0.00b	8.65 ± 0.01ab	165 ± 2a	140 ± 3a	53.7 ± 0.5b	42.5 ± 0.3a	16.4 ± 0.2c	18.7 ± 0.3c
油松	8.59 ± 0.01b	8.62 ± 0.02bc	156 ± 1b	135 ± 3ab	61.6 ± 1.3a	44.7 ± 4.7a	19.2 ± 0.7b	24.4 ± 4.5b

在同一列中, 相同字母表示各指标在不同植被群落下差异不显著 ($F < F_{0.05}$)

土壤铵态氮的含量在 0—10 cm 土层为 0.81—24.5 mg/kg, 与裸露地相比, 辽东栎土壤中的铵态氮含量增幅最大, 为 906%, 其次为油松、山杨、白羊草地, 增幅分别为 722%、280% 和 189%, 而撂荒地则减少了 66%。10—20 cm 土层中铵态氮的含量为 2.10—13.8 mg/kg, 含量大小依次为: 油松 > 辽东栎 > 白羊草地 > 山杨 > 裸露地 > 撂荒地。3 种乔木林上层土壤铵态氮含量显著高于下层, 其他土样则表现为下层土壤略高于上层。

0—10 cm 土层中亚硝态氮的含量为白羊草地 > 山杨 > 撂荒地 > 辽东栎 > 油松 > 裸露地。白羊草地中亚硝态氮的含量是裸露地的 19.06 倍, 油松与裸露地差异不显著。10—20 cm 土层中亚硝态氮的含量为白羊草地 > 撂荒地 > 辽东栎 > 山杨 > 油松 > 裸露地。与裸露地相比, 白羊草地和撂荒地亚硝态氮含量显著增加, 增加量分别为 631%、195%。仅山杨和油松两个土层亚硝态氮含量差异显著。

表 3 不同植被群落下土壤无机氮素含量

Table 3 Soil inorganic N contents under different vegetation types

植被群落 Vegetation types	硝态氮 Nitrate N/(mg/kg)		铵态氮 Ammonium N/(mg/kg)		亚硝态氮 Nitrous N/(mg/kg)	
	0—10 cm	10—20 cm	0—10 cm	10—20 cm	0—10 cm	10—20 cm
裸露地	4.62 ± 0.19c	3.45 ± 0.02b	2.43 ± 0.07d	2.86 ± 0.57d	0.16 ± 0.05c	0.22 ± 0.03c
撂荒地	7.74 ± 0.23a	5.83 ± 0.16a	0.81 ± 1.29d	2.10 ± 0.15d	0.69 ± 0.20bc	0.65 ± 0.06b
白羊草地	2.72 ± 0.23d	2.05 ± 0.29c	7.02 ± 1.06c	8.54 ± 0.54b	3.05 ± 0.58a	1.61 ± 0.17a
山杨	6.03 ± 0.55b	1.96 ± 0.23c	9.24 ± 0.20c	5.95 ± 0.18c	1.29 ± 0.12b	0.48 ± 0.1bc
辽东栎	5.41 ± 0.29bc	3.42 ± 0.08b	24.5 ± 1.39a	9.71 ± 0.31b	0.50 ± 0.03bc	0.51 ± 0.06bc
油松	5.07 ± 0.20bc	2.15 ± 0.06c	20.0 ± 1.22b	13.8 ± 0.01a	0.18 ± 0.02c	0.32 ± 0.02c

在同一列中, 相同字母表示各指标在不同植被群落下差异不显著 ($F < F_{0.05}$)

0—10 cm 土层的速效氮含量在 6.53—30.4 mg/kg 之间, 乔木林中含量最大, 草地次之, 裸露地最小, 且 3 种乔木增加显著。10—20 cm 土层的速效氮含量范围为 6.53—16.3 mg/kg, 且油松 > 辽东栎 > 白羊草地 > 撂荒地 > 山杨 > 裸露地。与裸露地相比, 各种植被下的速效氮含量均显著提高, 尤其是辽东栎和油松。速效氮含量仅在林地两个土层之间差异显著。硝态氮和铵态氮占速效氮的 76.1%—99.3%, 而亚硝态氮的含量极低。除撂荒地和裸露地外, 其他土样铵态氮占速效氮的比例均超过了 50%, 说明草地和乔木覆盖下土壤无机氮的形式主要为铵态氮。

2.3 不同植被群落下土壤有机氮、微生物量氮和矿化氮的特征

不同植被群落下土壤中有有机氮、矿化氮和微生物量氮的含量见表 4。0—10 cm 土层土壤有机氮含量范围

为 0.61—2.18 g/kg,草地最高,乔木林次之,裸露地最少。10—20 cm 土层的变化范围为 0.43—1.52 g/kg,同样是白羊草地>乔木林>撂荒地>裸露地,且均增幅显著。除撂荒地外,其他土壤有机氮含量为上层土壤显著高于下层。

0—10 cm 土层矿化氮的含量为 8.51—23.7 mg/kg,草地>辽东栎>油松>撂荒地>山杨>裸露地,与裸露地相比,它们的增幅分别为 179%、105%、98%、79% 和 27%。10—20 cm 土层矿化氮的含量为 5.47—21.2 mg/kg,不同植被均有所提高,其中辽东栎增幅最大,达 288%,而油松仅略有增加,并不显著。山杨和辽东栎下层土壤矿化氮高于上层,其他土壤则表现为上层显著高于下层。

0—10 cm 土层微生物氮的含量范围为 15.1—100 mg/kg。辽东栎含量最高,比裸露地高 565%,油松、山杨、撂荒地和草地的增幅分别为 441%、368%、363% 和 315%。10—20 cm 土层微生物氮的含量范围为 19.9—65.6 mg/kg,且辽东栎>油松>撂荒地>山杨>草地>裸露地。

相关性分析发现,铵态氮与微生物氮极显著正相关($r=0.72$),有机氮和矿化氮、微生物量氮显著相关,相关系数分别为 0.67 和 0.69。

表 4 不同植被群落下土壤有机氮素含量

Table 4 Soil organic N contents under different vegetation types

植被群落 Vegetation types	有机氮 Organic N/(g/kg)		矿化氮 Mineralizable N/(mg/kg)		微生物量氮 Nmic/(mg/kg)	
	0—10 cm	10—20 cm	0—10 cm	10—20 cm	0—10 cm	10—20 cm
裸露地	0.61±0.03e	0.43±0.00f	8.51±0.53c	5.47±1.25c	15.1±5.9c	13.7±9.2b
撂荒地	1.21±0.02d	0.95±0.00e	15.20±1.39b	7.88±2.80b	69.8±13.1b	27.1±8.5b
白羊草地	2.18±0.06a	1.52±0.01a	23.70±1.41a	18.70±1.39a	62.6±11.9b	17.2±13.7b
山杨	2.04±0.01ab	1.20±0.01c	10.80±8.43bc	18.70±1.17a	70.6±8.0b	19.9±2.8b
辽东栎	1.88±0.00bc	1.31±0.02b	17.40±1.08ab	21.20±1.22a	100.0±11.9a	65.6±11.4a
油松	1.84±0.00c	1.06±0.04d	16.80±3.62b	6.20±5.15c	81.5±5.5b	64.2±7.4a

在同一列中,相同字母表示各指标在不同植被群落下差异不显著($F < F_{0.05}$)

2.4 不同植被群落对土壤氮素转化相关酶活性的影响

2.4.1 不同植被群落对脲酶活性的影响

脲酶广泛存在于土壤中,它可促进尿素分解成氨、二氧化碳和水,其酶促产物氨是植物氮源之一。研究区域脲酶活性如图 1 所示。0—10 cm 土层,脲酶活性的顺序为辽东栎>白羊草地>撂荒地>油松>山杨>裸露地,与裸露地相比,增幅分别为 328%、175%、107%、92% 和 53%。10—20 cm 土层,白羊草地、油松、辽东栎、撂荒地、山杨与裸露地相比,增幅分别为 819%、665%、654%、585% 和 181%。脲酶在 0—10 cm 土层的活性显著高于 10—20 cm。

2.4.2 不同植被群落对蛋白酶活性的影响

蛋白酶参与土壤中蛋白质及其他含氮有机化合物的转化,是促进土壤氮循环的重要组分。如图 2 所示,0—10 cm 土层,撂荒地蛋白酶活性显著高于其他土样,山杨、白羊草地、辽东栎、油松与裸露地相比,略有增加。增幅分别为 221%、220%、99% 和 52%。10—20 cm 土层,土壤蛋白酶的活性为撂荒地>白羊草地>裸露地>辽东栎>山杨>油松,撂荒地、白羊草地与裸露地相比,分

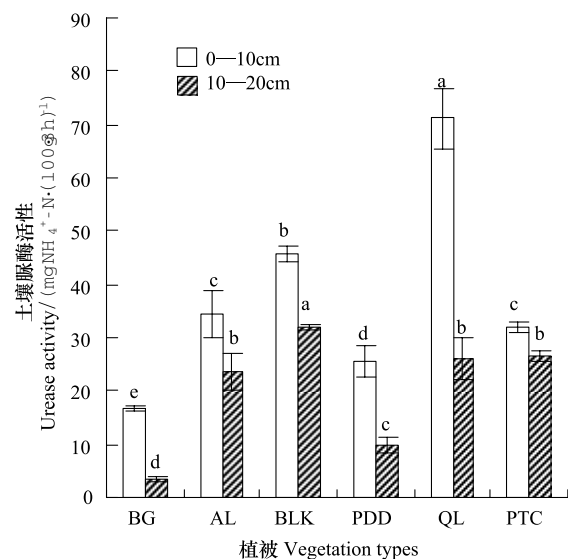


图 1 不同植被群落下土壤脲酶活性

Fig. 1 Urease activities under different vegetation types

在同一土层中,相同字母表示各指标在不同植被群落下差异不显著($F < F_{0.05}$)

别增加了 160% 和 101%，而 3 种乔木林之间变化不显著。除草地和裸露地土样蛋白酶活性下层显著高于上层，其他土样差异不显著。

2.4.3 不同植被群落对硝酸还原酶活性的影响

硝酸还原酶是反硝化过程中一种重要的酶，作为专性酶参与土壤硝态氮的进一步还原，在嫌气条件下催化硝酸转化为亚硝酸盐。如图 3 所示，0—10 cm 土层，辽东栎下土壤硝酸还原酶活性显著高于其他 5 种土样，且该 5 种土样之间无显著差异。10—20 cm 土层，山杨和辽东栎下硝酸还原酶活性显著高于其他土样。两个土层之间，土壤硝酸还原酶活性的变化规律不明显。

2.5 土壤氮素形态和相关酶活性之间的相关性分析

如表 5 所示，脲酶和铵态氮、有机氮显著相关，相关系数分别为 0.66 和 0.69，与微生物氮极显著相关，相关系数为 0.75。硝酸还原酶和铵态氮表现出了显著相关关系，相关系数为 0.60。

3 讨论

3.1 不同植被群落对土壤氮素的影响

本研究中，0—10 cm 土层的硝态氮含量在山杨样点显著高于辽东栎、油松，三者又显著高于白羊草地；而在 10—20 cm 土层中，则只有辽东栎样地显著高于其他 3 个植被样地。综合两个层次，可以看出辽东栎显著高于山杨、油松；3 种乔木又显著高于白羊草地。这与 Miriam 等人^[17]的研究结果一致，他们发现草原的硝态氮库比次生或原始热带雨林的低，认为这与氮的矿化和硝化作用通常在草原显著低于森林有关。而本研究中，尽管辽东栎和山杨的矿化氮在两个层次也较高，但白羊草地表层的矿化氮含量显著高于辽东栎、山杨和油松，所以，乔木中硝态氮含量高于草地可能与其硝化作用较强有关。而撂荒地硝态氮含量显著高于其他样点，可能与其撂荒之前作为耕地施用过多氮肥有关。3 种林地土壤硝态氮的含量在表层较裸露地显著增加，说明土壤硝态氮的含量主要来自于植物凋落物的矿化和硝化作用。下层显著低于上层，一方面是由植物凋落物的分布主要在表层所决定，另外与植物的根系在下层分布较多，使硝态氮被吸收利用而没有累积有关。

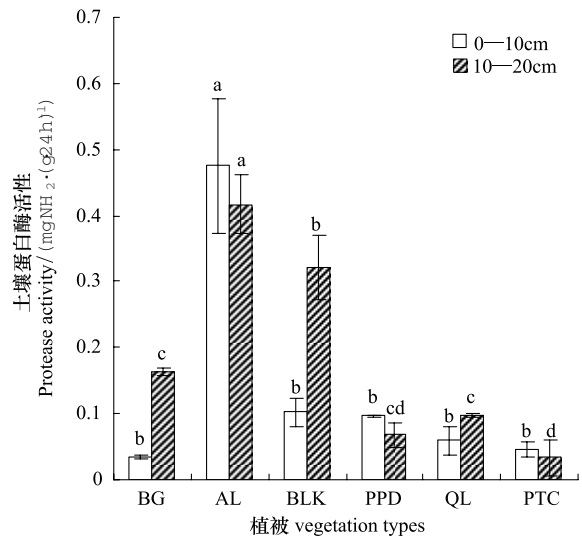


图 2 不同植被群落下土壤蛋白酶活性

Fig. 2 Protease activities under different vegetation types
在同一土层中，相同字母表示各指标在不同植被群落下差异不显著 ($F < F_{0.05}$)

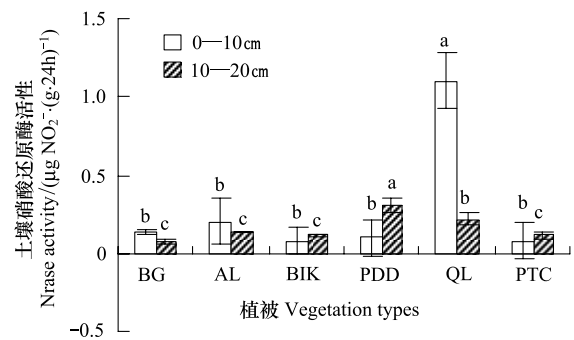


图 3 不同植被群落覆盖下土壤硝酸还原酶活性

Fig. 3 NRase activities under different vegetation types
在同一土层中，相同字母表示各指标在不同植被群落下差异不显著 ($F < F_{0.05}$)

表 5 不同植被下酶活性与土壤氮素含量的相关系数

Table 5 The correlative coefficients between soil enzyme activities and soil nitrogen under different vegetation types

相关系数 Correlative coefficients	硝态氮 Nitrate N	铵态氮 Ammonium N	亚硝态氮 Nitrous N	有机氮 Organic N	矿化氮 Mineralizable N	微生物量氮 Nmic
脲酶活性 Urease activity	0.26	0.66 *	0.34	0.69 *	0.48	0.75 **
蛋白酶活性 Protease activity	0.45	-0.52	0.13	-0.18	-0.05	-0.21
硝酸还原酶活性 NRase activity	0.18	0.60 *	-0.18	0.25	0.24	0.47

* $P < 0.05$, ** $P < 0.01$

铵态氮含量在辽东栎样地显著高于油松,二者又显著高于山杨和白羊草地,这可能与不同植物凋落物的数量及组成不同,从而具有不同的矿化(尤其是氨化)作用有关。3种林地表层土壤的铵态氮含量显著高于下层,而草地却表现为下层略高于表层,可能与草地根系的分布及土壤下层还原性较表层强有关。速效氮是土壤中能直接被植物利用的主要氮素形态,本研究中,4种典型植被(尤其是辽东栎和油松)下土壤速效氮含量均显著高于裸露地,说明这些植被的生长对于子午岭土壤速效氮的提高具有显著效果。可见,辽东栎和油松作为子午岭林区主要的乔木类型,对当地生态恢复具有重要的积极作用。

白羊草地的亚硝态氮含量相对较高,这可能是因为在其中有些土壤专性和兼性细菌利用 NO_3^- 进行醇解,把 NO_3^- 经过一系列步骤异化还原为 NH_4^+ 和 NO_2^- ^[18]。而亚硝酸盐的积累又会抑制硝化菌的活性^[19],因此其硝态氮含量相对较低。研究区土壤中无机氮主要为铵态氮,与 Maithani^[20]等在印度东北部地区的研究结果一致,原因可能有以下几个:植被对硝态氮的吸收强于铵态氮;硝态氮淋失较多;硝态氮通过土壤反硝化作用损失。

土壤有机氮可反映土壤中潜在供氮能力的大小。白羊草地的有机氮含量依次显著高于山杨、辽东栎和油松,且远远高于撂荒地和裸露地。矿化氮含量也表现出相似的趋势。微生物量氮含量则表现为辽东栎显著高于油松、山杨和白羊草地。草地有机氮和矿化氮含量最高,而微生物氮相对较低,土壤 C/N 亦比较低,这可能与草地的通气条件和含水量有关, Maithani^[20]等研究发现,氮矿化作用与土壤湿度和细菌数量显著正相关,具体原因还有待于进一步研究。有机氮、矿化氮和微生物量氮基本上表现为上层高于下层,这是因为上层土壤中凋落物量较下层丰富,有机质含量高,微生物活动强度大^[3]。

铵态氮与微生物氮表现出了极显著的正相关关系,这可能与微生物更易吸收铵态氮有关,而且微生物矿化有机氮的过程也是首先产生铵态氮。有机氮和亚硝态氮、矿化氮、微生物氮均表现出了显著正相关关系,这是因为有机氮是矿化氮的基础,是交换铵和硝态氮的源泉,高含量的有机氮为微生物的生长所需的无机氮提供了源,而大量的微生物生长又发挥出了很强的矿化作用,进一步提高了土壤中矿化氮的含量。

3.2 不同植被群落下相关酶活性与氮素分布的关系

植物-土壤-根际微生物组成的土壤微生态系统极其复杂,在相同的土壤背景下,高等植物根系分泌物的种类和数量能够影响土壤微生物区系、生理类群及酶活性^[21-22]。在本研究中,辽东栎脲酶和硝酸还原酶活性较高,白羊草地蛋白酶活性较高。大多数学者研究发现,土壤酶活性随着土层深度的增加而降低^[23]。这是因为在植物根系周围和根系及有机残体集中的土壤表层有丰富的酶释放源,随着植被根系增多,土壤动物和微生物种类和数量增多,生理活性增强,就会释放出更多的酶^[24]。本研究中,上层中的脲酶活性均显著高于下层。而蛋白酶和硝酸还原酶活性在两个土层间差异不显著,其原因还有待于进一步研究。

脲酶和铵态氮、有机氮显著相关,与微生物氮极显著相关。脲酶的作用是将尿素转化为铵,故脲酶活性大,转化的能力高,产生的铵态氮就多。焦晓光等也发现,土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量的动态变化与土壤脲酶有关,活性动态变化趋势基本一致^[25]。Eivazi 等发现脲酶活性与微生物量显著相关^[26]。Rutigliano 等发现蛋白酶活性与土壤全氮和有机碳含量正相关^[3]。蛋白酶与全氮的矿化速率逐步回归分析表明,蛋白酶可以作为氮矿化的一种指示剂^[27]。但在本研究中,蛋白酶活性与各种形态氮的含量均不相关,其原因有待研究。岳中辉等研究发现,黑土中速效氮是影响硝酸还原酶活性的最重要因素^[9]。Parron 等认为硝态氮浓度的增加刺激了反硝化过程的进行,土壤硝酸还原酶的活性增强^[28]。而本文研究发现,仅铵态氮含量与其活性相关。由于土壤酶活性的影响因素很多,因此关于酶活性与氮素的相关关系还需要进一步研究。

4 结论

乔木(尤其是辽东栎和油松)能够显著地促进土壤中各种氮素的富集,有效改善黄土丘陵区土壤氮素养分状况。白羊草能够有效地富集有机氮,增加可矿化氮。研究区域铵态氮为速效氮的主要形式。速效氮仅在林地下的两个土层中差异显著,有机氮基本表现为上层含量显著高于下层。土壤铵态氮与微生物氮极显著正相关;有机氮和亚硝态氮、矿化氮、微生物氮均显著正相关。

脲酶和硝酸还原酶活性在辽东栎群落下最高,蛋白酶在白羊草地下较高,且脲酶活性上层土壤高于下层,

而蛋白酶和硝酸还原酶并没有表现出明显规律。脲酶活性与铵态氮、有机氮显著相关,与微生物氮极显著相关;硝酸还原酶活性与铵态氮显著相关。可以看出,脲酶活性能更好地反映土壤氮素的变化状况,而蛋白酶和硝酸还原酶活性与氮素的关系还有待于进一步研究。

References:

- [1] Li M F, Cao Y S, Qi Y C, Geng Y B. Effect of land-use change on the contents of C & N in temperate grassland soils. *Grassland of China*, 2005, 27(1): 1-2.
- [2] Huang R, Pan K W, Wang J C, Li W. Comparison of soil nitrogen status among three stand types in the semi-arid areas of upper reaches of the Minjiang River. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(5): 1210-1216.
- [3] Rutigliano F A, Castaldi S, D'Ascoli R, Papa S, Carfora A, Marzaioli R, Fioretto A. Soil activities related to nitrogen cycle under three plant cover types in Mediterranean environment. *Applied Soil Ecology*, 2009, 43(1): 40-46.
- [4] Kristensen H L, Henriksen K. Soil nitrogen transformation along a successional gradient from *Calluna* heathland to *Quercus* forest at intermediate atmospheric nitrogen deposition. *Applied Soil Ecology*, 1998, 8(1/-3): 95-109.
- [5] Liu S, Wang C K. Spatio-temporal patterns of soil microbial biomass carbon and nitrogen in five temperate forest ecosystems. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(12): 3135-3143.
- [6] Tao B X, Zhang J C, Yu Y C, Cong R L. Season variations of forest soil enzyme activities in the hilly region of southern Jiangsu province. *Ecology and Environmental Sciences*, 2010, 19(10): 2349-2354.
- [7] Xue L, Kuang L G, Chen H Y, Tan S M. Soil nutrients, microorganisms and enzyme activities of different stands. *Acta Pedologica Sinica*, 2003, 40(2): 280-285.
- [8] Watanabe K, Hayano K. Seasonal variation of soil protease activities and their relation to proteolytic bacteria and *Bacillus* spp in paddy field soil. *Soil Biology and Biochemistry*, 1995, 27(2): 197-203.
- [9] Yue Z H, Zhang X Y, Xu J G, Sui Y Y, Yu D, Wang L, Chen H Y, Pang J. Distribution characteristics of nitrate reductase activity in black soil. *Journal of Northeast Agricultural University*, 2007, 38(6): 767-770.
- [10] Guo H, Wang X A. Canopy characteristics of the man-made *Pinus tabulaeformis* forests in the Ziwuling Mountain of the Loess Plateau. *Acta Botanica Boreo-Occidentalia Sinica*, 2005, 25(7): 1335-1339.
- [11] Wang M Y, Liang Z S, Yang C, Chen X Y. Study on the water physiological ecology characteristics of *Bothriochloa ischaemum* in different habitats and community biomass in hilly-gully areas in Northern Shaanxi. *Journal of Northwest A and F University: Natural Science Edition*, 2008, 36(1): 93-100.
- [12] Cheng J M, Zhao L P, Cheng J. Seed quality and forest regeneration of a 60-year *Quercus liaotungensis* forest in the Ziwuling region, northwestern China. *Journal of Beijing Forestry University*, 2009, 31(2): 10-16.
- [13] Bao S D. *Soil and Agricultural Chemistry Analysis*. 3rd ed. Beijing: China Agricultural Press, 2008.
- [14] Brookes P C, Landman A, Pruden G, Jenkinson D S. Chloroform fumigation and the release of soil nitrogen: a rapid direct extraction method to measure microbial biomass nitrogen in soil. *Soil Biology and Biochemistry*, 1985, 17(6): 837-842.
- [15] Guan S Y. *Soil Enzyme and its Methodology*. Beijing: China Agricultural Press, 1986.
- [16] Schinner F, Öhlinger R, Kandeler E, Margesin R. *Methods in Soil Biology*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 1996.
- [17] Paul M, Catterall C P, Pollard P C, Kanowski J. Recovery of soil properties and functions in different rainforest restoration pathways. *Forest Ecology and Management*, 2010, 259(10): 2083-2092.
- [18] Tiedje J M. Ecology of denitrification and dissimilatory nitrate reduction tammonium//Zehnder A J B, ed. *Biology of Anaerobic Microorgaism*. New York: Wiley, 1988: 179-244.
- [19] Liu F F, Zhou D P, Wu S H, Zhang M, Chu C B, Fan J Q, Jiang Z F. Isolation and identification of Hetetotrophic Nitrifiers from cultivation wastewater. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29(11): 2232-2237.
- [20] Maithani K, Arunachalam A, Tripathi R S, Pandey H N. Nitrogen mineralization as influenced by climate, soil and vegetation in a subtropical humid forest in northeast India. *Forest Ecology and Management*, 1998, 109(1/3): 91-101.
- [21] Makoi J H J R, Ndakidemi P A. Selected soil enzymes: examples of their potential roles in the ecosystem. *African Journal of Biotechnology*, 2008, 7(3): 181-191.
- [22] Xu Y, Xiang C H, Li X W. Advances in soil enzymology. *Journal of Sichuan Forestry Science and Technology*, 2010, 31(2): 14-20.
- [23] Huang Y M, An S S, Qu D, Zhao W F. Responses and evolution of soil enzymatic activities during process of vegetation recovering. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2007, 21(1): 152-155.

- [24] Zou J, Yu L F, Li Y Y. Study on soil enzyme activity characteristics during succession of degraded karst vegetation. *Ecology and Environmental Sciences*, 2010, 19(4): 894-898.
- [25] Jiao X G, Sui Y Y, Zhang X Y. Study on the relationship between soil organic matter content and soil urease activity. *System Sciences and Comprehensive Studies in Agriculture*, 2008, 24(4): 494-496.
- [26] Eivazi F, Bayan M R. Effects of long-term prescribed burning on the activity of selected soil enzymes in an oak-hickory forest. *Canadian Journal of Forest Research*, 1996, 26(10): 1799-1804.
- [27] Zhang W, Zhang M, Zhang X D, Zhang Y, Li W F. A review on Soil Protease and Arylamidase. *Chinese Journal of Soil Science*, 2008, 39(6): 1468-1474.
- [28] Parton W J, Mosier A R, Ojima D S, Valentine D W, Schimel D S, Weier K, Kulmala A E. Generalized model for N_2 and N_2O production from nitrification and denitrification. *Global Biogeochemical Cycle*, 1996, 10(3): 401-412.

参考文献:

- [1] 李明峰, 曹云社, 齐玉春, 耿元波. 温带草原土地利用变化对土壤碳氮含量的影响. *中国草地*, 2005, 27(1): 1-2.
- [2] 黄容, 潘开文, 王进闯, 李伟. 岷江上游半干旱河谷区 3 种林型土壤氮素的比较. *生态学报*, 2010, 30(5): 1210-1216.
- [5] 刘爽, 王传宽. 五种温带森林土壤微生物生物量碳氮的时空格局. *生态学报*, 2010, 30(12): 3135-3143.
- [6] 陶宝先, 张金池, 愈元春, 从日亮. 苏南丘陵地区森林土壤酶活性季节变化. *生态环境学报*, 2010, 19(10): 2349-2354.
- [7] 薛立, 邝立刚, 陈红跃, 谭绍满. 不同林分土壤养分、微生物与酶活性的研究. *土壤学报*, 2003, 40(2): 280-285.
- [9] 岳中辉, 张兴义, 许景刚, 隋跃宇, 于东, 王丽, 陈红艳, 庞健. 黑土硝酸还原酶活性的分布特征. *东北农业大学学报*, 2007, 38(6): 767-770.
- [10] 郭华, 王孝安. 黄土高原子午岭人工油松林冠层特性研究. *西北植物学报*, 2005, 25(7): 1335-1339.
- [11] 王满意, 梁宗锁, 杨超, 陈小燕. 陕北丘陵沟壑区不同立地白羊草水分特征及群落生物量研究. *西北农林科技大学学报: 自然科学版*, 2008, 36(1): 93-100.
- [12] 程积民, 赵凌平, 程杰. 子午岭 60 年辽东栎林种子质量与森林更新. *北京林业大学学报*, 2009, 31(2): 10-16.
- [13] 鲍士旦. *土壤农化分析* (第三版). 北京: 中国农业出版社, 2008.
- [15] 关松荫. *土壤酶及其研究法*. 北京: 农业出版社, 1986.
- [19] 刘芳芳, 周德平, 吴淑杭, 张明, 褚长彬, 范洁群, 姜震方. 养殖废水中异养硝化细菌的分离筛选和鉴定. *农业环境科学学报*, 2010, 29(11): 2232-2237.
- [22] 徐雁, 向成华, 李贤伟. 土壤酶的研究概况. *四川林业科技*, 2010, 31(2): 14-20.
- [23] 黄懿梅, 安韶山, 曲东, 赵伟峰. 黄土丘陵区植被恢复过程中土壤酶活性的响应与演变. *水土保持学报*, 2007, 21(1): 152-155.
- [24] 邹军, 喻理飞, 李媛媛. 退化喀斯特植被恢复过程中土壤酶活性特征研究. *生态环境学报*, 2010, 19(4): 894-898.
- [25] 焦晓光, 隋跃宇, 张兴义. 土壤有机质含量与土壤脲酶活性关系的研究. *农业系统科学与综合研究*, 2008, 24(4): 494-496.
- [27] 张威, 张明, 张旭东, 张乐, 李维福. 土壤蛋白酶和芳香氨基酶的研究进展. *土壤通报*, 2008, 39(6): 1468-1474.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol. 32, No. 5 March, 2012 (Semimonthly)

CONTENTS

- Statistical characteristics of eutrophication process in Dianshan Lake CHENG Xi, LI Xiaoping, CHEN Xiaohua (1355)
- Cadmium assimilation and elimination and biological response in *Pirata subpiraticus* (Araneae: Lycosidae) fed on Cadmium diets
..... ZHANG Zhengtian, ZHANG Guangduo, ZHANG Hucheng, et al (1363)
- Effect of co-cultivation time on camptothecin content in *Camptotheca acuminata* seedlings after inoculation with arbuscular
mycorrhizal fungi YU Yang, YU Tao, WANG Yang, et al (1370)
- Relationship between frequency of sandstorms and air humidity as well as plant phenology: a case study from the Minqin desert
area CHANG Zhaofeng, WANG Yaolin, HAN Fugui, et al (1378)
- Genetic diversity and evolution relationship on mtDNA D-loop in Tibetan yaks
..... ZHANG Chengfu, XU Lijuan, JI Qiumei, et al (1387)
- Geostatistical analysis on spatiotemporal distribution pattern of soil water content of forest gap in *Pinus koraiensis* dominated
broadleaved mixed forest LI Meng, DUAN Wenbiao, CHEN Lixin, et al (1396)
- Soil nitrogen and enzymes involved in nitrogen metabolism under different vegetation in Ziwuling mountain in the Loess Plateau,
China XING Xiaoyi, HUANG Yimei, HUANG Haibo, et al (1403)
- Soil carbon, nitrogen and microbiological characteristics during bamboo high-speed growth
..... WANG Xueqin, ZHANG Qichun, YAO Huaiying (1412)
- Effects of long-term increased soil N on leaf traits of several species in typical Inner Mongolian grassland
..... HUANG Juying, YU Hailong, YUAN Zhiyou, et al (1419)
- Influence of arbuscular mycorrhizal associations on the interspecific competition between mycorrhizal and non-mycorrhizal plants
..... ZHANG Yuting, WANG Wenhua, SHEN Hong, et al (1428)
- Structure and biodiversity of fig wasp community inside syconia of *Ficus virens* Ait. var. *sublanceolata* (Miq.) Corner in Fuzhou ...
..... WU Wenshan, CHEN Youling, CAI Meiman, et al (1436)
- Growth and photosynthetic characteristics of *Epimedium koreanum* Nakai in different habitats
..... ZHANG Yonggang, HAN Mei, HAN Zhongming, et al (1442)
- The critical temperature to Huashan Pine (*Pinus armandi*) radial growth based on the daily mean temperature
..... FENG Xiaohui, CHENG Ruimei, XIAO Wenfa, et al (1450)
- The analysis of grade diversity indices of butterfly community in the Three Gorges Reservoir Area of Yangtze River
..... MA Qi, LI Aimin, DENG Heli (1458)
- Research on dynamic characteristics of photosynthesis in muskmelon seedling leaves
..... HAN Ruifeng, LI Jianming, HU Xiaohui, et al (1471)
- Effects of different winter covering crops cultivation on methane (CH₄) and nitrous oxide (N₂O) emission fluxes from double-
cropping paddy field TANG Haiming, XIAO Xiaoping, SHUAI Xiqiang, et al (1481)
- Variations in groundwater levels and quality and their effects on vegetation in the western Grubantonggut Desert
..... ZENG Xiaoling, LIU Tong, ZHANG Weibin, et al (1490)
- Carbon and nitrogen stable isotope characteristics of particulate organic matter and zooplankton in Liuxihe Reservoir
..... NING Jiajia, LIU Hui, GU Binhe, et al (1502)
- Selection of vegetable seeds native in China instead of the cress seed for evaluating the maturity of biosolids
..... LIU Songsong, XU Tianfen, WU Qitang, et al (1510)
- Effects of anthropogenic nutrient input on organisms from different trophic levels in Hanfeng Lake: evidence from stable carbon
and nitrogen isotope analysis LI Bin, WANG Zhijian, JIN Li, et al (1519)
- Temporal and spatial distribution of phytoplankton in Liusha Bay ZHANG Caixue, CHEN Huiyan, SUN Xingli, et al (1527)
- Study on the supercooling of golden apple snail (*Pomacea canaliculata*)
..... ZHAO Benliang, ZHANG Jia'en, LUO Mingzhu, et al (1538)
- The effects of rice growth stages on the ovarian development and take-off of *Nilaparvata lugens* and *Sogatella furcifera*
..... CHEN Yu, FU Qiang, LAI Fengxiang, et al (1546)
- Cold tolerance of the overwintering egg of *Apolygus lucorum* Meyer-Dür (Hemiptera: Miridae)
..... ZHUO Degan, LI Zhaohui, MEN Xingyuan, et al (1553)
- A suggestion on the estimation method of population sizes of *Niviventer confucianus* in Land-bridge island
..... ZHANG Xu, BAO Yixin, LIU Jun, et al (1562)
- The carbon footprint of food consumption in Beijing WU Yan, WANG Xiaoke, LU Fei (1570)
- Anthropogenic phosphorus flow analysis of Hanshan County in Anhui Province
..... FU Yinyin, YUAN Zengwei, WU Huijun, et al (1578)
- A laboratory study of auctions for water rights transactions in inland river basin: a case study of irrigation areas of Heihe river
basin DENG Xiaohong, XU Zhongmin (1587)
- Review and Monograph**
- A review of the effect of typhoon on forests LIU Bin, PAN Lan, XUE Li (1596)
- Research progress on the effects of ocean acidification on coral reef ecosystems
..... ZHANG Chenglong, HUANG Hui, HUANG Liangmin, et al (1606)
- Interspecific competition among three invasive *Liriomyza* species
..... XIANG Juncheng, LEI Zhongren, WANG Haihong, et al (1616)
- Indicative significance of biogenic elements to eco-environmental changes in waters
..... YU Yu, SONG Jinming, LI Xuegang, et al (1623)
- Recent advances in studies on dissimilatory Fe(III)-reducing microorganisms
..... LI Huijuan, PENG Jingjing (1633)
- Discussion**
- Ecological vulnerability research for Xilingol League, Northern China XU Guangcai, KANG Muye, Marc Metzger, et al (1643)
- Scientific Note**
- Spatial distribution and species composition of zooplanktons in the eastern tropical Pacific Ocean off Costa Rica
..... LIU Bilin, CHEN Xinjun, JIA Tao, et al (1654)

《生态学报》2012 年征订启事

《生态学报》是中国生态学学会主办的自然科学高级学术期刊,创刊于 1981 年。主要报道生态学研究原始创新性科研成果,特别欢迎能反映现代生态学发展方向的优秀综述性文章;研究简报;生态学新理论、新方法、新技术介绍;新书评介和学术、科研动态及开放实验室介绍等。

《生态学报》为半月刊,大 16 开本,280 页,国内定价 70 元/册,全年定价 1680 元。

国内邮发代号:82-7 国外邮发代号:M670 标准刊号:ISSN 1000-0933 CN 11-2031/Q

全国各地邮局均可订阅,也可直接与编辑部联系购买。欢迎广大科技工作者、科研单位、高等院校、图书馆等订阅。

通讯地址:100085 北京海淀区双清路 18 号 电 话:(010)62941099; 62843362

E-mail: shengtaixuebao@rcees.ac.cn 网 址: www.ecologica.cn

编辑部主任 孔红梅 执行编辑 刘天星 段 靖

生 态 学 报

(SHENGTAI XUEBAO)

(半月刊 1981 年 3 月创刊)

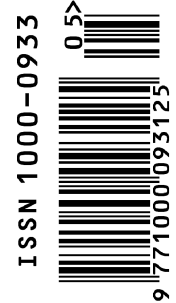
第 32 卷 第 5 期 (2012 年 3 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 32 No. 5 2012

编 辑	《生态学报》编辑部 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085 电话:(010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn	Edited by	Editorial board of ACTA ECOLOGICA SINICA Add: 18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China Tel: (010)62941099 www.ecologica.cn Shengtaixuebao@rcees.ac.cn
主 编	冯宗炜	Editor-in-chief	FENG Zong-Wei
主 管	中国科学技术协会	Supervised by	China Association for Science and Technology
主 办	中国生态学学会 中国科学院生态环境研究中心 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085	Sponsored by	Ecological Society of China Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS Add: 18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China
出 版	科 学 出 版 社 地址:北京东黄城根北街 16 号 邮政编码:1000717	Published by	Science Press Add: 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷	北京北林印刷厂	Printed by	Beijing Bei Lin Printing House, Beijing 100083, China
发 行	科 学 出 版 社 地址:东黄城根北街 16 号 邮政编码:1000717 电话:(010)64034563 E-mail: journal@espg.net	Distributed by	Science Press Add: 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China Tel: (010)64034563 E-mail: journal@espg.net
订 购	全国各地邮局	Domestic	All Local Post Offices in China
国外发行	中国国际图书贸易总公司 地址:北京 399 信箱 邮政编码:100044	Foreign	China International Book Trading Corporation Add: P. O. Box 399 Beijing 100044, China
广告经营 许 可 证	京海工商广字第 8013 号		



ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

国内外公开发行

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 70.00 元