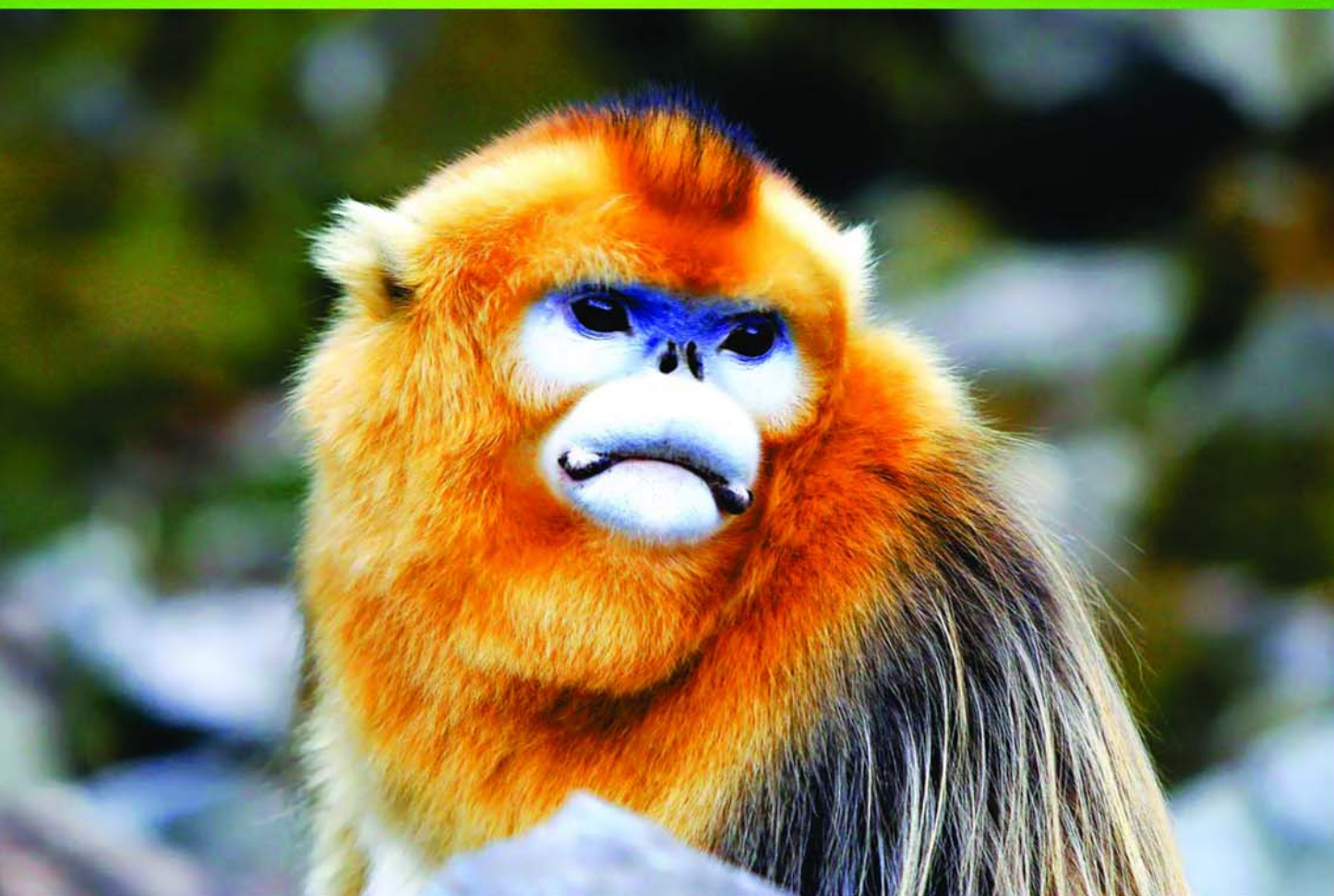


ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica



第32卷 第2期 Vol.32 No.2 **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 2 期 2012 年 1 月 (半月刊)

目 次

北部湾秋季底层鱼类多样性和优势种数量的变动趋势	王雪辉,邱永松,杜飞雁,等 (333)
中国大陆鸟类和兽类物种多样性的空间变异	丁晶晶,刘定震,李春旺,等 (343)
粉蝶盘绒茧蜂中国和荷兰种群学习行为及 EAG 反应的比较	王国红,刘勇,戈峰,等 (351)
君主绢蝶的生物学及生境需求	方健惠,骆有庆,牛犇,等 (361)
西南大西洋阿根廷滑柔鱼生物学年间比较	方舟,陆化杰,陈新军,等 (371)
城市溪流中径流式低坝对底栖动物群落结构的影响	韩鸣花,海燕,周斌,等 (380)
沉积再悬浮颗粒物对马氏珠母贝摄食生理影响的室内模拟	栗志民,申玉春,余南涛,等 (386)
太平洋中西部海域浮游植物营养盐的潜在限制	徐燕青,陈建芳,高生泉,等 (394)
几株赤潮甲藻的摄食能力	张清春,于仁成,宋静静,等 (402)
高摄食压力下球形棕囊藻凝聚体的形成	王小冬,王艳 (414)
大型绿藻浒苔藻段及组织块的生长和发育特征	张必新,王建柱,王乙富,等 (421)
链状亚历山大藻生长衰亡相关基因的筛选	仲洁,隋正红,王春燕,等 (431)
太湖春季水体固有光学特性及其对遥感反射率变化的影响	刘忠华,李云梅,吕恒,等 (438)
程海富营养化机理的神经网络模拟及响应情景分析	邹锐,董云仙,张祯祯,等 (448)
沙质海岸灌化黑松对蛀食胁迫的补偿性响应	周振,李传荣,许景伟,等 (457)
泽陆蛙和饰纹蛙蝌蚪不同热驯化下选择体温和热耐受性	施林强,赵丽华,马小浩,等 (465)
麦蚜和寄生蜂对农业景观格局的响应及其关键景观因子分析	赵紫华,王颖,贺达汉,等 (472)
镉胁迫对芥蓝根系膜过氧化及 ATPase 活性的影响	郑爱珍 (483)
生姜水浸液对生姜幼苗根际土壤酶活性、微生物群落结构及土壤养分的影响	韩春梅,李春龙,叶少平,等 (489)
九州虫草菌丝体对 Mn 的耐性及富集	罗毅,程显好,张聪聪,等 (499)
土霉素暴露对小麦根际抗生素抗性细菌及土壤酶活性的影响	张昊,张利兰,王佳,等 (508)
氮沉降对杉木人工林土壤有机碳矿化和土壤酶活性的影响	沈芳芳,袁颖红,樊后保,等 (517)
火炬树雌雄母株克隆生长差异及其光合荧光日变化	张明如,温国胜,张瑾,等 (528)
湖南乌云界自然保护区典型生态系统的土壤持水性能	潘春翔,李裕元,彭亿,等 (538)
祁连山东段高寒地区土地利用方式对土壤性状的影响	赵锦梅,张德罡,刘长仲,等 (548)
沙质草地生境中大型土壤动物对土地沙漠化的响应	刘任涛,赵哈林 (557)
腾格里沙漠东南缘可培养微生物群落数量与结构特征	张威,章高森,刘光秀,等 (567)
塔克拉玛干沙漠南缘玉米对不同荒漠化环境的生理生态响应	李磊,李向义,林丽莎,等 (578)
内蒙古锡林河流域羊草草原 15 种植物热值特征	高凯,谢中兵,徐苏铁,等 (588)
不同密度条件下芨芨草空间格局对环境胁迫的响应	张明娟,刘茂松,徐驰,等 (595)
环境因子对巴山冷杉-糙皮桦混交林物种分布及多样性的影响	任学敏,杨改河,王得祥,等 (605)
海藻酸铈配合物对毒死蜱胁迫下菠菜叶片抗坏血酸-谷胱甘肽循环的影响	栾霞,陈振德,汪东风,等 (614)
城市化进程中城市热岛景观格局演变的时空特征——以厦门市为例	黄聚聪,赵小锋,唐立娜,等 (622)
基于遥感和 GIS 的川西绿被时空变化研究	杨存建,赵梓健,任小兰,等 (632)
亚热带城乡复合系统 BVOC 排放清单——以台州地区为例	常杰,任远,史琰,等 (641)
研究简报	
不同水分条件下毛茛苔草枯落物分解及营养动态	侯翠翠,宋长春,李英臣,等 (650)
大山雀对巢箱颜色的识别和繁殖功效	张克勤,邓秋香,Justin Liu,等 (659)



封面图说: 雄视——中国的金丝猴有川、黔、滇金丝猴三种,此外还有越南和缅甸金丝猴两种。金丝猴是典型的森林树栖动物,常年栖居于海拔 1500—3300m 的亚热带山地、亚高山针叶林、针阔叶混交林、常绿落叶阔叶混交林中,随着季节的变化,只在栖息的生境中作垂直移动。川金丝猴身上长着柔软金色长毛,十分漂亮。个体大,嘴角处有瘤状突起的是雄性金丝猴的特征。川金丝猴只分布在中国的四川、甘肃、陕西和湖北省。属国家一级重点保护、CITES 附录一物种。

彩图提供: 陈建伟教授 国家林业局 E-mail: cites.chenjw@163.com

DOI: 10.5846/stxb201012011710

沈芳芳,袁颖红,樊后保,刘文飞,刘苑秋.氮沉降对杉木人工林土壤有机碳矿化和土壤酶活性的影响.生态学报,2012,32(2):0517-0527.

Shen F F, Yuan Y H, Fan H B, Liu W F, Liu Y Q. Effects of elevated nitrogen deposition on soil organic carbon mineralization and soil enzyme activities in a Chinese fir plantation. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(2): 0517-0527.

氮沉降对杉木人工林土壤有机碳矿化和土壤酶活性的影响

沈芳芳^{1,2},袁颖红¹,樊后保^{1,*},刘文飞¹,刘苑秋²

(1. 南昌工程学院生态与环境科学研究所,南昌 330099; 2. 江西农业大学园林与艺术学院,南昌 330045)

摘要:为探讨氮沉降对亚热带森林土壤有机碳矿化及土壤酶活性的影响规律,在杉木人工林中开展了野外模拟 N 沉降试验。试验设计为 4 种处理,分别为 N0(对照)、N1(60 kg N·hm⁻²·a⁻¹)、N2(120 kg N·hm⁻²·a⁻¹)和 N3(240 kg N·hm⁻²·a⁻¹),每处理重复 3 次。通过 28 d 的培养后发现,各土层有机碳日均矿化量随培养时间的延长呈下降趋势,而有机碳累计矿化量则逐步增加。不同氮沉降处理下各土层有机碳累计矿化量总体趋势表现为:随着氮沉降量的增加而降低,日均矿化量降低幅度以 N1 最大,其次是 N0 和 N2,N3 降幅最小。相同 N 沉降处理下,参与土壤碳循环的 6 种主要酶(蔗糖酶、纤维素酶、淀粉酶、β-葡糖苷酶、多酚氧化酶、过氧化物酶)活性、土壤有机碳日均矿化量和有机碳累计矿化量均随土层加深而降低。氮沉降对 6 种土壤酶活性的影响存在差异,对纤维素酶和多酚氧化酶具有促进作用,而对淀粉酶和过氧化物酶表现出一定的抑制作用;中-低氮沉降(N1、N2)对蔗糖酶无影响,而对 β-葡糖苷酶具有促进作用,高氮沉降(N3)促进了蔗糖酶活性,但抑制了 β-葡糖苷酶活性。表层土壤中,土壤有机碳累积矿化量与土壤纤维素酶、β-葡糖苷酶、过氧化物酶活性呈显著正相关。因此,氮沉降促进了表层土壤纤维素酶、多酚氧化酶和蔗糖酶的活性,但在一定程度上抑制了淀粉酶和过氧化物酶,对土壤有机碳矿化也表现出明显的抑制作用。

关键词:氮沉降;杉木人工林;土壤酶;有机碳矿化;碳循环

Effects of elevated nitrogen deposition on soil organic carbon mineralization and soil enzyme activities in a Chinese fir plantation

SHEN Fangfang^{1,2}, YUAN Yinghong¹, FAN Houbao^{1,*}, LIU Wenfei¹, LIU Yuanqiu²

¹ Research Institute of Ecology & Environmental Sciences, Nanchang Institute of Technology, Nanchang 330099, China

² College of Landscape and Art, Jiangxi Agricultural University, Nanchang 330045, China

Abstract: Human activities have dramatically increased the quantity of nitrogen fixed in terrestrial ecosystems, due to fossil fuel combustion, production and use of chemical fertilizers, and livestock ranching. Increased N supply can have a fertilization effect on forest ecosystems, but in the long-term, excess N can negatively impact biogeochemical cycling, soil chemistry, and productivity. Most research to date has focused on aggregate effects of N deposition on soil chemistry and N cycling. However, very little is known about the response of the microbial activities that are responsible for soil nutrient cycling and decomposition to these environmental changes. To investigate the response of soil organic carbon mineralization and soil enzyme activities to elevated nitrogen deposition, a field experiment was conducted in a Chinese fir plantation at Shaxian State Forest Farm of Fujian Province, China. Nitrogen loadings were designed at 4 levels as N0 (control), N1, N2 and N3 at the doses of 0, 60, 120 and 240 kg·hm⁻²·a⁻¹N, respectively. Each treatment comprised three replicate plots of 20m×20m which were sprayed with CO(NH₂)₂ solutions on the forest floor at the beginning of each month, lasting from

基金项目:国家自然科学基金项目(31060109; 30771714);江西省自然科学基金重点项目(0630101)

收稿日期:2010-12-01; **修订日期:**2011-04-14

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: hbfan@nit.edu.cn

January 2004 to the sampling time, March 2010. Soil samples were incubated in the laboratory at 28 °C for 28 days, and the alkali absorption method was applied to measure soil respiration. The carbon that mineralized as CO₂ evolved was measured on the third day and once every week thereafter, and determined on the 28th day for the last time. Soil invertase, cellulose and amylase were detected by 3, 5- dinitrosalicylic acid assay, β-glucosidase by nitrophenol colorimetric method, and polyphenol oxidase and peroxidase by iodometric titration. During the incubation period, the daily mineralization of soil organic carbon decreased, but the cumulative mineralization of soil organic carbon increased with increasing time. Generally, the cumulative mineralization of soil organic carbon decreased with increasing doses of nitrogen deposition. The daily mineralization of soil organic carbon decreased in the sequence of N1>N0>N2>N3. At the same level of nitrogen deposition, the activities of the six soil enzymes involving carbon cycle (invertase, cellulose, amylase, β-glucosidase, polyphenol oxidase and peroxidase), the daily mineralization of soil organic carbon and the cumulative mineralization of soil organic carbon all decreased with the increasing soil depth. The activities of six soil enzymes responded differently to nitrogen treatments. At the soil depth of 0—20 cm, nitrogen additions promoted cellulose and polyphenol oxidase activities, but inhibited amylase and peroxidase to some extents. High level of nitrogen loading (N3) showed significant positive impact on invertase, but negative on β-glucosidase. Significant correlation was established between some soil enzymes, with cellulose being positively related with invertase and amylase, polyphenol oxidase with amylase and cellulose, peroxidase with invertase, amylase, cellulose and polyphenol oxidase. Soil organic carbon mineralization was also found to be positively correlated with β-glucosidase and peroxidase, but negatively with invertase and cellulose at the surface soil (0—20 cm). Hence, nitrogen deposition in this experiment accelerated the activities of surface soil cellulose, polyphenol oxidase and invertase, but inhibited amylase and peroxide to some extents, and suppressed soil organic carbon mineralization.

Key Words: nitrogen deposition; *Cunninghamia lanceolata* (Lamb.) Hook.; soil enzyme; organic carbon mineralization; carbon cycle

近数十年来,在诸多人类活动中,如矿物燃料燃烧、含氮化肥的生产和使用及畜牧业的发展等向大气中排放的含氮化合物激增,大气氮沉降成比例增加^[1-3]。氮沉降量在未来几十年将继续增加,氮沉降将呈现出全球化趋势^[4]。我国已成为继欧洲、美国之后的世界第三大氮沉降集中区^[2],随着我国经济的发展,氮沉降问题将越来越严重^[5]。全球变化背景下大气氮沉降量的增加已成为许多森林的新生态因子^[6]。长期而持续的高氮输入可提高土壤矿化速率,导致森林土壤酸化。目前,氮沉降研究已经成为国际上生态和环境研究的热点内容之一^[7]。

土壤有机碳是全球碳循环中重要的碳库。据统计土壤有机碳库是大气碳库的3倍,大约是植被的2.5—3倍^[8],成为地球表层最大的有机碳库,是全球生物化学循环中极其重要的生态因子。土壤有机碳的矿化受土壤微生物驱动,由土壤酶介导,是土壤中重要的生物化学过程,直接影响到土壤中养分元素的释放和供应、土壤质量的维持以及温室气体的形成等^[9],其速率不仅受温度条件、水分状况、土壤性质等因素的影响,且与土壤碳、氮含量有关,土壤有机碳动态变化过程主要体现在其积累/矿化过程上^[10]。微生物生物量碳、水溶性有机碳及土壤酶类是反映土壤有机碳转化过程特征的敏感指标^[11]。施肥主要通过影响作物的生长来影响土壤有机物的输入量,进而影响土壤生物化学特性造成土壤有机碳含量差异。因此,土壤有机碳库的变化日益成为全球有机碳研究热点^[12]。土壤有机碳分解释放CO₂的过程称为碳矿化,其矿化速率控制着土壤养分的通量。大量化肥的施用导致土壤有机质增加,引起土壤呼吸的增加,从而使更多的C以CO₂的形式释放回大气^[13]。但也有研究表明施用化肥对CO₂排放的影响不明显^[14-15]。土壤中的一切生物化学过程都是在土壤酶系统的作用下进行的,土壤酶在森林生态系统中扮演着重要的角色,是生态系统的物质循环和能量流动等生态系统过程中最为活跃的生物活性物质^[16]。由于土壤酶活性与土壤的理化性质、土壤类型等密切相关,所以土壤酶活性一直以来被作为评价土壤生产力及土壤质量的指标之一^[17]。各种土壤酶积极参与土壤碳氮的转

化,对提高土壤肥力有重要作用,而土壤碳氮状况又是土壤酶活性的基础,对土壤酶活性有着不可忽视的影响。

杉木(*Cunninghamia lanceolata*)作为速生丰产林自建国后进入快速发展阶段。随着林业制度的改革与更新,至20世纪90年代初期,杉木林面积占人工林比重增大,南方诸多省份杉木林面积占人工林面积均在60%以上,湖南、江西则分别占79.7%和78.7%^[18]。国内外有关氮沉降对森林生态系统影响的研究始于20世纪80年代^[19],氮沉降增加对杉木人工林生态系统的影响主要集中在对杉木生长、土壤养分^[20]和凋落物^[21]等方面,而有关氮沉降对亚热带杉木林土壤有机碳矿化、土壤酶活性影响及两者之间关系的研究鲜见报道。本研究通过野外模拟试验,选择杉木人工林地对象,探讨氮沉降增加对林地土壤有机碳矿化和土壤酶活性的影响及其相互关系,为研究氮沉降对亚热带森林生态系统中生物过程和碳循环的影响提供实地监测数据和理论参考。

1 材料和方法

1.1 试验地概况与样地设置

试验地设在福建省三明市沙县官庄国有林场,位于117°43'29" E, 26°30'47" N。属中亚热带季风气候,四季气温温暖适中,日照充足,年平均气温18.8—19.6℃,年平均降水量1606—1650 mm,无霜期271 d。试验林设置在该林场的白溪工区21林班8小班南坡上,平均海拔200 m左右,土壤为山地红壤。试验林为1992年营造的杉木人工林,面积6 hm²。林下植被稀疏,以五节芒(*Miscanthus floridulus*)、芒萁(*Dicranopteris olichotoma*)、蕨(*Pteridium aquilinum var. latiusculum*)等为主,盖度在3%—5%之间。选择立地和林分条件相似的杉木人工林建立12块固定试验样地,样地面积均为20 m × 20 m,内设15 m × 15 m中心区域,以便破坏性试验在中心区外围的处理区进行。2010年3月进行了本底值调查,结果见表1。

表1 各处理样地的主要林分和立地特征本底值

Table 1 Background values of the stand and site characteristics in the nitrogen-loaded plots

处理 Treatment	林分特征 Stand characteristics					立地特征 Site characteristics			
	林龄 Age /a	密度 Density /(株/hm ²)	平均胸径 Mean DBH /cm	平均树高 Mean height /m	平均坡度 Mean grade /(°)	土壤容重 Soil bulk density /(g/cm ³)	土壤全氮 Soil total nitrogen /(g/kg)	土壤有机质 Soil organic matter /(g/kg)	土壤 pH Soil pH
N0	12	1717	19.5	16.73	32.5	1.06	0.86	19.23	3.99
N1	12	1633	19.5	19.34	31.5	1.06	0.68	17.31	3.92
N2	12	1683	20.2	19.32	29.8	1.05	0.80	18.88	3.88
N3	12	1625	20.1	18.17	30.8	1.05	0.81	18.14	3.78

1.2 研究方法

1.2.1 模拟氮沉降方法

模拟氮沉降实验即以人工喷氮的方式对未来的氮沉降趋势进行模拟。本研究参照 NITREX^[22-23]项目和北美 Harvard Forest^[24-25]等类似研究设计,按氮施用量的高低,分4种处理,从低到高分别标记为N0(0 kg N·hm⁻²·a⁻¹,对照),N1(60 kg N·hm⁻²·a⁻¹),N2(120 kg N·hm⁻²·a⁻¹),N3(240 kg N·hm⁻²·a⁻¹),每种处理重复3次。2003年12月建立样地后,于2004年1月开始进行模拟氮沉降处理,每月月初以溶液的形式给样地地面喷洒。按照处理水平的要求,将CO(NH₂)₂溶解在20 L水中,以背式喷雾器在林地人工来回均匀喷洒。对对照样地喷施同样量的水,以减少因外加的水而造成对林木生物地球化学循环的影响。

1.2.2 取样与处理

2010年3月用土壤采样器进行多点混合采集土壤原状样品,根据剖面,分表层(0—20 cm)、中层(20—40 cm)、底层(40—60 cm)进行采样,把土样密封后带回实验室,剔除植物残根、大于2 mm的石子等杂物,置于0—4℃冰箱待处理。

1.2.3 测定方法

(1) 土壤有机碳矿化培养试验^[26]

采用室内恒温培养、碱液吸收法测定土壤有机碳的矿化量。称 20 g 新鲜土壤于 250 mL 的培养瓶中培养,均匀铺于瓶底部,然后吸取 5 mL 0.2 mol/L NaOH 溶液于 1 只 10 mL 小烧杯中,轻轻将小烧杯放在培养瓶内的土壤上,再将培养瓶加盖密封,与不加土样的培养瓶作为对照,于 28 °C 恒温培养箱培养 28 d,每份土壤样品均 2 次重复。在培养开始后的第 3、10、17、24、28 天,小心取出培养瓶中的小烧杯,将碱液全部转移至 50 mL 三角瓶中,于每瓶中加入 1 mol/L BaCl₂ 溶液 2 mL 以及酚酞指示剂 2 滴,用标准酸(0.2 mol/L HCl) 滴定至红色消失,记录滴定所用 HCl 量。试验结果按 HCl 量计算土壤 CO₂ 释放量。有机碳累计矿化量是每次滴定结果相加。

(2) 土壤酶活性的测定^[27]

蔗糖酶、纤维素酶和淀粉酶采用 3,5-二硝基水杨酸比色法,多酚氧化酶和过氧化物酶采用碘量滴定法, β -葡萄糖苷酶采用硝基酚比色法。参与碳循环土壤酶主要方法、基质、培养条件和测定产物见表 2。各种酶都通过预备实验确定获得最大酶活性所需要的基质浓度和培养时间。

表 2 土壤酶活性测定的所用基质、培养条件和测定产物

Table 2 The substrates and incubated conditions and the products measured

名称 Name	基质 Matrix	培养温度/°C Incubation temperature	培养时间/h Incubation time	测定产物 Determination product
蔗糖酶 Invertase	蔗糖	37	24	葡萄糖
纤维素酶 Cellulose	CM-纤维素	37	72	葡萄糖
淀粉酶 Amylase	淀粉	37	24	葡萄糖
β -葡萄糖苷酶 β -glucosidase	对硝基苯- β -D-葡萄糖苷	37	1	对硝基酚
多酚氧化酶 Polyphenol oxidase	L-DOPA	30	2	DOPA 转化
过氧化物酶 Peroxidase	L-DOPA+ H ₂ O ₂	30	2	DOPA 转化

1.2.4 统计分析

土壤酶活性和土壤呼吸数据采用 Excel2003 软件进行制图,相关指标的差异性显著检验及回归分析采用 SPSS13.0 统计软件进行。不同字母表示差异显著($P < 0.05$),大写字母(A、B、C)表示相同氮沉降处理不同土层之间差异性比较,小写字母(a、b、c)表示相同土层不同氮沉降处理之间差异性比较。

2 结果与分析

2.1 氮沉降对土壤有机碳矿化的影响

2.1.1 氮沉降对土壤有机碳矿化动态的影响

土壤有机碳矿化过程动态是有机碳日均矿化量随着培养时间的变化关系,土壤有机碳矿化量是指在一定的温度下、一段时间内土壤有机碳矿化释放的 CO₂ 数量,它是土壤碳矿化速率的表征^[28]。图 1 表明,不同土层有机碳日均矿化量随土层加深而降低,即:0—20 cm > 20—40 cm > 40—60 cm。在 28 d 培养时间内,相同氮沉降处理各土层有机碳矿化释放的 CO₂ 量动态变化基本相似,随培养时间的延长,有机碳的日均矿化量呈明显的下降趋势,其中以表层矿化速率下降幅度最大,底层降幅最小,最后趋于稳定,保持在试验开始时的 30% 左右。相同土层各氮沉降处理有机碳日均矿化释放的 CO₂ 数量降低幅度各不相同,以 N1 降幅最快,其次 N0 和 N2, N3 降幅最慢,说明有机碳日均矿化量不一定随着氮沉降量的增加而增加,适量的氮沉降量促进其矿化速率。整个培养期间, N1 处理土壤有机碳矿化速率显著高于 N0; N2 和 N3 处理均显著低于对照,最终随着易分解碳组分的减少,逐渐趋于一致。这说明氮沉降条件下,表层土壤有机碳矿化速率快,释放的 CO₂ 数量高,中低层土壤矿化速率慢,释放的 CO₂ 数量较低。

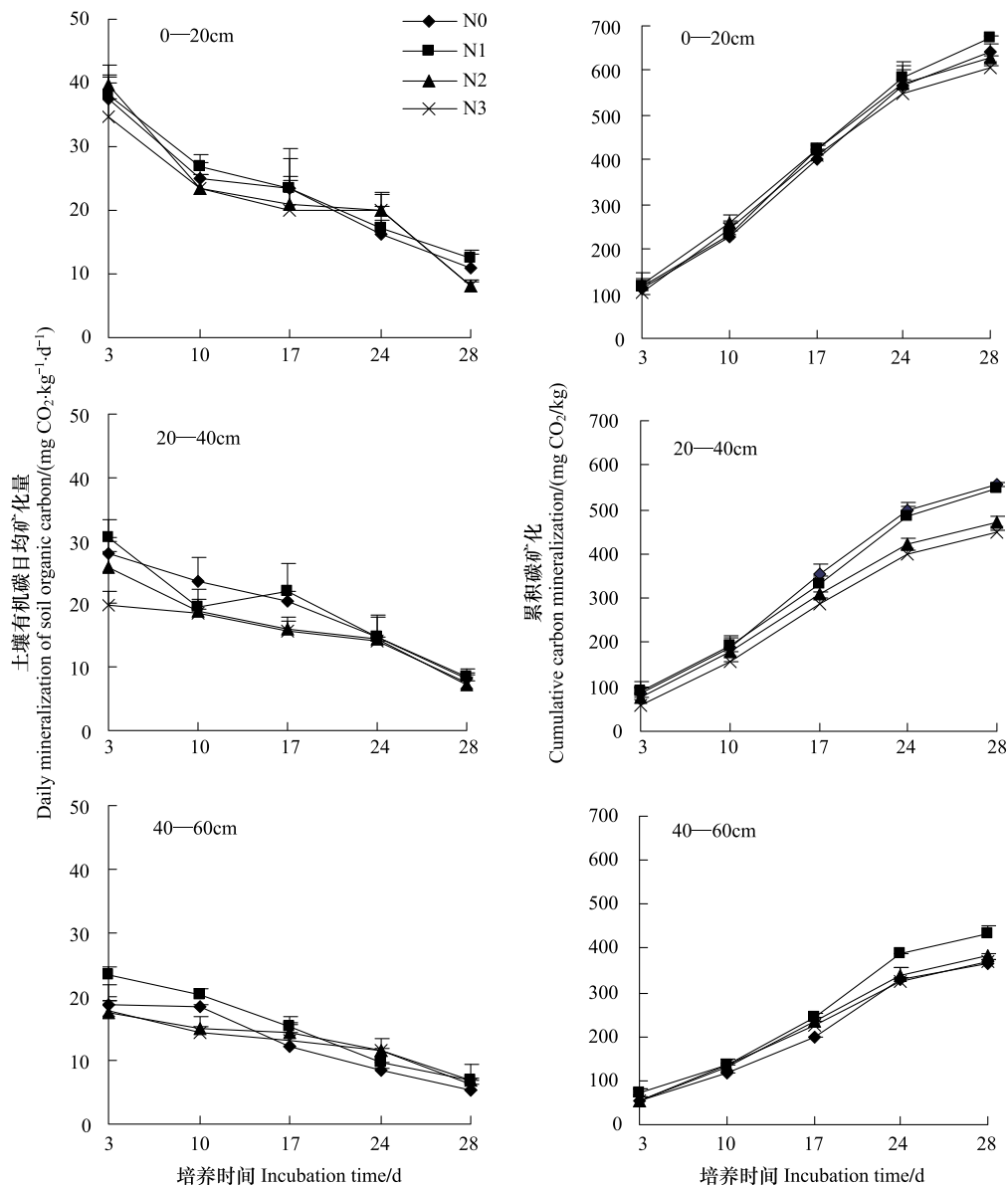


图1 各土层有机碳日均矿化量和累计矿化量变化

Fig. 1 Daily mineralization and cumulative mineralization of soil organic carbon

2.1.2 氮沉降对土壤有机碳矿化量的影响

土壤有机碳累积矿化量是一段培养时间内土壤 CO₂ 的总释放量。培养期间(图 1),土壤有机碳累积矿化量随着培养时间的延长而增加,但增加速率逐渐下降;相同氮沉降处理各土层有机碳累积矿化量存在一定的差异,随着土层的加深有机碳累积矿化量降低,即:0—20 cm > 20—40 cm > 40—60 cm;随着氮沉降量的增加,土壤有机碳的累积矿化量逐渐降低,即:N0 > N1 > N2 > N3。培养 28 d 后,N1、N2、N3 处理分别比 N0 处理降低了 1.90%、12.92%、19.48%,N3 处理下有机碳的累积矿化量亦显著低于 N0。

2.2 氮沉降对土壤碳代谢相关酶活性的影响

2.2.1 氮沉降对土壤酶活性的影响

参与土壤碳循环的蔗糖酶、纤维素酶、淀粉酶、β-葡糖苷酶、多酚氧化酶和过氧化物酶对土壤中不同稳定性碳的分解、转化和土壤的生物呼吸强度起重要作用^[29]。由图 2 可以看出,各氮沉降处理下,不同土层各土壤酶活性均随土壤深度增加而降低,即:0—20 cm > 20—40 cm > 40—60 cm,不同土层,氮沉降处理对各土壤酶

的影响有差异,其中对0—20 cm 土层的影响更大。除多酚氧化酶和过氧化物酶外,其他酶各处理均以0—20 cm 土层与20—40 cm、40—60 cm 土层差异显著($P<0.05$)。

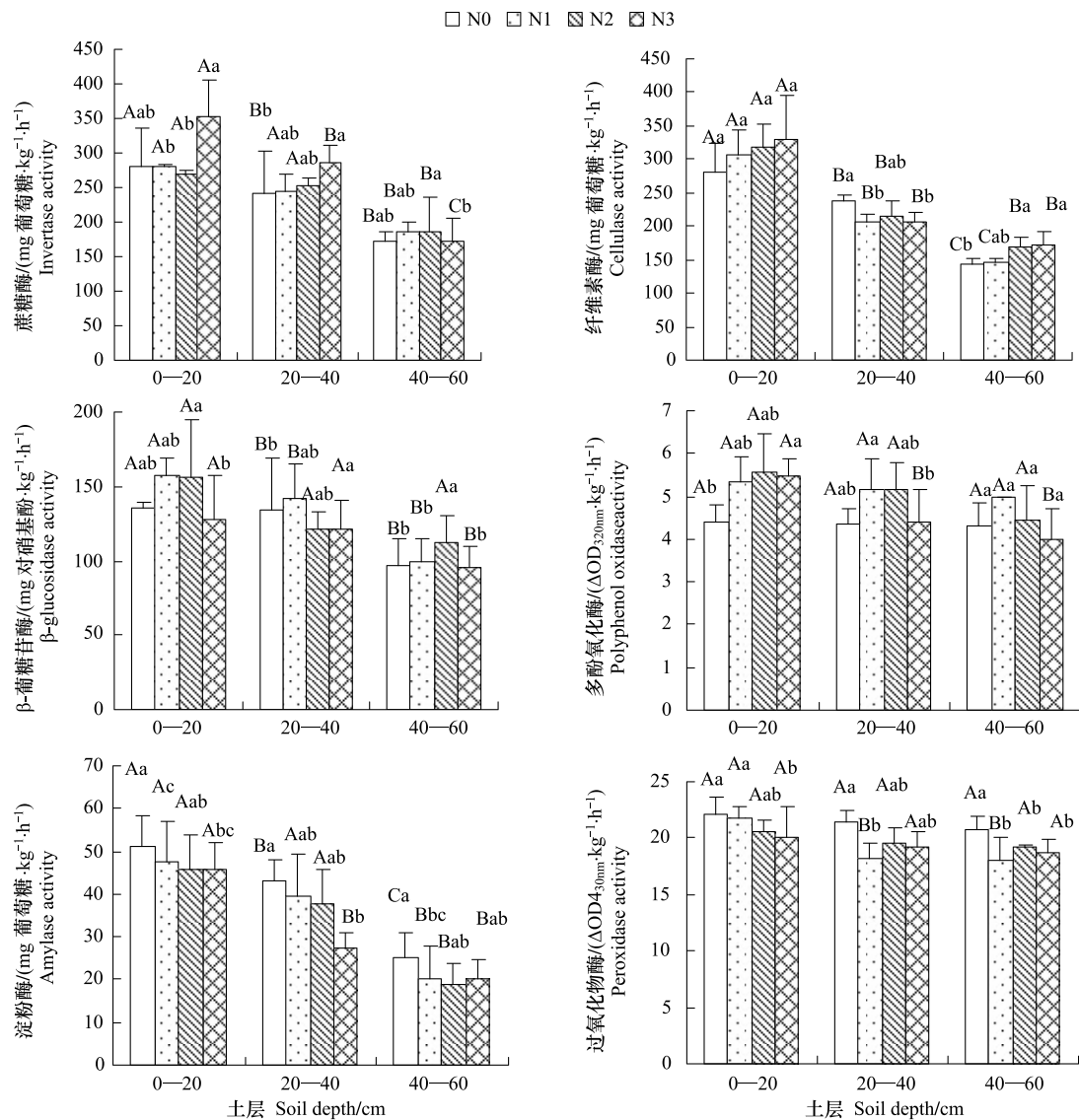


图2 不同氮处理水平下参与碳循环的土壤酶活性变化

Fig. 2 Soil enzyme activities involving carbon cycling under different nitrogen treatments

氮沉降处理对杉木人工林土壤碳代谢相关酶的影响各异(图2)。在0—20 cm 土层,氮沉降对土壤纤维素酶和多酚氧化酶活性有促进作用,N3 处理的多酚氧化酶活性与 N0 处理之间差异显著($P<0.05$);对淀粉酶和过氧化物酶具有一定的抑制作用,N2、N3 处理的淀粉酶与 N0 处理之间差异显著,N3 处理的过氧化物酶活性与 N1、N2 处理之间差异显著($P<0.05$);N1 和 N2 处理对蔗糖酶无影响,N3 处理明显促进其活性,N3 处理蔗糖酶活性与 N1、N2 处理之间差异显著($P<0.05$); β -葡萄糖苷酶活性随着氮处理量的增加表现为 N1 和 N2 处理促进其活性,而 N3 抑制其活性,N3 处理 β -葡萄糖苷酶活性与 N2 处理之间差异显著($P<0.05$)。在20—40 cm 和40—60 cm 土层,氮处理对酶活性的影响因酶的类型各异,且影响幅度不大。总体来讲,随着氮沉降量的增加,除淀粉酶和纤维素酶活性增加外,其它各酶活性降低变化幅度在中底土层差异不大。

2.2.2 表层土壤酶活性之间的相关性

对表层土壤(0—20cm)参与土壤碳循环的酶活性进行相关性分析(表3)表明,杉木林土壤蔗糖酶与纤维

素酶、过氧化物酶之间呈显著相关性,纤维素酶与多酚氧化酶、过氧化物酶之间呈显著相关性,相关系数 R 分别为 0.9270、0.9106;淀粉酶与纤维素酶、多酚氧化酶、过氧化物酶之间呈显著相关性,相关系数 R 分别为 0.9644、0.9790、0.8546;多酚氧化酶与过氧化物酶之间呈显著相关性,相关系数 R 为 0.7376,但其它酶之间不存在相关性。说明参与土壤碳循环的酶对氮沉降处理响应因酶的类型而异。

表 3 杉木土壤各酶相关性($n=6$)

Table 3 Relationship between soil enzymes

	蔗糖酶 Invertase	淀粉酶 Amylase	纤维素酶 Cellulose	β -葡糖苷酶 β -glucosidase	多酚氧化酶 Polyphenol oxidase	过氧化物酶 Peroxidase
蔗糖酶 Invertase	1.0000	0.3480	0.5813	0.7762	0.2559	0.6522
淀粉酶 Amylase		1.0000	0.9644	0.2241	0.9790	0.8546
纤维素酶 Cellulose			1.0000	0.0100	0.9270	0.9106
β -葡糖苷酶 β -glucosidase				1.0000	0.3648	0.2762
多酚氧化酶 Polyphenol oxidase					1.0000	0.7376
过氧化物酶 Peroxidase						1.0000

2.3 土壤酶活性与土壤有机碳累积矿化量的相关性

对杉木人工林各土层土壤酶与土壤有机碳累积矿化量之间的相关性进行分析,结果表明(表 4),不同氮素供应水平下,各土层土壤酶与其相关性表现不同。各土层蔗糖酶活性与土壤有机碳累积矿化量呈显著相关,相关性随土层增加而降低。纤维素酶和过氧化物酶在 0—20 cm 土层与土壤有机碳累积矿化量呈显著相关,其中纤维素酶为极显著负相关,过氧化物酶为显著正相关,但在 20—40 cm 和 40—60 cm 土层无显著相关,这说明表层土壤纤维素酶、过氧化物酶与有机碳累积矿化关系密切,而中底层土壤与其无明显相关; β -葡糖苷酶在 0—20 cm 土层与土壤有机碳累积矿化量呈显著正相关,而与 20—40 cm 土层则呈显著负相关,40—60 cm 土层无明显相关;淀粉酶、多酚氧化酶与各土层土壤有机碳累积矿化量无显著相关。

表 4 培养过程中各土层土壤酶活性与土壤有机碳累积矿化量关系函数($n=6$)

Table 4 Relation between soil organic carbon mineralization and soil enzymes during incubation

土壤酶活性 Soil enzyme activity	各土层有机碳累积矿化量 Soil organic carbon mineralization					
	0—20 cm		20—40 cm		40—60 cm	
	回归方程 Regression equation	相关系数 R Correlation coefficient	回归方程 Regression equation	相关系数 R Correlation coefficient	回归方程 Regression equation	相关系数 R Correlation coefficient
蔗糖酶 Invertase	$y = -0.4761x + 776.88$	0.6678	$y = -2.201x + 1070.6$	0.8646	$y = 3.1942x - 182.5$	0.7875
纤维素酶 Cellulose	$y = -1.0913x + 1027.9$	0.9742	$y = 2.0192x + 68.085$	0.5589	$y = -0.6744x + 495.74$	0.3181
淀粉酶 Amylase	$y = -2.3284x + 748.21$	0.3652	$y = 6.7635x + 256.51$	0.8726	$y = -4.5624x + 485.44$	0.3937
β -葡糖苷酶 β -glucosidase	$y = 249.8x + 285.83$	0.7841	$y = -329.72x + 875.12$	0.9974	$y = 21.183x + 386.31$	0.0922
多酚氧化酶 Polyphenol oxidase	$y = -11.198x + 694.36$	0.2205	$y = 2.1926x + 495.58$	0.0214	$y = 69.467x + 81.17$	0.9257
过氧化物酶 Peroxidase	$y = 23.863x + 132.02$	0.8189	$y = 11.453x + 281.61$	0.2855	$y = -19.931x + 771.3$	0.7099

$R_{0.01} = 0.708$, $R_{0.05} = 0.578$, x 为土壤各酶活性, y 为土壤有机碳累积矿化量

3 讨论

3.1 氮沉降对杉木人工林土壤碳矿化的影响

Ross^[30]等发现森林和草地土壤碳矿化释放的 CO_2 -C 量随土壤有机碳含量下降而下降,有机碳矿化比例随土层加深而降低;土壤表层有机碳矿化量及其比例和有机碳累积矿化量比底层土壤高^[31],本研究结果类似。这可能因为土壤表层有机碳含量较高,活性有机碳所占比例较高有关^[32]。土壤有机矿化速率一般呈现先快而后慢的趋势,土壤有机碳矿化随培养时间变化主要是由于土壤活性有机碳含量随培养时间减少所致^[33]。土壤活性有机碳是土壤微生物有效碳源、容易被分解利用变成 CO_2 的那部分有机碳。本研究表明,土

壤有机碳日均矿化量呈下降趋势,最后趋于稳定(图1),这可能是由于在矿化培养实验中,先期土壤易矿化有机碳数量较多,易被微生物分解;随着时间的进行,土壤易矿化有机碳数量逐渐减少,土壤微生物开始分解难矿化有机碳,分解速率下降,CO₂释放量开始降低。土壤可利用性碳、氮基质的数量是影响土壤有机碳矿化的主要因素^[34]。在土壤有机碳含量较低时,土壤有机碳矿化主要受到有机碳含量的限制,而在土壤中有机碳含量较高,且 C/N 也较高的条件下,土壤有机碳矿化则受到氮素含量的限制^[34]。培养后期,相对较低的土壤有机碳矿化速率说明了杉木人工林土壤中微生物的数量较少和活性不高,对土壤有机碳利用不高,这可能因为土壤中易矿化有机碳含量较低。

氮的输入能够引起土壤有机碳矿化速率的增加^[35];不同氮沉降处理土壤碳矿化速率的差异主要在0—20 cm 土层。本研究有机碳累计矿化量随着氮沉降量的增加而降低,表明外源氮输入量的增加并不能一直促进土壤有机碳矿化^[36],这主要是由于此时氮源已不是限制微生物活动的主要因素,可利用性碳源可能转成微生物活动的主要限制因子所致^[37]。N₂ 及 N₃ 处理使土壤碳矿化量低可能与长期高氮处理,导致土壤 pH 降低,加速土壤酸化有关。近年来北美和欧美 9 个¹⁵N 同位素标记实验研究表明,大气氮沉降只有约 3% 被固定在森林林木中,而其余大部分被固定在土壤中^[38]。大气氮在生长季节里能被一些林木冠层所吸收进入森林生态系统,但吸收存在限度(一般为 0.2—4.0 kg N hm⁻² a⁻¹)^[39],剩余的氮引起土壤的酸化。Bowman 的研究表明,氮沉降增加所引起的土壤酸化在酸性的针叶林和阔叶林中最为重要^[40]。

3.2 氮沉降对杉木人工林土壤酶活性的影响

在常温、常压和适宜的 pH 值条件下,土壤酶在土壤养分溶解、各种生物化学过程反应速率、微生物代谢过程等都具有显著促进作用^[16]。本研究表明,在氮沉降影响下,杉木人工林土壤参与碳循环的 6 种酶,蔗糖酶、纤维素酶、淀粉酶、 β -葡糖苷酶、多酚氧化酶和过氧化物酶的活性均随土层加深而减弱,其中前 4 种酶活性显著降低,后 2 种酶活性降幅较低;不同氮沉降处理土壤酶的差异主要在 0—20 cm 土层,且这些差异随土层加深而减弱。这种土壤酶活性的剖面分布特征可能反映了土壤受干扰的程度^[27,41]。这与国内外绝大多数研究者关于未受扰动的生态系统中,土壤酶活性随着土层加深,土壤酶活性降低的研究结果一致^[41-43]。其原因是表层土壤(0—20 cm)受凋落物分解的影响明显,且野外采样时发现根系分布较多,这也有利于该层次微生物的活动^[27],加之其具有良好的理化性质(表 1),上述作用均随土壤深度的增加而逐渐减弱。土壤有机质是土壤中酶促底物的主要供源,是土壤固相中最复杂的系统,也是土壤肥力的主要物质基础^[44]。这说明表层土(0—20 cm)相对中底层土(20—40 cm、40—60 cm)有更高含量的有机质。这与本研究结果一致,不同土层,氮沉降处理对表层土各酶的影响更大。

在大多数温带森林中,氮素是营养限制因子。施氮或者某些低 C/N 的底物能减轻氮素限制^[45],为植物和微生物生长提供丰富的营养来源。由于土壤酶主要来源于植物根系分泌物和土壤微生物及动物残体的分解释放过程,施氮会影响土壤酶活性^[46]。增加氮除对氮、磷相关酶活性有影响外,也对碳相关酶活性有影响。本研究氮沉降对杉木人工林土壤蔗糖酶活性有促进作用,表明氮沉降增加了土壤生物学活性强度和土壤肥力^[27]。近年来的研究表明,氮沉降增加可以使纤维素酶活性升高,而抑制木质素降解酶活性^[46]。过氧化物酶和多酚氧化酶为土壤中主要的木质素降解酶^[47],过氧化物酶参与腐殖质的合成过程^[48],多酚氧化酶的活性与土壤腐殖化程度密切相关^[47]。Carreiro 等^[49]和 Gallo 等^[50]发现,北方温带森林中氮沉降增加使土壤多酚氧化酶活性降低、纤维素酶活性升高。Deforest 等^[51]报道,多酚氧化酶活性随氮的可利用性提高而降低。Zeglin 等^[52]发现,氮沉降对氧化酶(多酚氧化酶、过氧化物酶等)活性无影响,这说明氧化酶对氮沉降的负响应并不是一个普遍现象。本研究也发现,高氮沉降(N₃)条件下多酚氧化酶活性降低,本实验以尿素作为 N 源,在土壤中发生溶解、氨化、硝化三大过程,尿素水解后积累大量 NH₄⁺,尤其是高浓度的氮沉降,使土壤中 NH₄⁺ 浓度升高,抑制了分泌多酚氧化酶的真菌活性^[51],降低了微生物的生物量 C 含量。Frey 等^[53]的实验发现,相对于对对照地,长期施加 N 使针叶林土壤中的活性真菌生物量下降了 42%—69%。Debosz 等^[54]研究了有机物输入对纤维素酶变化的影响,在作物生长期,无论是低量输入还是高量输入,土壤酶活性均增强,

其中, β -葡萄糖苷酶和纤维酶增加 30%。研究期间,不同浓度氮处理之间对几种酶活性的促进或抑制作用未表现出较强的规律性,这可能与取样频率、氮处理时间长短以及不同季节环境因子的变化等有关,有待进一步开展深入研究。

3.3 氮沉降增加条件下土壤酶与土壤有机碳矿化的关系

土壤有机质是土壤中酶促底物的主要供源,是土壤固相中最复杂的系统,也是土壤肥力的主要物质基础^[44]。土壤酶作为土壤中活跃的有机成分之一,在土壤有机碳循环及植物所需养分的供给过程中也具有重要作用。土壤酶可能主要通过间接作用来影响土壤有机碳转化,如通过酶促作用增加土壤中养分元素的溶出,激活或抑制土壤微生物活性等。Taylor 等^[55]研究也表明,土壤酶与土壤有机质之间存在显著正相关。土壤微生物是土壤有机质中最活跃和容易变化的部分,其自身呼吸作用是土壤有机碳矿化的首要驱动力^[56];同时,土壤微生物本身含有的碳、氮、磷等元素,被看作是土壤养分的储备库,参与土壤中物质与能量交换^[56]。此外,土壤微生物在生长过程中向土壤中分泌的一些胞外酶,也参与土壤中养分的循环和转化。微生物的变化可以直接或间接地反映土壤中生物化学过程的强度,与土壤有机碳矿化密切相关^[57]。本研究中氮沉降增加条件下各土壤酶与土壤有机碳累积矿化量相关性表现各异,没有直接的相关性,但土壤酶(纤维素酶、 β -葡萄糖苷酶和过氧化物酶)在表层与土壤有机碳累积矿化量呈显著相关,其它酶与其不存在显著相关;酶的活性直接影响到有机物的微生物降解情况,氮沉降在一定程度上使表层土壤蔗糖酶和纤维素酶的活性增强,此时微生物加速对有机物的降解,至于其机理还有待进一步研究。

References:

- [1] Vitousek P M, Aber J D, Howarth R W, Likens G E, Matson P A, Schindler D W, Schlesinger W H, Tilman D G. Human alteration of the global nitrogen cycle: sources and consequences. *Ecological Applications*, 1997, 7(3): 737-750.
- [2] Galloway J N, Cowling E B. Reactive nitrogen and the world: 200 years of change. *Ambio*, 2002, 31(2): 64-71.
- [3] Galloway J N, Aber J D, Erisman J W, Seitzinger S P, Howarth R W, Cowling E B, Cosby B J. The nitrogen cascade. *Bioscience*, 2003, 53(4): 341-356.
- [4] Matson P, Lohse K A, Hall S J. The globalization of nitrogen deposition: consequences for terrestrial ecosystems. *Ambio*, 2002, 31(2): 113-119.
- [5] Mo J M, Brown S, Xue J H, Fang Y T, Li Z A. Response of litter decomposition to simulated N deposition in disturbed, rehabilitated and mature forests in subtropical China. *Plant and Soil*, 2006, 282(1/2): 135-151.
- [6] Kazda M. Indications of unbalanced nitrogen of Norway spruce status. *Plant and Soil*, 1990, 128(1): 97-101.
- [7] Jenkinson D S, Goulding K, Powelson D S. Nitrogen deposition and carbon sequestration. *Nature*, 1999, 400(6745): 629-630.
- [8] Post W M, Kwon K C. Soil carbon sequestration and land-use change: processes and potential. *Global Change Biology*, 2000, 6(3): 317-327.
- [9] Li Z P, Zhang T L, Chen B Y. Dynamics of soluble organic carbon and its relation to mineralization of soil organic carbon. *Acta Pedologica Sinica*, 2004, 41(4): 544-552.
- [10] Wang Q K, Wang S L, Yu X J, Zhang J, Liu Y X. Soil carbon mineralization potential and its effect on soil active organic carbon in evergreen broadleaved forest and Chinese fir plantation. *Chinese Journal of Ecology*, 2007, 26(12): 1918-1923.
- [11] Lorenz K, Lal R. Biogeochemical C and N cycles in urban soils. *Environment International*, 2009, 35(1): 1-8.
- [12] Chen C M, Xie Z B, Zhu J G. Effects of elevated atmospheric CO₂ concentration on soil carbon. *Chinese Journal of Eco-agriculture*, 2008, 16(1): 217-222.
- [13] Izauralde R C, Megill W B, Rosenberg N J. Carbon cost of applying nitrogen fertilizer. *Science*, 2000, 288(5467): 811-812.
- [14] Lijeroth E, Kuikman P, Vanveen J A. Carbon translocation to the rhizosphere of maize and wheat and influence on the turnover of native soil organic matter at different soil nitrogen levels. *Plant and Soil*, 1994, 161(2): 233-240.
- [15] Wagai R, Brye K R, Gower S T, Norman J M, Bundy L G. Land use and environmental factors influencing soil surface CO₂ flux and microbial biomass in natural and managed ecosystems in southern Wisconsin. *Soil Biology Biochemistry*, 1998, 30(12): 1501-1509.
- [16] Zhou L K. *Soil enzymology*. Beijing: Science Press, 1989.
- [17] Meng L J, Wu F Z. Advances on soil enzymes. *Journal of Northeast Agricultural University*, 2004, 35(5): 622-626.
- [18] Wu Z L, Hou B X. A brief history of cultivation and utilization of Chinese fir. *Forest Science and Technology (Special issue)*, 1995.
- [19] Fan H B, Huang Y Z. Ecophysiological mechanism underlying the impacts of nitrogen saturation in terrestrial ecosystems on plants. *Journal of Plant Physiology and Molecular Biology*, 2006, 32(4): 395-402.

- [20] Fan H B, Liu W F, Li Y Y, Liao Y C, Yuan Y H, Xu L. Tree growth and soil nutrients in response to nitrogen deposition in a subtropical Chinese fir plantation. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(11): 4630-4642.
- [21] Gao C F, Fan H B, Liu W F. Macronutrient concentrations and fluxes in the litterfall of Chinese fir in response to simulated nitrogen deposition. *Journal of Fujian College of Forestry*, 2009, 29(3): 237-242.
- [22] Fenn M E, Poth M A, Aber J D, Baron J S, Bormann B T, Johnson D W, Lemly A D, McNulty S G, Ryan D F, Stottlemeyer R. Nitrogen excess in North American ecosystems; predisposing factors, ecosystem response, and management strategies. *Ecological Applications*, 1998, 8(3): 706-733.
- [23] Wright R F, Rasmussen L. Introduction to the NITREX and EXMAN projects. *Forest Ecology and Management*, 1998, 101(1/3): 1-7.
- [24] Gundersen P, Emmett B A, Kjønnass O J, Koopmans C J, Tietema A. Impact of nitrogen deposition on nitrogen cycling in forest: a synthesis of NITREX data. *Forest Ecology and Management*, 1998, 101(1/3): 37-55.
- [25] Aber J, McDowell W, Nadelhoffer K, Magill A, Berntson G, Kamakea M, McNulty S, Currie W, Rustad L, Fernandez L. Nitrogen saturation in temperate forest ecosystems: Hypotheses revisited. *Bioscience*, 1998, 48(11): 921-934.
- [26] Lu R K. *Soil Agriculture Chemical Analysis Method*. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000.
- [27] Guan S M. *Soil Enzymes and Research Methods*. Beijing: Agriculture Press, 1986.
- [28] Robertson G P, Coleman D C, Bledsoe C S, Sollins P. *Standard Soil Methods for Long-Term Ecological Research*. New York: Oxford University Press, Inc, 1999: 258-271.
- [29] Schimel J P, Weintraub M N. The implications of exoenzyme activity on microbial carbon and nitrogen limitation in soil: a theoretical model. *Soil Biology and Biochemistry*, 2003, 35(4): 549-563.
- [30] Ross D J, Tate K R, Feltham C W. Microbial biomass, and C and N mineralization, in litter and mineral soil of adjacent montane ecosystems in a southern beech (*Nothofagus*) forest and a tussock grassland. *Soil Biology and Biochemistry*, 1996, 28(12): 1613-1620.
- [31] Scheu S, Parkinson D. Successional changes in microbial biomass, respiration and nutrient status during litter decomposition in an aspen and pine forest. *Biology and Fertility of Soils*, 1995, 19(4): 327-332.
- [32] Updegraff K, Pastor J, Bridgman S D, Johnston C A. Environmental and substrate controls over carbon and nitrogen mineralization in northern wetlands. *Ecological Applications*, 1995, 5(1): 151-163.
- [33] Franzluebbers A J, Haney R L, honeycutt C W, Arshad M A, Schomberg H H, Hons F M. Climatic influences on active fractions of soil organic matter. *Soil Biology and Biochemistry*, 2001, 33(7/8): 1103-1111.
- [34] Weintraub M N, Schimel J P. Interactions between carbon and nitrogen mineralization and soil organic matter chemistry in arctic tundra soils. *Ecosystems*, 2003, 6(2): 129-143.
- [35] Mansson K F, Falkengren-Grerup U. The effect of nitrogen deposition on nitrification, carbon and nitrogen mineralization and litter C:N ratios in oak (*Quercus robur* L.) forests. *Forest Ecology and Management*, 2003, 179(1/3): 455-467.
- [36] Neff J C, Townsend A R, Gleixner G, Lehman S J, Turnbull J, Bowman W D. Variable effects of nitrogen additions on the stability and turnover of soil carbon. *Letters to Nature*, 2002, 419: 915-917.
- [37] Stapleton L M, Crout N M J, Säwatröm C, Marshall W A, Poulton P R, Tye A M, Laybourn-Parry J. Microbial carbon dynamics in nitrogen amended Arctic tundra soil: measurement and model testing. *Soil Biology and Biochemistry*, 2005, 37(11): 2088-2098.
- [38] Wang W X, Ding G A. The geographical distribution of ion concentration in precipitation over China. *Research of Environmental Sciences*, 1997, 10(2): 1-6.
- [39] Wang X K, Bai Y Y, Ouyang Z Y, Miao H. Missing sink in global carbon cycle and its causes. *Acta Ecologica Sinica*, 2002, 22(1): 94-103.
- [40] Willian D B, Zheng X. Biotic controls over ecosystem response to environmental change in alpine tundra of the Rocky Mountains. *Ambio*, 2000, 29(7): 396-400.
- [41] Yang W Q, Wang K Y. Advances on soil enzymology. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2002, 8(5): 564-570.
- [42] Taylor J P, Wilson B, Mills M S, Burns R G. Comparison of microbial numbers and enzymatic activities in surface soils and subsoils using various techniques. *Soil Biology and Biochemistry*, 2002, 34(3): 387-401.
- [43] Song X G, Hu T X, Xian J R, Xiao C L. Soil enzyme activities and its response to simulated nitrogen deposition in an evergreen broad-leaved forest, southern Sichuan. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(3): 1234-1240.
- [44] Lv G H, Zhou G S, Zhao X L, Zhou L. Advance in relation of soil C and N and soil enzymes. *Liaoning Meteorological Quarterly*, 2005, (2): 6-8.
- [45] Berg B, Matzner E. Effect of N deposition on decomposition of plant litter and soil organic matter in forest systems. *Environmental Review*, 1997, 5: 1-25.
- [46] Zhao Y T, Li X F, Han S J, Hu Y L. Soil enzyme activities under two forest types as affected by different levels of nitrogen deposition. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2008, 19(12): 2769-2773.
- [47] Tu L H, Hu T X, Zhang J, Li R H, Dai H Z, Lou S H, Xiang Y B, Huang L H. Soil enzyme activities in a *Pleioblastus amurus* plantation in rainy area of west China under simulated nitrogen deposition. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2009, 20(12): 2943-2948.

- [48] Liu J G, Zhang W, Li Y B, Sun Y Y, Bian X M. Effects of long-term continuous cropping system of cotton on soil physical-chemical properties and activities of soil enzyme in Oasis in Xinjiang. *Scientia Agricultura Sinica*, 2009, 42(2): 725-733.
- [49] Carreiro M M, Sinsabaugh R L, Repert D A, Parkhurst D F. Microbial enzyme shifts explain litter decay responses to simulated nitrogen deposition. *Ecology*, 2000, 81(9): 2359-2365.
- [50] Gallo M, Amonette R, Lauber C, Sinsabaugh R L, Zak D R. Microbial community structure and oxidative enzyme activity in nitrogen-amended north temperate forest soils. *Microbial Ecology*, 2004, 8(2): 218-229.
- [51] DeForest J L, Zak D R, Pregitzer K S, Burton A J. Atmospheric nitrate deposition, microbial community composition, and enzyme activity in northern hardwood forests. *Soil Science Society of America Journal*, 2004, 68(1): 132-138.
- [52] Zeglin L H, Stursova M, Sinsabaugh R L, Collins S L. Microbial responses to nitrogen addition in three contrasting grassland ecosystems. *Oecologia*, 2007, 154(2): 349-359.
- [53] Frey S D, Knorr M, Parrent J L, Simpson R T. Chronic nitrogen enrichment affects the structure and function of the soil microbial community in temperate hardwood and pine forests. *Forest Ecology and Management*, 2004, 196(1): 159-171.
- [54] Debosz K, Rasmussen P H, Pedersen A R. Temporal variations in microbial biomass C and cellulolytic enzyme activity in arable soils: effects of organic matter input. *Applied Soil Ecology*, 1999, 13(3): 209-218.
- [55] Taylor J P, Wilson B, Mills M S, Burns R G. Comparison of microbial numbers and enzymatic activities in surface and subsoils using various techniques. *Soil Biology and Biochemistry*, 2002, 34(3): 387-401.
- [56] Wang G H, Jin J, Han X Z, Liu J D, Liu X B. Effects of different land management practices on black soil microbial biomass C and enzymes activities. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2007, 18(6): 1275-1280.
- [57] Vázquez-Murrieta M S, Migueles-Garduño I, Franco-Hernández O, Govaerts B, Dendooven L. C and N mineralization and microbial biomass in heavy-metal contaminated soil. *European Journal of Soil Biology*, 2006, 42(2): 89-98.

参考文献:

- [9] 李忠佩, 张桃林, 陈碧云. 可溶性有机碳的含量动态及其与土壤有机碳矿化的关系. *土壤学报*, 2004, 41(4): 544-552.
- [10] 王清奎, 汪思龙, 于小军, 张剑, 刘燕新. 常绿阔叶林与杉木林的土壤碳矿化潜力及其对土壤活性有机碳的影响. *生态学杂志*, 2007, 26(12): 1918-1923.
- [12] 陈春梅, 谢祖彬, 朱建国. 大气 CO₂ 浓度升高对土壤碳库的影响. *中国生态农业学报*, 2008, 16(1): 217-222.
- [16] 周礼恺. *土壤酶学*. 北京: 科学出版社, 1989.
- [17] 孟立君, 吴凤芝. 土壤酶研究进展. *东北农业大学学报*, 2004, 35(5): 622-626.
- [18] 吴中伦, 侯伯鑫. 中国杉木栽培利用简史. *林业科技通讯(专刊)*, 1995.
- [19] 樊后保, 黄玉梓. 陆地生态系统氮饱和对植物影响的生理生态机制. *植物生理与分子生物学学报*, 2006, 32(4): 395-402.
- [20] 樊后保, 刘文飞, 李燕燕, 廖迎春, 袁颖红, 徐蕾. 亚热带杉木 (*Cunninghamia lanceolata*) 人工林生长与土壤养分对氮沉降的响应. *生态学报*, 2007, 27(11): 4630-4642.
- [21] 高春芬, 樊后保, 刘文飞. 杉木人工林凋落物大量元素含量与通量对模拟氮沉降的响应. *福建林学院学报*, 2009, 29(3): 237-242.
- [26] 鲁如坤. *土壤农业化学分析方法*. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- [27] 关松荫. *土壤酶及其研究方法*. 北京: 农业出版社, 1986.
- [38] 王兴文, 丁国安. 中国降水酸度和离子浓度的时空分布. *环境科学研究*, 1997, 10(2): 1-7.
- [39] 王效科, 白艳莹, 欧阳志云, 苗鸿. 全球碳循环中的失汇及其形成原因. *生态学报*, 2002, 22(1): 94-103.
- [40] William D B, 郑萧. 落基山脉高山冻原生态系统对环境变化反应的生物控制. *人类环境杂志*, 2000, 29(7): 396-400.
- [41] 杨万勤, 王开运. 土壤酶研究动态与展望. *应用与环境生物学报*, 2002, 8(5): 564-570.
- [43] 宋学贵, 胡庭兴, 鲜骏仁, 肖春莲. 川南天然常绿阔叶林土壤酶活性特征及其对模拟 N 沉降的响应. *生态学报*, 2009, 29(3): 1234-1240.
- [44] 吕国红, 周广胜, 赵先丽, 周莉. 土壤碳氮与土壤酶相关性研究进展. *辽宁气象*, 2005, (2): 6-8.
- [46] 赵玉涛, 李雪峰, 韩士杰, 胡艳玲. 不同氮沉降水平下两种林型的主要土壤酶活性. *应用生态学报*, 2008, 19(12): 2769-2773.
- [47] 涂利华, 胡庭兴, 张健, 李仁洪, 戴洪忠, 雒守华, 向元彬, 黄立华. 华西南屏区苦竹林土壤酶活性对模拟氮沉降的响应. *应用生态学报*, 2009, 20(12): 2943-2948.
- [48] 刘建国, 张伟, 李彦斌, 孙艳艳, 卞新民. 新疆绿洲棉花长期连作对土壤理化性状与土壤酶活性的影响. *中国农业科学*, 2009, 42(2): 725-733.
- [56] 王光华, 金剑, 韩晓增, 刘居东, 刘晓冰. 不同土地管理方式对黑土土壤微生物量碳和酶活性的影响. *应用生态学报*, 2007, 18(6): 1275-1280.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol. 32, No. 2 January, 2012 (Semimonthly)

CONTENTS

Dynamics of demersal fish species diversity and biomass of dominant species in autumn in the Beibu Gulf, northwestern South China Sea	WANG Xuehui, QIU Yongsong, DU Feiyan, et al (333)
Spatial variation in species richness of birds and mammals in mainland China	DING Jingjing, LIU Dingzhen, LI Chunwang, et al (343)
Comparative study on learning behavior and electroantennogram responses in two geographic races of <i>Cotesia glomerata</i>	WANG Guohong, LIU Yong, GE Feng, et al (351)
Biological characteristics and habitat requirements of <i>Parnassius imperator</i> (Lepidoptera: Parnassidae)	FANG Jianhui, LUO Youqing, NIU Ben, et al (361)
Annual variability in biological characteristics of <i>Illex argentinus</i> in the southwest Atlantic Ocean	FANG Zhou, LU Huajie, CHEN Xinjun, et al (371)
The impact of run-of stream dams on benthic macroinvertebrate assemblages in urban streams	HAN Minghua, YU Haiyan, ZHOU Bin, et al (380)
Effect of suspended sediment on the feeding physiology of <i>Pinctada martensii</i> in laboratory	LI Zhimin, SHEN Yuchun, YU Nantao, et al (386)
Potential nutrient limitation of phytoplankton growth in the Western and Central Pacific Ocean	XU Yanqing, CHEN Jianfang, GAO Shengquan, et al (394)
Ingestion of selected HAB-forming dinoflagellates	ZHANG Qingchun, YU Rencheng, SONG Jingjing, et al (402)
Formation of aggregation by <i>Phaeocystis globosa</i> (Prymnesiophyceae) in response to high grazing pressure	WANG Xiaodong, WANG Yan (414)
Growth and reproduction of the green macroalga <i>Ulva prolifera</i>	ZHANG Bixin, WANG Jianzhu, WANG Yifu, et al (421)
Screening of growth decline related genes from <i>Alexandrium catenella</i>	ZHONG Jie, SUI Zhenghong, WANG Chunyan, et al (431)
Analysis of inherent optical properties of Lake Taihu in spring and its influence on the change of remote sensing reflectance	LIU Zhonghua, LI Yunmei, LU Heng, et al (438)
Neural network modeling of the eutrophication mechanism in Lake Chenghai and corresponding scenario analysis	ZOU Rui, DONG Yunxian, ZHANG Zhenzhen, et al (448)
The compensatory growth of shrubby <i>Pinus thunbergii</i> response to the boring stress in sandy coast	ZHOU Zhen, LI Chuanrong, XU Jingwei, et al (457)
Selected body temperature and thermal tolerance of tadpoles of two frog species (<i>Fejervarya limnocharis</i> and <i>Microhyla ornata</i>) acclimated under different thermal conditions	SHI Linqiang, ZHAO Lihua, MA Xiaohao, et al (465)
Effects of landscape structure and key landscape factors on aphids-parasitoids-hyper parasitoids populations in wheat fields	ZHAO Zihua, WANG Ying, HE Dahan, et al (472)
Effects of cadmium on lipid peroxidation and ATPase activity of plasma membrane from Chinese kale (<i>Brassica alboglabra</i> Bailey) roots	ZHENG Aizhen (483)
Effects of ginger aqueous extract on soil enzyme activity, microbial community structure and soil nutrient content in the rhizosphere soil of ginger seedlings	HAN Chunmei, LI Chunlong, YE Shaoping, et al (489)
Manganese tolerance and accumulation in mycelia of <i>Cordyceps kyuusyuensis</i>	LUO Yi, CHENG Xianhao, ZHANG Congcong, et al (499)
Influence of oxytetracycline exposure on antibiotic resistant bacteria and enzyme activities in wheat rhizosphere soil	ZHANG Hao, ZHANG Lilan, WANG Jia, et al (508)
Effects of elevated nitrogen deposition on soil organic carbon mineralization and soil enzyme activities in a Chinese fir plantation	SHEN Fangfang, YUAN Yinghong, FAN Houbao, et al (517)
Differences in clonal growth between female and male plants of <i>Rhus typhina</i> Linn. and their diurnal changes in photosynthesis and chlorophyll fluorescence	ZHANG Mingru, WEN Guosheng, ZHANG Jin, et al (528)
Soil water holding capacity under four typical ecosystems in Wuyunjie Nature Reserve of Hunan Province	PAN Chunxiang, LI Yuyuan, PENG Yi, et al (538)
The effect of different land use patterns on soil properties in alpine areas of eastern Qilian Mountains	ZHAO Jinmei, ZHANG Degang, LIU Changzhong, et al (548)
Responses of soil macro-fauna to land desertification in sandy grassland	LIU Rentao, ZHAO Halin (557)
Characteristics of cultivable microbial community number and structure at the southeast edge of Tengger Desert	ZHANG Wei, ZHANG Gaosen, LIU Guangxiu, et al (567)
Physiological and ecological responses of maize to different severities of desertification in the Southern Taramakan desert	LI Lei, LI Xiangyi, LIN Lisha, WANG Yingju, et al (578)
Characterization of caloric value in fifteen plant species in <i>Leymus chinensis</i> steppe in Xilin River Basin, Inner Mongolia	GAO Kai, XIE Zhongbing, XU Sutie, et al (588)
Spatial pattern responses of <i>Achnatherum splendens</i> to environmental stress in different density levels	ZHANG Mingjuan, LIU Maosong, XU Chi, et al (595)
Effects of environmental factors on species distribution and diversity in an <i>Abies fargesii</i> - <i>Betula utilis</i> mixed forest	REN Xuemin, YANG Gaihe, WANG Dexiang, et al (605)
Effects of alginate cerium complexes on ascorbate- glutathione cycle in spinach leaves under chlorpyrifos stress	LUAN Xia, CHEN Zhende, WANG Dongfeng, et al (614)
Analysis on spatiotemporal changes of urban thermal landscape pattern in the context of urbanisation: a case study of Xiamen City	HUANG Jucong, ZHAO Xiaofeng, TANG Lina, et al (622)
The analysis of the green vegetation cover change in western Sichuan based on GIS and Remote sensing	YANG Cunjian, ZHAO Zijian, REN Xiaolan, et al (632)
An inventory of BVOC emissions for a subtropical urban-rural complex: Greater Taizhou Area	CHANG Jie, REN Yuan, SHI Yan, et al (641)
Scientific Note	
Litter decomposition and nutrient dynamics of <i>Carex lasiocapa</i> under different water conditions	HOU Cuicui, SONG Changchun, LI Yingchen, et al (650)
Nest-box color preference and reproductive success of great tit	ZHANG Keqin, DENG Qiuxiang, Justin Liu, et al (659)

《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 2 期 (2012 年 1 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 32 No. 2 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:100717	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:100717 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