

# 亚热带杉木人工林下植物多样性对氮沉降的响应

吴建平<sup>1</sup>, 刘文飞<sup>1</sup>, 袁颖红<sup>1</sup>, 黄荣珍<sup>1</sup>, 樊后保<sup>1</sup>, 廖迎春<sup>1</sup>, 林文龙<sup>2</sup>

(1. 南昌工程学院 生态与环境科学研究所, 江西 南昌 330099; 2. 福建沙县官庄国有林场, 福建 沙县 365504)

**摘要:** 基于野外长期控制试验, 研究了氮沉降 7 a 后人工杉木林下植物多样性的响应。试验处理分为  $N_0$  [(Control), 0 kg/(hm<sup>2</sup> · a)];  $N_1$  [60 kg/(hm<sup>2</sup> · a)];  $N_2$  [120 kg/(hm<sup>2</sup> · a)];  $N_3$  [240 kg/(hm<sup>2</sup> · a)]。林下植物中共发现 51 种植物, 隶属 34 科, 45 属。随着氮沉降的增加, 呈现出植物  $\alpha$  多样性指数减少, 而  $\beta_{as}$  多样性指数增加的趋势, 群落相似性指数明显降低。去趋势对应分析排序 (detrended correspondence analysis, DCA) 结果表明, 氮沉降改变了植物群落结构。其中, 菝葜和沿海紫金牛在 4 个处理中均有发现, 为广适种。毛冬青、粗叶榕、毛花连蕊茶、毛枝连蕊茶、香附子这几种植物在  $N_0$ — $N_2$  处理中有发现, 属于较耐受种。茅莓、羊乳、羊角藤、琴叶榕、紫麻、杜虹花、乌菝葜、海金莎均为一般耐受种, 在  $N_0$  和  $N_1$  处理中有发现。另外, 黄瑞木、黄樟等 16 种植物可能为敏感种, 仅可在  $N_0$  处理中发现。总之, 亚热带森林植物多样性受到了氮沉降增加的不利影响, 应针对某些濒危植物种类实施合理的保育措施。

**关键词:** 氮沉降; 生物多样性; 杉木人工林; 林下植物

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2014)04-0087-04

中图分类号: S718.5

DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2014.04.030

## Response of Understory Plant Diversity to Nitrogen Deposition in Subtropical Chinese Fir Plantation Forest

WU Jian-ping<sup>1</sup>, LIU Wen-fei<sup>1</sup>, YUAN Ying-hong<sup>1</sup>,

HUANG Rong-zhen<sup>1</sup>, FAN Hou-bao<sup>1</sup>, LIAO Ying-chun<sup>1</sup>, LIN Wen-long<sup>2</sup>

(1. Institute of Ecology & Environmental Science, Nanchang Institute of Technology, Nanchang, Jiangxi 330099, China; 2. Shaxian State Forest Farm of Fujian Province, Shaxian, Fujian 365504, China)

**Abstract:** Based on the long-term field manipulation experiment, the response of understory plants to 7 years of nitrogen deposition in a Chinese fir (*Cunninghamia lanceolata*) forest was investigated. The quantities of experimental N added and treatment codes were  $N_0$  [(Control); 0 kg/(hm<sup>2</sup> · a)];  $N_1$  [60 kg/(hm<sup>2</sup> · a)];  $N_2$  [120 kg/(hm<sup>2</sup> · a)];  $N_3$  [240 kg/(hm<sup>2</sup> · a)]. The result showed that the totally 51 species belong to 34 families, 45 genera. Along with the increase of nitrogen deposition, plant species, families and genera were all decreased. In addition, both Shannon—Weiner index and Simpson diversity index reduced, but Whittaker index increased with nitrogen deposition increase. Furthermore, Sorenson similarity index was decreased obviously. Detrended correspondence analysis (DCA) indicated that nitrogen deposition changed plant community composition. Plant species *Smilax china* and *Ardisia punctata* were found in the plots of four treatments, which would be the popular species. Plant species *Ilex asprella*, *Ficus hirta*, *Camellia fraternal*, *Camellia trichoclada* and *Rhizoma cyperi* were found in  $N_0$ — $N_2$  plots, which would be the resistant species. While *Rubus parvifolius*, *Codonopsis lanceolata*, *Morinda umbellata*, *Ficus lyrata*, *Oreocnide frutescens*, *Calli-carpa formosana*, *Herba cayratia* and *Lygodium japonicum* were found in  $N_0$  and  $N_1$  plots, which would be less resistant species. Other 16 species such as *Adinandra millettii* and *Cinnamomum parthenoxylon* were only found in  $N_0$  plots, which would be the sensitive species. In conclusion, because plant diversity in the subtropical forest was negatively affected by nitrogen deposition, more attention should be paid to the plant conservation.

**Keywords:** nitrogen deposition; biodiversity; Chinese fir (*Cunninghamia lanceolata*) plantation forests; understory plants

收稿日期: 2013-09-18

修回日期: 2013-09-23

资助项目: 国家自然科学基金项目“杉木林下植物—土壤微生物功能群相互关系对氮沉降的响应与适应”(31200406); 江西省自然科学基金项目(20122BAB204021); 江西省教育厅科技计划项目(KJLD12097; GJJ14744)。

作者简介: 吴建平(1984—), 男(汉族), 江西省临川县人, 博士, 讲师, 主要从事恢复生态学研究。E-mail: jpwu@nit.edu.cn。

通信作者: 樊后保(1965—), 男(汉族), 江西省修水县人, 博士, 教授, 主要从事森林生态学研究。E-mail: hbfan@nit.edu.cn。

目前,大气氮沉降增加现象在全球范围内普遍发生,已成为全球变化的重要研究内容<sup>[1]</sup>。据 IPCC 第 4 次报告显示,在过去的一个世纪中,氮沉降量增加了 3~5 倍<sup>[2]</sup>,由于农林产业的氮使用量在短期内将维持现状,全球氮沉降量在未来一段时期可能继续增加<sup>[3]</sup>。氮沉降的增加对生态系统的功能和过程产生直接或间接的影响。在温带森林长期氮沉降试验结果显示较低量的氮沉降有利于植物生物量的积累,但在高氮处理下 $[108 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})]$ ,不利于植物的生长,氮沉降的增加在短期内对植物生物量的积累有促进作用,从长时期的角度又可能会对植物的生长产生一个负作用<sup>[4]</sup>。众多研究<sup>[5-7]</sup>表明,在温带和寒带地区都有报道氮沉降对植物多样性影响的报道。对于同时受 P 元素限制的区域而言,氮沉降的增加还可能促进植物对 P 的吸收,从而在一定程度上减少植物对 P 的限制<sup>[8]</sup>,在我国南方地区,由于工业的发展,氮沉降的量普遍很大,但是氮沉降对生物多样性影响还不甚清楚。在对热带成熟森林和次生林的研究中,Lu 等<sup>[9-10]</sup>研究表明,氮沉降对植物多样性的影响不仅取决于氮沉降的量,还受到土地利用方式的影响,同时高的氮沉降通过诱导土壤酸化效应,引起“富氮”森林生态系统林下植物功能群显著减少。基于生物多样性与其所能提供生态系统服务功能的密切关系,研究氮沉降对生态系统植物生长/生存的影响有利于科学认识环境变化背景下植物多样性丧失的风险。

我国是森林资源大国,全国森林面积达  $1.95 \times 10^8 \text{ hm}^2$ ,占国土面积的 20.36%,人工林面积约占 1/3,其中杉木人工林占我国人工林总面积的 18.17%,在各造林树种面积中位列第 3<sup>[11]</sup>。本研究以我国大面积种植的杉木人工林为研究对象,利用自 2003 年建立起来的模拟氮沉降野外控制实验平台,通过实地调查研究了不同氮沉降水平处理 7 a 后植物多样性状况,以期丰富氮沉降对生物多样性影响的基础数据,为合理的植物保育策略提供科学依据。

## 1 研究区域及研究方法

### 1.1 样地设置和调查

野外试验样地位于福建省沙县官庄国有林场(东经  $117^\circ 43' 29''$ ,北纬  $26^\circ 30' 47''$ ),海拔 200 m,属于亚热带季风气候,年平均气温  $18.8 \sim 19.6 \text{ }^\circ\text{C}$ ,年平均降雨量  $1\ 606 \sim 1\ 650 \text{ mm}$ ,无霜期 271 d。土壤类型为山地红壤。试验林分为 1992 年由官庄林场统一种植的杉木人工林,总造林面积为  $5\ 173 \text{ hm}^2$ 。2003 年,在 12 a 生的杉木人工林中随机设置立地条件基本相

似的 12 块  $20 \text{ m} \times 20 \text{ m}$  的固定样地。氮沉降量按氮施用量的多少分 4 种处理,即  $N_0$  [(Control),  $0 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ ];  $N_1$  [ $60 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ ];  $N_2$  [ $120 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ ];  $N_3$  [ $240 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ ]。使用  $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$  作为氮源,每月以溶液的形式在样地喷洒, $N_0$  处理喷洒相同量的水<sup>[12]</sup>。每个处理重复 3 次,4 个处理总计 12 块固定样地,试验林面积约为  $6\ 000 \text{ m}^2$ 。本研究利用长期野外模拟氮沉降试验平台,于 2011 年 9 月在每个样方中设置 1 个  $5 \text{ m} \times 5 \text{ m}$  的调查样方,对高于 5 cm 的灌木和草本进行记录种名,高度和冠幅。

### 1.2 生物多样性计算

根据应用广泛的物种多样性的测度指数来分析植物多样性,以  $\alpha$  多样性指数(辛普森和香农—威纳多样性指数); $\beta$  多样性指数(Whittaker 指数)和 Sorenson 相似性指数来分析<sup>[13]</sup>。

#### (1) $\alpha$ 多样性指数

辛普森多样性指数(Simpson)  $= 1 - \sum P_i^2$

香农—威纳多样性指数(Shannon—Weiner)  $= -\sum P_i \ln P_i$

式中: $P_i$ ——种的个体数占群落中总个体数的比例。

#### (2) $\beta$ 多样性指数

Whittaker 指数:  $\beta_{us} = S/m_a - 1$

式中: $S$ ——所研究系统中记录的物种总数; $m_a$ ——各样方中的平均物种数。

#### (3) Sorenson 相似性指数

$C_s = 2j/(a+b)$

式中: $j$ ——两个群落的共有种数; $a, b$ ——群落 A 和 B 的物种数。

### 1.3 群落结构分析

采用去趋势对应分析(detrended correspondence analysis, DCA)排序功能对 4 种氮沉降水平下的植物群落进行排序,软件为 Canoco 4.5 版本。

## 2 结果与分析

结果表明,所有处理下林下植物共发现 51 种植物,隶属 34 科,45 属。经过 7 a 的氮沉降处理后,植物在  $N_0, N_1, N_2$  和  $N_3$  处理下分别发现 24, 21, 14 和 9 科; 28, 25, 16 和 9 属; 34, 29, 17 和 10 种,呈现出随氮沉降量增加而植物种类明显下降的趋势(图 1)。

图 2 表明,香农威纳指数在 4 个处理中分别为 2.74, 2.50, 1.81 和 1.69; 辛普森多样性指数分别为 0.92, 0.88, 0.78 和 0.78, 都表现出随氮沉降增加而减少的趋势。图 3 表明,  $\beta_{us}$  多样性指数表现为随氮沉降量增加而增加的趋势, 在  $N_0, N_1, N_2$  和  $N_3$  中分

别为 0.56, 0.83, 2.12 和 4.30。不同处理样方间物种相似性指数表现为:  $N_0$  和  $N_1, N_2, N_3$  间分别为 0.51, 0.31 和 0.09, 表现出显著的下降;  $N_1$  与  $N_2, N_3$  之间的相似性指数分别为 0.61 和 0.26, 同样表现出减少的趋势;  $N_2$  和  $N_3$  间的相似性指数为 0.30 (图 4)。去趋势对应分析 (DCA 排序, 图 5) 表明, 第一排序轴解释了 27.8% 的变异, 第二轴解释了 20.0% 的变异。其中, 第一轴反映了在不同氮沉降水平下植物群落结构的变化, 随着氮沉降水平的增加, 植物的变异程度加大, 以  $N_0$  和  $N_3$  之间差异最大,  $N_1$  和  $N_2$  之间有所交集。

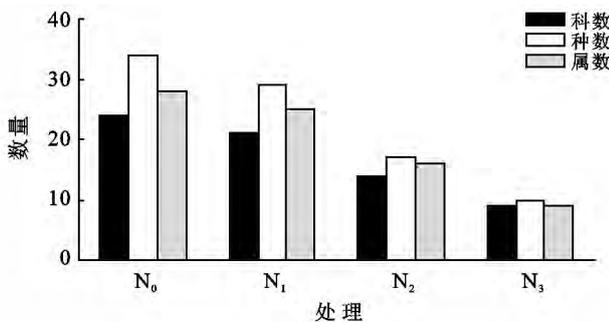


图 1 不同处理下植物群落的科属种数量

注: 氮沉降量按氮施用量的多少分 4 种处理, 即  $N_0$  [(Control), 0 kg/( $hm^2 \cdot a$ )];  $N_1$  [60 kg/( $hm^2 \cdot a$ )];  $N_2$  [120 kg/( $hm^2 \cdot a$ )];  $N_3$  [240 kg/( $hm^2 \cdot a$ )]. 下同。

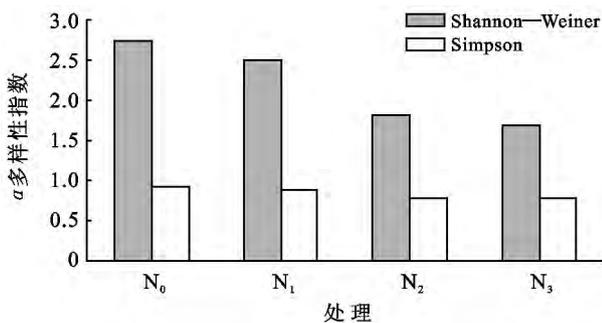


图 2 不同氮沉降水平下植物群落的 Shannon-Weiner 和 Simpson 多样性指数

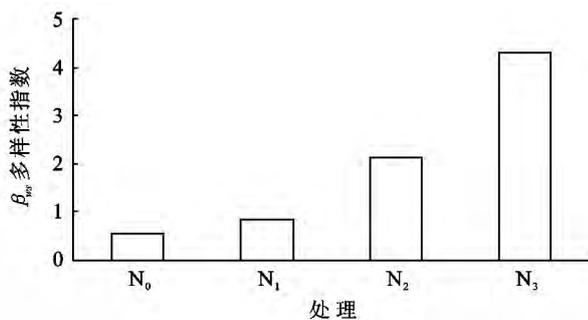


图 3 不同氮沉降水平下植物群落的  $\beta_{\text{多样性}}$  多样性指数

根据表 1 可知, 在不同的处理间可能出现的共有植物种为 25 种, 分布于 22 科。其中, 菝葜 (*Smilax*

*china*) 和沿海紫金牛 (*Ardisia punctata*) 在 4 个处理中均发现。毛冬青 (*Ilex pubescens*)、粗叶榕 (*Ficus hirta*)、毛花连蕊茶 (*Camellia fraterna*)、毛枝连蕊茶 (*Camellia trichoclada*)、香附子 (*Cyperus rotundus*) 在  $N_0$  和  $N_2$  中均有发现。茅莓 (*Rubus parvifolius*)、羊乳 (*Codonopsis lanceolata*)、羊角藤 (*Morinda umbellata*)、琴叶榕 (*Ficus lyrata*)、紫麻 (*Oreocnide frutescens*)、杜虹花 (*Callicarpa formosana*)、乌菝葜 (*Cayratia japonica*)、海金沙 (*Lygodium japonicum*) 在  $N_0$  和  $N_1$  中发现。

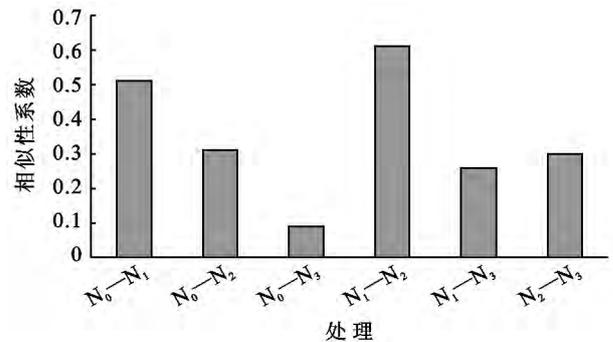


图 4 不同氮沉降水平之间的相似性指数

表 1 不同氮沉降处理下的共有植物种

序号	种名	$N_0$	$N_1$	$N_2$	$N_3$
1	菝葜	✓	✓	✓	✓
2	沿海紫金牛	✓	✓	✓	✓
3	毛冬青	✓	✓	✓	
4	粗叶榕	✓	✓	✓	
5	毛花连蕊茶	✓	✓	✓	
6	毛枝连蕊茶	✓	✓	✓	
7	香附子	✓	✓	✓	
8	茅莓	✓	✓		
9	羊乳	✓	✓		
10	羊角藤	✓	✓		
11	琴叶榕	✓	✓		
12	紫麻	✓	✓		
13	杜虹花	✓	✓		
14	乌菝葜	✓	✓		
15	海金沙	✓	✓		
16	醉香含笑	✓	✓		✓
17	野柿	✓		✓	
18	野含笑		✓	✓	✓
19	闽楠		✓	✓	✓
20	金线吊乌龟		✓		✓
21	山姜		✓	✓	
22	栲树		✓	✓	
23	苦槠		✓	✓	
24	粉单竹		✓	✓	
25	鳞毛蕨		✓	✓	

注: ① ✓ 说明该处理中有此物种出现。② 种植物学名为: 粉单竹 (*Bambusa chungii*), 栲树 (*Castanopsis hystrix*), 醉香含笑 (*Michelia macclurei*), 野柿 (*Diospyros kaki var. sylvestris*), 野含笑 (*Michelia skinneriana*), 闽楠 (*Phoebe bournei*), 金线吊乌龟 (*Ardisia punctata*)。

另外,黄瑞木(*Adinandra millettii*)、黄樟(*Cin-namomum parthenoxylon*)等 16 种植物仅在  $N_0$  中发现。野含笑、闽楠、山姜(*Alpinia japonica*)、栲树、苦槠(*Castanopsis sclerophylla*)、粉单竹、鳞毛蕨(*Arachniodes hasseltii*)在  $N_1, N_2$  或  $N_3$  中发现,在  $N_0$  中没有发现。不同的处理间特有种有所不同, $N_0$  处理下有 16 种,而  $N_1, N_2$  和  $N_3$  分别为 4, 2 和 4 种(表 2)。

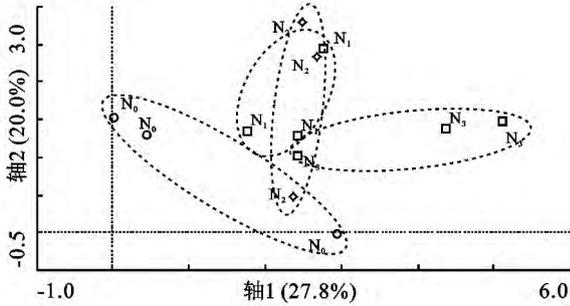


图 5 去趋势对应分析(DCA)排序图

表 2 不同氮沉降处理下的特有植物种类

$N_0$ 处理	$N_1$ 处理	$N_2$ 处理	$N_3$ 处理
黄瑞木	草珊瑚	八瓣糙果茶	幌伞枫
黄樟	耳蕨	鸭跖草	乌桕
南五味子	蛇根草		五叶木通
拟赤杨	杜茎山		中华猕猴桃
牛膝			
枇杷叶紫珠			
三叶崖爬藤			
山葡萄			
薯蓣			
台湾艾纳香			
悬钩子			
鱼腥草			
中华淡竹叶			
紫背天葵			
白花苦灯笼			
白英			

注:表中各植物学名分别为:南五味子(*Kadsura japonica*),拟赤杨(*Alniphyllum fortunei*),牛膝(*Achyranthes bidentata*),枇杷叶紫珠(*Callicarpa kochiana*),三叶崖爬藤(*Tetrastigma hemsleyanum*),山葡萄(*Vitis amurensis*),薯蓣(*Dioscorea opposita*),台湾艾纳香(*Blumea formosana*),悬钩子(*Rubus corchorifolius*),鱼腥草(*Houttuynia cordata*),中华淡竹叶(*Lophatherum sinense*),紫背天葵(*Gynura bicolor*),白花苦灯笼(*Tarenna mollissima*),白英(*Solanum lyratum*),八瓣糙果茶(*Camellia octopetala*),幌伞枫(*Heteropanax fragrans*),鸭跖草(*Commelina communis*),乌桕(*Sapium sebiferum*),五叶木通(*Akebia quinata*),中华猕猴桃(*Actinidia chinensis*),草珊瑚(*Sarcandra glabra*),耳蕨(*Polystichum lonchitis*),蛇根草(*Ophiorrhiza japonica*),杜茎山(*Maesa japonica*)。

### 3 结论

本研究结果表明,随着氮沉降的增加,植物多样性表现出依次减少的趋势,说明氮沉降对亚热带杉木人工林生物多样性有不利影响。我国亚热带区域是我国经济发展的重要组成部分,在工业排放的氮和农业施用的氮等共同作用下,大气氮沉降的量维持在一个高位水平,氮沉降不仅影响了生态系统的生产力和碳吸存,对生物多样性的影响也日益趋现。在鼎湖山的成熟森林中氮沉降试验研究表明,低到中等程度氮沉降( $<100 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ )处理对热带成熟森林多样性影响不大,而在高的氮沉降处理下( $150 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ )植物多样性降低,并且在不同的森林类型间表现出不同的响应<sup>[9-10]</sup>。

本试验中植物多样性减少的生理生态机制还需要进一步的研究来验证。在植物群落组成上,DCA排序分析也反映出沿氮沉降梯度植物群落结构发生变化,表明整个植物群落的稳定性受到氮沉降的影响,这与植物多样性和相似性指数的结果一致。

对于在不同处理样方中出现的植物物种,本研究认为在 4 个氮沉降处理都出现的种为广适种,对不同氮沉降水平都能适应;出现在  $N_0, N_1$  和  $N_2$  处理中的共同种,定义为较耐氮种;出现在  $N_0$  和  $N_1$  处理的种为一般耐受种;而只出现在  $N_0$  种,为对氮沉降敏感种。在本研究中,菝葜和沿海紫金牛为广布种,在 4 个氮沉降水平下均有发现。其它的种类表现出一定的动态,表现为不同植物对氮的利用效率和响应程度的差异。另外,发现有些植物种类在  $N_1, N_2$  或者  $N_3$  处理中出现,而在  $N_0$  处理中没有出现的种类。一方面,这可能与植物分布的随机性具有一定关系;另一方面,这些植物应该是受氮限制的植物种类。本研究将试图通过开展种子雨和土壤种子库的试验来部分解释这些差异来源。 $\beta_{\text{ws}}$ 多样性的值在氮沉降处理后显著增加,也表明植物群落组成在氮沉降处理后明显改变,不同处理间共有种的减少。

总之,随着氮沉降量的增加,植物多样性呈现减少的趋势,处理间植物群落组成的差异增大而相似性指数明显降低。

#### [参 考 文 献]

[1] Davidson E A. The contribution of manure and fertilizer nitrogen to atmospheric nitrous oxide since 1860 [J]. Nature Geoscience, 2009, 2(9): 659-662.  
 [2] IPCC. Climate Change 2007: The Physical Science Basis: Summary for Policy Makers [R]. UK: Cambridge University Press, Cambridge, 2007.

(下转第 98 页)

- system using an eco-physiological model for interplant competition [J]. *Agricultural Systems*, 2002, 73(2): 173-203.
- [25] Zhang Lizhen, van der Werf Wopke, Zhang Siping, et al. Growth, yield and quality of wheat and cotton in relay strip intercropping systems [J]. *Field Crops Research*, 2007, 103(3): 178-188.
- [26] 董宛麟, 张立祯, 于洋, 等. 向日葵和马铃薯间作模式的生产力及水分利用[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(18): 127-133.
- [27] 周绍松, 李永梅, 周敏, 等. 小麦、大麦与蚕豆间作对耗水量和水分利用率的影响[J]. *西南农业学报*, 2008, 21(3): 602-607.
- [28] 魏镇泽, 柴强, 黄鹏, 等. 玉米间作豌豆水分利用效率对供水水平和种植密度的响应[J]. *西北农业学报*, 2012, 21(8): 135-138.
- [29] 白岗栓, 张蕊, 耿桂俊, 等. 河套灌区农业节水技术集成研究[J]. *水土保持通报*, 2011, 31(1): 149-154.
- [30] 杜社妮, 于健, 耿桂俊, 等. 定植孔密封方式对土壤水盐及番茄苗存活率的影响[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(12): 110-116.
- [31] 杜社妮, 白岗栓, 赵世伟, 等. 沃特和 PAM 对土壤水分及马铃薯生长的影响研究[J]. *农业工程学报*, 2007, 23(8): 72-79.
- [32] 杜社妮, 白岗栓, 赵世伟, 等. 沃特和 PAM 施用方式对土壤水分及玉米生长的影响[J]. *农业工程学报*, 2008, 24(11): 30-35.
- [33] 戴佳信, 史海滨, 田德龙, 等. 河套灌区套种粮油作物耗水规律的试验研究[J]. *灌溉排水学报*, 2011, 30(1): 49-53.
- [34] 朱敏, 史海滨, 程满金, 等. 河套灌区小麦套种向日葵田间灌水有效性评价[J]. *中国农村水利水电*, 2010(10): 1-4, 8.
- [35] 张莹, 孙占祥, 李爽, 等. 辽西半干旱区玉米/大豆单作田间耗水规律研究[J]. 2010, 28(5): 43-46.

(上接第 90 页)

- [3] Galloway J N, Townsend A R, Erismann J W, et al. Transformation of the nitrogen cycle: Recent trends, questions, and potential solutions[J]. *Science*, 2008, 320(5878): 889-892.
- [4] Högberg P, Fan Houbao, Quist M, et al. Tree growth and soil acidification in response to 30 years of experimental nitrogen loading on boreal forest [J]. *Global Change Biology*, 2006, 12(3): 489-499.
- [5] Hurd T, Brach A, Raynal D. Response of understory vegetation of Adirondack forests to nitrogen additions [J]. *Canadian Journal of Forest Research*, 1998, 28(6): 799-807.
- [6] Stevens C J, Dise N B, Mountford J O, et al. Impact of nitrogen deposition on the species richness of grasslands [J]. *Science*, 2004, 303(5665): 1876-1879.
- [7] Bobbink R, Hicks K, Galloway J, et al. Global assessment of nitrogen deposition effects on terrestrial plant diversity: A synthesis [J]. *Ecological Applications*, 2010, 20(1): 30-59.
- [8] Houlton B Z, Wang Yingping, Vitousek P M, et al. A unifying framework for dinitrogen fixation in the terrestrial biosphere[J]. *Nature*, 2008, 454(7202): 327-330.
- [9] Lu Xiankai, Mo Jiangming, Gilliam F S, et al. Effects of experimental nitrogen additions on plant diversity in an old-growth tropical forest [J]. *Global Change Biology*, 2010, 16(10): 2688-2700.
- [10] Lu Xiankai, Mo Jiangming, Gilliam F S, et al. Effects of experimental nitrogen additions on plant diversity in tropical forests of contrasting disturbance regimes in Southern China [J]. *Environmental Pollution*, 2011, 159(10): 2228-2235.
- [11] 国家林业局森林资源管理司. 第七次全国森林资源清查及森林资源状况[J]. *林业资源管理*, 2010, 1(1): 1-8.
- [12] 樊后保, 刘文飞, 徐雷, 等. 氮沉降下杉木 (*Cunninghamia lanceolata*) 人工林凋落叶分解过程中 C, N 元素动态变化[J]. *生态学报*, 2008, 28(6): 2546-2553.
- [13] 钱迎倩, 马克平. 生物多样性研究的原理方法[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 1994.