

# 林地覆盖经营对雷竹林土壤氮素形态及硝化-反硝化作用的影响

叶莉莎, 陈双林\*, 郭子武

(中国林业科学研究院亚热带林业研究所, 浙江 杭州 311400)

**摘要:**为探讨林地覆盖经营对雷竹林土壤氮素形态和硝化作用、反硝化作用的影响,选择了覆盖11、3、5 a和不覆盖(CK)4种处理的雷竹林,测定0~20 cm土层土壤全氮、铵态氮和硝态氮含量,并采用气压过程分离系统(BaPS)测定土壤总硝化速率和反硝化速率。结果表明:随着覆盖年限的增加,试验雷竹林0~20 cm土层土壤全氮含量总体呈增加趋势,覆盖雷竹林全氮含量显著高于CK;土壤铵态氮和硝态氮含量均呈倒“N”型变化,覆盖3 a雷竹林的铵态氮和硝态氮含量最高;土壤铵硝比递增,覆盖3 a后显著提高,覆盖5 a后铵态氮是雷竹林土壤无机氮库的主要存在形式;土壤总硝化速率呈下降趋势,总体上与不同形态氮素含量、铵硝比相关性不显著,且相关性强度随覆盖经营年限的增加而减弱。土壤反硝化速率在覆盖3 a及以下年限时基本为0,覆盖5 a时显著提高,达 $69.53 \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ 。研究表明,林地覆盖经营对雷竹林土壤氮素形态及组分比例的影响较明显,削弱了土壤硝化作用,土壤氮素不是限制硝化作用进行的主要因子,长期覆盖经营会显著提高土壤反硝化作用,增大土壤氮素的损失。在实际生产中建议采用休闲式覆盖方式,连续覆盖时间不超过3 a。

**关键词:**雷竹;林地覆盖;氮素形态;硝化作用;反硝化作用

中图分类号:S795

文献标识码:A

## Effects of Mulching Management on Soil Nitrogen, Nitrification and Denitrification in *Phyllostachys praecox* Stand

YE Li-sha, CHEN Shuang-lin, GUO Zi-wu

(Research Institute of Subtropical Forestry, Chinese Academy of Forestry, Hangzhou 311400, Zhejiang, China)

**Abstract:** In order to understand the influence of mulching management on soil nitrogen, nitrification and denitrification of *Phyllostachys praecox* stands, and furthermore to provide a theoretic reference for the sustainable management of *Ph. praecox*, four kinds of *Ph. praecox* stand were selected, which were under mulching for one year (1 a), three years (3 a), five years (5 a) and non-mulching (CK), to measure the total nitrogen, ammonium nitrogen, and nitrate nitrogen in the soil layer with the depth from 0–20 cm. The gross nitrification and denitrification rates were measured by the barometrical separation technique. The results showed that, compared with the CK, the content of total nitrogen increased with prolonged mulching. The change law of ammonium nitrogen and nitrate nitrogen in different trial stands followed a curve of high-low-high-low. The ratio of ammonium nitrogen and nitrate nitrogen increased significantly with the extended response time, as the ratio was the highest in mulching for 3 a. The ammonium nitrate ratio in soil indicated a progressively increase and had a remarkable increase after mulching for 5 a. Ammonium nitrogen is the main form of inorganic nitrogen reservoir in *Ph. praecox* stand soil. However, the

收稿日期:2015-02-09

基金项目:浙江省省院合作林业科技项目(2013SY04);中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金项目(RISF61258)

作者简介:叶莉莎(1990—),女,浙江舟山人,硕士研究生,从事竹林生态与培育研究。

\* 通讯作者:研究员,博士,从事竹林生态与培育研究。E-mail:cslbamboo@126.com

gross nitrification rate decreased gradually over time. There was a significant decrease in mulching for 3 a and 5 a. Generally speaking, the soil nitrification rate was not positively associated with nitrogen or ammonium nitrate ratio, only the soil nitrification rate in the soil types of CK was positively related to the ammonium nitrate content. The denitrification rates greatly increased in the soil mulching for 5 years, reached  $69.53 \mu\text{g N} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ , but the others was 0. Research indicated that forest management had a more significant impact on the component types and rates in the proportion of soil nitrogen, and weakened the soil nitrification. Soil nitrogen was not the major factor limiting nitrification. A long-term management will significantly improve the soil denitrification, which will increase the loss of soil nitrogen. Casual types of mulching are recommended in actual production, with continuous coverage of less than 3 years.

**Key words:** *Phyllostachys praecox*; mulching management; soil nitrogen; nitrification; denitrification

土壤中能够被植物直接吸收利用的有效态氮主要以铵态氮( $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ )和硝态氮( $\text{NO}_3^- - \text{N}$ )等无机态存在<sup>[1]</sup>,二者的含量变化影响植物的根系吸收、生长发育及产量,即无机态氮的多寡限制着植物对土壤氮素的利用效率<sup>[2-3]</sup>。土壤中有有机氮矿化、硝化-反硝化等作用的发生及微生物的生命活动对土壤铵态氮和硝态氮含量产生显著变化,而硝化-反硝化作用又是土壤与大气之间进行氮交换的主要途径<sup>[4]</sup>,其产生的温室气体( $\text{N}_2\text{O}$ )会造成土壤氮素的损失<sup>[5]</sup>。因此,对土壤的氮素形态及硝化-反硝化作用的影响研究具有农学与环境的双重意义。

土壤氮素相互转化、硝化-反硝化作用主要受土壤温度、含水量、pH值等环境因子及施肥、凋落物输入和微生物等生物因素的影响<sup>[6-7]</sup>。土地利用方式的差异也会引起土壤环境因子和生物因素的改变,进而影响土壤氮素条件与氮循环过程。目前,国内外学者对不同生态系统中的土壤氮循环已有一些研究。李辉信等<sup>[8]</sup>研究表明,红壤氮素矿化和硝化速率与土壤pH值、速效磷含量和有机质含量呈正相关。施振香等<sup>[9]</sup>通过不同类型农业用地的硝化作用和反硝化作用进行比较发现,土壤总硝化速率与铵态氮含量呈正相关,总硝化速率、反硝化速率与土壤含水量、通气孔隙度及全氮含量显著相关。余砾等<sup>[10]</sup>通过研究几种不同耕作方式下土壤硝化作用发现,土壤pH值是影响硝化作用的重要因素,呈正相关关系。

雷竹(*Phyllostachys praecox* Z. D. Chu et C. S. Chao f. *prevernalis* S. Y. Chen et C. Y. Yao)是我国优良的笋用竹种之一,具有出笋早、笋期长、笋质优、效益好等特点,在我国长江以南各省广泛栽培。20世纪80年代以来,推广了以冬季覆盖和大量施肥为主要措施的集约经营技术,通过有机物料隔绝冷空气及有机物料腐烂所产生的热量来达到增温、保温和

保湿效果,从而达到提前出笋的目的,使雷竹林产量和经济效益显著提高,但长期林地覆盖经营会引起雷竹林土壤酸化<sup>[11]</sup>、酶活性异常<sup>[12]</sup>、微生物区系明显改变<sup>[13]</sup>等问题,从而可能导致雷竹林土壤氮循环的变化,对土壤中不同形态氮素含量及硝化-反硝化作用产生影响。为此,本文测定了不同林地覆盖经营年限雷竹林土壤不同形态氮素含量和土壤总硝化速率、反硝化速率,试图探讨林地覆盖经营是否会引起雷竹林土壤不同形态氮素含量及铵硝比的变化,以及是否影响雷竹林土壤硝化-反硝化作用及其与土壤氮素含量和铵硝比的相关关系问题,旨在为雷竹林的合理覆盖经营提供理论参考。

## 1 研究区概况

试验地位于浙江省临安市(29°56'N ~ 30°23'N, 118°51'E ~ 119°72'E)太湖源镇,属中亚热带季风气候,年降水量1 250 ~ 1 600 mm,年平均气温15.4℃,年平均无霜期235 d,年日照1 850 ~ 1 950 h。土壤为红壤。试验区属于浙江省临安市竹笋产业第一镇,全镇有雷竹林面积0.4万 $\text{hm}^2$ ,是雷竹林地覆盖经营技术推广最早的乡镇,竹笋业已成为当地农村家庭经济收入的重要来源。

试验区雷竹林一般每年施肥3次,每次将肥料撒施于竹林地表,深翻入土。施肥时间为5—6月、8—9月和11—12月(覆盖前)。肥料主要以氮磷钾复合肥和尿素等化肥为主,厩肥、菜籽饼等有机肥为辅,每年施入复合肥(含N 15% ~ 18%)2.25 t ·  $\text{hm}^{-2}$ 和尿素(含N 46%)1.05 t ·  $\text{hm}^{-2}$ 左右,每次施入量基本相同。雷竹林冬季覆盖主要方法为每年的11月下旬至12月上旬进行双层覆盖,下层为增温层(稻草、竹叶等),上层为保温层(苍糠、竹叶等),至翌年3、4月逐步移去覆盖物。

## 2 材料与方法

### 2.1 试验雷竹林选择

2014年9月,在试验区选择覆盖1 a(2013年覆盖)、覆盖3 a(2011—2013年覆盖)、覆盖5 a(2009—2013年覆盖)和不覆盖(CK)4种不同覆盖经营年限雷竹林各3块,每块试验雷竹林面积约0.1 hm<sup>2</sup>。试验雷竹林栽植前均为种植水稻的农业耕作田,土地平整,立地条件基本一致,栽植年限接近,各试验林分结构见表1。

表1 试验林分结构

雷竹林覆盖时间/a	立竹密度/(株·hm <sup>-2</sup> )	立竹胸径/cm	立竹年龄结构(3年生:2年生:1年生)
0(CK)	15 600	3.76	1:0.75:1.33
1	20 000	3.69	1:0.83:1.34
3	18 900	3.77	1:0.75:2.00
5	16 400	3.51	1:0.60:1.40

注:立竹年龄结构为3年生、2年生、1年生立竹株数的比例。

### 2.2 土壤样品采集与测定

2014年9月,在每块试验雷竹林中按对角线法取3处0~20 cm土层土壤约200 g,去除竹叶等杂质,其中,取80 g鲜土用于测定铵态氮和硝态氮含量、含水量及pH值,剩余土样经风干后研磨过2 mm筛,去除2 mm以上的沙砾和植物残体,再按四分法弃取,取约100 g土样,研磨过0.15 mm筛,混合均匀后,装袋备用,用于测定土壤全氮含量;同时,在每块试验雷竹林中按对角线法用环刀(体积为100 cm<sup>3</sup>)取0~20 cm表层原状土样3组15个(5个1组),用于测定土壤总硝化速率和反硝化速率。另外,用地表温度计测定取样时的雷竹林土表温度。

土壤铵态氮含量用氯化钾-靛酚蓝比色法测定,硝态氮含量用酚二磺酸比色法测定,全氮含量用半微量开氏定氮法测定,土壤含水量用质量法测定,土壤pH值(水浸)用电位法测定<sup>[14]</sup>。

土壤总硝化速率和反硝化速率测定<sup>[15]</sup>:将每组

5个环刀土样放入BaPS技术测定装置的培养器中,盖上带传感器的盖子,调整温度至取土样时的土壤温度。系统平衡1 h左右抽气检查培养器的密闭性,输入样品的预水分含量、pH值、5个环刀样土壤总质量及其它相关参数,软件收集数据12 h后,由Delta分析或线性回归分析得到总硝化速率和反硝化速率。

### 2.3 数据处理与分析

试验数据在Excel 2003统计软件中进行处理和图表制作,采用SPSS 17.0统计软件进行单因素方差分析(One-way ANOVA)和LSD( $\alpha=0.05$ )多重比较,分析不同林地覆盖经营年限雷竹林土壤全氮、铵态氮、硝态氮含量和铵硝比及总硝化速率和反硝化速率的差异,并对总硝化速率与土壤全氮、铵态氮、硝态氮含量和铵硝比进行相关性分析。

## 3 结果与分析

### 3.1 林地覆盖经营对雷竹林土壤全氮、铵态氮和硝态氮含量及铵硝比的影响

由表2可知:随着覆盖经营年限的增加,试验雷竹林土壤全氮含量总体呈增加趋势,其中,覆盖雷竹林与CK雷竹林差异显著,而覆盖1、3、5 a雷竹林间差异不显著。不同覆盖经营年限雷竹林土壤铵态氮和硝态氮含量均有显著差异,二者都随着覆盖经营年限的增加呈倒“N”型变化趋势,其中,覆盖3 a雷竹林的铵态氮和硝态氮含量最高,显著高于CK雷竹林,覆盖1 a雷竹林的铵态氮含量和覆盖5 a雷竹林的硝态氮含量最低,显著低于CK雷竹林。土壤铵硝比随着覆盖经营年限增加依次增大,覆盖1 a与CK雷竹林差异不显著,覆盖5、3 a雷竹林与CK雷竹林差异显著,且覆盖5 a雷竹林铵硝比显著高于覆盖1、3 a雷竹林,铵态氮成为雷竹林土壤无机氮库的主要存在形式。

表2 不同覆盖经营年限雷竹林土壤全氮、铵态氮、硝态氮含量和铵硝比

雷竹林覆盖时间/a	全氮/(g·kg <sup>-1</sup> )	铵态氮/(mg·kg <sup>-1</sup> )	硝态氮/(mg·kg <sup>-1</sup> )	铵硝比
0(CK)	1.46±0.05 b	9.40±0.71 c	11.30±0.92 b	0.94±0.02 c
1	1.75±0.13 a	4.80±0.40 d	5.15±0.77 c	0.98±0.01 c
3	1.85±0.21 a	21.13±0.93 a	15.63±0.71 a	1.19±0.06 b
5	1.84±0.08 a	12.74±0.69 b	4.56±0.26 c	2.78±0.12 a

注:同列不同小写字母表示差异显著( $p<0.05$ ),下同。

### 3.2 林地覆盖经营对雷竹林土壤总硝化速率和反硝化速率的影响

由图1可知:随着林地覆盖经营年限的增加,雷

竹林土壤总硝化速率呈下降趋势,覆盖3、5 a后急剧降低,降幅分别达到47.00%和61.74%。覆盖1 a与CK雷竹林差异不显著,覆盖3、5 a雷竹林间差

异显著,并均与覆盖1 a、CK 雷竹林差异显著。覆盖1、3 a和CK 雷竹林土壤反硝化速率基本为0,覆盖5 a雷竹林土壤反硝化速率明显提高,达 $69.53 \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ 。

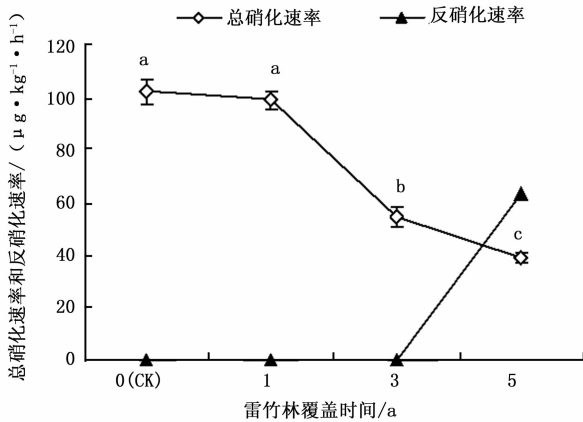


图1 不同覆盖经营年限雷竹林土壤总硝化速率和反硝化速率

### 3.3 林地覆盖经营对雷竹林土壤总硝化速率与土壤氮素含量及铵硝比的相关性影响

由表3可知:CK 雷竹林土壤总硝化速率与土壤铵态氮含量呈显著正相关,与土壤全氮、硝态氮含量和铵硝比的相关性并不显著。覆盖雷竹林土壤总硝化速率与土壤全氮、铵态氮、硝态氮含量及铵硝比相关性均不显著,而且随着覆盖经营年限的增加,相关性总体上呈递减趋势。说明土壤不同形态氮素含量及组分比例并不是影响林地覆盖经营雷竹林土壤硝化作用的主要因素。

表3 林地覆盖经营雷竹林土壤总硝化速率与土壤全氮、铵态氮、硝态氮含量及铵硝比之间的相关系数

雷竹林覆盖时间 /a	相关系数( <i>r</i> )			
	全氮	铵态氮	硝态氮	铵硝比
0(CK)	0.390	0.998*	0.709	0.841
1	0.311	0.863	0.819	0.640
3	0.485	0.441	0.919	0.259
5	0.214	0.675	0.069	0.263

注: \* 表示显著相关( $p < 0.05$ )。

## 4 结论与讨论

### 4.1 林地覆盖经营对雷竹林土壤全氮、无机氮含量及铵硝比的影响

林地覆盖经营虽然能显著提高雷竹林经济产出,但对雷竹林土壤性状也会产生一定的负面影响<sup>[16-18]</sup>,包括改变土壤氮素条件<sup>[16,19]</sup>。本研究表明:随着覆盖经营年限的增加,雷竹林0~20 cm土壤全氮含量总体上逐渐升高,覆盖雷竹林显著高于

CK 雷竹林,与郭子武等<sup>[20]</sup>的研究结果一致,这主要与覆盖经营中的大量施肥和林地存留覆盖物分解的氮素输入等有关,仅30 cm厚的覆盖物每年可向雷竹林地输入氮素达 $295.89 \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ <sup>[21]</sup>。另外,随着覆盖经营年限的增加,雷竹林土壤铵态氮、硝态氮含量均呈倒“N”型变化趋势,出现先降低后升高再降低的同步变化,覆盖1 a雷竹林土壤铵态氮含量和覆盖5 a雷竹林土壤硝态氮含量最低;铵硝比随着覆盖年限增加逐渐升高,CK、覆盖1 a雷竹林土壤铵硝比接近1,而覆盖3、5 a雷竹林显著增加,说明随着覆盖年限的延长铵态氮成为雷竹林土壤无机氮库的主要存在形式。造成这种现象的原因可能有以下几点:一是与施肥有关。目前,雷竹林集约经营的模式下氮肥的利用率不足30%,大量氮肥过剩导致土壤中氮含量总体上呈增加趋势<sup>[22]</sup>,但覆盖1 a的雷竹林土壤无机氮含量降低,可能是因为覆盖1 a促进了雷竹吸收利用土壤中的有效态氮;二是与有机覆盖材料的分解有关。林地存留有机物的分解增加土壤有机质含量,并产生大量酚酸类物质降低土壤pH值<sup>[18]</sup>,而有机质具有保持和供应铵态氮和硝态氮的作用,氮素的矿化作用与有机质含量呈正相关关系<sup>[23-24]</sup>,有机质在酸性条件更有利于转化成有效态氮,因此,覆盖3、5 a后随着有机材料残留量增加,土壤中无机态氮含量升高,但覆盖5 a雷竹林又由于反硝化作用增加损失一部分硝态氮。三是与环境变化有关。林地覆盖下土壤理化性质、质地及通气状况发生改变<sup>[25]</sup>,进而影响氨氧化微生物的群落结构及活性,改变对氮素的固定与转化能力<sup>[26-27]</sup>。综合分析认为,长期林地覆盖经营会导致雷竹林土壤氮素形态及其组分比例发生明显变化,明显提高土壤氮素损失,不利于雷竹林可持续经营,并会造成环境污染。在实际生产中建议采用休闲式覆盖方式,连续覆盖经营年限不宜超过3 a。

### 4.2 林地覆盖经营对雷竹林硝化-反硝化作用及硝化作用与无机氮含量、铵硝比相关性的影响

本研究结果表明,随着覆盖经营年限增加,雷竹林土壤硝化作用依次减弱,覆盖3、5 a雷竹林的土壤硝化速率明显降低,但覆盖5 a时土壤反硝化作用明显增强。对硝化作用与土壤不同形态氮素含量、铵硝比的相关性分析发现,仅CK 雷竹林土壤铵态氮含量与总硝化速率呈显著正相关,覆盖雷竹林土壤总硝化速率与铵态氮、硝态氮含量和铵硝比相关性均不显著,但相关趋势随着覆盖经营年限的增

加而减弱。硝化作用一直被认为是仅由自养细菌参与的在中性或弱碱性条件下才会发生的过程,酸性条件会限制铵的氧化<sup>[28]</sup>,但已有研究表明硝化作用也可以在酸性条件下进行<sup>[29]</sup>,本研究结果也证明了这一点。铵态氮和硝态氮分别是硝化作用的基质和产物,其浓度尤其是铵态氮浓度直接影响土壤硝化作用进行的强度<sup>[30-31]</sup>,但本研究发现,林地覆盖经营雷竹林土壤硝化作用并没有表现出与无机态氮含量及铵硝比的强烈相关性,这可能与覆盖经营后对环境的显著影响有着密切的关系。

## 参考文献:

- [1] Malagoli M, Dal Canal A, Quaggiotti S. Differences in nitrate and ammonium uptake between Scots pine and European larch[J]. *Plant and Soil*, 2000, 221:1-3.
- [2] Kobler R L, Rouppet B, Westfall D G, *et al.* Evaluation of an in situ net soil nitrogen mineralization method in dryland agroecosystem [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1997, 61(3): 504-508.
- [3] Reich P B, Grigal D F, Aber J D, *et al.* Nitrogen mineralization and productivity in 50 hardwood and conifer stands on diverse soils[J]. *Ecology*, 1997, 72(2): 335-347.
- [4] Vitousek P M, Howarth R W. Nitrogen limitation on land and in the sea: how can it occur? [J]. *Biogeochemistry*, 1991, 13(2): 87-115.
- [5] 李振高, 俞 慎. 土壤硝化-反硝化作用研究进展[J]. *土壤*, 1997, 29(6): 281-286.
- [6] Binkley D, Hart S C. The components of nitrogen availability assessments in forest soils[J]. *Advance in Soil Science*, 1989, 10: 57-112.
- [7] Knoepf J D, Swank W T. Using soil temperature and moisture to predict forest soil nitrogen mineralization[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2002, 36: 177-182.
- [8] 李辉信, 蔡贵信, 胡 峰, 等. 红壤氮素的矿化和硝化作用特征[J]. *土壤*, 2000, 32(4): 194-197, 214.
- [9] 施振香, 柳云龙, 尹 俊, 等. 上海城郊不同农业用地类型土壤硝化和反硝化作用[J]. *水土保持学报*, 2009, 23(6): 99-102, 111.
- [10] 余 砾, 高 明, 慈 恩, 等. 不同耕作方式下土壤氮素矿化和硝化特征研究[J]. *生态环境学报*, 2010, 19(3): 733-738.
- [11] 陈双林, 萧江华. 现代竹业栽培的土壤生态管理[J]. *林业科学研究*, 2005, 18(3): 351-355.
- [12] 李国栋, 刘国群, 庄舜尧, 等. 不同种植年限下雷竹林的有机质转化[J]. *土壤通报*, 2010, 41(4): 845-849.
- [13] 杨 芳, 吴家森, 钱新标, 等. 不同施肥雷竹林土壤微生物量碳的动态变化[J]. *浙江林学院学报*, 2006, 23(1): 70-74.
- [14] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- [15] Ingwersen J, Butterbach - Bahl K, Gasche R, *et al.* Barometric process separation: new method for quantifying nitrification, denitrification, and nitrous oxide sources in soils[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1999, 63: 117-128.
- [16] 郭子武, 俞文仙, 陈双林, 等. 林地覆盖对雷竹林土壤微生物特征及其与土壤养分制约性关系的影响[J]. *生态学报*, 2013, 33(18): 5623-5630.
- [17] 刘 力, 潘锡东. 早竹高产笋用林及其土壤理化性质分析研究[J]. *竹子研究汇刊*, 1994, 13(3): 38-43.
- [18] 刘 丽, 陈双林. 有机材料林地覆盖对雷竹林生态系统的负面影响研究综述[J]. *广西植物*, 2009, 29(3): 327-330.
- [19] 姜培坤, 徐秋芳, 钱新标. 雷竹林地覆盖增温过程中土壤化学性质的动态变化[J]. *浙江林学院学报*, 1999, 16(2): 123-130.
- [20] 郭子武, 王为宇, 杨清平, 等. 林地覆盖对雷竹林土壤碳氮磷化学计量特征的影响[J]. *广西植物*, 2013, 33(5): 627-632.
- [21] 黄 芳, 蔡荣荣, 孙 达, 等. 集约经营雷竹林土壤氮素状况及氮平衡的估算[J]. *植物营养与肥料学报*, 2007, 13(6): 1193-1196.
- [22] 孙 晓, 庄舜尧, 刘国群, 等. 集约经营下雷竹林种植对土壤基本性质的影响[J]. *土壤*, 2009, 41(5): 784-789.
- [23] 陈效民, 吴华山, 孙静红. 太湖地区农田土壤中铵态氮和硝态氮的时空变异[J]. *环境科学*, 2006, 27(6): 1217-1222.
- [24] Pastor J, Abet J D, Mc Claugherty C A, *et al.* Above-ground production and N and P cycling along a nitrogen mineralization gradient on Blackhawk island[J]. *Wisconsin Ecology*, 1984, 65(1): 256-258.
- [25] 刘 丽. 林地覆盖雷竹林退化特征及土壤改良研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2009.
- [26] 秦 华, 刘卜榕, 徐秋芳, 等. 长期集约种植对雷竹林土壤氨氧化古菌群落的影响[J]. *生态学报*, 2012, 32(19): 6076-6084.
- [27] 秦 华, 李国栋, 叶正钱, 等. 集约种植雷竹林土壤细菌群落结构的演变及其影响因素[J]. *应用生态学报*, 2010, 21(10): 2645-2651.
- [28] Hankinson T R, Schmidt E L. An acidophilic and a neutrophilic Nitrobacter strain isolated from the numerically predominant nitrite-oxidizing population of an acid forest soil[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 1988, 54(6): 1536-1540.
- [29] 刘 义, 陈劲松, 尹华军, 等. 川西亚高山针叶林土壤硝化作用及其影响因素[J]. *应用与环境生物学报*, 2006, 12(4): 500-505.
- [30] Aamio T, Martikainen P J. Mineralization of carbon and nitrogen, and nitrification in Scots pine forest soil treated with fast and slow release nitrogen fertilizers[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 1996, 22(3): 214-220.
- [31] Mendum T A, Socket R E, Hirsch P R. Use of the subdivision of the class Proteobacteria in arable soils to nitrogen fertilizer[J]. *Appl Environ Microbiol*, 1999, 65: 4155-4162.