

毛竹扩张对常绿阔叶林土壤氮素矿化及有效性的影响*

宋庆妮 杨清培** 刘 骏 余定坤 方 楷 徐 佩 何宇娟

(江西农业大学/江西省竹子种质资源与利用重点实验室, 南昌 330045)

摘 要 采用时空替代法和 PVC 顶盖原位培养法, 分析了江西大岗山毛竹扩张形成的竹-阔混交林与邻近常绿阔叶林土壤中的无机氮含量、氮矿化速率和吸收速率等指标. 结果表明: 两种林分土壤总无机氮含量时空变化趋势相同; 竹-阔混交林年均矿化速率低于常绿阔叶林, 前者以氨化作用为主, 后者氨化作用与硝化作用相当, 但生长季硝化作用明显占优势. 两林分全年都以吸收 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 为主, 但生长季常绿阔叶林对 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的吸收明显占优势. 说明毛竹向常绿阔叶林扩张会增强土壤氮素氨化作用、减弱硝化作用和总矿化作用, 同时也会增加对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的吸收, 减少对 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 和总无机氮的吸收.

关键词 毛竹扩张 氮素矿化 氮素有效性 常绿阔叶林 江西大岗山

文章编号 1001-9332(2013)02-0338-07 **中图分类号** Q948.113 **文献标识码** A

Effects of *Phyllostachys edulis* expansion on soil nitrogen mineralization and its availability in evergreen broadleaf forest. SONG Qing-ni, YANG Qing-pei, LIU Jun, YU Ding-kun, FANG Kai, XU Pei, HE Yu-juan (Jiangxi Province Key Laboratory for Bamboo Germplasm Resources and Application, Jiangxi Agricultural University, Nanchang 330045, China). -Chin. J. Appl. Ecol., 2013, 24(2): 338–344.

Abstract: By the methods of space-time substitution and PVC tube closed-top *in situ* incubation, this paper studied the soil mineralized-N content, N mineralization rate, and N uptake rate in *Phyllostachys edulis*-broadleaf mixed forest (PBMF) formed by *P. edulis* expansion and its adjacent evergreen broadleaf forest (EBF) in Dagangshan Mountain of Jiangxi Province, China. There existed the same spatiotemporal variation trend of soil total mineralized-N (TMN) content between the two forests. The annual average N mineralization rate was slightly lower in PBMF than in EBF. In PBMF, soil N mineralization was dominated by ammonification; while in EBF, soil ammonification and nitrification were well-matched in rate, and soil nitrification was dominated in growth season (from April to October). The N uptake by the plants in PBMF and EBF in a year was mainly in the form of $\text{NH}_4^+\text{-N}$, but that in EBF in growth season was mainly in the form of $\text{NO}_3^-\text{-N}$. These findings indicated that the expansion of *P. edulis* into EBF could promote the ammonification of soil N, weakened soil nitrification and total N mineralization, and also, increased the $\text{NH}_4^+\text{-N}$ uptake but decreased the $\text{NO}_3^-\text{-N}$ and TMN uptake by the plants.

Key words: *Phyllostachys edulis* expansion; nitrogen mineralization; nitrogen availability; evergreen broadleaf forest; Dagangshan Mountain of Jiangxi Province.

毛竹(*Phyllostachys edulis*)是一种高大散生乔木状克隆植物, 主要分布在我国亚热带地区^[1]. 它依靠强大的地下茎(竹鞭)不断向邻近常绿阔叶林蔓

延、发笋成竹, 实现种群克隆扩张, 形成竹-阔混交林甚至毛竹纯林^[2].

毛竹扩张导致竹林面积扩大, 对增加林农收入、改善林农生活起到了积极作用^[3], 同时也引发了一系列的生态变化, 如森林景观被破坏^[4]、生物多样性减少^[5]、森林土壤退化^[6]及森林碳贮量的改变^[7], 影响了我国南方自然保护区的生态保护. 因

* 国家自然科学基金项目(31260120, 31170306)、江西省自然科学基金项目(20122BAB204019)、江西省教育厅科学技术研究项目(GJJ08192)和大岗山生态站基金项目资助.

** 通讯作者. E-mail: Qingpeiyang@126.com

2012-05-03 收稿, 2012-12-07 接受.

此,毛竹林向邻近森林扩张问题已引起生态学与林学界的广泛关注^[8-9],但有关毛竹扩张对其他森林生态系统氮素矿化作用及其有效性的潜在影响研究却少人问津。

土壤中的氮素 92%~98% 以有机氮形式存在,通常需要经过矿化作用将其转化为 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 形式的无机氮^[10],才能被植物直接吸收利用^[11]。无机氮的组分比例及其数量反映了土壤氮素的有效性。长期以来,生态学家一直使用氮素矿化来研究土壤对植物的供氮能力^[12]。大量研究表明,物种组成变化^[13]和植被类型的转变^[14]都会影响到生态系统中土壤氮素的矿化作用^[15],而毛竹向常绿阔叶林扩张会对土壤氮素矿化及其有效性造成怎样的影响,尚未见报道。

本文采用时空替代法和 PVC 顶盖原位培养法,比较分析了江西大岗山毛竹扩张形成的竹-阔混交林和扩张前常绿阔叶林土壤的无机氮含量、矿化速率和吸收速率等指标,探讨毛竹扩张对常绿阔叶林土壤氮素矿化速率、转化过程、吸收过程、无机氮库的影响,为揭示毛竹扩张机理,以及为生态效应研究提供理论基础。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

江西大岗山位于江西省分宜县境内(27°30′—27°50′ N, 114°30′—114°45′ E),属亚热带湿润气候,年均气温 15.8~17.7℃,年均降水量 1591 mm (图 1),土壤类型主要是低山丘陵红壤、黄壤。该地带性植被为常绿阔叶林,也是毛竹的适生区^[16]。由于长期对常绿阔叶林人为采伐和干扰,毛竹不断地向其克隆扩张,形成竹-阔混交林。

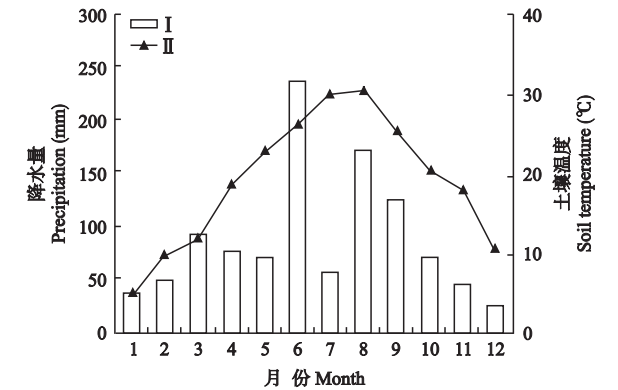


图 1 2011 年江西大岗山月均降水量 (I) 和土壤温度 (II)
Fig. 1 Average monthly rainfall (I) and soil temperature (II) in 5 cm depth in Dagangshan Mountain, Jiangxi Province in 2011.

试验地常绿阔叶林乔木层优势种主要为丝栗栲 (*Castanopsis fargesii*), 40~50 年,伴生树种主要有苦槠栲 (*Castanopsis sclerophylla*)、黄牛奶树 (*Symplocos cochinchinensis*) 等,乔木层高 25.0 m,平均胸径 17.8 cm,密度 1060 株·hm⁻²,郁闭度 0.85。下木层主要有黄牛奶树、绒毛润楠 (*Machilus velutina*) 和油茶 (*Camellia oleifera*) 等。草本植物主要有淡竹叶 (*Lophatherum gracile*)、草珊瑚 (*Sarcandra glabra*) 和铁芒萁 (*Dicranopteris linearis*) 等。竹-阔混交林是 20~30 年前毛竹向常绿阔叶林扩张形成的竹-阔混交林,竹木数量比为 9:1。除偶有择伐毛竹外,没有砍杂和施肥,一直处于粗放经营状态。毛竹高 15 m 左右,密度 4000 株·hm⁻²,主林层郁闭度为 0.8。伴生树种主要有丝栗栲、刨花楠 (*Machilus pauhoi*)、山乌柏 (*Sapium discolor*) 和拟赤杨 (*Alniphyllum fortunei*) 等。下木层主要有油茶、绒毛润楠和杜茎山 (*Maesa japonica*) 等,草本植物主要有淡竹叶、铁芒萁和寒莓 (*Rubus buergeri*) 等。

1.2 试验设计

2011 年,采用时空替代法和 PVC 顶盖原位培养法^[17],选取典型地段设置常绿阔叶林和竹-阔混交林样地,面积为 20 m×20 m,二者相距 30 m 左右,每种林分 3 个样地,总计 6 个样地。在每样地中选取 5 个代表性样点,去除地表凋落物后,将 2 根长 32 cm、内径 5 cm 的 PVC 管垂直打入土中(以装满为准),然后小心取出其中 1 根 PVC 管带回实验室,用于土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 初始值的测定,另 1 根 PVC 管顶部加盖,留在原位培养 1 个月。培养结束取回,同时将下一批管按上述方法布置于上一次培养点的附近。将管中土壤分为 0~10 和 10~30 cm 两层掏出,拣去根系和石砾,过 2 mm 筛,将土样装入自封袋,4℃ 低温保存,以备室内分析。

1.3 测定项目及方法

室内土壤分析包括 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量分析及其他土壤理化性质测定,其中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 测定采用靛酚蓝比色法; $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 采用镀铜镉还原-重氮化偶合比色法^[18];全氮采用半微量凯氏法;全碳采用重铬酸钾外加热氧化法;土壤 pH 采用玻璃电极法(土水比为 1:2.5);土壤含水率采用烘干法(105℃, 12 h);土壤容重采用环刀法^[19]。

1.4 数据处理

土壤氮素矿化速率和植被氮吸收速率的计算参见文献[20-21]。

$$R_{\text{amm}} = 30 ([\text{NH}_4^+\text{-N}]_{t+1} - [\text{NH}_4^+\text{-N}]_t) / \Delta t$$

$$R_{\text{nit}} = 30([NO_3^- - N]_{t+1} - [NO_3^- - N]_t) / \Delta t$$
$$R_{\text{min}} = 30([NH_4^+ - N + NO_3^- - N]_{t+1} - [NH_4^+ - N + NO_3^- - N]_t) / \Delta t$$
$$R_{\text{amm}}^{\text{up}} = 30([NH_4^+ - N]_{\text{in}} - [NH_4^+ - N]_{\text{out}}) / \Delta t$$
$$R_{\text{nit}}^{\text{up}} = 30([NO_3^- - N]_{\text{in}} - [NO_3^- - N]_{\text{out}}) / \Delta t$$
$$R_{\text{min}}^{\text{up}} = 30([NH_4^+ - N + NO_3^- - N]_{\text{in}} - [NH_4^+ - N + NO_3^- - N]_{\text{out}}) / \Delta t$$

式中: R_{amm} 、 R_{nit} 、 R_{min} 分别表示净氨化、硝化和矿化速率 $[\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot (30 \text{ d})^{-1}]$; $R_{\text{amm}}^{\text{up}}$ 、 $R_{\text{nit}}^{\text{up}}$ 、 $R_{\text{min}}^{\text{up}}$ 分别代表森林植物对 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 和无机氮的净吸收速率 $[\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot (30 \text{ d})^{-1}]$; $[NH_4^+ - N]$ 、 $[NO_3^- - N]$ 分别代表 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度 $(\text{mg} \cdot \text{g}^{-1})$; t 、 $t+1$ 分别代表培养前和培养后的日期; Δt 为培育时间 (d) ; in、out 分别表示管内与管外。

最后,结合土壤容重和林地面积,得到净矿化量(或吸收量):

$$W_t = W_b V_s R \Delta t \times 10^{-6}$$

式中: W_t 为某培育时期 Δt 内土壤的净矿化量或吸收量 (kg) ; W_b 为土壤容重 $(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$; V_s 为土壤体积 (m^3) ; R 为净矿化速率或吸收速率; 10^{-6} 是将 mg 转换成 kg 的系数. 各月净矿化(或吸收)量相加即可得到全年净矿化(或吸收)总量。

采用 Fisher 最小显著差异法(LSD)进行差异性检验;采用 t 检验中配对(月份)差异显著性检验两种林分间矿化速率和吸收速率;采用 t 检验非配对差异显著性检验同一林分生长季与非生长季之间的差异($\alpha=0.05$). 上述分析通过 SPSS 17.0 和 Excel 2007 软件完成。

2 结果与分析

2.1 毛竹扩张对林地土壤基本性质的影响

由表1可知,毛竹扩张使常绿阔叶林转变为竹-阔混交林,土壤中的全氮、有机质含量显著增加, pH 值和容重显著减小. 其中,表层土壤(0~10 cm)的全氮、有机质含量、C/N 分别增加 67.7%、99.5% 和 19.5%, pH 值和容重分别下降 5.6% 和 18.8%;

表 1 毛竹扩张对林地土壤基本理化性质的影响
Table 1 Effects of *Phyllostachys edulis* expansion on soil properties (mean±SE, n=15)

林型 Forest type	土层 Soil layer (cm)	全氮 Total N (g · kg ⁻¹)	有机质 Organic matter (g · kg ⁻¹)	碳氮比 C/N	pH	容重 Bulk density (g · cm ⁻³)
EBF	0 ~ 10	0.96±0.18b	24.95±4.74bc	15.06±0.90a	3.92±0.05a	1.12±0.06ab
	10 ~ 30	0.28±0.07c	4.84±1.09c	9.96±0.41b	4.06±0.08a	1.33±0.00b
PBMF	0 ~ 10	1.61±0.37a	49.78±5.81a	17.99±0.51a	3.70±0.10b	0.91±0.07c
	10 ~ 30	0.62±0.16bc	17.20±2.63bc	5.93±1.15b	3.69±0.40b	1.14±0.19ab

EBF: 常绿阔叶林 Evergreen broadleaf forest; PBMF: 竹-阔混交林 *Phyllostachys edulis*-broadleaf mixed forest. 同列中不同字母表示不同土壤层次间差异明显 ($P<0.05$) Different letters meant significant difference in the same column at 0.05 level. 下同 The same below.

下层土壤(10~30 cm)的全氮、有机质含量分别增加 121.4% 和 255.4%, pH 值和容重分别下降 9.1% 和 14.3%. 毛竹具有庞大的地下鞭根系统,使土壤形成许多孔隙,土壤容重减小,而且其生物量和周转量大,增加了地下碳、氮输入^[22-23],造成林下土壤碳素和氮素积累,对土壤性质产生显著的影响。

2.2 毛竹扩张对林地土壤有效氮含量的影响

由图2可知,毛竹扩张前后表层土壤的 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$

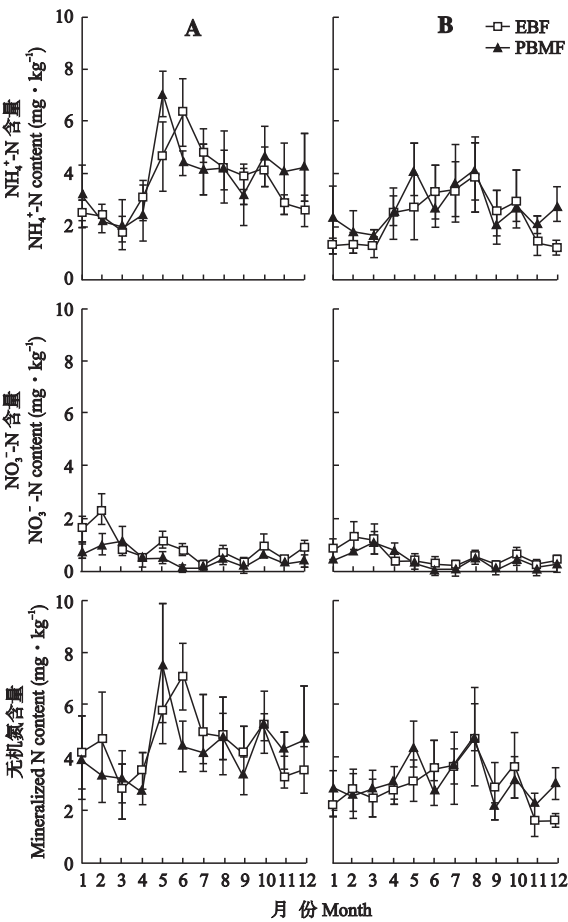


图 2 毛竹扩张对土壤 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 和无机氮的影响
Fig. 2 Effects of *Phyllostachys edulis* expansion on the content of $\text{NH}_4^+ - \text{N}$, $\text{NO}_3^- - \text{N}$ and mineralized N (mean±SE).
EBF: 常绿阔叶林 Evergreen broadleaf forest; PBMF: 竹阔混交林 *Phyllostachys edulis*-broadleaf mixed forest. A: 0~10 cm; B: 10~30 cm. 下同 The same below.

含量介于 $1.92 \sim 7.04 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 总无机氮含量在 $2.74 \sim 7.60 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$. 除 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 外, 无机氮含量差异不明显, 且季节变化规律相似, $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 、总无机氮均为生长季大于非生长季, 而 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 为非生长季大于生长季. $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 始终是土壤中无机氮的主要形式, 两种林分 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 含量都超过 60.0% (常绿阔叶林 2 月和竹-阔混交林 1—3 月除外), 这说明毛竹向常绿阔叶林扩张对土壤中无机氮的组成及其比例影响不大.

2.3 毛竹扩张对林地土壤氮素矿化的影响

毛竹向常绿阔叶林扩张会增强土壤的氨化作用. 由图 3 可以看出, 常绿阔叶林和竹-阔混交林表层土壤年均净氨化速率分别为 3.82 和 $5.66 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot (30 \text{ d})^{-1}$, 在生长季节这一差异更明显. 同时, 竹-阔混交林氨化速率的季节波动比常绿阔叶林大.

毛竹扩张还会减弱土壤硝化作用和总氮素矿化作用. 常绿阔叶林和竹-阔混交林的年均净硝化速率分别为 3.31 和 $0.18 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot (30 \text{ d})^{-1}$, 总矿化速率分别为 6.95 和 $5.51 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot (30 \text{ d})^{-1}$. 且下层土壤的净矿化速率明显小于表层, 但毛竹扩张对下层土壤氮素矿化速率的影响与表层土壤相似.

常绿阔叶林表层土壤的年净氨化、硝化和矿化总量分别为 52.19 、 45.57 和 $97.76 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-1}$, 竹-阔混交林为 62.96 、 1.99 和 $64.95 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$. 毛竹扩张后, 森林年净氨化总量增加了 20.6%, 净硝化和净矿化总量减少 95.6% 和 33.6%. 下层土壤净氨化量增加了 51.0%, 净硝化和净矿化总量分别下降 133.7% 和 29.8% (表 2).

另外, 常绿阔叶林上、下层土壤净矿化总量分别占全氮的 9.1%、8.6%, 而竹-阔混交林仅为 4.4%、3.2%. 因此, 毛竹向常绿阔叶林扩张, 土壤氮素周转率降低, 导致土壤氮素累积.

2.4 毛竹扩张对土壤氮素吸收的影响

毛竹向常绿阔叶林扩张会影响林分对土壤氮素

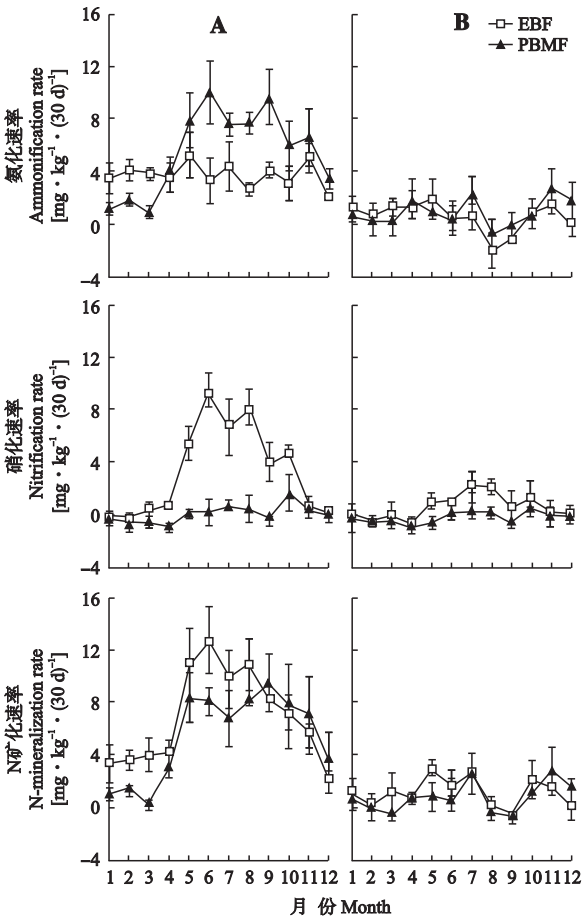


图 3 毛竹扩张对土壤氮素氨化速率、硝化速率和矿化速率的影响

Fig. 3 Effects of *Phyllostachys edulis* expansion on soil ammonification rate, nitrification rate and mineralization rate (mean±SE).

吸收. 由图 4 可以看出, 常绿阔叶林对表土 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 和总无机氮的吸收速率分别为 5.32 、 3.78 和 $8.21 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot (30 \text{ d})^{-1}$, 竹-阔混交林为 4.70 、 0.18 和 $5.50 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot (30 \text{ d})^{-1}$. 常绿阔叶林转变成竹-阔混交林后, 林分对土壤氮素的吸收速率明显降低, 但在生长季, 竹-阔混交林对 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 的吸收速率明显高于常绿阔叶林, 在非生长季, 竹-阔混交林显著低于常绿阔叶林. 两种林分对下层土壤氮素的吸收也表现出相似的规律, 只是速率较低.

表 2 毛竹扩张对林地土壤年净氨化量、硝化量和矿化总量的影响
Table 2 Effects of *Phyllostachys edulis* expansion on soil annual net N ammonification, nitrification and mineralization (mean±SE, n = 15)

林型 Forest type	土层 Soil layer (cm)	净氨化量 Amminification ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)	净硝化量 Nitrification ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)	净矿化量 Mineralization ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)	无机氮/总氮 Mineralized-N /total N (%)
EBF	0 ~ 10	52.19±15.99ab	45.57±13.95a	97.76±27.71a	9.1±3.3a
	10 ~ 30	18.09±11.83c	14.05±5.16bc	32.15±18.67c	8.6±2.7a
PBMF	0 ~ 10	62.96±27.34b	1.99±0.66c	64.95±24.73b	4.4±1.2b
	10 ~ 30	27.32±13.92bc	-4.73±1.70c	22.57±8.74c	3.2±1.2b

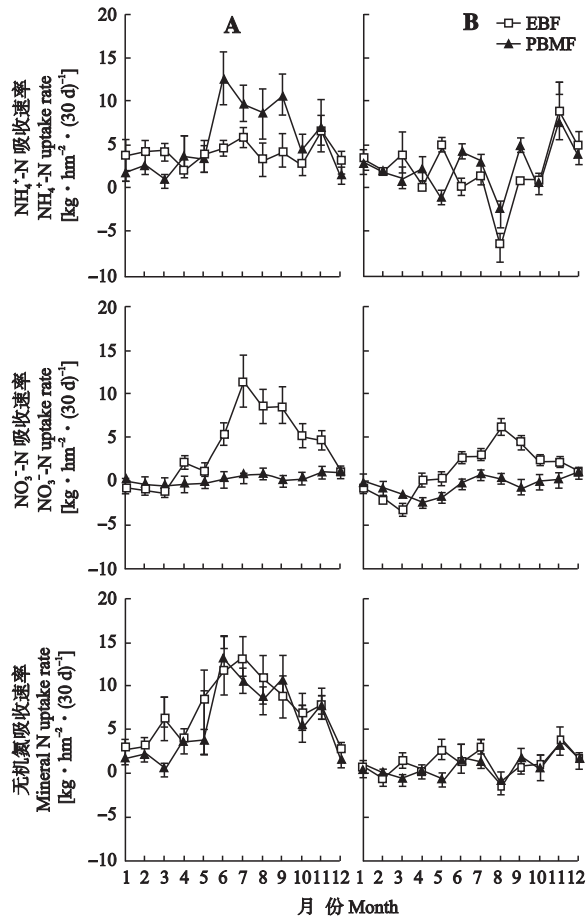


图4 毛竹扩张对林地土壤氮素吸收速率的影响
Fig. 4 Effects of *Phyllostachys edulis* expansion on forest N uptake rate (mean±SE).

由表3可以看出,常绿阔叶林对土壤(0~30 cm) $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 和无机氮年吸收总量分别为88.37、70.95和159.32 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,而竹-阔混交林为96.82、6.64和103.46 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$.毛竹扩张后林分对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的吸收量增加9.6%,对 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 和总无机氮吸收量分别减少90.6%和35.1%.

表3 毛竹扩张对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 和无机氮年净吸收量的影响
Table 3 Effects of *Phyllostachys edulis* expansion on the annual net uptake of $\text{NH}_4^+\text{-N}$, $\text{NO}_3^-\text{-N}$ and mineralized-N (mean±SE, n=15)

林型 Forest type	土层 Soil layer (cm)	氨态氮 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)	硝态氮 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)	无机氮 Mineralized-N ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)
EBF	0~10	56.41±22.84a	48.46±44.48a	104.87±31.74a
	10~30	31.96±18.94b	22.49±9.04b	54.45±12.77b
	0~30	88.37±32.21	70.95±24.42	159.32±42.45
PBMF	0~10	63.74±20.07a	3.94±0.55c	67.68±14.44b
	10~30	33.08±13.37b	2.7±2.76c	35.78±11.04bc
	0~30	96.82±30.12	6.64±2.34	103.46±34.56

同时,毛竹扩张还改变了林分对氮素形态的吸收比例,常绿阔叶林对土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 吸收量分别占总无机氮吸收量的55.5%、44.5%,竹-阔混交林分别占93.6%、6.4%,说明毛竹对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 有一定的偏向吸收性.这可能与毛竹本身的生物学习性或每年都有孕笋、新竹生长有关,因为生长初期植物优先吸收 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ [24].

3 讨论

植被类型转变强烈地影响到土壤基本理化性质和养分循环[25-27].本研究中,竹-阔混交林土壤有机质、总氮含量均显著高于常绿阔叶林,说明毛竹向常绿阔叶林扩张会增加土壤总碳、总氮的储量,这与吴家森等[6]的研究结果一致.其原因可能是:毛竹具有庞大的地下鞭根系统,鞭根周转补充了土壤碳库和氮库,从而导致土壤总有机碳和总氮含量增加[6];也可能与竹-阔混交林土壤氮素的净矿化速率较低有关.竹-阔混交林表层、下层土壤净矿化总量占全氮的比例只有4.3%和3.3%,而常绿阔叶林高达9.1%和11.3%,竹-阔混交林土壤氮周转明显慢于常绿阔叶林,导致土壤中碳、氮积累.

土壤氮素矿化作用是森林生态系统氮素循环中重要的过程之一,主要包括氨化作用和硝化作用[28].这一过程与森林群落的物种组成、群落结构、生物量分配、凋落物(地上和地下)数量和质量等因素密切相关[7,29-30].因此,人工造林或外来植物入侵都会引起生态系统土壤氮素矿化过程及土壤氮素有效性的变化[31-32].Parker和Schimel[33]研究发现,北美外来一年生草本植物 *Bromus hordeaceus*、*B. madritensis* 和 *Hordeum murinum* 对入侵地的氨化、硝化都有明显的促进作用.本研究发现,毛竹向常绿阔叶林扩张,改变了土壤氮素矿化过程和格局,增强土壤氨化作用,降低了硝化和总矿化作用.而且这种影响在生长季更明显.该研究结果与许多入侵植物相似.陆健忠等[34]发现,加拿大一枝黄花(*Solidago canadensis*)能够提高土壤氨化速率和矿化速率.

毛竹向常绿阔叶林扩张,引起硝化作用降低的原因很复杂,很可能与毛竹每年都有幼竹生长(尤其是发笋大年)需要大量 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 有关.因为生长早期植物一般优先吸收 $\text{NH}_4^+\text{-N}$,而后期才优先吸收 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ [24].在植物吸收 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的同时, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 会与 H^+ 进行交换,引起土壤pH值下降,导致土壤硝化作用受到相应抑制[24].这可以从竹-阔混交林pH较低得到证实.

虽然毛竹向常绿阔叶林扩张会改变土壤氮素矿化过程与格局,但对土壤无机氮库的影响不显著, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 是无机氮的主要存在形式.土壤无机氮库的消长主要取决于氮素的矿化和林分对氮素的吸收.虽然毛竹扩张增加氨化作用,降低了硝化作用和总矿化作用,但竹-阔混交林又增加了对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的吸收量,减少了 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 和总无机氮的吸收量,因此扩张前后土壤无机氮库没有明显差异.

土壤氮素矿化作用还受到当地温度、湿度等气象因子的影响^[12].本试验中,土壤温度(5 cm)和月均降水量与氮素矿化作用都呈线性正相关(图 5),而且土壤温度对常绿阔叶林与竹-阔混交林氮素净矿化速率的影响达到了极显著水平.

另外,毛竹对土壤氮素矿化特征的改变,还可能是毛竹成功扩张的原因之一.毛竹林向常绿阔叶林扩张,土壤氮素氨化作用增强, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的供应量增加,而毛竹对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 又具有偏向吸收选择性,因此,高 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 供给能满足毛竹生长发育对氮素的需求.毛竹扩张引起土壤硝化作用和总矿化作用减弱, $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 和总无机氮的供应量减少,而常绿阔叶林生长发育却需要大量的 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 和无机氮的供应,导致常绿阔叶林因低 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 供应而受到影响.因此,改变土壤氮素矿化可能是毛竹成功扩张、维持

种群稳定性的重要生态策略.

本试验主要研究了氮素净矿化作用,研究结果初步说明毛竹向邻近常绿阔叶林扩张对土壤氮素矿化的影响以及毛竹扩张的氮素养分机理,但暂未涉及氮素转化过程的具体细节,因此,继续深入开展毛竹扩张对邻近生态系统氮素平衡的影响机理研究,将有助于更好地评价毛竹扩张的生态效应和揭示毛竹扩张驱动机制.同时,在全球变化背景下对毛竹扩张格局动态及常绿阔叶林保护对策的研究,还需要开展长期监测.

参考文献

[1] Flora of China Editorial Committee, Chinese Academy of Sciences (中国科学院中国植物志编辑委员会). Flora of China. Vol. 9, No. 1. Beijing: Science Press, 1996 (in Chinese)

[2] Editorial Committee of Forests of Jiangxi (江西森林编辑委员会). Forests of Jiangxi. Beijing: China Forestry Press, 1986 (in Chinese)

[3] Ruiz MP, Zhong MG, Brian B, et al. The role of bamboo plantations in rural development: The case of Anji County, Zhejiang, China. *World Development*, 1999, **27**: 101-114

[4] Yuji I, Atsushi T. Range expansion and its mechanisms in a naturalized bamboo species, *Phyllostachys pubescens*, in Japan. *Journal of Sustainable Forestry*, 1998, **6**: 127-141

[5] Yang S-Z (杨淑贞), Du Q-Z (杜晴洲), Chen J-X (陈建新), et al. Effect of *Phyllostachys heterocycla* var. *pubescens* spreading on bird diversity. *Journal of Zhejiang Forestry Science & Technology* (浙江林业科技), 2008, **28**(4): 43-46 (in Chinese)

[6] Wu J-S (吴家森), Jiang P-K (姜培坤), Wang Z-L (王祖良). The effects of *Phyllostachys pubescens* expansion on soil fertility in National Nature Reserve of Mount Tianmu. *Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis* (江西农业大学学报), 2008, **30**(4): 689-692 (in Chinese)

[7] Yang Q-P (杨清培), Wang B (王 兵), Guo Q-R (郭起荣), et al. Effects of *Phyllostachys edulis* expansion on carbon storage of evergreen broad-leaved forest in Dagangshan Mountain, Jiangxi. *Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis* (江西农业大学学报), 2011, **33**(3): 529-536 (in Chinese)

[8] Kiyoshi O, Shigeyuki S, Hiroko F. Causal analysis of the invasion of broad-leaved forest by bamboo in Japan. *Journal of Vegetation Science*, 1996, **7**: 723-728

[9] Suzuki S, Nakagoshi N. Expansion of bamboo forests caused by reduced bamboo-shoot harvest under different natural and artificial conditions. *Ecological Research*, 2008, **23**: 641-647

[10] Chapin FS, Matson PA, Mooney HA. Principles of Terrestrial Ecosystem Ecology. New York: Springer Verlag,

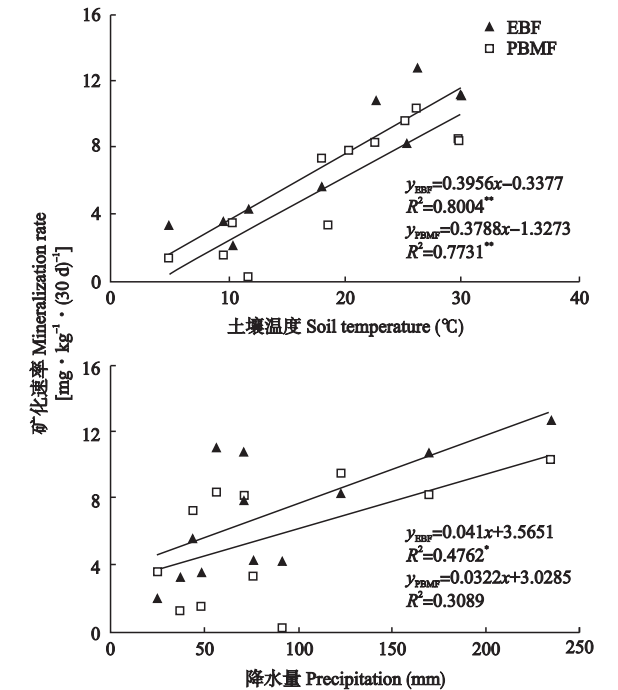


图 5 土壤氮矿化速率与土壤温度和降水量的关系

Fig. 5 Relationship of nitrogen mineralization rate and soil temperature, precipitation.

* $P<0.05$; ** $P<0.001$.

- 2002
- [11] Ingestad T. Plant growth in relation to nitrogen supply. *Ecology*, 1981, **33**: 268–271
- [12] Jones DL, Healey JR, Willett VB, *et al.* Dissolved organic nitrogen uptake by plants: An important N uptake pathway? *Soil Biology and Biochemistry*, 2005, **37**: 413–423
- [13] Binkley D, Hart SC. The components of nitrogen availability assessments in forest soils. *Advances in Soil Science*, 1989, **10**: 57–112
- [14] Yan ER, Wang XH, Huang JJ, *et al.* Decline of soil nitrogen mineralization and nitrification during forest conversion of evergreen broad-leaved forest to plantations in the subtropical area of Eastern China. *Biogeochemistry*, 2008, **89**: 239–251
- [15] Vitousek PM, Howarth RW. Nitrogen limitation on land and in the sea: How can it occur? *Biogeochemistry*, 1991, **13**: 87–115
- [16] Wang B (王 兵), Li H-J (李海静), Guo Q-S (郭泉水). Studies on Biodiversity of Forest in Dagangshan Mountain, Jiangxi Province. Beijing: China Forestry Press, 2005 (in Chinese)
- [17] Zhang XL, Wang QB, Li LH, *et al.* Seasonal variations in nitrogen mineralization under three land use types in a grassland landscape. *Acta Oecologica*, 2008, **34**: 322–330
- [18] Lu R-K (鲁如坤). Method of Soil Agricultural Chemistry Analysis. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000 (in Chinese)
- [19] State Forestry Administration of China (国家林业局). Forest Soil Analysis Methods (LY/T 1210-1275-1999). Beijing: China Standards Press, 1999 (in Chinese)
- [20] Wei XR, Shao MG, Fu XL, *et al.* The effects of land use on soil N mineralization during the growing season on the northern Loess Plateau of China. *Geoderma*, 2011, **160**: 590–598
- [21] Pajuste K, Frey J. Nitrogen mineralisation in podzol soils under boreal Scots pine and Norway spruce stands. *Plant and Soil*, 2003, **257**: 237–247
- [22] Fan S-H (范少辉), Xiao F-M (肖复明), Wang S-L (汪思龙), *et al.* Fine root biomass and turnover in moso bamboo plantation in Huitong Forest Station, Hunan Province. *Scientia Silvae Sinicae* (林业科学), 2009, **45**(7): 1–6 (in Chinese)
- [23] Zhou B-Z (周本智), Fu M-Y (傅懋毅). Review on bamboos under ground rhizome-root system research. *Forest Research* (林业科学研究), 2004, **17**(4): 533–540 (in Chinese)
- [24] Li S-X (李生秀). Soil and Plant Nitrogen in Dryland Areas of China. Beijing: Science Press, 2008 (in Chinese)
- [25] Su B (苏 波), Han X-G (韩兴国), Qu C-M (渠春梅), *et al.* Net nitrogen mineralization and nitrification in one pure pine (*Pinus tabulaeformis*) forest and one pine-oak mixed forest in dangling mountainous region. *Acta Phytocologica Sinica* (植物生态学报), 2001, **25**(2): 195–203 (in Chinese)
- [26] Jiang YM, Chen CG, Liu YQ, *et al.* Soil soluble organic carbon and nitrogen pools under mono- and mixed species forest ecosystems in subtropical China. *Journal of Soils and Sediments*, 2010, **10**: 1071–1081
- [27] Rau BM, Johnson DW, Blank RR, *et al.* Woodland expansion's influence on belowground carbon and nitrogen in the Great Basin U. S. *Journal of Arid Environments*, 2011, **75**: 827–835
- [28] Niu H-B (牛红榜), Liu W-X (刘万学), Wan F-H (万方浩). Invasive effects of *Ageratina adenophora* Sprengel (Asteraceae) on soil microbial community and physical and chemical properties. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2007, **27**(7): 3051–3060 (in Chinese)
- [29] Jackson RB, Banner JL, Jobbágy EG, *et al.* Ecosystem carbon loss with woody plant invasion of grasslands. *Nature*, 2002, **418**: 623–626
- [30] Eviner VT, Chapin FS, Vaughn CE. Seasonal variations in plant species effects on soil N and P dynamics. *Ecology*, 2006, **87**: 974–986
- [31] Zeng DH, Hu YL, Chang SX, *et al.* Land cover change effects on soil chemical and biological properties after planting Mongolian pine (*Pinus sylvestris* var. *mongolica*) in sandy lands in Keerqin, northeastern China. *Plant and Soil*, 2009, **317**: 121–133
- [32] Hawkes CV, Wren IF, Herman DJ, *et al.* Plant invasion alters nitrogen cycling by modifying the soil nitrifying community. *Ecology Letters*, 2005, **8**: 976–985
- [33] Parker SS, Schimel OP. Invasive grasses increase nitrogen availability in california grassland soils. *Invasive Plant Science and Management*, 2010, **3**: 40–47
- [34] Lu J-Z (陆健忠), Qiu W (裘 伟), Chen J-K (陈家宽), *et al.* Impact of invasive species on soil properties: Canadian goldenrod (*Solidago canadensis*) as a case study. *Biodiversity Science* (生物多样性), 2005, **13**(4): 347–356 (in Chinese)

作者简介 宋庆妮, 女, 1988 年生, 硕士研究生. 主要从事竹林生态学研究. E-mail: songqingni@126.com

责任编辑 李凤琴