

氮磷添加对中亚热带常绿阔叶林土壤有效氮和 pH 值的影响

苏渝钦^{1,2} 刘何铭^{1,2} 郑泽梅^{1,2*} 林莉^{1,2} 李彬彬^{1,2} 王希华^{1,2}

(¹华东师范大学生态与环境科学学院, 上海 200241; ²浙江天童森林生态系统野外科学观测研究站, 浙江宁波 315114)

摘要 为了确定施肥类型和施肥时间对中亚热带常绿阔叶林土壤有效氮和 pH 值的影响, 通过在浙江天童木荷林 (*Schima superba*) 设置 4 种施肥处理 (对照: 不添加; 氮添加: $100 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$; 磷添加: $15 \text{ kg P} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 和氮磷添加 $100 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1} + 15 \text{ kg P} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$) 测定了氮磷添加后森林土壤有效氮和 pH 值的变化。结果表明: 1) 氮添加显著促进了土壤铵态氮和硝态氮含量的增加, 增加幅度随着施氮时间的延长而增加; 磷添加对土壤铵态氮含量无显著影响, 但能显著降低土壤硝态氮含量; 氮磷添加显著增加土壤硝态氮含量, 随着施氮时间的延长, 氮磷添加显著增加土壤铵态氮。2) 随着施氮时间的延长, 氮添加和氮磷添加均能显著降低土壤 pH 值; 磷添加对土壤 pH 值无显著影响。3) 相对硝态氮含量的增加而言, 相同程度的土壤铵态氮含量的增加后土壤 pH 值降低的幅度更大。

关键词 施肥; 铵态氮; 硝态氮; 酸化; 常绿阔叶林

Effects of N and P addition on soil available nitrogen and pH in a subtropical forest. SU Yu-qin^{1,2}, LIU He-ming^{1,2}, ZHENG Ze-mei^{1,2*}, LIN Li^{1,2}, LI Bin-bin^{1,2}, WANG Xi-hua^{1,2} (¹*School of Ecological and Environmental Sciences, East China Normal University, Shanghai 200241, China*; ²*Tiantong National Observation Station of Forest Ecosystem, Ningbo 315114, Zhejiang, China*).

Abstract: In order to understand the effects of N and P addition on soil available nitrogen and pH in a subtropical evergreen broadleaved forest dominated by *Schima superba*, we investigated contents of soil $\text{NH}_4^+\text{-N}$, $\text{NO}_3^-\text{-N}$ and pH. Four N and P addition treatments were included as follows: CK (no addition of N and P), N ($100 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$), P ($15 \text{ kg P} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$) and NP ($100 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1} + 15 \text{ kg P} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$). The results showed that: 1) The soil $\text{NH}_4^+\text{-N}$ and $\text{NO}_3^-\text{-N}$ concentrations were significantly increased after N addition, and the range of stimulation increased with prolonged nitrogen fertilization time. The soil $\text{NO}_3^-\text{-N}$ concentration was significantly decreased by P addition, and there was no significant impact on soil $\text{NH}_4^+\text{-N}$ concentration under P addition. NP addition significantly increased the soil $\text{NO}_3^-\text{-N}$ concentration, and N addition alone had more obvious effects on the soil $\text{NO}_3^-\text{-N}$ concentration than NP addition. The response of soil $\text{NH}_4^+\text{-N}$ concentration to NP addition turned from insignificant to significant over time. 2) The soil pH decreased obviously with prolonged N addition and NP addition time, while remained stable under P addition. 3) Relative to the increase of nitrate nitrogen concentration, the same increase of soil ammonium nitrogen concentration resulted in a greater decline in pH value.

Key words: fertilization; ammonium nitrogen; nitrate nitrogen; acidification; evergreen broad-leaf forest.

国家自然科学基金项目(31000231)和高等学校博士学科点专项科研基金项目(新教师类)(20100076120025)资助。

收稿日期: 2015-12-23 接受日期: 2016-06-15

* 通讯作者 E-mail: zmzheng@ecnu.edu.cn

氮是限制陆地生态系统植物生长的营养元素之一 (Vitousek *et al.*, 1991), 其有效性对于调节森林生态系统结构和功能具有重要的作用 (Kaye *et al.*, 2003)。土壤中的有效氮主要以铵态氮 ($\text{NH}_4^+\text{-N}$) 和硝态氮 ($\text{NO}_3^-\text{-N}$) 形式存在, 在没有额外氮输入的生态系统中, 氮素的内部循环通常比较稳定, 极少损失 (Berg *et al.*, 1997)。然而, 化石燃料燃烧和农田施肥量增加等人类活动的加剧使得大气氮沉降量明显增加并趋于全球化 (Gruber *et al.*, 2008), 这一变化会直接影响土壤氮的有效性 (方运霆等, 2004; Sun *et al.*, 2016)、氮的生物循环速率及其与外界的氮交换量 (Aber *et al.*, 1997), 最终会对生态系统的结构和功能产生深刻影响 (Galloway *et al.*, 2008), 开展氮添加对土壤有效氮影响的研究能为深入探讨氮添加对生态系统的影响奠定基础。

已有研究发现, 氮添加对土壤氮的有效性的影响与施肥时间长短、施肥量及生态系统原有的养分有效性有关 (Groffman *et al.*, 2011; Zhang *et al.*, 2014)。大多数研究都表明, 氮添加能显著提高土壤中铵态氮和硝态氮的含量 (Bejarano *et al.*, 2014; 王文娟等, 2015), 这与氮添加加速了土壤有机氮的矿化速率有关 (陈立新等, 2012; Sun *et al.*, 2016)。而对于氮素水平已接近饱和的生态系统而言, 过量或长期的氮添加会导致氮素的供应超过土壤微生物和植物的养分需求, 造成土壤中的硝态氮通过淋溶和反硝化的方式流失 (Du *et al.*, 2016), 加快土壤酸化进程 (肖辉林, 2001)。目前, 国内关于氮添加对森林土壤有效氮影响的报道多集中于温带和南亚热带地区 (方运霆等, 2004; 陈立新等, 2011; 陈高起等, 2014), 对于长三角中亚热带森林的报道较少, 而该地区的氮素湿沉降量达到 $26.9 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ (谢迎新等, 2008), 约 2 倍于全国平均水平 ($11.11 \sim 13.87 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$) (Jia *et al.*, 2014), 是全国氮素沉降最高的地区之一。高的氮素沉降可能引起土壤氮素有效性的改变和土壤酸化, 严重威胁生态系统的健康发展。因此, 有必要加强氮添加对长三角中亚热带森林土壤有效氮和 pH 值影响的研究工作。

本研究以浙江天童中亚热带常绿阔叶林为研究对象, 受磷元素代谢过程和高氮素沉降量的影响, 本研究区域的森林生态系统明显受磷限制 (阎恩荣等, 2008)。通过开展氮磷添加实验, 分析了施肥类型和施肥时间对该类森林土壤有效氮含量和 pH 值的影响。根据已有研究的普遍结论 (方运霆等,

2004; 陈立新等, 2012; Bejarano *et al.*, 2014), 我们假设: (1) 本生态系统不受氮限制 (木荷群落叶片 $\text{N}:\text{P}=18.77$) (阎恩荣等, 2008), 氮添加会促进土壤硝化作用, 导致土壤有效氮含量增加, 加剧土壤酸化; (2) 本生态系统受磷限制, 磷添加能缓解土壤氮磷比例失衡, 促进土壤微生物活性和植物对氮的吸收能力 (Treseder *et al.*, 2001; Blanes *et al.*, 2012; Marklein *et al.*, 2012), 磷添加通过促进植物和微生物对有效氮的吸收和固持降低土壤有效氮含量; (3) 在氮添加的基础上同时进行磷添加, 会削弱氮添加对土壤有效氮和 pH 值的影响。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

研究地点位于浙江天童森林生态系统国家野外科学观测研究站站区内 ($29^\circ 48' \text{ N}$, $121^\circ 47' \text{ E}$, 海拔 160 m)。研究区域隶属浙闽山地常绿阔叶林生态区 (VA1) 东部, 气候属中亚热带湿润季风气候。年平均气温 16.2°C , 最热月平均气温 28.1°C , 最冷月平均气温 4.2°C 。年降水量 1374.7 mm , 多集中于夏季 (6—8 月), 占全年降水量的 35%~40%, 冬季 (12—次年 2 月) 冷而干燥, 仅占全年降水量的 10%~15%。土壤为砂岩和花岗岩残积风化而形成的山地黄红壤, 质地以中壤为主, 腐殖质层土壤有机质含量约为 $110 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 0~20 cm 表层土壤有机质含量约为 $40 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, pH 值为 4.5~5.1 (宋永昌等, 1995)。

1.2 氮磷添加实验

氮磷添加实验在站区立地较为整齐平坦、土壤养分含量、林分密度相对均匀的木荷林内进行。该样地在 20 世纪 60 年代经历过砍伐, 后自然演替为次生林。样地乔木层的优势种为木荷、石栎 (*Lithocarpus glaber*)、山矾 (*Symplocos sumuntia*) 等, 平均林分密度为 $3797 \text{ 株} \cdot \text{hm}^{-2}$, 平均胸径约 24 cm, 层高度为 12~20 m, 林龄约 25 a; 灌木层优势种为连蕊茶 (*Camellia fraterna*)、老鼠矢 (*Symplocos stellaris*) 等, 层高度为 1.5~5 m; 草本层主要为里白 (*Hieriopteris glauca*)、蕨类。

参照研究长江三角洲地区大气本底湿氮沉降量 ($26.9 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)、本样地土壤 $\text{N}:\text{P}$ 本底比例 (阎恩荣等, 2007) 及参照国际上通用的施氮量成倍增加的惯例, 共设置 4 个施肥处理, 分别为对照 CK ($0 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)、氮添加 N ($100 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)、磷添加 P ($15 \text{ kg P} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$) 和氮磷添加 NP (100

kg N · hm⁻² · a⁻¹ + 15 kg P · hm⁻² · a⁻¹) ,每个处理 3 个重复。每个样方面积均为 20 m × 20 m ,共 12 个样方。各样方之间有 10 m 的间隔 ,并使用 PVC 板进行样方阻隔 ,以减小样方之间因处理差异而产生的相互干扰。从 2011 年 1 月开始 ,每月月初进行 1 次施肥处理。根据施肥水平 ,将 NH₄NO₃ 或 NaH₂PO₄ 溶解于 20 L 自来水中 ,用背式喷雾器将溶液均匀的喷洒于样方林冠下方 ,对对照地喷洒等量的自来水 ,以避免由喷洒自来水带来的林内降水量的差异。

1.3 土壤样品的采集与测定

2011 秋季至 2013 年夏季的每个季节在施肥半个月后进行 1 次土壤采样 ,共计采样 8 次。采用均匀布点的方式 ,在每个样方选择 5 处采样点。采样时 ,先去除掉地表凋落物层和腐殖质层 ,然后用内径为 2.5 cm 的土钻采取 0~20 cm 土层的土壤。将土壤样品带回实验室 ,去除根系、石块和其他杂物并过 2 mm 筛。将同一个样方的 5 个土壤样品混合均匀 ,每个样方得到 1 个混合土样。取约 10 g(精确到 0.01 g) 新鲜土壤 ,在 105 °C 恒温烘干 6~8 h 至恒重 ,以确定土壤质量含水率。称取约 5 g(精确到 0.001 g) 新鲜土壤 ,用 25 mL 的 1 mol · L⁻¹ 的 KCl 溶液提取 ,用全自动间断分析仪 (SmartChem 200 , AMS ,Italy) 测定土壤浸提液中铵态氮和硝态氮的浓度。土壤铵态氮或硝态氮含量 (C_N) 由下式计算得到:

$$C_N = M_N \times 25 \times (1 + W) / M_w \quad (1)$$

式中 , C_N 为土壤铵态氮或硝态氮含量 (mg · kg⁻¹) , M_N 为土壤浸提液中铵态氮或硝态氮的浓度 (mg · L⁻¹) , W 为土壤的质量含水率 (%) , M_w 为新鲜土重 (g) 25 为浸提液体积 (mL) 。

称取通过 2 mm 筛孔的风干土样 10 g 左右(精确至 0.01 g) 置于小白瓶中 ,加入 25 mL 无二氧化碳水。在摇床上 300 r · min⁻¹ 震荡 5 min ,静置 30 min 左右至分层 ,通过玻璃电极测定 pH 值。

1.4 数据分析

分析前 ,首先判断各组数值是否满足正态分布以及方差是否具有齐性 ,如不满足 ,则进行对数转换以满足统计分析的假定条件。采用单因素方差分析法 (one-way ANOVA) 比较不同季节间土壤铵态氮、硝态氮含量及 pH 值的差异 ,采用 LSD 进行配对比较检验。为了分析施肥时间对土壤有效氮含量和 pH 值的影响 ,采用双因素方差分析 (two-way ANO-

VA) 比较两年内(第一年即 2011 秋季至 2012 夏季和第二年即 2012 秋季至 2013 夏季) 不同处理下土壤铵态氮、硝态氮含量及 pH 值年平均值的差别。采用双因素重复测量方差分析 (repeated measures ANOVA) 比较不同处理对 2011 年秋季至 2013 年夏季土壤铵态氮、硝态氮含量及 pH 值的影响。

采用线性回归分析方法分析土壤铵态氮、硝态氮含量对氮磷添加的响应率 (RE) 与 pH 值对氮磷添加的响应率之间的关系 ,其中:

$$RE(\%) = (D_1 / D_0 - 1) \times 100 \quad (2)$$

式中 D₀ 为对照处理下土壤硝态氮、铵态氮或者 pH 值 , D₁ 为氮磷添加处理下土壤铵态氮、硝态氮或者 pH 值。RE 为正值表示氮磷添加后土壤铵态氮、硝态氮含量和 pH 增大; 负值表示氮磷添加后土壤铵态氮、硝态氮含量和 pH 值减小 ,土壤酸化加剧。

本统计分析采用 SPSS 13.0 软件完成 ,方差分析和回归分析的显著性均设定为 α = 0.05。

2 结果与分析

2.1 土壤有效氮和 pH 值的季节动态

对照处理下 ,天童木荷林 0~20 cm 土壤铵态氮和硝态氮含量季节差异显著 (图 1a、1b) 。土壤铵态氮含量在冬季最低 (9.72 ± 0.64 mg · kg⁻¹) ,显著低于其他 3 个季节; 在秋季最高 (16.82 ± 1.98 mg · kg⁻¹) ,显著高于春季和冬季 ,土壤铵态氮年平均值为 (12.99 ± 2.95) mg · kg⁻¹ 。土壤硝态氮含量在冬季最低 (21.86 ± 1.07 mg · kg⁻¹) ,显著低于其他 3 个季节; 在秋季最高 (27.53 ± 3.07 mg · kg⁻¹) ,土壤硝态氮年平均值为 (25.30 ± 2.47) mg · kg⁻¹ 。对照处理下 ,NO₃⁻-N 为天童木荷林各季节土壤有效氮的主要存在形式 ,占土壤有效氮的 66% 。土壤 pH 值的年内变化较小 (4.17~4.27) ,各季节的土壤 pH 值没有显著差异 (图 1c) 。

2.2 氮磷添加对土壤有效氮和 pH 值的影响

氮添加处理下 ,土壤铵态氮含量显著地增加 (图 2a) ,增加幅度由第一年 (2011 秋季至 2012 夏季) 的 24% 增加到第二年 (2012 秋季至 2013 夏季) 的 68% 。重复测量方差分析显示 ,氮添加与年份对土壤铵态氮含量的影响存在显著的交互效应 (表 1) 。磷添加对土壤铵态氮含量的影响没有达到显著水平。氮磷同时添加处理下 ,第一年土壤铵态氮含量的响应不显著 ,第二年土壤铵态氮含量显著地增加了 59% ,但相对氮添加处理的增加幅度有所降

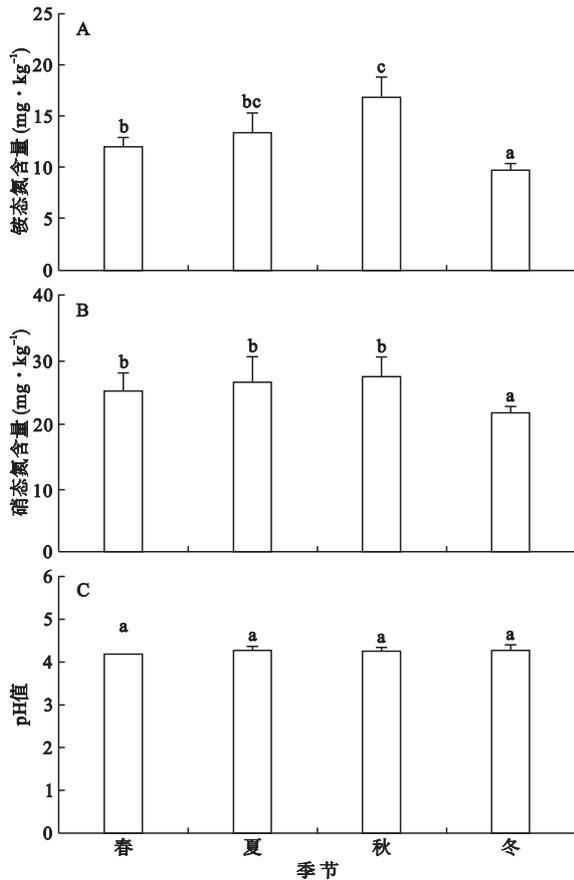


图 1 土壤铵态氮 (a)、硝态氮 (b) 含量和 pH (c) 值的季节动态

Fig.1 Seasonal dynamics of soil NH₄⁺-N concentration (a), NO₃⁻-N concentration (b) and pH value (c) 数值为平均值±标准差。对研究期内同一季节的数据进行了平均处理,同一图中不同小写字母表示均值的差异显著(P<0.05)。下同。

低;氮磷添加对土壤铵态氮的影响不存在交互效应。

氮添加处理下,土壤硝态氮含量显著地增加(图 2b),增加幅度从第一年的 106% 增加到第二年的 160%。磷添加处理下,土壤硝态氮含量则显著降低,降低幅度从第一年的 28% 增加到第二年的 42%。重复测量方差分析显示,氮添加和磷添加与年份对土壤硝态氮含量的影响均存在显著的交互效应(表 1)。氮磷同时添加处理下,土壤硝态氮含量有显著的增加,增加幅度从第一年的 81% 增加到第二年的 115%,但相对氮添加处理的增加幅度有所降低,氮磷

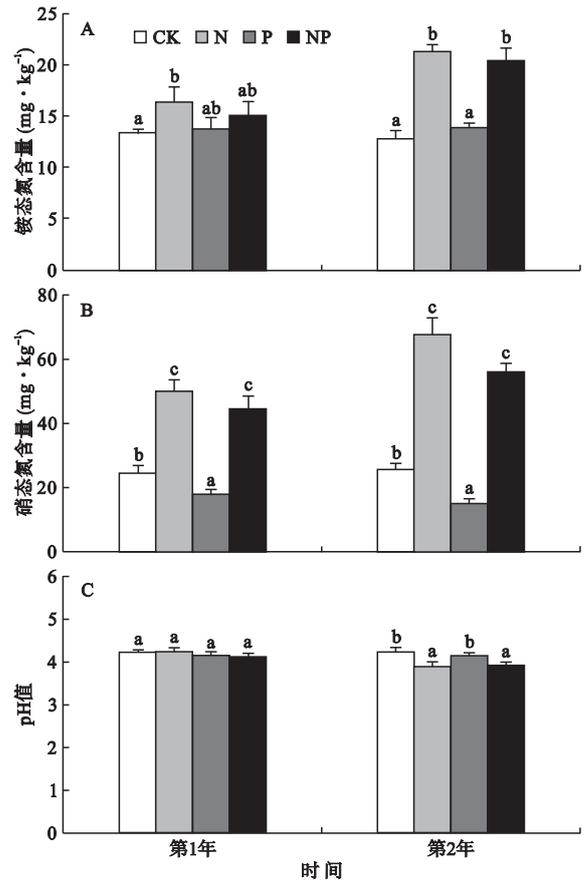


图 2 氮磷添加对土壤铵态氮 (a)、硝态氮 (b) 含量和 pH 值 (c) 年平均值的影响

Fig.2 Effects of fertilization to soil NH₄⁺-N concentration (a), NO₃⁻-N concentration (b) and pH value (c) in *Schima superba* forest 第一年即 2011 秋季至 2012 夏季,第二年即 2012 秋季至 2013 夏季。

添加对土壤硝态氮的影响不存在交互效应。

氮添加处理下,第一年土壤 pH 值的响应不明显,但是第二年土壤 pH 值相对对照处理有明显的降低(图 2c);氮磷同时添加对土壤 pH 值的影响也存在相同的规律。氮添加与年份对土壤 pH 值的影响存在显著的交互效应(表 1)。磷添加对土壤 pH 值无显著的影响。

2.3 氮磷添加条件下土壤有效氮和土壤 pH 值的相互关系

回归分析显示,土壤铵态氮、硝态氮含量对氮磷

表 1 氮磷添加对土壤有效氮组分和 pH 值影响的重复测量方差分析

Table 1 Repeated measures ANOVA of effects of fertilization on available N and pH value

	N	P	Year	N×P	N×Year	P×Year	NP×Year
土壤铵态氮含量	<0.001	0.681	<0.001	0.067	<0.001	0.378	0.758
土壤硝态氮含量	<0.001	<0.001	<0.001	0.998	<0.001	0.033	0.664
土壤 pH 值	0.002	0.472	<0.001	0.193	<0.001	0.730	0.377

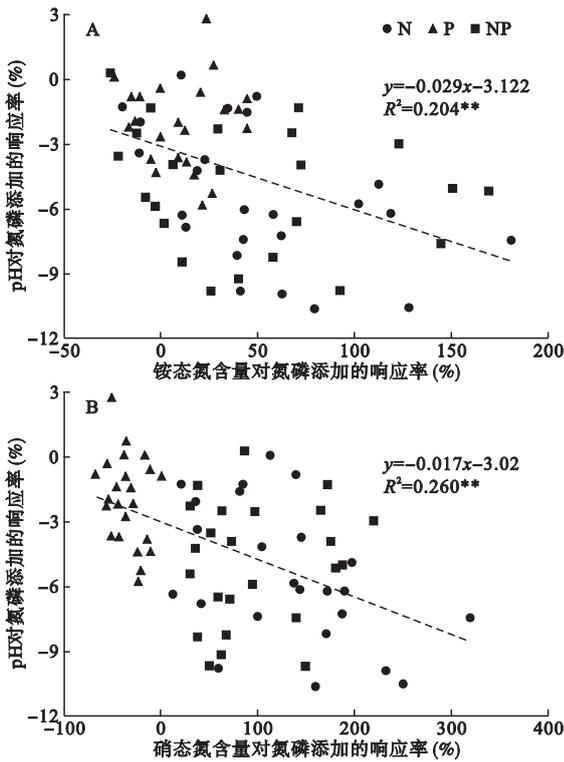


图3 土壤铵态氮(a)、硝态氮(b)含量与土壤pH值对氮磷添加的响应率之间的关系

Fig.3 Relationship between effect ratio of soil available nitrogen concentrations and soil pH value to fertilization

** 土壤有效氮含量与pH值对氮磷添加的响应率的相关性达到极显著水平 ($P < 0.01$), 响应率由公式(2)计算得到。

添加的响应率与土壤pH值对氮磷添加的响应率之间的关系均可以用线性方程来描述, 线性方程的斜率均为负数(图3), 说明随着土壤铵态氮或硝态氮含量的增加, 土壤的酸化程度加强。通过线性回归方程斜率的比较发现, 相对 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 含量的增加而言, 相同程度的土壤 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 含量的增加后, 土壤pH值降低的幅度更大。

3 讨论

3.1 土壤有效氮的组成与季节动态

对对照样地的观测结果表明, 硝态氮是天童木荷林土壤有效氮的主要存在形式, 占到土壤有效氮含量的66%左右(图1a、1b), 与中国亚热带常绿阔叶林、北方原始红松和次生林硝态氮占土壤有效氮的比例(54%~60%)基本相当(方运霆等, 2004; 胡艳玲等, 2009)。天童木荷林土壤铵态氮和硝态氮含量的较大值出现在夏季或秋季(图1a、1b), 应与土壤矿化速率和地下生物对氮的吸收速率间的平衡有关。本研究区域夏季高温多雨, 水热条件好, 植物

生长速度快, 微生物活性强, 土壤矿化速率高(土壤原位矿化数据, 未发表), 矿化产生的有效氮一部分被植物吸收, 一部分仍以硝态氮或铵态氮形式存在; 秋季为植物生长旺季末期, 植物根系的吸收作用减弱, 矿化作用产生有效氮在土壤中不断累积, 使得有效氮含量在该季节达到最大值(图1a、1b)。

3.2 氮磷添加对土壤有效氮的影响

本研究发现, 氮添加能显著地促进天童木荷林土壤铵态氮含量的增加(图2a), 与本研究的假设(1)相一致, 也与大多数温带、亚热带和热带地区森林的研究结果是一致的(方运霆等, 2004; 陈立新等, 2011; Bejarano *et al.*, 2014)。氮添加对土壤铵态氮的影响与年份存在交互效应(表1和图2a), 一方面说明氮添加对土壤铵态氮的影响存在累计效应, 另一方面意味着氮添加将改变土壤氮素生物循环过程(氨化、硝化作用速率的改变、植物吸收、微生物的N固持量), 进而引起的铵态氮的响应程度在不同年份存在差异。本研究区域的植物生长不受氮限制(阎恩荣等, 2008), 人工喷洒的氮溶液能快速进入土壤层参与氮素的生物循环, 因此土壤铵态氮在氮添加的初期显著增加(图2a)。随着氮输入时间的延长, 添加的氮则更多会被微生物所固持而生成有机氮, 该部分的氮又在土壤氨化作用下以 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 形式回归土壤(Adams *et al.*, 1984), 从而导致了第二年铵态氮的增加(图2a)。

土壤氮添加能显著地促进天童木荷林土壤硝态氮含量的增加(图2b), 但是土壤氮添加对土壤硝态氮含量的促进作用要高于对土壤铵态氮含量的促进作用(图2a、2b)。可能的原因是: 一方面在土壤氮素的生物循环过程中, 当土壤氨化作用产生的铵态氮超过了植物吸收和微生物固持量后, 多余的铵态氮会在土壤硝化作用下转化为硝态氮; 另一方面氮添加可能会提高土壤矿化作用中硝化作用的比例(Bejarano *et al.*, 2014), 导致更多的硝态氮在土壤中的积累。

本研究结果表明, 磷添加对铵态氮的影响不明显, 但能显著降低土壤硝态氮的含量(图2a、2b), 这与本研究假设(2)相一致。土壤的养分状态是影响土壤有效氮对磷添加响应的重要因素之一。在土壤有效磷含量高的区域, 磷添加对土壤有效氮的影响不明显(Finzi, 2009; Groffman *et al.*, 2011), 但是对于本研究区域而言, 磷添加能够缓解本区域生态系统的磷限制。磷限制的缓解一方面可提高土壤微生物

的活性,导致氨化作用的增强;另一方面植物和微生物的氮吸收和固持能力也会提高,因氨化作用产生的铵态氮又会被植物根系或土壤微生物大量吸收或固持,进而引起土壤硝化作用的减弱,最后导致土壤硝态氮含量的降低(图2b)。

3.3 氮磷添加对土壤酸化的影响

土壤 pH 产生和消耗与氮的生物化学反应有着重要联系,并受到铵态氮和硝态氮输入与输出平衡状态的影响(肖辉林,2001)。本研究发现,随着氮添加的持续进行,氮输入对土壤 pH 的影响由无显著变为显著降低(图2c),土壤铵态氮、硝态氮含量对氮磷添加的响应率与 pH 值对氮磷添加的响应率之间的线性关系(图3),证实了土壤酸化与土壤铵态氮和硝态氮含量变化之间的直接联系。但是,土壤铵态氮的增加比硝态氮的增加对土壤 pH 值降低的影响更大(图3),意味着铵态氮离子的增加更能促进土壤的酸化,与土壤在硝化过程中 1 mol 铵根离子在转化成硝酸根离子时会产生 2 mol H⁺ 有关(Skeffington,1990)。

4 结论

氮添加能显著增加土壤有效氮含量,影响程度存在年际差异;氮添加对土壤硝态氮的促进作用要高于对土壤铵态氮的促进作用。研究结果意味着氮添加可通过改变土壤氮素生物循环过程,进而引起土壤有效氮的改变。磷添加能显著降低土壤硝态氮的含量,可能与氮添加后可缓解研究区域的磷限制有关。土壤铵态氮的增加比硝态氮的增加对土壤 pH 值降低的影响更大,意味着铵根离子的增加更能促进土壤的酸化。

参考文献

陈高起,傅瓦利,罗亚晨,等. 2014. 氮添加对生长季寒温带针叶林土壤有效氮和酸化的影响. *环境科学*, **35**(12): 4686-4694.

陈立新,段文标. 2011. 模拟氮沉降对温带典型森林土壤有效氮形态和含量的影响. *应用生态学报*, **22**(8): 2005-2012.

陈立新,黄兰英,乔璐,等. 2012. 模拟氮沉降对温带不同森林类型土壤氮矿化速率的影响. *水土保持学报*, **26**(6): 139-146.

方运霆,莫江明,周国逸,等. 2004. 南亚热带森林土壤有效氮含量及其对模拟氮沉降增加的初期响应. *生态学报*, **24**(11): 2353-2359.

胡艳玲,韩士杰,李雪峰,等. 2009. 长白山原始林和次生林土壤有效氮含量对模拟氮沉降的响应. *东北林业大学*

学报, **37**(5): 36-38.

宋永昌,王祥荣. 1995. 浙江天童森林公园的植被和区系. 上海: 上海科技文献出版社.

王文娟,赵超,杨鑫,等. 2016. 不同林龄杨树人工林土壤有效氮对模拟氮沉降的初期响应. *南京林业大学学报: 自然科学版*, **39**(4): 15-21.

肖辉林. 2001. 大气氮沉降对森林土壤酸化的影响. *林业科学*, **37**(4): 111-116.

谢迎新,张淑利,赵旭,等. 2008. 长江三角洲地区雨水中 NH₄⁺-N/NO₃⁻-N 和 δ¹⁵NH₄⁺ 值的变化. *应用生态学报*, **19**(9): 2035-2041.

阎恩荣,王希华,陈小勇. 2007. 浙江天童地区常绿阔叶林退化对土壤养分库和碳库的影响. *生态学报*, **27**(4): 1646-1655.

阎恩荣,王希华,周武. 2008. 天童常绿阔叶林演替系列植物群落的 N:P 化学计量特征. *植物生态学报*, **32**(1): 13-22.

Aber JD, Ollinger SV, Scoll CT. 1997. Modeling nitrogen saturation in forest ecosystems in response to land use and atmospheric deposition. *Ecological Modelling*, **101**: 61-78.

Adams MA, Attiwill PM. 1984. Patterns of nitrogen mineralization in 23-year old pine forest following nitrogen fertilizing. *Forest Ecology and Management*, **7**: 241-248.

Bejarano M, Etchevers JD, Ruíz-Suárez G, et al. 2014. The effects of increased N input on soil C and N dynamics in seasonally dry tropical forests: An experimental approach. *Applied Soil Ecology*, **73**: 105-115.

Berg MP, Verhoef HA, Bolger T, et al. 1997. Effects of air pollutant-temperature interactions on mineral-N dynamics and cation leaching in replicate forest soil transplantation experiments. *Biogeochemistry*, **39**: 295-326.

Blanes MC, Emmett BA, Viñeña B, et al. 2012. Alleviation of P limitation makes tree roots competitive for N against microbes in a N-saturated conifer forest: A test through P fertilization and ¹⁵N labelling. *Soil Biology & Biochemistry*, **48**: 51-59.

Du Y, Guo X, Cao G, et al. 2016. Increased nitrous oxide emissions resulting from nitrogen addition and increased precipitation in an alpine meadow ecosystem. *Polish Journal of Environmental Studies*, **25**: 447-451.

Finzi AC. 2009. Decades of atmospheric deposition have not resulted in widespread phosphorus limitation or saturation of tree demand for nitrogen in southern New England. *Biogeochemistry*, **92**: 217-229.

Galloway JN, Townsend AR, Jan Willem E, et al. 2008. Transformation of the nitrogen cycle: Recent trends, questions, and potential solutions. *Science*, **320**: 889-892.

Groffman PM, Fisk MC. 2011. Phosphate additions have no effect on microbial biomass and activity in a northern hardwood forest. *Soil Biology & Biochemistry*, **43**: 2441-2449.

Gruber N, Galloway JN. 2008. An Earth-system perspective of the global nitrogen cycle. *Nature*, **451**: 293-296.

Jia Y, Yu G, He N, et al. 2014. Spatial and decadal variations in inorganic nitrogen wet deposition in China induced by

- human activity. *Scientific Reports* , **4**: 3763.
- Kaye JP , Dan B , Rhoades C. 2003. Stable soil nitrogen accumulation and flexible organic matter stoichiometry during primary floodplain succession. *Biogeochemistry* , **63**: 1–22.
- Marklein AR , Houlton BZ. 2012. Nitrogen inputs accelerate phosphorus cycling rates across a wide variety of terrestrial ecosystems. *New Phytologist* , **193**: 696–704.
- Skeffington RA. 1990. Accelerated nitrogen inputs: A new problem or a new perspective? *Plant and Soil* , **128**: 1–11.
- Sun J , Peng B , Li W , *et al.* 2016. Effects of nitrogen addition on potential soil nitrogen-cycling processes in a temperate forest ecosystem. *Soil Science* , **181**: 29–38.
- Treseder KK , Vitousek PM. 2001. Effects of soil nutrient availability on investment in acquisition of N and P in Hawaiian rain forests. *Ecology* , **82**: 946–954.
- Vitousek PM , Howarth RW. 1991. Nitrogen limitation on land and in the sea: How can it occur? *Biogeochemistry* , **13**: 87–115.
- Zhang W , Zhu X , Luo Y , *et al.* 2014. Responses of nitrous oxide emissions to nitrogen and phosphorus additions in two tropical plantations with N-fixing vs. non-N-fixing tree species. *Biogeosciences* , **11**: 4941–4951.
-
- 作者简介 苏渝钦,女,1991年生,硕士研究生,主要从事植被生态学研究。E-mail: 605243798@qq.com
责任编辑 张 敏
-