

模拟石灰添加对雷竹林土壤氮矿化的影响^①

程琳^{1,2}, 孙晓², 庄舜尧^{2*}, 杨浩¹

(1 南京师范大学地理科学学院, 南京 210093; 2 中国科学院南京土壤研究所, 南京 210008)

摘要: 土壤酸化是临安雷竹林竹笋生产的主要障碍因子之一。为了提高雷竹笋的产量, 改良酸性土壤, 提高土壤供氮能力极为重要。本研究以不同种植年限的雷竹林土壤为研究对象, 通过模拟试验分析了石灰添加对土壤供氮能力的影响。试验采用 Stanford 间歇淋洗好气培养法, 研究不同石灰添加量处理的土壤氮矿化动力学特征。结果表明, 雷竹林土壤随着种植年限增加, pH 显著降低, 表层有机质和氮素显著积累。不同石灰添加量处理的雷竹林土壤 119 天氮矿化过程符合一级反应动力学方程。与对照相比, 施用石灰后, 土壤氮供应综合指数均有不同程度的提高, 说明添加石灰可显著提高土壤氮的有效性。经估算, 当前雷竹林每千克土壤施用石灰 4~8 g 较适宜, 石灰施用过多, 会导致土壤矿质氮的过量积累, 进而增加氮素损失。因此, 通过合理施用石灰, 可以缓解雷竹林土壤酸化和提高土壤供氮潜力, 增强雷竹的可持续经营。

关键词: 雷竹林; 土壤; 氮矿化; 石灰

中图分类号: S357

雷竹(*Phyllostachys praecox Preveynalis*)是优良笋用竹种, 具有出笋早、出笋期长、产量高、笋味鲜美等优点^[1]。具有“中国竹笋美食之都”美誉的浙江临安, 是我国雷竹的主产区。从 1991 年开始, 临安陆续实施早出覆盖丰产技术来提高竹笋的产量, 从而获得更高的经济效益; 但随着林地实施覆盖年限的增加, 土壤酸化、林地退化、竹笋产量持续下降等问题日渐突显^[1]。土壤作为植物生长的基础, 其酸化使大量营养元素淋失, 土壤肥力下降, 养分供应能力变弱, 从而进一步影响雷竹生长, 造成恶性循环^[2-3]。因此, 改良土壤对雷竹丰产高效的可持续发展有着重要的实际意义。

施用石灰是改良酸性土壤传统和有效的方法。施用石灰可以提高土壤 pH, 有效缓解铝毒和其他重金属毒害, 补充钙镁营养, 改善土壤结构, 提高土壤生物活性和养分循环能力, 从而提高作物产量和品质^[4]。而土壤氮素是土壤肥力中最活跃的因素, 也是农业生产中最重要限制因子之一, 其中矿质氮大部分是作物可以直接吸收和利用的^[5]。国内外许多研究表明, 氮矿化势可作为评价土壤氮肥力和供氮强度的指标, 它既可用于判断不同土壤氮素供应能力的相对

高低, 也可用来估算作物生长期间土壤可能矿化出的氮量及其矿化过程^[6]。所以, 研究土壤氮素的矿化对了解雷竹林土壤的养分供应能力具有重要意义。研究发现, 雷竹林土壤酸化后氮矿化量并未随总氮的增加而增加, 反而是下降的, 也就意味着土壤酸化后氮的供应能力在急剧下降^[7]。目前, 关于酸性土壤施加石灰后对其养分和作物影响的报道比较多, 但是对雷竹林施加石灰对土壤养分动态变化的研究较少, 尤其是从土壤有机氮矿化的角度去研究尚少报道。因此, 本文对集约经营下雷竹林土壤基本性质以及施加石灰对雷竹林土壤氮矿化的影响进行了初步探讨, 以期揭示添加石灰对土壤养分供应能力的影响, 为雷竹林区产量的提高和可持续发展提供理论依据和实践经验。

1 材料与方法

1.1 样区概况与样品采集

样区概况: 供试土壤为南方不同种植年限雷竹林土壤以及对照水稻土, 采集于浙江省临安市太湖源镇光辉村, 地理坐标为 30°16'53"N, 119°33'14"E。临安市位于浙江省西部, 总面积 3 124 km²。属季风气候区, 四季分明, 雨水充足, 年均降水量 1 613.9 mm。

基金项目: 中国科学院战略先导科技专项(XDA05070303)资助。

* 通讯作者(syzhuang@issas.ac.cn)

作者简介: 程琳(1990—), 女, 江西抚州人, 硕士研究生, 主要从事地理环境研究。E-mail: lcheng@issas.ac.cn

光照充足,温暖湿润,年平均气温 15.9℃,最高气温 41.3℃,最低气温 -13.3℃,无霜期年平均为 237 天。境内以丘陵山地为主,土壤为红壤、黄红壤和水稻土 3 种类型。

雷竹集约经营模式:自 1990 年以来,浙江临安采取以大量施肥和冬季地表覆盖有机物酿热增温为主的集约经营模式,该模式为每年分 3 次施肥,时间分别为 5 月中旬、9 月中旬和覆盖前,每年施肥量为无机复合肥(N P K = 16 16 16)2.25 t/hm²和尿素(含 N 460 g/kg)1.125 t/hm²。冬季覆盖通常是在每年 11 月底至 12 月初进行,先在地表覆 10~15 cm 稻草(用量 40 t/hm²),再覆盖 10~15 cm 的荻糠(用量 55 t/hm²),次年 3、4 月份揭去未腐烂的荻糠;下层的稻草经过一个冬春的发酵和雨雪水的淋泡已基本腐烂入土^[8]。

样品采集:在太湖源镇光辉村选取了 3 块分别种植 0 年(以未种植雷竹的水稻田作为对照土壤)、种植 5 年覆盖 1 年、种植 15 年覆盖 4 年停盖 3 年的雷竹林地,后两块地均由水稻田改种雷竹。所选地区土壤背景及土地经营方式一致,只是雷竹的种植年限不同。每块样地随机选取 3 个点进行采样,采样时去除土壤表层的植被凋落物以及覆盖物,并且每个点按 0~20、20~40 和 40~60 cm 采集土壤剖面样品。

1.2 室内土壤有机氮矿化培养

试验共设有 6 个石灰施用水平,分别为:CK、T1、T2、T4、T8、T16(对应每千克土壤施石灰 0、1、2、4、8、16 g),每个处理 3 次重复。实验采用 Stanford 和 Smith^[9]的间歇淋洗好气培养法。在 60 ml 的塑料注射器底部铺上一层玻璃棉(2~3 mm),然后装入 15 g 石英砂,然后再铺上一层玻璃棉,再将 15 g 过 20 目筛的风干土样与 20 g 石英砂和一定量的石灰充分混匀,装入管中,最后在土样上铺上一层玻璃棉,装入 15 g 石英,以防淋洗时冲溅土壤,造成误差。将土样调整至田间持水量的 60%,用塑料膜封口,置于 35℃(此时土壤中微生物的活性很高,并属于土壤温度变化范围之内)恒温箱中恒温培养。在第 0、7、14、28、60、119 天取出样品,用 100 ml 0.01 mol/L CaCl₂ 溶液分 5 次淋洗土样,每次 20 ml。淋洗结束后将注射器放入干燥器中在 8 kPa 负压下抽去多余水分,然后置于恒温箱中继续培养,直至下次淋洗。将各次淋洗液过滤、定容,测定其中矿化出的无机氮(NH₄⁺-N + NO₃⁻-N)及 pH。本实验中所用的石英砂和玻璃棉均用 1:1 的盐酸溶液浸泡 24 h,然后用去离子水不断地清洗,直至石英砂和玻璃棉的 pH 呈中性为止。使得

玻璃棉和石英砂经过处理后不含氮。

矿化出的无机氮用一级动力学方程 $N_t = N_0(1 - e^{-kt})$ 模拟^[9]。式中: N_t 为从试验开始后至 119 天时土壤有机氮累积矿化量; N_0 为氮矿化势; k 为矿化速率常数。文中 N_{14} 为前 14 天土壤有机氮累积矿化量、 N_{14}/N_t 为前 14 天土壤有机氮矿化量占 119 天累积矿化量的比例、 N_{14}/N_0 为前 14 天土壤有机氮矿化量占氮矿化势的比例。

1.3 分析方法

参照鲁如坤主编的《土壤农业化学分析方法》^[10]测定土样的 5 项基本性质和淋洗液的化学指标:pH 用酸度计测定,铵态氮采用靛酚蓝比色法测定,硝态氮采用双波长比色法测定,全氮采用开氏消煮法测定,有机质采用高温外热重铬酸钾氧化-容量法测定。

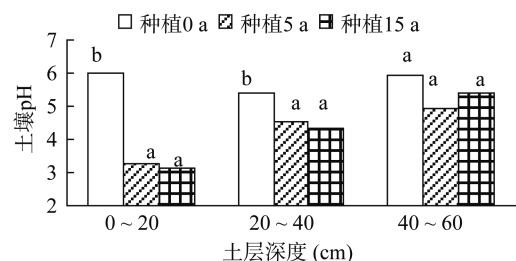
1.4 数据处理

应用 Excel 和 SPSS 对数据进行统计整理;用 Origin8.0 对土壤氮矿化参数进行非线性回归模拟;土壤氮矿化过程用 SigmaPlot10.0 拟合作图。

2 结果和分析

2.1 基本性质

2.1.1 土壤 pH 从图 1 可得,随着种植年限的增加,各层土壤 pH 均不断减少;从土壤剖面来看,雷竹林土壤的 pH 明显随着深度的增加而增加,对照土壤则是随着土层深度的增加,pH 先减少后增加。种植 5 年雷竹林土壤表层 pH 为 3.58,种植 15 年雷竹林土壤表层 pH 为 3.12(pH<4.5,属于强酸性土壤),较对照土壤(pH = 6.03,微酸性土壤)均有极大的下降,说明土壤已严重酸化。这可能与采取连年林地覆盖、过量施用尿素等高强度的经营措施有关^[11]。郑仁红^[12]的研究表明,连续多年的覆盖措施会造成雷竹林土壤酚酸含量的大幅度上升,土壤 pH 不断下降。所以一般竹林连续覆盖 2~3 年后应适当控制覆盖频率和次数。蔡泽江等^[13]和 Guo 等^[14]研究认为,长期



(柱图上方不同小写字母表示同一土层不同种植年限雷竹林土壤间差异在 $P < 0.05$ 水平显著)

图 1 不同种植年限雷竹林土壤 pH 变化

Fig. 1 Changes of soil pH with bamboo planting year

施用化学氮肥是导致红壤 pH 降低的主要原因之一；徐祖祥等^[15]、孙晓等^[16]研究也认为，雷竹土壤连续多年大量施用尿素，进而对土壤 pH 产生影响。

2.1.2 有机质 从图 2 可见，相对对照水稻田，种植雷竹后表层土壤有机质含量显著增加，从种植 0 年的 36.82 g/kg 增加到 5 年的 46.42 g/kg。通常在覆盖经营中，土壤有机质存在持续增加的过程，但是种植 5 年后到 15 年，表层土壤有机质含量并无显著变化，这是由于种植 15 年的雷竹样地在覆盖经营 4 年后停止有机物覆盖 3 年，有机物料来源减少，而土壤有机质分解仍然保持较高速率，使得有机质的含量不再增加。这与刘丽^[11]的研究结果一致。同时，随着土壤剖面深度的增加，雷竹林土壤有机质含量呈下降的趋势，这是由于覆盖模式下，雷竹林土壤有机质主要来源于表层覆盖物和凋落物的腐解，因而主要增加了表层土壤有机质的含量。

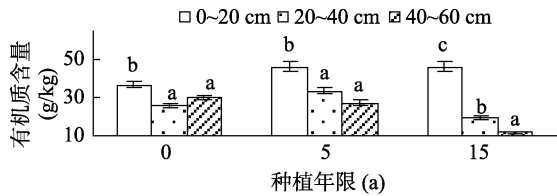


图 2 不同种植年限雷竹林土壤有机质变化
Fig. 2 Changes of soil organic matter contents with bamboo planting year

2.1.3 土壤氮 从表 1 可以发现，土壤全氮前 5 年增长缓慢，表层土壤全氮含量分别较 0 年时增长了 26.9%，底层甚至出现负增长。这与孙晓等^[16]的研究结果相同。这是由于土壤由水田的厌氧环境转化为旱地的好氧环境后，土壤全氮量会有一定的下降^[17]；同时在雷竹种植 5 年内，虽然也施用了氮肥，但是，由于此时竹笋产量不高，施氮量不大，而且覆盖尚未开始，所以在雷竹种植的前 5 年中全氮量增长缓慢^[16]。种植年限为 0 的土壤表层全氮含量为 2.43 g/kg，种植 5 年后缓慢增加到 2.73 g/kg；而种植 15 年后全氮含量下降到 2.41 g/kg，与对照土壤含量相接近。说明土壤全氮含量随着种植年限的增加呈现出先增加后减少的趋势。高志勤^[18]研究认为，随着栽培年限的延长，土壤全氮含量呈现下降趋势。但是，姜培坤等人^[19]认为与土壤有机质随种植年限呈明显上升的趋势相比，土壤全氮随种植历史没有发生明显变化。这些研究结果差异可能与管理方式不同有关。

各层土壤硝态氮含量随种植年限的变化趋势与全氮的一致，均为先增加后减少。从土壤剖面来看，硝态氮含量随着深度的增加而减少。与种植 0 年的相比，种植 5 年后各土层硝态氮的含量急剧上升，其表层、次表层和底层含量分别是 0 年的 16.3、8.7 和 6.0 倍。这主要是由于有些笋农过多施用尿素，造成土壤残留

表 1 不同种植年限雷竹土壤氮素含量的变化
Table 1 Changes of soil nitrogen contents with bamboo planting year

种植年限 (a)	采样深度 (cm)	铵态氮 (mg/kg)	硝态氮 (mg/kg)	全氮 (g/kg)
0	0~20	13.64 ± 5.48 ab	4.94 ± 3.66 a	2.15 ± 0.02 a
	20~40	10.19 ± 5.56 a	7.23 ± 7.90 a	1.97 ± 0.08 b
	40~60	13.09 ± 1.49 c	5.33 ± 5.18 a	1.92 ± 0.25 b
5	0~20	18.12 ± 0.24 b	80.45 ± 3.75 b	2.73 ± 0.09 b
	20~40	11.18 ± 0.37 a	62.69 ± 13.47 b	1.97 ± 0.19 b
	40~60	9.97 ± 1.64 b	32.00 ± 10.44 b	1.09 ± 0.08 a
15	0~20	12.97 ± 1.39 a	53.18 ± 8.39 c	2.63 ± 0.10 b
	20~40	7.16 ± 0.42 a	29.46 ± 0.04 c	1.10 ± 0.04 a
	40~60	5.95 ± 1.15 a	22.73 ± 3.87 b	0.80 ± 0.13 a

注：表中不同小写字母表示同一土层不同种植年限雷竹林土壤间差异在 P<0.05 水平显著。

氮较多，加之按目前生产上的施肥方式，氮肥利用率还不足 30%^[20]，以致于土壤中有效态氮的含量增幅较大。

表层土壤中铵态氮随着种植年限的变化与硝态氮的一致，但是次表层以及底层随种植年限增加并无明显的变化规律。而且，次表层与底层的铵态氮含量较 0 年相比均有所减少，这可能是由于植物的吸收以及在好气条件下肥料铵和矿化释放出来的铵态氮经过硝化作用很快地氧化成硝态氮所引起的。

2.2 施加石灰对土壤有机氮矿化的影响

2.2.1 施加石灰对土壤 pH 的影响 土壤的酸碱度是影响土壤养分平衡和作物生长的重要因素^[21]。图 3 为矿化培养第一天所测得的不同种植年限土壤施加不同石灰量，表层 pH 的变化。从图中可见，施加石灰后，不同种植年限的土壤 pH 都有一定的回升，并且土壤 pH 的增幅随着石灰用量的增加而增大。相关分析研究表明，土壤 pH 与石灰施用量呈线性正相关，

种植 0、5、15 年雷竹林表层土壤其相关系数分别为 0.937、0.929、0.891，均达显著水平 ($P < 0.01$)。这与敖俊华等^[21]对石灰施用量与土壤 pH 的相关性研究结果相一致。但是，当石灰平均施用量超过 8 g/kg 时，pH 增幅加大，有些已经超过了雷竹适宜生长的 pH，最高达到了 11.93。而 pH 大于 9 则会严重影响作物的正常生长和发育，并可导致作物死亡。因此，合理施用石灰，是提高土壤 pH 的有效途径。

2.2.2 施加石灰对土壤氮矿化的影响 对土壤氮矿化实测数据进行拟合，结果表明，土壤有机氮矿化很好地符合一级动力学方程，相关性均达到极显著水平(表 2)。

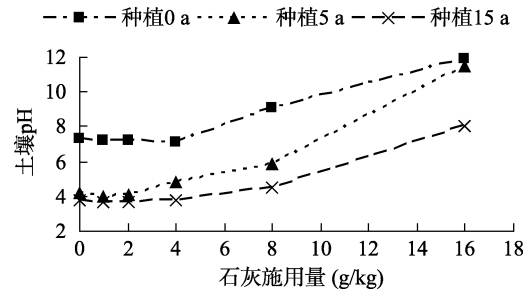


图 3 培养第一天不同种植年限土壤施加不同量的石灰后 pH 的变化

Fig. 3 Changes of soil pH of different bamboo planting years under various lime processing (1d)

表 2 各种植年限不同石灰处理土壤的矿化参数
Table 2 Parameters of the 1st order equation of bamboo soils with or without liming

处理	N_0 (mg/kg)	k (d ⁻¹)	R^2	N_{14} (mg/kg)	N_{14}/N_t (%)	N_t (mg/kg)	N_{14}/N_0 (%)	N_0/TN (%)	$N_0 \times k$ (mg/(kg·d))
A-CK	79.3 a	0.065	0.981	51.0	60.3	84.5	64.3	3.3	5.14
A-T1	118.2 a	0.144	0.992	105.2	85.1	123.6	89.0	4.9	16.97
A-T2	128.5 ab	0.155	0.994	116.6	87.1	133.8	90.7	5.3	19.92
A-T4	153.6 b	0.098	0.982	124.8	77.9	160.2	81.2	6.3	15.05
A-T8	199.1 c	0.126	0.995	165.3	79.6	207.6	83.0	8.2	25.05
A-T16	305.6 d	0.070	0.970	198.7	59.5	333.9	65.0	12.6	21.41
B-CK	89.7 a	0.022	0.977	25.6	29.6	86.4	28.5	3.3	2.00
B-T1	86.7 a	0.039	0.956	40.6	43.7	92.8	46.8	3.2	3.37
B-T2	117.5 ab	0.030	0.868	52.9	41.8	126.5	45.0	4.3	3.47
B-T4	107.7 b	0.052	0.948	60.5	51.0	118.7	56.2	4.0	5.55
B-T8	182.6 c	0.052	0.944	104.8	52.0	201.7	57.4	6.7	9.55
B-T16	265.6 d	0.062	0.979	163.5	57.4	284.6	61.5	9.7	16.60
C-CK	76.9 a	0.034	0.958	34.5	43.2	79.7	44.8	3.2	2.60
C-T1	95.8 a	0.032	0.965	40.6	40.9	99.4	42.4	4.0	3.08
C-T2	103.7 ab	0.029	0.955	43.8	41.0	106.8	42.2	4.3	3.04
C-T4	155.0 b	0.051	0.960	84.4	50.2	168.1	54.4	6.4	7.84
C-T8	167.0 c	0.061	0.980	99.6	55.7	178.8	59.6	6.9	10.23
C-T16	324.7 d	0.044	0.989	155.1	46.1	336.4	47.8	13.5	14.27

注：同列不同小写字母表示不同处理间差异在 $P < 0.05$ 水平显著。处理代号中的 A、B、C 分别表示种植 0 年、种植 5 年、种植 15 年的雷竹林表层土壤，CK、T1、T2、T4、T8、T16 表示不同石灰处理，对应为每千克土壤施石灰 0、1、2、4、8、16 g；表 4 中表示与之相同。

从图 4 可以看出，在培养试验的前 14 天，各种植年限不同石灰处理的土壤累积矿化氮均急剧增加，随后增长速率逐渐变缓，至 28 天后累积矿化量呈缓慢增加趋势，60 天后，累计矿化量增长极为缓慢，至 119 天，累积曲线趋于平稳，矿化氮越来越少，接近平衡。这与罗贤平^[22]及金雪霞等^[23]的结果一致。

在整个 119 天的培养过程中，同一土壤随着石灰施加量的增加，土壤氮的矿化速率不断增加，而且在前 14 天尤为明显，矿化量也随之增加；而石灰施加量越少的处理则越早达到平衡。

有机氮矿化势(N_0)可以反映土壤的供氮容量，矿

化率(k)反映土壤的供氮速度^[23]。24 个供试土壤样品有机氮矿化势(N_0)范围为 76.9 ~ 404.9 mg/kg，平均为 169.1 mg/kg。样品 B-CK 的氮矿化势为 89.7 mg/kg，而 B-T16 的氮矿化势达 265.2 mg/kg，是 B-CK 的 3 倍，C-T16 是 C-CK 的 4.2 倍，A-T16 是 A-CK 的 3.9 倍。土壤 k 值为 0.022 ~ 0.155 d⁻¹ (平均 0.058 d⁻¹)，与不施石灰处理相比，施用石灰后，土壤 k 值都有所提高，A、B、C 地施加石灰处理后 k 值分别较不施石灰处理最大提高了 138.46%、181.82%、79.41%。Serna 和 Pomares^[24]及王正银和青长乐^[25]认为仅用单个矿化参数很难表述供氮能力，而综合指

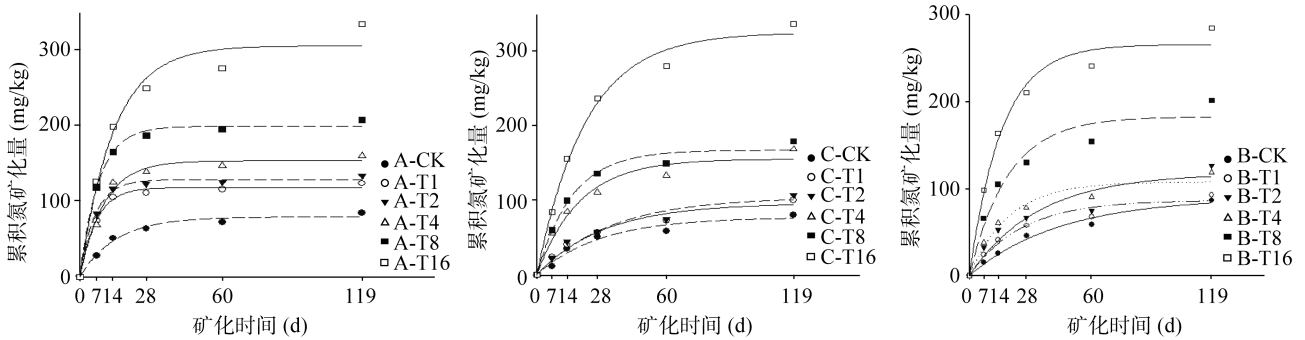


图 4 各种植年限表层土壤不同石灰处理后氮矿化过程
 Fig. 4 Soil nitrogen mineralization process under different lime treatments

数 $N_0 \times k$ 与作物的吸氮量、生物量等都有很好的相关性，可作为更好的供氮指标。本研究所测 24 个土壤样品氮供应综合指数 $N_0 \times k$ 为 1.72 ~ 62.76 mg/(kg·d)，平均 12.79 mg/(kg·d)；A、B、C 地施加石灰处理后土壤氮供应综合指数 $N_0 \times k$ 分别较不施石灰处理最大提高 3.87、7.30 和 4.49 倍。

N_{14} 、 N_N 、 N_{14}/N_N 、 N_{14}/N_0 、 $N_0 \times k$ 等各项指标均随着石灰施加量的增加而增大。种植 5 年和种植 15 年雷竹林土壤的氮矿化势均与石灰用量呈正比；而对照水稻土，其 N_{14} 、 N_N 、 N_0 是随着石灰的增加而增大， N_{14}/N_N 、 N_{14}/N_0 则出现先增加后减少的趋势。

2.2.3 合理的石灰用量 施加石灰后，雷竹林土壤的 pH 随着培养时间的增加呈增长的趋势。石灰施用量与供试酸性土壤 pH 呈显著正相关。已有很多研究证实，适量添加石灰可以提高土壤的 pH、有机质、全氮等养分含量以及一些酶的活性，从而促进土壤氮素的矿化作用^[26-29]。李辉信等^[30]研究认为，添加石灰石粉能有效地促进 pH 较低的红壤氮素的矿化。

雷竹林适宜生长的土壤为微酸至中性^[31]，pH 5 ~ 7。综合图 3 和图 5 可知，种植 5 年的雷竹林土壤石灰施用量为 8、16 g/kg 时，pH 的增幅并不大，建议石灰施加量在 4 g/kg 为宜，种植 15 年以上的雷竹林土壤则应施加石灰 8 g/kg 为宜。所以，在实际生产中应根据雷竹林种植年限的差异来确定适宜石灰施用量，以取得最佳雷笋经济效益。

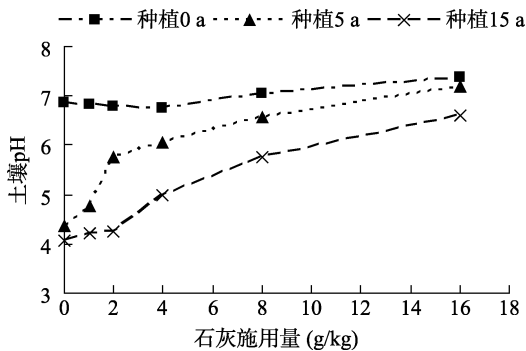


图 5 施加石灰培养 119 天后土壤 pH 变化

Fig. 5 Soil pH varied with time after using lime application (after 119 d)

施加石灰对雷竹表层土壤氮的矿化有显著影响，石灰处理与未处理的土壤氮矿化速率常数无明显差异，而施加石灰后土壤的累计氮矿化量和潜在氮矿化势均显著高于未施加石灰的土壤。土壤中的交换性铵和硝态氮，既是作物可直接吸收的速效氮，又是各种氮素损失过程中共同的源^[32]。因此，石灰用量过高反而会导致土壤矿质氮的过量积累，进而增加氮素因氨挥发、硝化-反硝化和径流而造成的损失。

综合添加石灰对土壤酸碱度调节和对矿化速率以及供氮潜力的影响，雷竹林石灰的适宜施入量应根据雷竹林种植年限、土壤酸度因地制宜确定适宜石灰施用量，本研究中适宜量为 4 ~ 8 g/kg，折合为大田用量为 9.4 ~ 19.8 t/hm²。

3 结论

雷竹林在强度集约经营条件下，由于长期大量施肥、冬季连续多年覆盖导致 pH 显著降低，与对照水稻土(pH = 6.03)相比，种植 5 年表层土壤 pH 下降了 2.62 个单位，种植 15 年则下降了 2.91 个单位，土壤均已严重酸化；表层有机质和氮素积累明显。室内培养 119 天，石灰施用量 8 g/kg 处理使种植雷竹 0、5、15 年土壤 pH 分别上升了 0.18、2.37、2.22 个单位。不同石灰添加量处理的雷竹林土壤 119 天氮矿化过程符合一级反应动力学方程。添加石灰后土壤累计氮矿化量和潜在氮矿化势均显著高于未施加石灰处理，种植 5 年和 15 年雷竹林土壤氮矿化势均随石灰施用量的增加而增加；并且随石灰施用量加大，土壤供氮潜力明显提高。种植 0、5、15 年雷竹林土壤施加石灰后土壤氮供应综合指数 $N_0 \times k$ 分别较不施石灰处理最大提高 3.87、4.62 和 4.49 倍。因此，在雷竹林土壤酸化状况下，需要合理施加石灰，严格控制氮肥的使用量，提高土壤 pH，改善土壤供氮能力，从而使雷竹得以可持续生产。

参考文献：

- [1] 黄美珍, 陈继红, 王丽臻, 吴建新, 胡竹平, 祝霞. 雷竹退化林分改造技术[J]. 林业实用技术, 2007(11): 12-13
- [2] 易杰祥, 吕亮雪, 刘国道. 土壤酸化和酸性土壤改良研究[J]. 华南热带农业大学学报, 2006, 12(1): 23-27
- [3] 尹永强, 何明雄, 邓明军. 土壤酸化对土壤养分及烟叶品质的影响及改良措施[J]. 中国烟草科学, 2008, 29(1): 51-54
- [4] 蔡东, 肖文芳, 李国怀. 施用石灰改良酸性土壤的研究进展[J]. 中国农学通报, 2010, 26(9): 206-213
- [5] 叶优良, 张福锁, 李生秀. 土壤供氮能力指标研究[J]. 土壤通报, 2001, 32(6): 273-277
- [6] 鲁彩艳, 牛明芬, 陈欣, 史奕, 石险峰. 不同施肥制度培育土壤氮矿化势与供氮潜力[J]. 辽宁工程技术大学学报, 2007, 26(5): 773-775
- [7] 钟敏, 戎静, 庄舜尧, 桂仁意. 不同种植年限雷竹林土壤有机氮的矿化[J]. 浙江农业科学, 2011(1): 55-58
- [8] 黄芳, 蔡荣荣, 孙达, 秦华, 杨芳, 庄舜尧, 林先贵, 曹志洪. 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): 1 193-1 196
- [9] Stanford G, Smith SJ. Nitrogen mineralization potentials of soils[J]. Soil Sci Soc. Am. Proc., 1972, 36: 465-472
- [10] 鲁如坤. 土壤农业化学分析法[M]. 北京: 中国农业科学技术出版, 1999: 12-195
- [11] 刘丽. 林地覆盖雷竹林退化特征以及土壤改良研究(硕士学位论文)[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2009
- [12] 郑仁红. 覆盖栽培对雷竹林衰退的化感效应研究(硕士学位论文)[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2006
- [13] 蔡泽江, 孙楠, 王伯仁, 徐明岗, 黄晶, 张会. 长期施肥对红壤 pH、作物产量及氮、磷、钾养分吸收的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2011, 17(1): 71-78
- [14] Guo JH, Liu X J, Zhang Y, Shen JL, Han WX, Zhang WP, Christie P, Goulding KWP, Vitousek PM, Zhang FS. Significant acidification in major Chinese croplands[J]. Sci., 2010, 327: 1 008-1 010
- [15] 徐祖祥, 陈丁红, 李良华, 楼中, 杨文叶. 临安雷竹种植条件下土壤养分的变化[J]. 中国农学通报, 2010, 26(13): 247-250
- [16] 孙晓, 庄舜尧, 刘国群, 李国栋, 桂仁意, 何钧潮等. 集约经营下雷竹种植对土壤基本性质的影响[J]. 土壤, 2009, 41(5): 784-789
- [17] 蔡崇法, 陈家宙, 王长荣, 胡章程. 鄂南红壤丘陵区种植结构调整对土壤养分的影响[J]. 土壤与环境, 2001, 10(1): 47-50
- [18] 高志勤. 集约经营雷竹林土壤质量的演变——以氮磷养分变化为例[J]. 世界竹藤通讯, 2011, 9(2): 10-12
- [19] 姜培坤, 徐秋芳, 储家森, 吴丽君. 雷竹早产高效栽培过程中土壤养分质量分数的变化[J]. 浙江林学院学报, 2006, 23(3): 242-247
- [20] 姜培坤, 俞益武, 金爱武, 王安国, 俞勤民. 丰产雷竹林地土壤养分分析[J]. 竹子研究汇刊, 2000, 19(4): 50-53
- [21] 敖俊华, 黄振瑞, 江永, 邓海华, 陈顺, 李奇伟. 石灰施用对酸性土壤养分状况和甘蔗生长的影响[J]. 中国农学通报, 2010, 26(15): 266-269
- [22] 罗贤平. 围海造田水稻土肥力特点和氮矿化特征研究(硕士学位论文)[D]. 武汉: 华中农业大学, 2008
- [23] 金雪霞, 范晓晖, 蔡贵信. 菜地土氮素的主要转化过程及其损失[J]. 土壤, 2005, 37(5): 492-499
- [24] Serna MD, Pomares F. Nitrogen mineralization of sludge-amended soil[J]. Biores. Tech., 1992, 39: 285-290
- [25] 王正银, 青长乐. 紫色土氮素矿化与作物效应的研究[J]. 中国农业科学, 1994, 27(2): 13-23
- [26] 陈燕霞, 唐晓东, 游媛, 刘芳, 王正银. 石灰和沸石对酸化菜园土壤改良效应研究[J]. 广西农业科学, 2009, 40(6): 700-704
- [27] 熊德中, 李春英, 黄光伟, 曾文龙. 施用石灰对福建低pH 植烟土壤的效应[J]. 中国烟草学报, 1993, 5(1): 25-29
- [28] 唐莉娜, 熊德中. 酸性土壤施石灰对土壤性质与烤烟品质的影响[J]. 中国生态农业学报, 2003, 11(3): 81-83
- [29] 于宁, 关连珠, 娄翼来, 马莹, 颜丽. 施石灰对北方连作烟田土壤酸度调节及酶活性恢复研究[J]. 土壤通报, 2008, 39(4): 849-851
- [30] 李辉信, 胡锋, 郭和生, 蔡贵信, 范晓晖. 添加碳源、磷和石灰对红壤氮素矿化和硝化作用的影响[J]. 土壤, 2001, 33(3): 135-141
- [31] 蒋善明. 墙头镇雷竹高产栽培技术[J]. 宁波农业科技, 2000(3): 226-228
- [32] 朱兆良. 农田中氮肥的损失与对策[J]. 土壤与环境, 2000, 9(1): 1-6

Effect of Liming on Soil Nitrogen Mineralization of *Phyllostachys praecox* Using Lab Incubation Experiment

CHENG Lin^{1,2}, SUN Xiao², ZHUANG Shun-yao^{2*}, YANG Hao¹

(1 School of Geography Science, Nanjing Normal University, Nanjing 210093, China; 2 Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

Abstract: Severe soil acidification is a major constraint to *Phyllostachys praecox* production of Lin'an City, Zhejiang Province. In order to improve bamboo shoots production, it is important to meliorate soil acidity and enhance the availability of soil nitrogen. Soil samples from *Phyllostachys praecox* under various planting years were selected to simulate and analyze the effect of liming on soil nitrogen availability. An intermittent leaching method was adopted to investigate nitrogen mineralization rates and potentials in bamboo soils under various lime application rates. The results showed that soil pH decreased greatly, soil organic matter and nitrogen content in the surface soil increased obviously with the increase of bamboo planting time. A first-order kinetic model could be used well to predict N mineralization as a function of time. The $N_0 \times k$ value of nitrogen mineralization with liming was significantly higher than that without liming, which suggested that liming measure could increase soil nitrogen availability greatly. According to estimation, the suitable amount of lime on bamboo soil was 4–8 g/kg; excessive lime could cause soil mineral nitrogen accumulated excessively, and then increase soil nitrogen loss. Overall, a rational application of lime in acid soil can increase soil pH value and improve soil available N pool and N mineralization rate to enhance the productivity of acidic soils.

Key words: *Phyllostachys praecox*, Bamboo soils, Nitrogen mineralization, Lime