

岩性对毛竹林土壤硅形态的影响

蔡彦彬^{1,2}, 宋照亮^{1,2}, 姜培坤^{1,2}

(1. 浙江农林大学 浙江省森林生态系统碳循环与固碳减排重点实验室, 浙江 临安 311300; 2. 浙江农林大学 环境与资源学院, 浙江 临安 311300)

摘要: 采取发育于5种不同岩性类型(花岗闪长岩、花岗岩、玄武岩、凝灰岩和页岩)的毛竹 *Phyllostachys edulis* 林不同土层(0~20 cm 和 20~40 cm)的土样, 运用逐级化学提取技术, 研究不同岩性条件下发育的土壤中硅的形态以及影响硅转化的因素, 为不同岩性类型土壤有效硅调控提供科学参考。结果表明: ①不同岩性类型土壤中总二氧化硅质量分数从大到小顺序依次为凝灰岩>花岗闪长岩>页岩>花岗岩>玄武岩, 而且不同岩性之间二氧化硅质量分数差异性较大; ②不同岩性类型下发育的毛竹林土壤有效硅质量分数及相对百分比顺序为玄武岩>花岗岩>页岩>花岗闪长岩>凝灰岩, 有效硅主要来源于无定形硅的转化, 与土壤中总二氧化硅的质量分数相关性不大; ③岩性能够影响土壤中总硅数量以及各种硅形态的整体分布。图1表2参22

关键词: 土壤学; 岩性; 毛竹林; 土壤硅形态; 有效硅

中图分类号: S714.2 文献标志码: A 文章编号: 2095-0756(2013)06-0799-06

Silicon fractions in *Phyllostachys edulis* soils derived from different parent materials

CAI Yanbin^{1,2}, SONG Zhaoliang^{1,2}, JIANG Peikun^{1,2}

(1. Zhejiang Provincial Key Laboratory of Carbon Cycling in Forest Ecosystems and Carbon Sequestration, Zhejiang A & F University, Lin'an 311300, Zhejiang, China; 2. School of Environmental and Resource Sciences, Zhejiang A & F University, Lin'an 311300, Zhejiang, China)

Abstract: To provide theory for regulating available silicon (Si) in forest soils, silicon forms and available Si conversion from amorphous Si with sequential chemical extraction technology was studied. In Zhejiang Province *Phyllostachys edulis* stands grown in five different soils derived from five parent materials (granodiorites, granite, basalt, tuff, and shale) were sampled at 0–20 and 20–40 cm with three replicates. Results showed that SiO_2 decreased in the order: tuff>granodiorites>shale>granite>basalt. Available Si and relative percentage of Si were: basalt>granite>shale>granodiorites>tuff. Since available Si mainly came from regulating amorphous Si and had little relevance on total SiO_2 content, soil parent materials affected silicon forms and distribution in *Ph. edulis* forest soils. [Ch, 1 fig. 2 tab. 22 ref.]

Key words: soil science; parent materials; *Phyllostachys edulis* forests; soil silicon fractions; available Si

硅(Si)在地壳中的丰度为28.8%, 是土壤的基本成分, 也是土壤中最丰富的元素之一^[1]。从现有资料看, 作为典型的硅超富集禾本科 Gramineae 植物, 竹林土壤中生物硅的积累通量(210 ~ 485 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$)^[2]远高于赤道雨林土壤(4~6 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$)^[3], 温带草原土壤中硅的积累通量(4~16 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$)^[4]及温带落叶林和针叶林土壤硅的积累通量(分别为0和1 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$)^[5]。毛竹 *Phyllostachys edulis* 林是中国重要的竹林资源类型, 占全国竹林面积的70%左右, 占世界毛竹总量的85%, 而且毛竹生长速度快,

收稿日期: 2012-12-13; 修回日期: 2013-01-30

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41103042); 环境地球化学国家重点实验室开放基金项目(SKLEG9011)

作者简介: 蔡彦彬, 从事土壤环境与生物地球化学研究。E-mail: cyb878787@163. com。通信作者: 姜培坤, 教授, 从事土壤与环境学研究。E-mail: jiangpeikun@zafu.edu.cn

固定二氧化碳能力强,具有很强的碳汇功能^[6]。周国模等^[7]通过对毛竹林地土壤有机碳的研究得出集约经营能够导致土壤碳的大量损失的结论。毛竹广泛分布于400~800 m的丘陵、低山山麓地带,主要集中分布在中国浙江、江西、湖南等中亚热带红壤地区,在浙江临安、安吉、新昌等地毛竹覆盖率较高^[6~7]。目前对集约经营下竹林土壤磷素、氮素和有机质变化的研究^[8~12]已比较深入,竹林土壤硅形态研究^[13]有初步了解,而不同岩性条件下发育的土壤硅形态研究则鲜有报道。本研究选取发育于5种不同岩性的毛竹林土壤,探讨不同岩性土壤硅素及形态变化,为土壤有效硅调控提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 采集区概况

发育于5种(花岗闪长岩、花岗岩、玄武岩、凝灰岩、页岩)不同岩性类型的毛竹林土壤采集分别设于浙江省安吉县山川乡船坝村(30°27'32.76"N, 119°41'6.72"E),绍兴市新昌县巧英乡(29°23'21.36"N, 121°11'24.90"E),绍兴市新昌县大市聚镇(29°28'6.72"N, 120°59'53.16"E),临安市藻溪镇严家村(30°11'56.33"N, 119°32'29.04"E),临安市青山湖(30°13'49.71"N, 119°46'44.98"E)地区。各采集区的母质来源类型是残积,土壤为上述各岩性发育的红壤土类,红壤亚类,土层深度为50~60 cm。

各采集区不同岩石类型产状简介:①安吉县船坝村花岗闪长岩: N50°W∠SW45°,即走向为北偏西50°,倾向向南西倾斜,倾角为45°。②新昌县巧英乡花岗岩: N43°W∠SW52°,即走向为北偏西43°,倾向向西南倾斜,倾角为52°。③新昌县大市聚镇玄武岩: N68°W∠SW47°,即走向为北偏西68°,倾向向西南倾斜,倾角为47°。④临安市藻溪镇严家村凝灰岩: N78°W∠SW56°,即走向为北偏西78°,倾向向西南倾斜,倾角为56°。⑤临安市青山湖页岩: N63°W∠SW45°,即走向为北偏西63°,倾向为西南倾斜,倾角为45°。

不同岩性类型的毛竹林经营方式为样地均采用集约经营方式,林下无灌木、杂草,每年进行松土垦复。5月上旬或中旬施肥1次,肥料一般采用常规施肥,施肥量为氮素(N)300~600 kg·hm⁻²,磷素(P)100~200 kg·hm⁻²,钾素(K)150~250 kg·hm⁻²。肥料撒施在地表,撒施后深翻1次,翻耕深度在30 cm左右。

1.2 样品采集及分析方法

2011年7月上旬,在上述各区域,各选取面积为10 m×10 m的样地3个。同一样地,同一水平位置,挖掘3个土壤剖面,取0~20 cm,20~40 cm土壤(将同一样地3个点取得的土样混匀,作为该样地的土壤样品)。样品采集后,带回实验室,在室温条件下风干,除去砾石和根系后研磨,过2 mm钢筛后封袋备用。土壤pH值、总有机碳、总磷、总硅、铝、铁等质量分数测定方法参考文献[14]。土壤中各种硅形态的提取采用改进的逐级化学提取流程测定^[15]:①醋酸-醋酸钠缓冲液提取有效硅(available Si);②双氧水提取有机结合态硅(organic Si);③盐酸羟胺提取铁锰(氢)氧化物结合态硅(Fe/Mn-oxide Si);④氢氧化钠提取无定型硅(amorphous Si)。其中某种硅形态所占的比列按单位质量土壤该种形态硅质量分数除以单位质量土壤上述4种硅形态质量分数之和再乘以百分之百计算。

1.3 数据处理

数据统计与分析处理采用Excel和SPSS软件^[16],运用Duncun单因素方差分析各处理之间的差异显著性。

2 结果与分析

2.1 土壤基本理化参数

表1为5种不同岩性类型土壤的基本理化参数。由表1可以看出:除了页岩上层土壤pH值大于下层土壤外,其余4种岩性类型土壤pH值都是上层小于下层。有机碳质量分数都是上层土壤大于下层土壤,而且不同岩性类型土壤其上层有机碳差异性很大,下层差异则变小。发育于5种不同岩性类型土壤二氧化硅质量分数相差很大,最低仅有285.98 g·kg⁻¹,而最高却高达878.47 g·kg⁻¹。5种不同岩性类型土壤中,上层土中氧化铝(Al₂O₃)质量分数低于下层土,其中发育于花岗闪长岩和玄武岩2类岩性土壤中质量分数最高。氧化铁(Fe₂O₃)在5种不同岩性类型土壤中的质量分数差异性很大,发育于玄武岩上层

土壤高达 $170.60 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 而发育于花岗岩上层土壤仅为 $26.69 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

表 1 5 种不同岩性类型土壤的基本理化参数

Table 1 Basic physicochemical parameters of the soil profiles from five different lithologies

土层/cm	岩性	pH 值	有机碳/(g·kg ⁻¹)	二氧化硅/(g·kg ⁻¹)	氧化铝/(g·kg ⁻¹)	氧化铁/(g·kg ⁻¹)
0~20	花岗闪长岩	4.33 c	29.25 ab	757.35 b	301.77 a	44.44 c
	花岗岩	4.36 c	32.93 a	473.15 d	184.49 c	26.69 e
	玄武岩	4.54 b	17.34 cd	285.98 e	261.99 b	170.60 a
	凝灰岩	4.34 c	19.22 c	834.97 a	238.19 b	39.40 d
	页岩	5.15 a	13.40 d	658.86 c	128.11 d	55.39 b
20~40	花岗闪长岩	4.56 c	16.61 a	798.37 b	332.38 a	45.78 c
	花岗岩	4.64 b	18.46 a	503.04 d	192.91 d	24.99 d
	玄武岩	4.66 b	11.27 b	316.07 e	310.03 b	169.84 a
	凝灰岩	4.53 c	8.02 b	878.47 a	281.38 c	43.32 c
	页岩	4.88 a	8.27 b	646.01 c	138.59 e	61.83 b

说明: Duncun 单因素方差分析同一土层不同岩性各处理之间的差异显著性, 同列不同字母代表差异达显著水平($P < 0.05$)。

2.2 不同岩性土壤各提取态硅质量分数的分布特征

表 2 为发育于 5 种不同岩性类型土壤剖面各硅形态质量分数。由表 2 不难看出, 不同岩性发育的土壤中各硅形态质量分数差异很大。0~20 cm 土层内, 发育于玄武岩的毛竹林土壤内有效硅质量分数显著高于其他 4 种岩性类型土壤, 而且其质量分数高于 20~40 cm 土层内有效硅质量分数。其他 4 种岩性类型土壤, 有效硅质量分数在 0~20 cm 土层内相差不大, 而且要低于 20~40 cm 土层内有效硅质量分数。2 个土层内, 发育于凝灰岩的毛竹林土壤内有效硅质量分数最低。

有机结合态硅质量分数在 2 个土层内的变化趋势跟上述有效硅质量分数相似。铁锰(氢)氧化物结合态硅除发育于玄武岩的毛竹林土壤内略高于其他岩性类型土壤外, 其他 4 种岩性类型土壤内相对质量分数相差不大。

5 种不同岩性土壤内无定形硅质量分数都是上层高于下层, 其中发育于花岗岩和玄武岩的毛竹林土壤内无定形硅质量分数要高于其他岩性类型土壤, 而发育于页岩的毛竹土壤无定形硅明显低于其他 4 种不同岩性类型土壤。

表 2 5 种不同岩性类型土壤剖面硅形态变化

Table 2 Variation of contents of silicon fractions with depth in the soil profiles from five different lithologies

土层/cm	岩性	有效硅/(g·kg ⁻¹)	有机结合态硅/(g·kg ⁻¹)	铁锰(氢)氧化物结合态硅/(g·kg ⁻¹)	无定形硅/(g·kg ⁻¹)
0~20	花岗闪长岩	0.050 3 \pm 0.001 1 c	0.173 0 \pm 0.008 7 c	0.336 0 \pm 0.009 4 b	7.494 2 \pm 0.845 5 b
	花岗岩	0.067 3 \pm 0.004 3 b	0.151 0 \pm 0.006 9 c	0.344 0 \pm 0.022 3 b	8.994 4 \pm 0.474 9 a
	玄武岩	0.237 5 \pm 0.001 4 a	0.304 5 \pm 0.003 3 a	0.486 1 \pm 0.009 7 a	9.138 4 \pm 0.316 6 a
	凝灰岩	0.041 6 \pm 0.001 8 d	0.106 1 \pm 0.004 7 d	0.283 9 \pm 0.016 2 c	5.277 9 \pm 0.233 9 c
	页岩	0.065 3 \pm 0.000 6 b	0.201 6 \pm 0.000 6 b	0.308 5 \pm 0.024 6 bc	2.151 4 \pm 0.076 2 d
20~40	花岗闪长岩	0.069 5 \pm 0.002 2 c	0.191 1 \pm 0.003 6 b	0.397 6 \pm 0.007 0 b	5.885 9 \pm 0.230 3 b
	花岗岩	0.134 3 \pm 0.011 9 b	0.203 4 \pm 0.010 1 b	0.397 6 \pm 0.001 8 b	8.019 4 \pm 0.420 9 b
	玄武岩	0.164 7 \pm 0.001 8 a	0.261 7 \pm 0.024 3 a	0.496 9 \pm 0.018 3 a	8.872 1 \pm 0.064 8 a
	凝灰岩	0.055 0 \pm 0.000 7 d	0.123 8 \pm 0.005 1 c	0.325 2 \pm 0.033 8 c	5.339 1 \pm 0.417 3 c
	页岩	0.093 6 \pm 0.000 9 b	0.193 1 \pm 0.007 0 b	0.291 3 \pm 0.024 9 c	1.969 9 \pm 0.030 2 d

说明: Duncun 单因素方差分析同一土层不同岩性各处理之间的差异显著性, 同列不同字母代表差异达显著水平($P < 0.05$)。

2.3 不同岩性土壤各提取态硅相对百分比分布特征

图1为5种发育于不同岩性类型的毛竹林土壤各硅形态所占比例的时空变化情况。不同岩性发育的毛竹林土壤各硅形态所占比例差异性比较大。在0~20 cm土层内,发育于花岗岩和花岗闪长岩的毛竹林土壤有效硅所占比例(0.62%和0.70%)最低,无定形硅所占比例(93.06%和94.12%)最高。发育于页岩和玄武岩的毛竹林土壤有效硅所占比例(2.39%和2.34%)最高,而无定形硅所占比例(78.90%和89.89%)最低。有机结合态硅和铁锰(氢)氧化物结合态硅所占比例(7.48%和11.37%)都是发育于页岩的毛竹林土壤内较其他4种岩性类型的高,最低(1.58%和3.60%)都是发育于花岗岩的毛竹林土壤。

在20~40 cm土层内,发育于凝灰岩的毛竹林土壤有效硅所占比例(0.94%)最低,同样无定形硅所占比例(92.37%)最高。有机结合态硅和铁锰(氢)氧化物结合态硅所占比例(7.58%和11.43%)同样是发育于页岩的毛竹林土壤内高,最低(2.12%和4.54%)也同样是发育于花岗岩的毛竹林土壤。

在同一岩性类型的0~20 cm和20~40 cm的不同土层内,有效硅的所占比例的差异性最大。无定形硅所占比例差异性相差不大。有机结合态硅和铁锰(氢)氧化物结合态硅所占比例在上下2层几乎没什么差异。由图1可以看出:花岗闪长岩、花岗岩和凝灰岩3种岩性发育的土壤硅各形态所占的比例差异不大,而玄武岩与页岩发育的土壤硅各形态所占比例差异性很大。

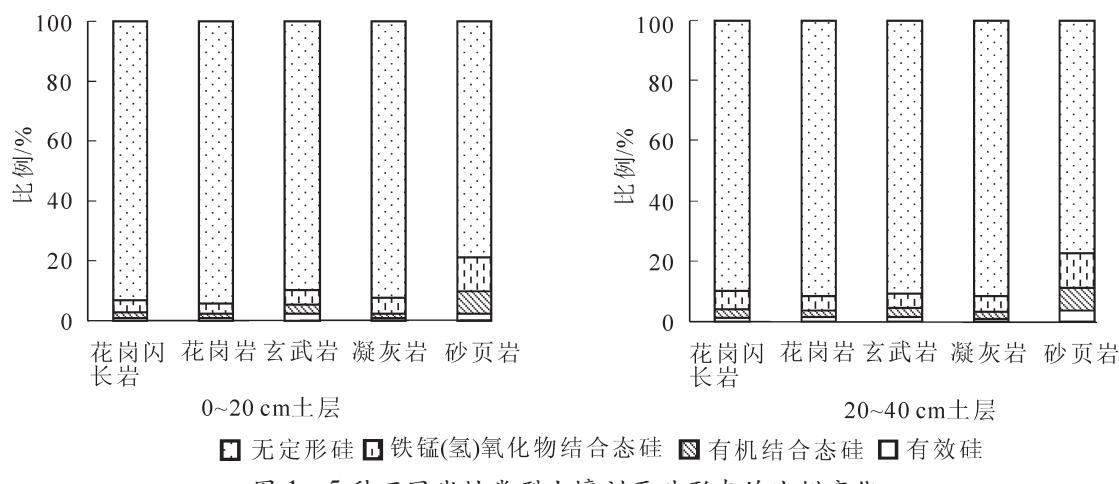


图1 5种不同岩性类型土壤剖面硅形态的比例变化

Figure 1 Variation of percentages of various aluminum fractions with depth in soil profiles from five different lithologies

3 讨论

3.1 森林土壤硅存在形态

硅作为地壳中继氧之后的含量最多的元素,约占土壤总质量的32%^[17]。土壤中的硅形态是以有机态和无机态存在的,主要是以无机态硅为主。但有机态硅的形式是多样的,如以类酯态的硅酸衍生物($R_1-O-Si-R_2$)或以Si—C键联结合的有机硅化合物等^[15]。无机态硅分为晶态和非晶态2类,晶态硅对植物硅素营养没有多大意义^[18-20]。非晶态硅包括水溶态硅、交换态硅、胶体态硅和无定形硅4种类型。水溶态硅是指溶于土壤溶液的硅,通常以单硅酸(H_4SiO_4)形式存在;交换态硅与水溶态硅保持动态平衡,它通常吸附在土壤固相上。胶体态硅是由单硅酸聚合而成,它们都是活性硅的一部分。无定形硅主要包括无定形二氧化硅和无定形铝硅酸盐2类,以前者为主^[20]。

从逐级化学提取的观点来看,分步提取土壤中的4种形态硅(AcidNaAc-Si, H_2O_2 -Si, $NH_2OH \cdot HCl$ -Si和NaOH-Si)分别代表有效硅、有机结合态硅、铁锰(氢)氧化物结合态硅和无定形硅^[13]。本研究表明:5种不同岩性类型土壤中主要可提取态的硅形态同样以无定形硅(77.31%~94.16%,平均88.92%)为主。铁锰(氢)氧化物结合态硅(3.60%~11.43%,平均6.15%),在花岗岩土壤的所占比例最低,页岩土壤的所占比例最高。有机结合态硅(1.54%~7.58%,平均3.36%)要低于不同林分类型土壤中有机结合态硅的所占比例。有效硅(0.70%~3.67%,平均1.57%)在不同岩性类型土壤中差异性很大,页岩土壤有效硅所占比例明显高于其他岩性类型土壤。

3.2 影响土壤硅不同形态转化的因素

本研究表明, 不同岩性类型土壤硅形态主要是以无定形硅为主, 有效态硅库的量仅占无定形硅库量的小部分, 而且主要受无定形硅含量的影响^[13]。Wickramasinghe 等^[21-22]研究发现: 无定形硅能快速地转化为有效硅。有效硅的来源主要是无定形硅的转化。毛竹生长过程中易吸收土壤中的有效态硅而使其损耗, 使得竹林土壤中有效硅的质量分数不高。同时毛竹根部分泌的有机酸会加速结晶态硅酸盐的分解风化, 这部分风化而来的硅是无定形硅库来源的重要部分。由此可见, 有效硅的质量分数主要与毛竹的吸收速率以及无定形硅的转换速率有关^[13]。在根系吸收有效硅的前提下, 根系的吸收速率能够直接影响到无定形硅向有效硅的转化过程。但影响程度是怎样的? 对有效硅的吸收速率是怎样的? 还需要进一步研究。本研究发现, 不同岩性条件下发育的各种土壤总硅的质量分数差异很大, 最低玄武岩仅有 $285.98 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 而最高凝灰岩却高达 $878.47 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。但有效硅的质量分数却是玄武岩的最高, 凝灰岩的最低, 说明土壤中有效硅跟总硅相关性不大, 无定形硅的一个主要来源是结晶态硅酸盐的分解风化。本研究中, 玄武岩与花岗岩土壤中无定形硅的质量分数最高, 说明在同等气候条件下这2种岩性较其他岩性易风化。页岩土壤中无定形硅的质量分数最低, 说明页岩是在5种岩性类型中较难风化的。但由于各个样地的气候条件不可能完全一致, 因此不同的外界气候条件对土壤各种硅形态间的相互转化影响是怎样的, 还需进一步研究。

4 结论

不同岩性条件下发育的毛竹林土壤各硅形态差异性很大, 表明岩性不同能影响土壤各硅形态的分布。

不同母岩发育的土壤各硅形态在数量和各自所占比例方面都有较大差异。主要是因为不同母岩本身所含有的二氧化硅有较大的差异, 因此, 在发育成土壤过程中, 使得各硅形态有较大的差异。

岩性作为影响土壤硅形态分布的重要因素, 对于其他的外界因素, 如温度、海拔、地势等能否影响土壤硅形态分布需进一步研究。

参考文献:

- [1] SOMMER M, KACZOREK D, KUZYAKOV Y, et al. Siliconpools and fluxes in soils and landscapes: a review [J]. *Plant Nutr Soil Sci*, 2006, **169**: 310 – 329.
- [2] MEUNIER J D, COLIN F, ALARCON C. Biogenic silica storage in soils [J]. *Geology*, 1999, **27**(9): 835 – 838.
- [3] ALEXANDRE A, MEUNIER J D, COLIN F, et al. Plant impact on the biogeochemical cycle of silicon and related weathering processes [J]. *Geochim Cosmochim Acta*, 1997, **61**: 677 – 682.
- [4] MORIKAWA C K, SAIGUSA M. Mineral composition and accumulation of silicon in tissues of blueberry (*Vaccinium corymbosus* ‘Bluecrop’) cuttings [J]. *Plant & Soil*, 2004, **258**: 1 – 8.
- [5] DANIEL J C, TERRESTRIA L. Ecosystems and the global biogeochemical silica cycle [J]. *Global Biogeochem Cycles*, 2002, **16**(4): 1121 – 1128.
- [6] 杜满义, 范少辉, 漆良化, 等. 不同类型毛竹林碳、氮特征及其耦合关系 [J]. 水土保持学报, 2010, **24**(4): 198 – 202.
DU Manyi, FAN Shaohui, QI Lianghua, et al. Characteristics and coupling relationship of soil organic carbon and total nitrogen in different types of *Phyllostachys pubescens* stands [J]. *J Soil Water Conserv*, 2010, **24**(4): 198 – 202.
- [7] 周国模, 徐建明, 吴家森, 等. 毛竹林集约经营过程中土壤活性有机碳库的演变 [J]. 林业科学, 2006, **42**(6): 124 – 128.
ZHOU Guomo, XU Jianming, WU Jiasen, et al. Changes in soil active organic carbon with history of intensive management of *Phyllostachys pubescens* forest [J]. *Sci Silv Sin*, 2006, **42**(6): 124 – 128.
- [8] 姜培坤, 俞益武, 金爱武, 等. 丰产雷竹林地土壤养分分析 [J]. 竹子研究汇刊, 2000, **19**(4): 50 – 53.
JIANG Peikun, YU Yiwu, JIN Aiwu, et al. Analysis on nutrients of soil under high-yield *Phyllostachys praecox* f. *prevelnalis* forest [J]. *J Bamboo Res*, 2000, **19**(4): 50 – 53.
- [9] 杨芳, 徐秋芳. 不同栽培历史雷竹林土壤养分与重金属比例的变化 [J]. 浙江林学院学报, 2003, **20**(2): 11 – 14.

- YANG Fang, XU Qiufang. Changes in nutrients and heavy metal contents in soils under *Phyllostachys praecox* stands with different cultivation histories [J]. *J Zhejiang For Coll*, 2003, **20**(2): 11 – 14.
- [10] 孙达, 黄芳, 蔡荣荣, 等. 集约经营雷竹林土壤磷素的时空变化[J]. 浙江林学院学报, 2007, **24**(6): 670 – 674.
- SUN Da, HUANG Fang, CAI Rongrong, *et al.* Temporal and spatial variation of soil pho-sphorus in *Phyllostachys praecox* stands under intensive cultivation management [J]. *J Zhejiang For Coll*, 2007, **24**(6): 670 – 674.
- [11] 谢秉楼, 吴家森, 徐秋芳, 等. 覆盖与施肥处理对雷竹林土壤水溶性有机氮的影响[J]. 土壤学报, 2009, **46**(6): 1168 – 1171.
- XIE Binglou, WU Jiasen, XU Qiufang, *et al.* Effect of different fertilization and mulching on water soluble organic N of the soil under *Phyllostachys praecox* stands [J]. *Acta Pedol Sin*, 2009, **46**(6): 1168 – 1171.
- [12] 蔡荣荣, 黄芳, 孙达, 等. 集约经营雷竹林土壤有机质时空变化[J]. 浙江林学院学报, 2007, **24**(4): 450 – 455.
- CAI Rongrong, HUANG Fang, SUN Da, *et al.* Temporal and spatial variation of soil organic matters in *Phyllostachys praecox* stands with intensive cultivation management [J]. *J Zhejiang For Coll*, 2007, **24**(4): 450 – 455.
- [13] 赵送来, 宋照亮, 姜培坤, 等. 西天目集约经营雷竹林土壤硅存在形态与植物有效性研究[J]. 土壤学报, 2012, **49**(2): 127 – 133.
- ZHAO Songlai, SONG Zhaoliang, JIANG Peikun, *et al.* Fractions of silicon in soils of intensively managed *Phyllostachys praecox* stands and their plant-availability [J]. *Acta Pedol Sin*, 2012, **49**(2): 127 – 133.
- [14] 中国土壤学会农业化学专业委员会. 土壤农业化学常规分析方法[M]. 北京: 科学出版社, 1983.
- [15] KURTZ A C, DERRY L A, CHADWICK O A. Germanium-silicon fractionation in the weathering environment [J]. *Geochim Cosmochim Acta*, 2002, **66**(9): 1525 – 1537.
- [16] 唐启明, 冯光明. 实用统计分析及其计算机处理平台[M]. 北京: 中国农业出版社, 1997: 15 – 70.
- [17] LINDSAY W L. *Chemical Equilibrium in Soil* [M]. New York: John Wiley & Sons, 1979.
- [18] 张兴梅, 邱忠祥, 刘永菁. 东北地区主要旱地土壤供硅状况及土壤硅素形态变化的研究[J]. 植物营养与肥料学报, 1997, **3**(3): 237 – 241.
- ZHANG Xingmei, QIU Zhongxiang, LIU Yongjing. Study on supplying capacity and changing forms of silicon in upland soil of northeast China [J]. *Plant Nutr Fertil Sci*, 1997, **3**(3): 237 – 241.
- [19] 刘鸣达, 张玉龙, 李军, 等. 施用钢渣对水稻土硅素肥力的影响[J]. 土壤与环境, 2001, **10**(3): 220 – 223.
- LIU Mingda, ZHANG Yulong, LI Jun, *et al.* Effects of slag application on silicon fertility in paddy soil [J]. *Soil Environ Sci*, 2001, **10**(3): 220 – 223.
- [20] 刘鸣达, 张玉龙, 陈温福. 土壤供硅能力评价方法研究的历史回顾与展望[J]. 土壤, 2006, **38**(1): 11 – 16.
- LIU Mingda, ZHANG Yulong, CHEN Wenfu. The evaluation methods of soil silicon supplying capacity: a review [J]. *Soils*, 2006, **38**(1): 11 – 16.
- [21] WICKRAMASINGHE D B, ROWELL D L. The release of silicon from amorphous silica and rice straw in Sri Lankan soils [J]. *Biol Fertil Soil*, 2006, **42**(3): 231 – 240.
- [22] CORNELIS J T, TITEUX H, RANGER J, *et al.* Identification and distribution of the readily soluble silicon pool in a temperate forest soil below three distinct tree species [J]. *Plant Soil*, 2011, **342**(1/2): 369 – 378.