

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*

赵送来¹ 宋照亮^{1, 2, 3†} 姜培坤^{1, 2} 李自民¹ 蔡彦彬¹

(1 浙江农林大学环境与资源学院, 浙江临安 311300)

(2 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)

(3 中国科学院地球化学研究所环境地球化学国家重点实验室, 贵阳 550002)

摘 要 在雷竹主产地临安西天目选取了集约经营下不同种植年限(1、5、10、15 a)的雷竹林地, 采集不同深度(0~10 cm、10~20 cm 和 20~40 cm)土样, 运用逐级化学提取等技术, 研究集约经营雷竹林土壤硅素含量与形态随种植年限和土壤剖面深度的变化规律, 为雷竹林地土壤有效态硅调控提供理论依据。研究结果表明:(1) 雷竹林土壤不同土层有效态硅的含量(0.084~0.318 g kg⁻¹)和所占的比例(1.60%~12.3%)随种植年限和有机物覆盖年限的增加呈先下降后上升趋势;(2) 雷竹林表层土壤无定形硅含量(2.58~5.15 g kg⁻¹)和所占比例(75.1%~87.7%)随种植年限的增加呈上升趋势;(3) 覆盖有机物可同时促进无定形硅向有效态硅、有机结合态硅、铁锰(氢)氧化物结合态硅转变。

关键词 土壤学; 集约经营; 雷竹林; 土壤硅形态

中图分类号 S727.15; S714.5 **文献标识码** A

硅是地壳中第二大元素, 在全球生物地球化学循环中起重要作用, 硅循环和碳循环相互影响, 调节全球大气 CO₂ 含量^[1-3]。植物所吸收的硅最终来源于土壤中硅酸盐矿物的风化分解^[4-5]。土壤中的硅分为有机硅和无机硅。土壤中有有机硅的含量远少于无机硅的含量。无机硅可分为晶态硅和可提取态硅两类。晶态硅, 如硅酸盐矿物、结晶二氧化硅等对于植物硅素营养意义不大, 而可提取态硅, 如有效态硅、有机结合态硅、无定形硅等对于植物硅素营养具有重要意义。植物地上部分的硅含量因作物种类不同和生长过程中蒸腾量不同而差异显著^[6]。随着土壤酸化和作物收获以及森林开采的不断加强, 土壤中可提取态硅(特别是植物有效态硅)因植被吸收和淋溶作用而呈亏损趋势^[7-10]。研究^[11-12]表明, 种植甘蔗等作物每年能从土壤中带走 500~700 kg a⁻¹有效态硅。由于缺少硅肥补充, 随着需硅作物持续高产和土壤酸化^[13-14], 土壤有效态硅含量迅速下降。如受母质、植被吸收和淋溶作用等影响, 我国南方广泛分布的红砂岩、花岗岩、花

岗片麻岩和浅海沉积物母质发育的水稻土, 以及位于红壤丘陵二级阶地的轻质第四纪红色黏土母质发育的水稻土, 缺硅问题日趋严重, 据估算我国长江以南仅既酸又砂的缺硅水稻土就有 1.33 × 10⁶ hm²^[15]。然而, 土壤中硅的存在形态对土壤中硅的植物有效性以及淋溶流失行为有重要控制作用^[4, 16]。因此, 当前迫切需要对我国土壤中硅存在形态与植物有效性进行系统研究。

作为典型的硅富集植物, 雷竹(*Phyllostachys praecox*)又名雷公竹, 属禾本科竹亚科刚竹属竹种, 是我国优良笋用散生竹种之一^[17], 主要分布在浙江临安、安吉、德清等地, 江苏、安徽等省均有少量分布^[18]。目前, 集约经营下雷竹林土壤磷素、氮素和有机质变化的研究^[19-23]已比较深入, 但雷竹林土壤中硅存在形态和植物有效性时空变化研究则鲜见报道。本研究通过分析不同种植年限雷竹林地土壤硅素的含量与形态, 揭示硅素存在形态的时空演变规律, 为雷竹林地的可持续利用提供理论依据。

* 国家自然科学基金项目(41103042)、浙江省自然科学基金项目(Y5080110)、环境地球化学国家重点实验室开放基金项目(SKLEG9011)和浙江农林大学科研发展基金项目(2351000741)联合资助

† 通讯作者, Tel: 0571-63740889, E-mail: songzhaoliang78@163.com

作者简介: 赵送来(1986—), 男, 硕士研究生, 主要从事土壤环境与生物地球化学研究。E-mail: zhaosonglai86@163.com

收稿日期: 2011-08-21; 收到修改稿日期: 2011-10-20

1 材料与方 法

1.1 试验地概况

试验区位于浙江省临安市西天目乡,采样范围为 $30^{\circ}17.803'N$, $119^{\circ}27.503'E$ 与 $30^{\circ}18.038'N$, $119^{\circ}27.348'E$ 。属中纬度北亚热带季风气候区,低山丘陵地貌,年平均气温 $16^{\circ}C$,年降水量 1400 mm ,年平均日照时数为 1939 h ,无霜期 234 d ,海拔高度 150 m 左右,区内土壤的母岩主要为粉砂岩,样地均为水稻田改制而成的雷竹林地。

试验地雷竹采用集约经营栽培模式,该模式为:当雷竹林龄达到 5 a 后,每年 11 月下旬至 12 月上旬给雷竹林地表覆盖有机物^[17-18]。即在雷竹林地表先覆 $10\sim 15\text{ cm}$ 稻草,稻草用量为 40 t hm^{-2} ,再在上面覆盖 $10\sim 15\text{ cm}$ 的耨糠。次年 $3,4$ 月份揭去未腐烂的耨糠^[20]。每年施三次肥,时间为 5 月中旬, 9 月中旬和覆盖前。肥料为无机复合肥($N:P:K=16:16:16$) 2.25 t hm^{-2} 和尿素(含 $N\ 46\%$) 1.13 t hm^{-2} 。本试验设 4 个处理(随机设置 4 个重复,每个小区面积为 $10\text{ m}\times 10\text{ m}$):(1)雷竹种植年限为 1 a ,无覆盖(X_{1N});(2)雷竹种植年限为 5 a ,无覆盖(X_{5N});(3)雷竹种植年限为 10 a ,从第 6 年开始覆盖(X_{10C});(4)雷竹种植年限为 15 a ,从第 6 年开始覆盖(X_{15C})。

1.2 样品采集及分析方法

在每个重复小区里随机设置 3 个采样点位,每个点位人工挖取 1 条土壤剖面。分别采集表层 $0\sim 10\text{ cm}$ 、中层 $10\sim 20\text{ cm}$ 和底层 $20\sim 40\text{ cm}$ 土壤样品各约 $500\sim 1000\text{ g}$ 。样品经风干、研磨、过筛后备用。土壤 pH 、有机质、总磷、总硅、铁、铝等含量测定方法参照文献[24]。采用改进的逐级化学提取流程^[4,25]测定土壤中可提取态硅的存在形态:(1)醋酸-醋酸钠缓冲液提取有效态硅(Available Si, Ava. Si);(2)双氧水提取有机结合态硅(Organic Si, Org. Si);(3)盐酸羟胺提取铁锰(氢)氧化物结合态硅(Fe/Mn-oxide Si, FMo. Si);(4)氢氧化钠提取无定形硅(Amorphous Si, Amo. Si)。某种形态硅所占比例按单位质量土壤该种形态硅含量除以单位质量土壤上述四种形态硅含量之和再乘以百分之百计算。

1.3 数据处理

数据统计和分析处理采用 Excel 和 SPSS 软件^[26],运用 Duncun 单因素方差分析各处理之间的

差异显著性。

2 结 果

2.1 雷竹林土壤的基本理化参数

表 1 为西天目雷竹林土壤的基本理化参数。由表 1 显示,不同土层的土壤 pH 随种植年限的增加呈下降趋势,不同种植年限的土壤 pH 随土层深度的增加呈上升趋势。不同土层的 SOM(土壤有机质含量)和 P_2O_5 含量随种植年限的增加均呈上升趋势,不同种植年限的土壤 SOM 和 P_2O_5 含量随土层深度的增加均呈下降趋势。不同土层的土壤 Al_2O_3 含量随种植年限的增加呈先上升后下降的趋势,不同种植年限的土壤 Al_2O_3 含量随土层深度的增加呈上升趋势,但总体差异并不明显。不同土层及不同种植年限的土壤的 Fe_2O_3 含量变化差异并不明显。

雷竹林土壤 SiO_2 含量变化范围在 $632.5\sim 691.2\text{ g kg}^{-1}$ 之间(平均 662.1 g kg^{-1})。不同土层的 SiO_2 含量随种植年限的增加略呈先上升后下降的趋势;不同种植年限的土壤 SiO_2 含量随土层深度的增加变化差异并不显著,表明竹子吸收和有机物覆盖可能不会对土壤剖面总硅分布产生明显影响。

2.2 雷竹林土壤各提取态硅含量的时空变化特征

表 2 为西天目雷竹林土壤各形态硅含量的变化范围。由表 2 显示,表层和底层的土壤有效态硅(Ava. Si)含量随种植年限的增加呈先下降后上升的趋势,中层变化趋势不明显。有效态硅含量随土层深度的增加在覆盖有机物前后均呈上升趋势。

不同土层的有机结合态硅(Org. Si)含量随种植年限的增加呈先下降后上升的趋势。有机结合态硅含量随土层深度的增加在覆盖有机物前(雷竹林种植龄 $1\sim 5\text{ a}$)呈先升后降的趋势,覆盖有机物后(雷竹林种植龄 $10\sim 15\text{ a}$)呈上升趋势。

不同土层的铁锰(氢)氧化物结合态硅(FMo. Si)含量随种植年限的增加呈下降趋势;铁锰(氢)氧化物结合态硅含量随土层深度的增加在覆盖有机物前(雷竹林种植龄 $1\sim 5\text{ a}$)呈先升后下降的趋势,覆盖有机物后(雷竹林种植龄 $10\sim 15\text{ a}$)呈下降趋势。

不同土层的无定形硅(Amo. Si)含量随种植年限的增加呈现上升趋势,无定形硅含量随土层深度的增加在覆盖有机物前后均呈下降的趋势。

表 1 西天目雷竹林土壤的基本理化参数

Table 1 Basic physicochemical parameters of the soil profiles from *Phyllostachys Praeox* stands of different ages in West Tianmu

处理编号 Treatment No.	土层深度 Depth (cm)	pH	SOM (g kg ⁻¹)	P ₂ O ₅ (g kg ⁻¹)	SiO ₂ (g kg ⁻¹)	Al ₂ O ₃ (g kg ⁻¹)	Fe ₂ O ₃ (g kg ⁻¹)
X _{1N}	0~10	5.192 ± 0.026c	18.023 ± 0.775a	1.008 ± 0.252a	642.4 ± 16.0a	129.4 ± 2.2b	51.65 ± 1.98a
	10~20	5.245 ± 0.020b	11.602 ± 1.888a	0.939 ± 0.115a	655.4 ± 21.3ab	133.5 ± 1.3b	54.38 ± 3.02b
	20~40	5.267 ± 0.060b	5.182 ± 1.385a	0.916 ± 0.092a	648.0 ± 8.7a	132.2 ± 0.6a	56.00 ± 1.60ab
X _{5N}	0~10	4.922 ± 0.094b	20.415 ± 1.133a	2.634 ± 0.412b	651.9 ± 12.0ab	136.5 ± 0.7c	48.49 ± 3.01a
	10~20	5.233 ± 0.020b	11.728 ± 2.770a	1.351 ± 0.137ab	675.9 ± 22.2b	136.5 ± 1.8c	52.63 ± 4.24ab
	20~40	5.255 ± 0.030b	6.063 ± 3.147a	1.283 ± 0.115b	686.7 ± 15.0b	131.5 ± 2.1a	50.28 ± 0.76a
X _{10C}	0~10	4.796 ± 0.175b	22.807 ± 3.273a	4.077 ± 0.023c	686.9 ± 24.3b	129.4 ± 2.7b	42.32 ± 7.73a
	10~20	5.124 ± 0.095b	13.868 ± 2.392ab	1.672 ± 0.206b	691.2 ± 26.0b	146.5 ± 1.6d	45.45 ± 3.95a
	20~40	5.243 ± 0.018b	6.189 ± 2.140a	1.603 ± 0.046c	677.2 ± 3.4b	130.0 ± 4.8a	51.09 ± 5.93a
X _{15C}	0~10	4.104 ± 0.170a	44.963 ± 3.903b	4.489 ± 0.252c	638.2 ± 25.4a	110.3 ± 0.5a	47.90 ± 7.07a
	10~20	4.557 ± 0.158a	18.652 ± 3.021b	3.458 ± 0.504c	632.5 ± 7.4a	126.8 ± 1.2a	50.46 ± 5.56ab
	20~40	5.033 ± 0.134a	13.994 ± 3.399b	3.413 ± 0.298d	658.5 ± 6.2a	162.3 ± 1.5b	58.91 ± 3.28b

注: Duncan 单因素方差分析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 ($p < 0.05$)

Note: Different letters in the same column indicate significant differences by Duncan's multiple range tests at 0.05 level

表 2 西天目雷竹各种植年限土壤剖面硅形态含量变化

Table 2 Variation of contents of silicon fractions with depth in the soil profiles from *Phyllostachys Praeox* stands of different ages in West Tianmu

处理编号 Treatment No.	土层深度 Depth (cm)	有效态硅 Available Si (g kg ⁻¹)	有机结合态硅 Organic Si (g kg ⁻¹)	铁锰(氢)氧化物结合态硅 Fe/Mn-oxide Si (g kg ⁻¹)	无定形硅 Amorphous Si (g kg ⁻¹)
X _{1N}	0~10	0.153 ± 0.012c	0.120 ± 0.020b	0.580 ± 0.032b	2.576 ± 0.147a
	10~20	0.252 ± 0.007c	0.152 ± 0.003d	0.581 ± 0.010b	1.864 ± 0.020a
	20~40	0.318 ± 0.015d	0.115 ± 0.005b	0.567 ± 0.064c	1.585 ± 0.102a
X _{5N}	0~10	0.084 ± 0.010a	0.091 ± 0.0070a	0.574 ± 0.040b	4.587 ± 0.321b
	10~20	0.117 ± 0.011a	0.112 ± 0.008c	0.591 ± 0.047b	3.398 ± 0.170c
	20~40	0.121 ± 0.011a	0.098 ± 0.006a	0.481 ± 0.024b	2.698 ± 0.108c
X _{10C}	0~10	0.107 ± 0.009b	0.088 ± 0.005a	0.506 ± 0.030a	5.009 ± 0.301bc
	10~20	0.122 ± 0.004a	0.090 ± 0.005a	0.517 ± 0.047ab	4.350 ± 0.348d
	20~40	0.195 ± 0.009b	0.110 ± 0.009ab	0.387 ± 0.012a	2.353 ± 0.212b
X _{15C}	0~10	0.177 ± 0.008d	0.101 ± 0.004ab	0.492 ± 0.030a	5.152 ± 0.309c
	10~20	0.176 ± 0.006b	0.100 ± 0.003b	0.468 ± 0.042a	2.606 ± 0.235b
	20~40	0.254 ± 0.023c	0.120 ± 0.006b	0.396 ± 0.024a	1.801 ± 0.162a

注: Duncan 单因素方差分析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 ($p < 0.05$)

Note: Different letters in the same column indicate significant differences by Duncan's multiple range tests at 0.05 level

2.3 雷竹林土壤各提取态硅比例的时空变化特征

图 1 为西天目雷竹林土壤各形态硅所占比例的时空变化情况。从图 1 可见, 有效态硅 (Ava. Si) 的比例和有机结合态硅 (Org. Si) 的比例趋势基本一致。在各种植年限内土壤有效态硅比例变化范围为 1.60%~12.3% (平均 5.20%), 有机结合态硅比

例变化范围为 1.50%~5.30% (平均 3.10%)。不同土层的有效态硅、有机结合态硅的比例随种植年限的增加呈先下降后上升趋势。有效态硅、有机结合态硅的比例随土层深度的增加在覆盖有机物前后均呈上升趋势。

在各种植年限内土壤铁锰(氢)氧化物结合态

硅 (FMo. Si) 比例变化范围为 8.30%~21.9% (平均 14.0%)。不同土层的土壤铁锰(氢)氧化物结合态硅比例随种植年限的增加呈先下降后上升趋势。铁锰(氢)氧化物结合态硅比例随土层深度的增加在覆盖有机物前后呈上升趋势。

在各种植年限内土壤无定形硅 (Amo. Si) 比例变化范围为 61.3%~87.8% (平均 77.8%)。不同土层的土壤无定形硅比例随种植年限的增加呈先上升后下降趋势。无定形硅比例随土层深度的增加在覆盖有机物前后均呈下降趋势。

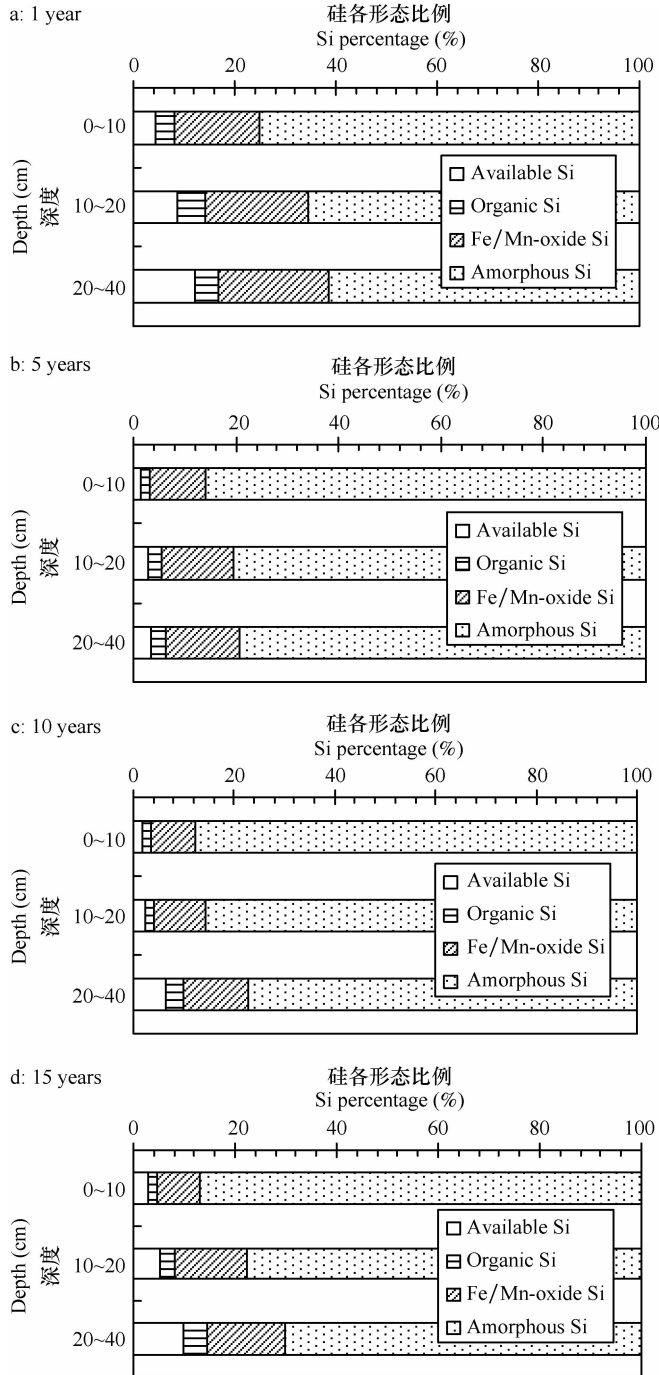


图 1 西天目各年限雷竹林土壤剖面硅形态的比例变化

Fig. 1 Variation of percentages of various silicon fractions with depth in soil profiles from *Phyllostachys Praeox* stands of different ages in West Tianmu: (a) 1 year, (b) 5 years, (c) 10 years, (d) 15 years.

3 讨 论

3.1 雷竹林土壤硅存在形态

土壤中硅的存在形态分为有机态硅和无机态硅。土壤中有有机态硅的含量远少于无机态硅的含量。有机态硅存在形式多样,如类脂态的硅酸衍生物($R_1O-Si-R_2$)或以 Si-C 键联结形成的有机硅化合物等^[4,25,27]。无机态硅可分为晶态硅和可提取态硅两类,其中晶态硅对于植物硅素营养意义不大,而可提取态硅对于植物硅素营养具有重要意义^[28-30]。晶态硅主要有两种类型:一类是硅与铝或其他元素结合形成的硅酸盐矿物,如沸石、云

母、橄榄石等;另一类是单纯的二氧化硅,如结晶态的石英、鳞石英、方石英等^[31]。可提取态硅包括水溶态硅、交换态硅、胶体态硅和无定形硅。水溶态硅是指可溶于土壤溶液中的硅,通常以单硅酸(H_4SiO_4)形式存在;交换态硅是指吸附在土壤固相上的单硅酸,它与土壤水溶态硅之间保持着动态平衡,是活性硅的一部分;胶体态硅是由单硅酸聚合而成,也是活性硅的一部分;无定形硅包括无定形二氧化硅和无定形铝硅酸盐两类,但以前者为主^[31]。无定形硅可水化形成胶体态硅或溶解于土壤溶液中,为植物生长提供部分有效态硅素。可提取态硅各形态之间存在相互转化的动态平衡关系见图 2。

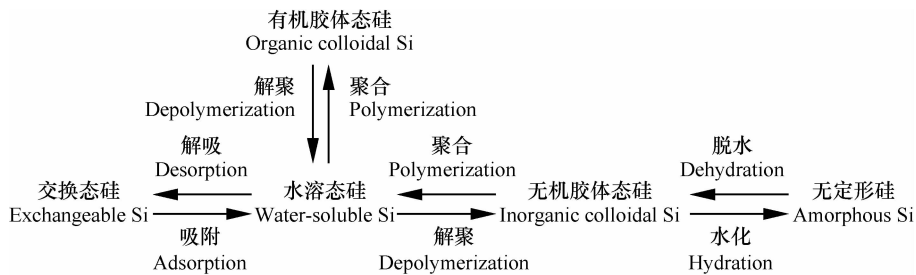


图 2 土壤各种可提取态硅之间的转化 (根据刘鸣达和张玉龙^[29]修改)

Fig. 2 Transformation between different extractable fractions of silicon in the soil (Modified from Liu and Zhang^[29])

从逐级化学提取的观点来看, Available Si、Organic Si、Fe/Mn-oxide Si 和 Amorphous Si 分别代表有效态硅、有机结合态硅、铁锰(氢)氧化物结合态硅和无定形硅。本研究表明,雷竹林土壤中主要可提取态硅部分为无定形硅(61.3%~87.8%,平均77.8%),包括无定形的铝硅酸盐和二氧化硅。测定的铁锰(氢)氧化物结合态硅(8.30%~21.9%,平均14.0%),主要为被吸附在黏粒 Fe/Mn-O 表面上的部分硅酸。有效态硅(1.60%~12.3%,平均5.20%),包括可为植物所直接吸收利用的单硅酸(H_4SiO_4)及各种易于转化为单硅酸的盐类,并与土壤固相其他形态的硅保持着动态平衡。有机结合态硅(1.50%~5.30%,平均3.10%),主要以有机胶体态硅存在的部分。

3.2 雷竹生长和有机物覆盖对硅形态转化影响

本研究表明,雷竹林作为土壤无定形硅归还的主要来源和土壤中有有效态硅的吸收器,影响无定形硅返回到土壤的含量进而影响土壤无定形硅库的大小。有效态硅库的量占无定形硅库的量的一小部分,主要受无定形硅含量影响。有效态硅库主要

由源于生物蛋白石的分解和吸附于无定形铁氧化物表面的单硅酸解吸组成,因此,土壤中无定形硅的分解和无定形硅的迁移或保存可能强烈影响有效态硅的分布。

未覆盖有机物的条件下,雷竹林土壤有效态硅、有机结合态硅、铁锰(氢)氧化物结合态硅比例呈下降趋势。雷竹林生长过程中,土壤中有有效态硅易被雷竹吸收而损耗,此外,土壤中微生物分解有机质产生的小分子有机酸和其他酸类及酸式碳酸盐的水解等作用产生的羟基离子影响雷竹林土壤 pH 使土壤酸性较强^[32],铁锰氧化物吸附游离硅和淋溶作用使雷竹林土壤进一步缺乏有效态硅,此外,雷竹林根部分泌有机酸加速结晶态硅酸盐的分解风化,增加无定形硅的含量。覆盖有机物的条件下,雷竹林土壤有效态硅、有机结合态硅、铁锰(氢)氧化物结合态硅比例呈上升趋势,有效态硅比例增加也可能是由于低 pH 和雷竹根部分泌高浓度的低分子有机酸促进硅酸盐矿物的风化以及有机覆盖物腐烂释放大量硅的结果;各种年限内无定形硅比例随土层深度的增加而呈下降趋势可能是由于

无定形硅的迁移和分解,其次可能是由于单硅酸根部吸收和淋溶作用的结果。有研究表明^[33]随土层深度的增加,森林土壤无定形硅的分解量与森林地表硅的流失量和土壤溶液硅含量之和相一致。

不同土层的有效态硅比例与有机结合态硅、铁锰(氢)氧化物结合态硅比例随种植年限的变化呈相同趋势,而与无定形硅比例随种植年限的变化呈相反趋势(图1),说明覆盖有机物后无定形硅可以转化为有效态硅、有机结合态硅和铁锰(氢)氧化物结合态硅。Wickramasinghe 和 Rowell 研究^[34]发现水稻中无定形硅能快速地转化为有效态硅支持了这一观点。Cornelis 等^[35]的研究也表明,土壤有效态硅含量随覆盖有机物而增加,有效态硅库主要受无定形硅,其次受吸附态硅库的影响,无定形硅分解和迁移或保存可能强烈影响有效态硅的分布。因此,覆盖有机物可以缓解土壤缺乏有效态硅的问题。但是,覆盖有机物影响下雷竹林土壤其他可提取态硅转化有效态硅的准确机制,如各转化过程的相对重要性以及母质、水文条件和施肥(如有机肥)等因素对硅转化的影响等需要进一步研究。此外,还需进一步探讨不同有机覆盖物种类、覆盖厚度以及覆盖时段等对土壤硅形态和植物有效性的影响等问题。

4 结 论

西天目雷竹林土壤总硅分布没有明显差异,表明覆盖有机物后可能不会对雷竹土壤总硅分布产生明显影响。雷竹林土壤有效态硅比例随种植年限的增加呈上升趋势,而无定形硅比例随种植年限的增加呈下降趋势。覆盖有机物后土壤各剖面有效态硅比例随剖面深度呈增加的趋势,表明覆盖有机物影响有效态硅的分布。覆盖有机物后有效态硅的比例与有机结合态硅、铁锰(氢)氧化物结合态硅的比例呈相同的变化趋势,而与无定形硅比例呈相反变化趋势,表明覆盖有机物可同时促进无定形硅向有效态硅、有机结合态硅、铁锰(氢)氧化物结合态硅转变。覆盖有机物可改良缺硅土壤。然而,要通过覆盖有机物解决竹林土壤缺硅问题,还需进一步探讨不同有机覆盖物种类、覆盖厚度以及覆盖时段等对土壤硅形态和植物有效性的影响等问题。

致 谢 本研究在采样和实验设计中得到了曹志洪教授的帮助和指点,在实验测定和分析上得到了南迪扬、陈海峰同学的帮助,在此向他们一并表示诚挚的谢意。

参 考 文 献

- [1] Wedepohl K H. The composition of the continental crust. *Geochim Cosmochim Acta*, 1995, 59(7): 1 217—1 232
- [2] White A F, Brantley S L. Chemical weathering rates of silicate minerals in soils. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 1995, 31(1): 407—461
- [3] Berner R A. The rise of plants and their effect on weathering and atmospheric CO₂. *Science*, 1997, 276(5312): 544—546
- [4] Kurtz A C, Derry L A, Chadwick O A. Germanium-silicon fractionation in the weathering environment. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2002, 66(9): 1 525—1 537
- [5] Song Z L, Zhao S L, Zhang Y Z, et al. Plant impact on CO₂ consumption by silicate weathering: The role of bamboo. *The Botanical Review*, 2011, 77(3): 208—213
- [6] 张玉龙, 王喜艳, 刘鸣达. 植物硅素营养与土壤硅素肥力研究现状和展望. *土壤通报*, 2004, 35(6): 785—788. Zhang Y L, Wang X Y, Liu M D. The research status and prospects about plant silicon nutrition and soil silicon fertility (In Chinese). *Chinese Journal of Soil Science*, 2004, 35(6): 785—788
- [7] Savant N K, Datnoff L E, Snyder G H. Depletion of plant-available silicon in soils: A possible cause of declining rice yields. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 1997, 28(13/14): 1 245—1 252
- [8] Savant N K, Snyder G H, Datnoff L E. Silicon management and sustainable rice production. *Advances in Agronomy*, 1996, 58: 151—199
- [9] Kelly E F, Chadwick O A, Hilinski T E. The effect of plants on mineral weathering. *Biogeochemistry*, 1998, 42(1/2): 21—53
- [10] Conley D J, Likens G E, Buso D C, et al. Deforestation causes increased dissolved silicate losses in the Hubbard Brook Experimental Forest. *Global Change Biology*, 2008, 14(11): 2 548—2 554
- [11] Anderson D L. Soil and leaf nutrient interactions following application of calcium silicate slag to sugarcane. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 1991, 30(1): 9—18
- [12] Matichenkov V V, Calvert D V. Silicon as a beneficial element for sugarcane. *Journal American Society of Sugar Cane Technologists*, 2002, 22: 21—30
- [13] Ashraf M, Rahmatullah, Ahmad R, et al. Amelioration of salt stress in sugarcane (*Saccharum officinarum* L.) by supplying potassium and silicon in hydroponics. *Pedosphere*, 2010, 20(2): 153—162
- [14] 喻艳红, 张桃林, 李清曼, 等. 红壤主要土壤组分对低分子量有机酸吸附的研究. *土壤学报*, 2010, 47(6): 1 144—1 150. Yu Y H, Zhang T L, Li Q M, et al. Adsorption of low molecular weight organic acids by main soil components of red soil (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2010, 47(6): 1 144—1 150
- [15] 臧惠林, 张效朴, 何电源. 我国南方水稻土供硅能力的研究. *土壤学报*, 1982, 19(2): 131—140. Zang H L, Zhang X P, He D Y. On the silicon supplying capacity of paddy soils in

- south China (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 1982, 19 (2): 131—140
- [16] 胡克伟, 肇雪松, 关连珠, 等. 水稻土中硅磷元素的存在形态及其相互影响研究. *土壤通报*, 2002, 33(4): 272—274. Hu K W, Zhao X S, Guan L Z, et al. Study on interaction and forms of silicon and phosphate in paddy Soil (In Chinese). *Chinese Journal of Soil Science*, 2002, 33(4): 272—274
- [17] 林海萍, 吴家森, 付顺华, 等. 雷竹笋采后储藏生理的研究. *江苏林业科技*, 2002, 19(4): 16—17. Lin H P, Wu J S, Fu S H, et al. Study on physiology of bamboo shoot of *Phyllostachys praecox f. prevelnalis* under storage (In Chinese). *Journal of Jiangsu Forestry Science & Technology*, 2002, 19(4): 16—17
- [18] 陈万福, 赖德才, 林贵发. 雷竹笋用林高产栽培技术. *福建水土保持*, 2002, 14(3): 48—49. Chen W F, Lai D C, Lin G F. High yield cultivation technique of the Lei Bamboo plantation (for Bamboo Shoot) (In Chinese). *Fujian Soil and Water Conservation*, 2002, 14(3): 48—49
- [19] 姜培坤, 俞益武, 金爱武, 等. 丰产雷竹林地土壤养分分析. *竹子研究汇刊*, 2000, 19(4): 50—53. Jiang P K, Yu Y W, Jin A W, et al. Analysis on nutrients of soil under high-yield *Phyllostachys praecox f. prevelnalis* forest (In Chinese). *Journal of Bamboo Research*, 2000, 19(4): 50—53
- [20] 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. *浙江林学院学报*, 2003, 20(2): 11—14. Yang F, Xu Q F. Changes in nutrients and heavy metal contents in soils under *Phyllostachys praecox* stands with different cultivation histories (In Chinese). *Journal of Zhejiang Forestry College*, 2003, 20(2): 11—14
- [21] 孙达, 黄芳, 蔡荣荣, 等. 集约经营雷竹林土壤磷素的时空变化. *浙江林学院学报*, 2007, 24(6): 670—674. Sun D, Huang F, Cai R R, et al. Temporal and spatial variation of soil phosphorus in *Phyllostachys praecox* stands under intensive cultivation management (In Chinese). *Journal of Zhejiang Forestry College*, 2007, 24(6): 670—674
- [22] 谢秉棣, 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. *土壤学报*, 2009, 46(6): 168—171. Xie B L, Wu J S, Xu Q F, et al. Effect of different fertilization and mulching on water soluble organic N of the soil under *Phyllostachys praecox* stands (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2009, 46(6): 168—171
- [23] 蔡荣荣, 黄芳, 孙达, 等. 集约经营雷竹林土壤有机质时空变化. *浙江林学院学报*, 2007, 24(4): 450—455. Cai R R, Huang F, Sun D, et al. Temporal and spatial variation of soil organic matters in *Phyllostachys praecox* stands with intensive cultivation management (In Chinese). *Journal of Zhejiang Forestry College*, 2007, 24(4): 450—455
- [24] 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*. 北京: 科学出版社, 1983. Agricultural Chemistry Committee, Soil Science Society of China. *Routine analytical methods for soil and agricultural chemistry* (In Chinese). Beijing: Science Press, 1983
- [25] Tessier A, Campbell P G C, Bisson M. Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metals. *Analytical Chemistry*, 1979, 51(7): 844—851
- [26] 唐启义, 冯光明. *实用统计分析及其计算机处理平台*. 北京: 中国农业出版社, 1997: 15—70. Tang Q Y, Feng G M. *Practical statistical analysis and computer processing platform* (In Chinese). Beijing: China Agriculture Press, 1997: 15—70
- [27] 向万胜, 何电源, 廖先苓. 湖南省土壤中硅的形态与土壤性质的关系. *土壤*, 1993, 25(3): 146—151. Xiang W S, He D Y, Liao X L. The relationship between silicon forms and soil characters in Hunan Province (In Chinese). *Soils*, 1993, 25(3): 146—151
- [28] 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. *植物营养与肥料学报*, 1997, 3(3): 237—241. Zhang X M, Qiu Z X, Liu Y J. Study on supplying capacity and changing forms of silicon in upland soil of northeast China (In Chinese). *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 1997, 3(3): 237—241
- [29] 刘鸣达, 张玉龙, 李军, 等. 施用钢渣对水稻土硅素肥力的影响. *土壤与环境*, 2001, 10(3): 220—223. Liu M D, Zhang Y L, Li J, et al. Effects of slag application on silicon fertility in paddy soil (In Chinese). *Soil and Environmental Sciences*, 2001, 10(3): 220—223
- [30] 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. *土壤*, 2006, 38(1): 11—16. Liu M D, Zhang Y L, Chen W F. The evaluation methods of soil silicon supplying capacity: A review (In Chinese). *Soils*, 2006, 38(1): 11—16
- [31] 刘鸣达. 水稻土供硅能力评价方法及水稻硅素肥料效应的研究. 沈阳: 沈阳农业大学土地与环境学院, 2002. Liu M D. *Study on evaluation method of silicon supplying capacity in paddy soil and fertilizer response of silicon on rice* (In Chinese). Shenyang: College of Land and Environmental Science, Shenyang Agricultural University, 2002
- [32] 端木合顺. 矿物风化对黄土区土壤有效态硅含量的控制作用. *矿物学报*, 2006, 26(2): 189—195. Duanmu H S. Control of mineral weathering on the available silicon content of soil in loess area as exemplified by Guanzhong - Shanbei area of Shanxi Province (In Chinese). *Acta Mineralogica Sinica*, 2006, 26(2): 189—195
- [33] Cornelis J T, Ranger J, Iserentant A, et al. Tree species impact the terrestrial cycle of silicon through various uptakes. *Biogeochemistry*, 2010, 97(2/3): 231—245
- [34] Wickramasinghe D B, Rowell D L. The release of silicon from amorphous silica and rice straw in Sri Lankan soils. *Biology and Fertility of Soils*, 2006, 42(3): 231—240
- [35] 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. *Plant Soil*, 2011, 342(1/2): 369—378

FRACTIONS OF SILICON IN SOILS OF INTENSIVELY MANAGED *PHYLLOSTACHYS PRAECOX* STANDS AND THEIR PLANT-AVAILABILITY

Zhao Songlai¹ Song Zhaoliang^{1,2,3†} Jiang Peikun^{1,2} Li Zimin¹ Cai Yanbin¹

(1 School of Environment and Resources, Zhejiang A & F University, Lin'an, Zhejiang 311300, China)

(2 Zhejiang Provincial Key Laboratory of Carbon Cycling in Forest Ecosystems and Carbon Sequestration, Zhejiang A & F University, Lin'an, Zhejiang 311300, China)

(3 State Key Laboratory of Environmental Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China)

Abstract *Phyllostachys praecox* stands under intensive management different in history (1, 5, 10 and 15 years) in West Tianmu, Linan City, a major *Phyllostachys praecox* production area, were selected for sampling of soil profiles, 0 ~ 10 cm, 10 ~ 20 cm and 20 ~ 40 cm, separately, in depth. These samples were subjected to sequential extraction for analysis of variation of contents and fractions of silicon with plantation age and soil depth. Results show that the content (0.084 ~ 0.318 g kg⁻¹) of available Si and its proportion (1.60% ~ 12.3%) to soil Si in the profiles varied with the age of plantation and organic mulching, showing a curve downwards first and then turning rise. The content (2.58 ~ 5.15 g kg⁻¹) of amorphous Si and its proportion (75.1% ~ 87.7%) in the topsoil increased with the age of plantation. Organic mulching promoted transformation of amorphous Si into available Si, organic Si and Fe/Mn-oxide Si. The findings of the study may be offered as reference for regulation of soil bioavailable Si in the soil of *Phyllostachys praecox* stands.

Key words Soil science; Intensive management; *Phyllostachys praecox*; Soil silicon fractions