

不同生态型竹子的硅分布特征

刘蕾蕾¹, 周国模², 宋照亮², 高培军¹, 李自民²

(1. 浙江农林大学 林业与生物技术学院, 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: 选择 10 种散生竹、丛生竹和混生竹为试材, 运用偏硼酸锂溶解和钼蓝比色方法, 研究了不同生态型竹子器官的硅质量分数、储量和通量等, 为植硅体封存碳潜力评估提供参考。结果表明: 不同生态型竹子器官硅质量分数均为叶>莖>枝>根>鞭>秆, 质量分数区间为 1.77~63.10 g·kg⁻¹, 在不同生态型间竹叶硅质量分数分布趋势整体表现为混生>散生>丛生; 其中硅储量和通量分别为混生(2 225.91 kg·hm⁻²·a⁻¹, 1 112.96 kg·hm⁻²·a⁻¹)>散生(788.18 kg·hm⁻²·a⁻¹, 394.06 kg·hm⁻²·a⁻¹)>丛生(586.00 kg·hm⁻²·a⁻¹, 293.00 kg·hm⁻²·a⁻¹)。全国竹子硅储量和通量散生竹远高于丛生竹和混生竹。植硅体封存二氧化碳通量为混生竹(38.83·kg·hm⁻²·a⁻¹)>散生竹(33.69 kg·hm⁻²·a⁻¹)>丛生竹(27.32 kg·hm⁻²·a⁻¹), 全国散生竹总植硅体碳封存速率(190.69×10⁶~197.48×10⁶ kg·a⁻¹)分别为丛生竹和混生竹的 5.46 倍和 35.7 倍。因此, 在未来的竹林种植和管理中, 可以适当地通过选择封存二氧化碳通量高的竹种(如混生竹)进行造林或者采取竹林废弃物还林作硅肥等措施来提高部分竹林植硅体的生物固碳潜力。因为本研究区属于散生竹的典型生长区, 而非丛生竹典型生长区, 不能推测所有地区都符合以上规律, 在丛生竹典型生长区的结果可能正好相反。所有生态环境和生物气候带生长的竹子中硅储量和硅体碳的相关性是否一致或相近还需进一步研究。图 3 表 1 参 34

关键词: 森林生态学; 竹子; 硅; 生物循环; 封存碳; 植硅体

中图分类号: S718.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-0756(2015)05-0668-07

Silicon distribution in bamboo stands of different ecotypes

LIU Leilei¹, ZHOU Guomo², SONG Zhaoliang², GAO Peijun¹, LI Zimin²

(1. School of Forestry and Biotechnology, Zhejiang A & F University, Lin'an 311300, Zhejiang, China; 2. School of Environmental & Resource Sciences, Zhejiang A & F University, Lin'an 311300, Zhejiang, China)

Abstract: To provide scientific references for understanding the role of phytoliths in biogeochemical carbon sequestration, organs (leaf, branch, culm, stump, root, and rhizome) of ten representative bamboo species belonging to three bamboo ecotypes (mix, scatter, and cluster) were sampled at the Jiyong Plantation Experimental Site at Zhejiang A & F University. The biological Si cycle in bamboo ecosystems was studied based on the above-ground biomass production and silica accumulations in bamboo organs. Results showed that the Si content of the organs in different bamboo species significantly ranged from 1.77 g·kg⁻¹ to 63.10 g·kg⁻¹ with leaf > branch > stump > root > rhizome > culm ($P<0.01$). For the three bamboo ecotypes, Si distribution was mixed > scattered > clustered; additionally, mean Si storage and fluxes of Si for bamboo ecotypes were mixed > scattered > clustered. Based on the analytic results of this study, we find that the mean flux for phytolith carbon sequestration in bamboo ecotypes was scattered > mixed > clustered.

收稿日期: 2014-12-02; 修回日期: 2015-01-05

基金项目: 浙江农林大学“青年拔尖”人才计划项目; 浙江省 151 人才工程第三层次省财政联合资助项目(2035110003)

作者简介: 刘蕾蕾, 从事植硅体与生物地球化学研究。E-mail: leileibilin1990@126.com。通信作者: 周国模, 教授, 博士, 博士生导师, 从事森林碳汇与应对全球气候变化、森林可持续经营技术等研究。E-mail: zhougum@zafu.edu.cn

Furthermore, for China the rate of phytolith carbon sequestration in scattered bamboo was 5.46 times greater than clustered bamboo and 35.7 times greater than mixed bamboo. Thus, this study highlights that increasing the area of bamboo planting and electing a scattered bamboo ecotype characterized by bamboo species with high carbon content in phytoliths would increase atmospheric CO₂ sequestration. However, further research should be systematically carried out to identify silicon and carbon cycles in national and global soil-bamboo systems. [Ch, 3 fig. 1 tab. 34 ref.]

Key words: forest ecology; bamboo; silicon (Si); biological cycling; carbon sequestration; phytoliths

硅(Si)在全球陆地生态系统表层土壤中的含量仅次于氧的含量, 高达 29.5%^[1], 通过一系列的复杂作用(例如化学、物理和生物作用)释放到土壤中^[2], 其在生态系统内的迁移转化是维持陆地生态系统地球化学循环的重要因素之一^[3]。硅在陆地生态系统中的地球化学循环与全球土壤碳的平衡和全球气候变暖密切相关^[4-9]。无论陆地生态系统还是海洋生态系统都在进行强烈的 Si 生物地球化学循环^[10-11], 海洋中硅藻每年固定的生物硅(biogenic silica)含量为 240 Tmol, 陆地植被每年固定的生物硅含量为 60~200 Tmol^[12-13], 所以陆地生态系统硅的生物地球化学循环不容忽视^[4]。植硅体是植物在生长过程中吸收土壤溶液中的单硅酸[Si(OH)₄], 沉淀在植物叶、茎、根的细胞壁、细胞腔和皮层间隙的无定型二氧化硅(SiO₂·H₂O)^[8,14-15]。研究发现植硅体在形成的过程中封存了一部分有机碳(1%~6%), 也即是植硅体封存的有机碳(PhytOC)^[5,7,16-17], 这部分有机碳在植硅体这个坚硬的外壳“保护”下, 具有较强的抗分解和抗氧化性, 可以稳定地保存在土壤中^[8,14], 在全球陆地生态系统碳循环中扮演着很重要的角色^[5,7,9,16-17]。因此, 研究植物—土壤生态系统中硅碳耦合循环的生物学过程和地球化学过程, 揭示区域植物生物固碳的评估和测算是非常必要的。竹子是典型的硅超富集植物, 全球分布面积达 22.0×10⁶ hm², 其中三分之一集中分布在中国浙江、江西和湖南等中亚热带红壤地区, 中国竹林面积有 7.2×10⁶ hm²^[18-19]。研究表明: 竹林土壤中生物硅的累积速率远高于赤道雨林、温带草原以及温带落叶林和针叶林^[10,17]。竹子又因其高生长速率和高繁殖率, 为陆地森林生态系统植硅体碳汇做了很大贡献^[6,16,20-21], 开展竹林土壤—植物系统中硅分布和迁移研究, 阐明竹林土壤—植物系统中硅生物地球化学循环的规律与控制机制, 不仅可为亚热带竹林生态系统硅-碳循环调控提供科学依据, 而且也可完善陆地硅生物地球化学循环理论。本研究以浙江省临安市浙江农林大学竹园内散生、丛生、混生等 3 种不同生态型竹子为研究对象, 分析不同器官中硅的质量分数、分布和积累情况, 揭示竹子硅的生物循环特征, 为增强陆地生态系统硅碳耦合循环的综合观测和区域植硅体封存的碳积累尺度的评估及预算提供参考。

1 试验材料与方法

1.1 研究地概况

样品采集地点位于浙江省临安市浙江农林大学竹园内(30°15'N, 119°43'E)。该竹园建于 2004 年, 有近 200 种竹种。竹园土壤母质主要为页岩。试验地属中纬度亚热带季风气候, 四季分明, 温暖湿润, 季节降水分配不均, 主要集中在 5-9 月, 年平均降水量为 1 439.0 mm, 年平均气温 16.0 °C, 年平均无霜期 236 d, 海拔高度 150 m。

1.2 试验设计

本研究主要是目的是, 通过不同竹种在一个简单的小流域中生长模式, 来初步估算全国竹种所扮演的作用。因此, 2013 年 5 月初, 在浙江农林大学竹园中分别设立了 10 种竹种的采样小流域试验区, 其中桂竹 *Phyllostachys bambusoides*, 高节竹 *Ph. prominens*, 黄槽竹 *Ph. aureosulcata*, 黄秆乌哺鸡竹 *Ph. vivax*, 唐竹 *Sinobambusa tootsik* 属于散生竹, 罗汉竹 *Bambusa ventricosa* 和孝顺竹 *B. multiplex* 属于丛生竹, 橄榄竹 *Indosasa gigantea*, 茶秆竹 *Pseudosasa amabilis*, 白纹阴阳竹 *Hibanobambus tranquillans* 属于混生竹。在每个试验区中从 4 年生竹中随机选取 3 株, 测定地上部分各个器官生物量, 将每株样竹的竹秆纵向十字破开, 取完整 1 条, 自竹冠从上往下每轮采集 1 枝竹枝样品, 并将在主枝上采下的竹叶留待备用。挖取莖、根、鞭, 将 3 株样竹按叶、枝、秆、莖、根、鞭不同器官分别混匀后采集样品 1 kg 左右带回实验室, 用自来水多次冲洗, 根用超声波洗过后, 与其他器官一起用去离子水反复清洗后, 放置于

105 ℃下杀青 15 min, 75 ℃烘干至恒量, 称其干质量。将叶器官剪碎后混匀, 并分别将枝、秆、笋、根、鞭等器官劈碎后混匀。用不锈钢植物高速粉碎机粉碎后分成 2 份供总硅平行分析。

1.3 样品分析

样品的总硅质量分数按照文献[21]方法用植物标样灌木枝叶 GBW07602《灌木枝叶成分分析标准物质》(GSV-1)进行测定。具体实验操作步骤如下: 运用少量偏硼酸锂(LiBO_2)熔融样品, 在马弗炉中进行高温(950 ℃)熔融约 20 min 后冷却至常温, 用优级纯硝酸 1:20 溶解并定容至 50 mL 制备成待测液用钼蓝比色法进行测定。4 次重复·样品⁻¹。

1.4 数据分析与处理

植物植硅体/植物植硅体封存二氧化碳的产生通量和植物植硅体封存二氧化碳的总产生速率的计算参考文献[6,22-25]。公式如下: 植物植硅体的产生通量=植物中植硅体质量分数×凋落物量(ANPP); 植物植硅体封存二氧化碳通量($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$)=植物植硅体产生通量($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$)×植硅体含碳的质量分数($\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$)×44/12; 植物植硅体封存二氧化碳的总速率($\text{kg}\cdot\text{a}^{-1}$)=植物植硅体封存碳的产生通量($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$)×植物的分布面积(hm^2)。

运用 Duncan 新复极差法对于不同处理间的差异显著性进行分析。试验数据处理与分析在 Excel 2003, SPSS 13.0 和 Origin 统计软件上进行。

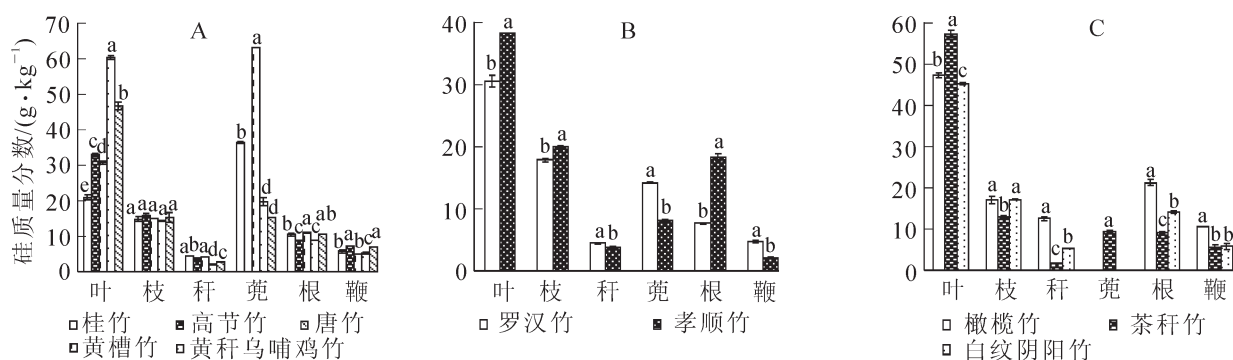
2 结果与分析

2.1 不同生态型竹子器官硅质量分数比较

5 种散生竹器官硅质量分数均为竹枝>竹根>竹鞭>竹秆, 竹叶和竹笋质量分数均高于竹枝, 但两者质量分数高低因竹种不同而不同。除桂竹和黄槽竹竹笋的硅质量分数高于其他器官, 黄秆乌哺鸡竹、唐竹、高节竹中硅质量分数最高的器官均为竹叶。由图 1A 看出: 这 5 种散生竹的叶、枝、秆、笋、根、鞭中硅质量分数范围分别是 20.86~60.23, 14.35~15.95, 2.07~4.42, 15.32~36.48, 8.83~11.06, 5.03~7.21 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

丛生竹中罗汉竹器官硅质量分数为叶>枝>笋>根>鞭>秆, 其中竹叶硅质量分数($30.63\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$)分别是竹鞭($4.73\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$), 竹秆($4.51\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$)硅质量分数的 6.48 倍和 6.8 倍, 孝顺竹器官硅质量分数为叶>枝>根>笋>鞭>秆, 其中竹叶硅质量分数分别是竹秆和竹鞭的 10.13 倍和 17.75 倍(图 1B)。

硅在 3 种生态型竹叶中的质量分数变化范围为 1.77~63.10 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。竹叶硅质量分数总体上为散生>混生>丛生(图 1)。混生竹中橄榄竹器官硅质量分数为叶>笋>根>枝>鞭>秆。3 种混生竹的叶、枝、秆、笋、根、鞭硅质量分数范围分别为 45.22~57.24, 13.00~17.15, 1.77~5.18, 9.10~21.28, 5.53~10.46 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。其中, 竹叶和竹秆硅质量分数最高的分别为茶秆竹和白纹阴阳竹, 而竹枝、竹根及竹鞭硅质量分数最高的均为橄榄竹(图 1C)。



误差线为标准差, 小写字母表示不同竹种同一器官硅质量分数差异显著性水平。

图 1 3 类生态型竹子不同器官中硅质量分数变化(A.散生竹, B.丛生竹, C.混生竹)

Figure 1 Si content in organs of ten bamboo species with three ecotypes(A. scattered bamboo; B. clustered bamboo; C. mixed bamboo)

2.2 不同生态型竹子器官硅储量和通量比较

不同生态类型竹子硅储量和通量分别为 $334.78\sim 3\ 015.70\ \text{g}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$ 和 $127.24\sim 1\ 311.53\ \text{g}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$ (表 1)。硅储量和通量总体上为混生竹>散生竹>丛生竹。散生竹地上部分各器官(叶、枝和秆)在 1 a 中的硅储量和通量变化均为唐竹>黄槽竹>黄秆乌哺鸡竹>桂竹>高节竹, 叶、枝和秆硅储量分别为 $140.77\sim 787.60$, $143.13\sim 532.77$, $53.59\sim 271.55\ \text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 叶、枝和秆硅通量分别为 $70.39\sim 393.80$, $28.63\sim 106.55$, $10.72\sim 54.31\ \text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 总体上为叶>枝>秆。丛生竹竹叶硅储量为地上部分所有器官最高; 1 a 中罗汉竹和孝顺竹地上部分器官硅通量分别为 145.8 和 $276.19\ \text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 其中竹叶通量最高, 分别高达 131.41 , $181.23\ \text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 竹枝次之, 竹秆最低。在混生竹(橄榄竹、茶秆竹以及白纹阴阳竹)中, 竹叶硅储量在所有器官中最高, 分别为 $921.53\sim 2\ 361.34$, $139.95\sim 898.46$, $73.42\sim 362.49\ \text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。其中白纹阴阳竹因其 1 分枝·节⁻¹, 长可达 60 cm, 竹枝的生物量较高, 硅储量也是 3 种混生竹竹枝以及竹秆器官中最高的; 地上器官硅通量为茶秆竹($1\ 311.53\ \text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)>白纹阴阳竹($885.28\ \text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)>橄榄竹($503.44\ \text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)。其中竹叶硅通量最高的是茶秆竹, 分别是竹枝和竹秆硅通量的 12.7 倍和 31.16 倍; 橄榄竹竹叶硅通量分别是竹枝和竹秆硅通量的 16.46 倍和 31.38 倍。

表 1 3 种生态型竹子器官硅储量和通量

Table 1 Variation of Si reserve and flux in organs of three ecotype bamboos

生态型	竹种	硅储量平均值(偏差)/(kg·hm ⁻² ·a ⁻¹)				硅通量平均值(偏差)/(kg·hm ⁻² ·a ⁻¹)			
		叶	枝	秆	小计	叶	枝	秆	小计
	桂竹	217.56	260.82	77.28	555.66	108.78	52.16	15.46	176.40
		(7.40)	(12.50)	(0.11)	(20.01)	(3.70)	(2.50)	(0.02)	(6.22)
	高节竹	140.77	199.96	84.31	425.04	70.39	39.99	16.86	127.24
		(2.04)	(5.99)	(5.35)	(13.39)	(1.02)	(1.20)	(1.07)	(3.29)
散生	黄槽竹	340.12	532.77	271.55	1 144.45	170.06	106.55	54.31	330.93
		(4.56)	(2.02)	(1.34)	(7.92)	(2.28)	(0.40)	(0.27)	(2.95)
	黄秆乌哺鸡	572.4	163.23	53.59	789.21	286.2	32.65	10.72	329.56
		(4.82)	(1.36)	(2.88)	(9.05)	(2.41)	(0.27)	(0.58)	(3.26)
	唐竹	787.6	143.13	95.82	1 026.55	393.8	28.63	19.16	441.59
		(17.99)	(12.04)	(1.73)	(31.77)	(9.00)	(2.41)	(0.35)	(11.75)
丛生	罗汉竹	262.81	49.99	21.98	334.78	131.41	10.00	4.40	145.80
		(7.72)	(0.59)	(0.42)	(8.74)	(3.86)	(0.12)	(0.08)	(4.06)
	孝顺竹	362.47	283.00	191.75	837.22	181.23	56.60	38.35	276.19
		(0.38)	(2.65)	(9.07)	(12.09)	(0.19)	(0.53)	(1.81)	(2.53)
混生	橄榄竹	921.53	139.95	73.42	1 134.89	460.76	27.99	14.68	503.44
		(13.16)	(6.94)	(12.33)	(32.42)	(6.58)	(1.39)	(2.47)	(10.43)
	茶秆竹	2 361.31	464.91	189.48	3 015.70	1 180.66	92.98	37.90	1 311.53
		(37.57)	(9.98)	(5.57)	(53.13)	(8.79)	(2.00)	(1.11)	(21.90)
	白纹阴阳竹	1 266.19	898.46	362.49	2 527.14	633.09	179.69	72.50	885.28
		(8.03)	(6.68)	(1.02)	(15.73)	(4.01)	(1.34)	(0.20)	(5.56)

3 讨论

3.1 生态型对竹子器官硅分布和积累的影响

本研究发现: 3 种类型竹子中各器官硅质量分数变化差异较大, 但是其整体表现出为竹叶>竹枝>竹根>竹鞭>竹秆的变化趋势, 遵循“末端分布律”^[25-26]。因为不同竹种对硅的吸收能力在很大程度上是取决于生长环境(土壤, 气候和水分等)与物种基因^[16,24]。除此之外, 竹器官对硅的积累量也主要与生物量和生物屏障等生理作用有关^[27]。竹叶的蒸腾作用要强于竹枝和竹秆, 从而能够积累更多的硅^[18,24]。随着植物年龄的增长, 硅也在植物体特定细胞中的沉积量增加, 此时硅在枝和秆中已经趋于稳定和均

匀,主要形成了不易转移和再利用的生物硅(也即是植硅体)^[4,17,26]。本研究为了排除日照、温度、降水量以及土壤等环境因素对其硅循环特征产生干扰,选取在同一片竹园即相同生长环境下的不同竹种,因此,同种生态型竹子在不同生长环境下的生长习性也会因之改变,从而影响了生长过程对各器官的吸收和积累。

实际上不同生态型竹子的叶、枝、秆生物量比例分配有很大区别,进而影响各器官中的硅元素积累和分配的。然而仅仅竹叶,作为竹器官硅质量分数最大的器官,每年通过枯枝落叶将很大一部分生物硅返回到土壤中^[28-32],对土壤中生物硅的补充有着很大的意义。例如,依据本研究在小流域范围的实验统计分析数据,可以作为植硅体碳汇调控实践指导,在此基础上可以初步估算出全国每年散生、丛生、混生竹落叶硅通量分别达到 5.90~6.11, 5.59~7.04, 3.77~8.14 $t \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1}$ 。竹秆的硅质量分数是所有器官中最低的,范围为 1.77~5.18 $g \cdot kg^{-1}$,因此,不同生态型竹类种群各个不同器官在硅的积累和分布中扮演了重要的角色,对整个竹林生态系统生物硅的平衡有着积极的实际意义。

3.2 中国竹子硅生物循环及其碳汇意义

最近的研究表明:竹林生态系统硅的动态平衡^[4,6],在全球生物碳循环和气候变化中扮演着重要的作用^[5-8]。据统计:全国竹林总面积为 $7.2 \times 10^6 \text{ hm}^2$ ^[19],散生竹、丛生竹、混生竹总面积分别为 5.76×10^6 , 1.30×10^6 , $0.14 \times 10^6 \text{ hm}^2$ ^[22-23]。依据本研究分析的竹子生态型硅含量及其生物量在小流域的动态变化,发现(图2和图3),散生竹硅的总储量($4\ 539.93 \times 10^3 \text{ t} \cdot a^{-1}$)分别是丛生竹和混生竹的 5.96 倍和 14.57 倍;硅在全国散生、丛生、混生竹中循环量分别为 $2\ 269.96 \times 10^3$, 380.90×10^3 , $155.81 \times 10^3 \text{ t} \cdot a^{-1}$ 。这可能是因为散生竹是中国最重要的生态型分布竹种,在全国的分布面积最高,部分竹种的生产力相对较高,所以其硅年储量和年循环量都是最高的,对陆地森林生态系统硅的动态平衡有着很大的贡献。

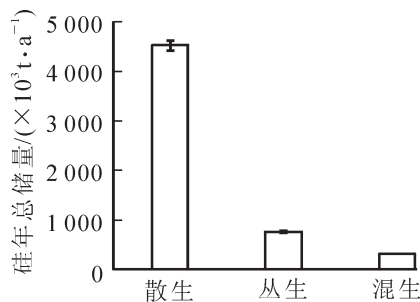


图2 3种生态型竹子硅的全国年储量
Figure 2 Si reserves of three ecotype bamboo in China

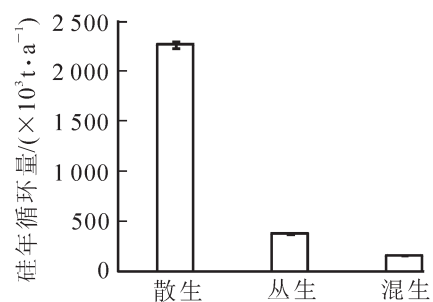


图3 3种生态型竹子硅的全国年循环量
Figure 3 Si cycles of three ecotype bamboo in China

最近的研究表明,植物硅在积累的过程中形成的生物硅(也就是植硅体, phytoliths)可以封存一部分有机碳(PhytOC),是一种相对“安全”的稳定碳汇库,在全球陆地生态系统碳循环和气候变化中,扮演着重要的作用^[4-5,7,16,33]。实际上,植物所吸收的硅与积累的植硅体有一种转移功能^[4,6],为了给未来的研究提供参考意见,我们可以初步地假设估算出本研究竹子器官中的植硅体含量,进而得出全国三大类竹子植硅体的年归还量分别为 $4\ 114.21 \times 10^3$, 690.19×10^3 , $282.21 \times 10^3 \text{ t} \cdot a^{-1}$,年归还总量为 $5\ 068.61 \times 10^3 \text{ t} \cdot a^{-1}$ 。虽然全国面积内竹子植硅体产生的通量很大,但是人类行为对植硅体归还过程产生了很大程度的干扰,从而导致实际上进入土壤的植硅体总量并不等于竹子的植硅体年产量^[6,16]。竹子作为一种高经济林业,竹制品在人类生活中有着广泛的推广和使用,同时也会造成伐竹量的日益增加,因此竹秆部分植硅体归还量会产生很大一部分的转移和流失,并没有直接进入竹林生态系统中。通常,也是竹子植硅体积累量最高的竹叶很大一部分是直接归还进入土壤当中,增加土壤中生物硅归还量,补充竹林生态系统中土壤中生物硅库,进而增加土壤中的生物地球化学稳定碳汇。本研究进一步假设估算^[6,34]3种生态型竹子植硅体封存二氧化碳通量为混生竹($38.83 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot a^{-1}$) > 散生竹($33.69 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot a^{-1}$) > 丛生竹($27.32 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot a^{-1}$);中国散生竹、丛生竹以及混生竹总植硅体碳封存碳的速率分别为 $(190.69 \sim 197.48) \times 10^3$, $(31.44 \sim 39.60) \times 10^3$, $(3.44 \sim 7.43) \times 10^3 \text{ t} \cdot a^{-1}$ 。

因此,如果为了增加竹林生态系统封存大气中的二氧化碳,我们可以通过选取封存二氧化碳通量最

高的竹子, 生态型为散生竹的竹种来进行培育种植, 在满足其经济效益的前提下, 适当的扩大其种植面积并通过一些合理施硅肥及其有效的管理方法等提高部分竹林地上部分植硅体生物固碳潜力, 增加土壤中生物地球化学碳库的量。

4 参考文献

- [1] JONES H P, HANDRECK K A. Silica in soils, plants, and animals [J]. *Adv Agron*, 1967, **19**(1): 107 – 149.
- [2] ILER R K. *The Chemistry of Silica: Solubility, Polymerization, Colloid and Surface Properties, and Biochemistry*[M]. New York: Wiley, 1979: 129 – 168.
- [3] 王惠, 马振民, 代力民. 森林生态系统硅素循环研究进展[J]. 生态学报, 2007, **27**(7): 3010 – 3017.
WANG Hui, MA Zhenmin, DAI Limin. A review of silicon cycling in forest ecosystem[J]. *Acta Ecol Sin*, 2007, **27**(7): 3010 – 3017.
- [4] SONG Zhaoliang, WANG Hailong, STRONG P J, *et al.* Plant impact on the coupled terrestrial biogeochemical cycles of silicon and carbon: Implications for biogeochemical carbon sequestration [J]. *Earth-Sci Rev*, 2012, **115**(4): 319 – 331.
- [5] LI Zimin, SONG Zhaoliang, PARR J F, *et al.* Occluded C in rice phytoliths: implications to biogeochemical carbon sequestration [J]. *Plant & Soil*, 2013, **370**(1/2): 615 – 623.
- [6] SONG Zhaoliang, LIU Hongyan, LI Beilei, *et al.* The production of phytolith-occluded carbon in China's forests: implications to biogeochemical carbon sequestration [J]. *Glob Change Biol*, 2013, **19**(9): 2907 – 2915.
- [7] ZUO Xinxin, LU Houyuan. Carbon sequestration within millet phytoliths from dry-farming of crops in China [J]. *Chin Sci Bull*, 2011, **56**(32): 3451 – 3456.
- [8] PARR J F, SULLIVAN L A. Soil carbon sequestration in phytoliths [J]. *Soil Biol Biochem*, 2005, **37**(1): 117 – 124.
- [9] 李自民, 宋照亮, 姜培坤. 稻田生态系统中植硅体的产生与积累: 以嘉兴稻田为例[J]. 生态学报, 2013, **33**(22): 7197 – 7203.
LI Zimin, SONG Zhaoliang, JIANG Peikun. The production and accumulation of phytoliths in rice ecosystems: a case study to Jiaxing paddy field [J]. *Acta Ecol Sin*, 2013, **33**(22): 7197 – 7203.
- [10] 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**(3): 677 – 682.
- [11] NORRIS A R, HACKNEY C T. Silica content of a mesohaline tidal marsh in North Carolina [J]. *Estuar Coast Shelf Sci*, 1999, **49**(4): 597 – 605.
- [12] 王立军, 季宏兵, 丁淮剑, 等. 硅的生物地球化学循环研究进展[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2008, **27**(2): 187 – 194.
WANG Lijun, JI Hongbing, DING Huaijian, *et al.* Advances of the research on the biogeochemical cycle of silicon [J]. *Bull Min Petrol Geochem*, 2008, **27**(2): 187 – 194.
- [13] CONLEY D J, LIKEN G, BUSO D C, *et al.* Deforestation causes increased dissolved silicate losses in the Hubbard Brook Experimental Forest [J]. *Glob Change Biol*, 2008, **14**(11): 2548 – 2554.
- [14] WILDING L P, BROWN R E, HOLOWAYCHUK N. Accessibility and properties of occluded carbon in biogenetic opal [J]. *Soil Sci*, 1967, **103**(1): 56 – 61.
- [15] PIPERNO D R. *Phytolith Analysis: An Archaeological and Geological Perspective* [M]. San Diego: Academic Press, 1988.
- [16] PARR J F, SULLIVAN L A, CHEN B, *et al.* Carbon biosequestration within the phytoliths of economic bamboo species [J]. *Glob Change Biol*, 2010, **16**(10): 2661 – 2667.
- [17] LI Zimin, SONG Zhaoliang, CORNELIS J T. Impact of rice cultivar and organ on elemental composition of phytoliths and the release of bio-available silicon [J]. *Front Plant Sci*, 2014, **5**: 529. doi: 10.3389/fpls.2014.00529.
- [18] ZHOU Guomo, ZHUANG Shunyao, JIANG Peikun, *et al.* Soil organic carbon accumulation in intensively managed *Phyllostachys praecox* stands [J]. *Bot Rev*, 2011, **77**(3): 296 – 303.
- [19] JIANG Peikun, MENG Cifu, ZHOU Guomo. *et al.* Comparative study of carbon storage in different forest stands in subtropical China [J]. *Bot Rev*, 2011, **77**(3): 242 – 251.
- [20] HUANG Zhangting, LI Yongfu, JIANG Peikun, *et al.* Long-term intensive management increased carbon occluded in

- phytolith (PhytOC) in bamboo forest soils [J]. *Sci Rep*, 2014, **439**: 457 – 461.
- [21] 李自民, 宋照亮, 李蓓蕾, 等. 杭州西溪湿地植物植硅体产生极其影响因素[J]. 浙江农林大学学报, 2013, **30**(4): 470 – 476.
- LI Zimin, SONG Zhaoliang, LI Beilei, *et al.* Phytolith production in wetland plants of the Hangzhou Xixi Wetlands ecosystem [J]. *J Zhejiang A & F Univ*, 2013, **30**(4): 470 – 476.
- [22] CAO Zhihong, ZHOU Guomo, WONG Meihua. Special issue on bamboo and climate change in China [J]. *Bot Rev*, 2011, **77**(3): 188 – 189.
- [23] 马乃训. 国产丛生竹类资源与利用[J]. 竹子研究汇刊, 2004, **23**(1): 1 – 5.
- MA Naixun, Resources of sympodial bamboos in China and their utilization [J]. *J Bamboo Res*, 2004, **23**(1): 1 – 5.
- [24] DING T P, ZHOU J X, WAN D F, *et al.* Silicon isotope fractionation in bamboo and its significance to the biogeochemical cycle of silicon [J]. *Geochim Cosmochim Acta*, 2008, **72**(5): 1381 – 1395.
- [25] 白淑琴, 阿木日沙那, 那仁高娃, 等. 水稻中硅元素的分布及存在状态[J]. 应用与环境生物学报, 2012, **18**(3): 444 – 449.
- BAI Shuqin, Amurishana, Gaowanaren, *et al.* Distribution and status of silicon in rice plant [J]. *Chin J Appl Environ Biol*, 2012, **18**(3): 444 – 449.
- [26] 黄张婷, 姜培坤, 宋照亮, 等. 不同竹龄雷竹中硅及其他营养元素吸收和积累特征[J]. 应用生态学报, 2013, **24**(5): 1347 – 1353.
- HUANG Zhangting, JIANG Peikun, SONG Zhaoliang. Uptake and accumulation characteristics of silicon and other nutritional elements in different age *Phyllostachys praecox* plants [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2013, **24**(5): 1347 – 1353.
- [27] CONLEY D J. Terrestrial ecosystems and the global biogeochemical silica cycle [J]. *Glob Biogeochem Cycles*, 2002, **16**(4): 1121 – 1129.
- [28] 邱尔发, 陈卓梅, 郑郁善, 等. 麻竹山地笋用林凋落物发生、分解及养分归还动态[J]. 应用生态学报, 2005, **16**(5): 811 – 814.
- QIU Erfu, CHEN Zhuomei, ZHENG Yushan, *et al.* Dynamics of litter fall and its decomposition and nutrient return of shoot-used *Dendrocalamus latiflorus* in mountainous areas of Fujian Province [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2005, **16**(5): 811 – 814.
- [29] 荣俊冬, 王新屯, 郭喜军, 等. 沿海沙地吊丝竹林凋落物及养分动态研究[J]. 福建林业科技, 2007, **34**(4): 59 – 62.
- RONG Jundong, WANG Xintun, GUO Xijun, *et al.* Study on the litter and nutrient dynamics of *Dendrocalamus minor* plantation in the coastal sandy site [J]. *J Fujian For Sci Tech*, 2007, **34**(4): 59 – 62.
- [30] 余英, 费世民, 何亚平, 等. 长宁苦竹种群结构和地上生物量研究[J]. 四川林业科技, 2005, **26**(4): 90 – 93.
- YU Ying, FEI Shimin, HE Yaping, *et al.* The structure and aboveground biomass of *Pleiolblastus amarus* population in Changning [J]. *J Sichuan For Sci Technol*, 2005, **26**(4): 90 – 93.
- [31] 周国模, 吴家森, 姜培坤. 不同管理模式对毛竹林碳储量的影响[J]. 北京林业大学学报, 2006, **28**(6): 51 – 55.
- ZHOU Guomo, WU Jiasen, JIANG Peikun, Effects of different management models on carbon storage in *Phyllostachys pubescens* forests [J]. *J Beijing For Univ*, 2006, **28**(6): 51 – 55.
- [32] HONG Chuntao, FANG Jia, JIN Aiwu, *et al.* Comparative growth, biomass production and fuel properties among different perennial plants, bamboo and miscanthus [J]. *Bot Rev*, 2011, **77**(3): 197 – 207.
- [33] ZUO Xinxin, LU Houyuan, GU Zhaoyan. Distribution of soil phytolith-occluded carbon in the Chinese Loess Plateau and its implications for silica-carbon cycles [J]. *Plant Soil*, 2014, **374**(1/2): 223 – 232.
- [34] SONG Zhaoliang, WANG Hailong, STRONG P J, *et al.* Phytolith carbon sequestration in China's croplands [J]. *Eur J Agron*, 2014, **53**: 10 – 15.