

## 杭州西溪湿地植物植硅体产生及其影响因素

李自民<sup>1</sup>, 宋照亮<sup>1,2,3</sup>, 李蓓蕾<sup>1</sup>, 蔡彦彬<sup>1</sup>

(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, 贵州 贵阳 550002)

**摘要:** 在浙江杭州西溪湿地选取 18 种植物, 运用微波消解和 Walkley-Black 消解相结合的方法, 研究了湿地生态系统中不同植物植硅体质量分数及其产生通量变化特征, 为沼泽湿地生态系统植硅体碳汇调控提供科学依据。研究结果表明: ①18 种植物植硅体质量分数有较大的差异( $P<0.05$ ), 其中蒲苇 *Cortaderia selloana*(7.69%), 狗尾草 *Setaria viridis*(7.56%), 三数马唐 *Digitaria ternata*(6.88%)和芦苇 *Phragmites australis*(6.60%)等植硅体质量分数较高, 槐叶萍 *Salvinia natans*(1.28%), 美人蕉 *Canna indica*(1.01%)和凤眼莲 *Heteropeltis cymbalaria*(1.11%)植硅体质量分数较低。②湿地植物植硅体与其二氧化硅质量分数有较强的正相关性。在湿地生态系统中, 选择一种高植硅体质量分数和高生产力的植物芦苇 *Phragmites australis* 栽植, 对提高地上植物植硅体的产生通量有重要的作用。③在西溪沼泽湿地生态系统中, 地上植物植硅体产生通量为  $4.48\sim129.92\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ , 植硅体封闭碳的产生通量为  $0.16\sim1.03\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ , 植硅体封闭碳的总产生速率为  $8.29\text{ t}\cdot\text{a}^{-1}$ 。图 1 表 1 参 35

**关键词:** 植物学; 植硅体; 湿地; 植硅体产生通量; 植硅体封闭碳; 碳汇; 西溪

中图分类号: S184 文献标志码: A 文章编号: 2095-0756(2013)04-0470-07

## Phytolith production in wetland plants of the Hangzhou Xixi Wetlands ecosystem

LI Zimin<sup>1</sup>, SONG Zhaoliang<sup>1,2,3</sup>, LI Beilei<sup>1</sup>, CAI Yanbin<sup>1</sup>

(1. School of Environmental and Resource Sciences, Zhejiang A & F University, Lin'an 311300, Zhejiang, China; 2. Zhejiang Provincial Key Laboratory of Carbon Cycling in Forest Ecosystems and Carbon Sequestration, Zhejiang A & F University, Lin'an 311300, Zhejiang, China; 3. State Key Laboratory of Environmental Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, Guizhou, China)

**Abstract:** Phytoliths, also referred to as plant opal, are silicified features that form as a result of biomineralization within plants and plays an important role in terrestrial biogeochemical cycles of carbon and silicon. This study selected 18 different plant species at the Xixi Wetlands in Zhejiang Province, to determine the phytolith content and its production flux using microwave, Walkley-Black digestion, and a correlation analysis. The main purpose of this study is to provide scientific reference for understanding the role of phytoliths in biogeochemical cycles of silicon and carbon. Results showed strong variation in phytolith content among the 18 plants: *Cortaderia selloana*(7.7%), *Setaria viridis*(7.6%), *Digitaria ternata*(6.9%), and *Phragmites australis*(6.6%) were higher than *Salvinia natans*(1.3%), *Heteropeltis cymbalaria*(1.1%), and *Canna indica* L.(1.0%). A positive correlation between phytolith content and total  $\text{SiO}_2$  in the 18 plants( $R^2=0.663\ 3$ ,  $P<0.01$ ) was also found. Phytolith production flux was  $4.48\sim129.92\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ ; phytolith sequestration of atmospheric  $\text{CO}_2$  was

收稿日期: 2012-09-25; 修回日期: 2012-11-23

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41103042); 浙江省自然科学基金资助项目(Y5080110); 国家重点实验室开放基金资助项目(SKLEG9011)

作者简介: 李自民, 从事植硅体与生物地球化学研究。E-mail: lizimin322@126.com。通信作者: 宋照亮, 副教授, 博士, 从事环境与生物地球化学研究。E-mail: songzaoliang78@163.com

0.16–1.03 g·m<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>; and the phytolith sequestration rate of atmospheric CO<sub>2</sub> was 8.29 t·a<sup>-1</sup>. So, it is very important to improve the flux of aboveground plant phytolith production in wetlands ecosystems by selecting a plant with high-phytolith (silicon) content and high-ANPP (aboveground net primary production) yields for the plant *Phragmites australis*. [Ch, 1 fig. 1 tab. 35 ref.]

**Key words:** botany; phytolith; wetland; phytolith production flux; phytolith sequestration carbon; carbon sink

植硅体是植物根系吸取土壤溶液中的可溶性二氧化硅(SiO<sub>2</sub>), 在植物细胞或细胞内硅化而形成的一种固体的非晶质含水二氧化硅颗粒物<sup>[1]</sup>。植硅体主要组成部分是二氧化硅(67.0%~95.0%), 有机碳(0.1%~6.0%)及一些微量元素如铁、铝、铊等<sup>[2]</sup>。由于它们具有较强的抗分解、抗腐蚀和耐高温等特性, 植硅体可以较稳定地长时间保存在一些岩石和土壤中<sup>[3-4]</sup>, 在硅的生物地球化学循环中有着重要的作用, 是全球硅循环的重要参与者<sup>[5]</sup>。自20世纪80年代以来, 植硅体的研究领域已涉及到地质学、考古学、土壤学、生态学、动物学、植物学、医学及农学等学科。目前, 对植硅体的研究主要从农业考古<sup>[6-7]</sup>、碳同位素研究<sup>[8-10]</sup>、古气候重建<sup>[11-13]</sup>、植硅体固定大气中二氧化碳的潜力<sup>[14-17]</sup>、植硅体放射性定年<sup>[18-19]</sup>及植物分类学<sup>[20-21]</sup>等方面开展。虽然植硅体作为生物硅的重要组成部分, 在全球硅的生物地球化学循环中占据着重要地位, 但在湿地生态系统中植硅体产生和积累研究则鲜见报道<sup>[22]</sup>。在陆地生态系统中, 湿地生态系统拥有旺盛的植物群落, 在较高的生产力及其在厌氧环境作用下的低分解率下, 形成了特色的富含大量有机质的湿地土壤和泥炭土。而且湿地生态系统中的一些禾本科Poaceae植物, 具有较强的富硅能力, 虽然湿地仅占陆地表面积的2.0%~6.0%<sup>[23]</sup>, 但在全球硅和碳的生物地球化学循环中占据着重要的地位<sup>[22]</sup>。然而, 对于湿地不同植物中植硅体质量分数的分布特征研究则报道较少<sup>[17,22]</sup>。因此, 本研究选择浙江杭州西溪湿地生态系统中的不同植物为研究对象, 研究其植硅体质量分数的分布特征, 来阐明湿地生态系统中植硅体的产生和积累规律, 为湿地生态系统植硅体碳汇提供科学参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地概况

西溪湿地(30°15'N, 120°05'E)是在古河滩遗存的基础上及1 000多年来人类农渔耕共同影响下形成的城市边缘次生湿地, 总面积为16.15 km<sup>2</sup>, 主要是由沼泽、湖漾和鱼塘等组成, 水域面积达50%<sup>[24]</sup>。该地地处亚热带季风气候, 四季分明, 年均气温为16.2 ℃; 年均降水量约为1 400 mm, 降水量主要分布于3~9月; 无霜期≥240 d。该地区地下为伏白垩系砂岩, 上覆40~50 cm厚的第四系亚砂土、亚黏土层, 目前多为改良为水稻土<sup>[24]</sup>。

西溪湿地植被主要以草本植物为主, 常见有芦苇 *Phragmites australis*, 荻 *Zizania caduciflora*, 狗尾草 *Setaria viridis*, 莩草 *Arthraxon hispidus* 等, 也有一些乔木和灌丛, 例如桑 *Morus alba*, 垂柳 *Salix babylonica*, 构树 *Broussonetia papyrifera* 等乔木, 忍冬 *Lonicera japonica*, 野蔷薇 *Rosa multiflora*, 海州常山 *Clerodendrum trichotomum* 等灌丛, 及一些早园竹 *Phyllostachys propinqua*; 水边常有白茅 *Imperata koenigii*, 风车草 *Cyperus alternifolius*, 水蓼 *Polygonum hydropiper*, 喜旱莲子草 *Alternanthera philoxeroides* 等分布<sup>[24]</sup>。依照文献[25]中的湿地分类系统, 西溪湿地可划分为沼泽湿地<sup>[26]</sup>。

### 1.2 样品采集及分析方法

为了保证实验样品具有较好的代表性, 本实验选择了沼泽湿地所常见3种生长类型的18种植物(表1), 采集时间为2011年10月, 此时植物样品具有较高的硅质量分数<sup>[27]</sup>和较大的地上净初级生产力(ANPP)。

植物地上净初级生产力的测定方法是, 各个植物样品随机的选择3处100 cm×100 cm样地, 用不锈钢剪刀在其露地处剪断, 收集地上植株全部样品。芦苇, 美人蕉 *Canna indica*, 蒲苇 *Cortaderia selliana*, 风车草和荻等是随机的选择3处200 cm×200 cm样地, 收集地上全部植物样品。采集回来的植物样品, 用自来水洗净, 在鼓风烘箱中75 ℃烘干至恒量, 冷却称其干质量。

各个植物样品分别选择5个点, 采集植物样8~10株·点<sup>-1</sup>, 用不锈钢剪刀在其露地处剪断, 收集地

上植株样品混合成1个样品。

采集的植物样品分别用自来水多次冲洗后,再用去离子水反复冲洗干净,先放置鼓风烘箱中105℃杀青20 min,然后75℃烘干至恒量,冷却称其干质量。地上植株剪碎后混匀,分成2份,其中1份用不锈钢植物粉碎机粉碎供总硅测试,另一份用剪刀剪至0.5 cm左右,供植硅体分析。植物样品硅按照文献[28]方法测定。具体操作步骤如下:用高精度天平(0.000 1 mg),称取粉碎植物样品约1.000 g,放入坩埚中→用少量偏硼酸锂(LiBO<sub>2</sub>)覆盖,在马弗炉中高温熔融(950℃,约20 min)→冷却至常温,用优级纯硝酸(1:20)溶解,定容至50 mL制备成待测液→取待测液(1~3 mL)→用钼蓝比色法测定。

植物样品植硅体的提取按照微波消解<sup>[29]</sup>和Walkely-Black方法<sup>[30]</sup>提取植硅体,略有修改,旨在彻底地除去植硅体外面多余的有机质。具体操作步骤如下:①用高精度天平(0.000 1 mg)定量称取1.000 g烘干搅碎的样品,放入消解罐中,待氧化;②往消解罐中加入12 mL浓硝酸氧化植物有机质,将消解罐放置微波炉中加热,直至反应完全停止,转移入离心管离心,用蒸馏水清洗干净(至少3次,离心3 min·次<sup>-1</sup>,2 500转·min<sup>-1</sup>);③加入5 mL浓硫酸,将消解罐在85℃水浴锅中加热90 min,确保有机质完全去除,转移入离心管离心,清洗;④然后再加入10 mL体积分数为30%的双氧水进一步氧化,约90 min,离心,清洗;⑤提取出的植硅体放在干燥过的离心管内(已称量),在75℃鼓风烘箱中干燥24 h,然后称量得出植硅体质量分数。

植物植硅体/植物植硅体封闭碳的产生通量和植物植硅体封闭碳的总产生速率的计算公式分别如下:植物植硅体的产生通量=植物中植硅体质量分数×植物地上净初级生产量(ANPP);植物植硅体封闭碳的产生通量=植物植硅体产生通量×植硅体含碳的质量分数;植物植硅体封闭碳的总产生速率=植物植硅体封闭碳的产生通量×植物的栽植面积。

### 1.3 数据处理

本研究的结果数据为3次重复的平均值,数据进行方差分析,并用新复极差法进行多重比较。数据的统计分析均在Microsoft, Excel和DPS等软件上进行。

## 2 结果与分析

### 2.1 西溪湿地植物植硅体含量分布特征

表1给出了18种植植物植硅体质量分数及植硅体产生通量的变化特征。本研究中植物植硅体质量分数变化范围为1.01%~7.09%。植硅体质量分数较高的主要是禾本科Poaceae中的狗尾草(7.56%),三数马唐*Digitaria ternate*(6.88%),狗牙根*Cynodon dactylon*(6.32%),蒲苇(7.69%),芦苇(6.60%)等,较少的是则是莎草科Cyperaceae的风车草(1.51%),槐叶萍科Salviniaceae槐叶萍*Salvinia natans*(1.28%),雨久花科Pontederiaceae的凤眼莲*Heterpestes cymbalaria*(1.11%),美人蕉科Cannaceae的美人蕉*Canna indica*(1.01%)。

### 2.2 植物植硅体产生通量特征

在计算每年单位面积不同植物植硅体产生通量时,准确计算生物量至关重要。本研究对18种植地上生产力进行了实地测量(表1),利用此结果估算了每一种植物植硅体单位面积年产生量的潜力。表1给出了不同植物植硅体的产生通量变化特征,变化范围在0.08~157.61 g·m<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>,其间的变异系数较大( $P<0.05$ )。芦苇植硅体产生通量最大,为157.61 g·m<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>,其次是蒲苇,为123.04 g·m<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>,荻为115.20 g·m<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>,稗*Echinochloa crusgalli*为0.21 g·m<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>,狗尾草植硅体产生通量最低,为0.08 g·m<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>。引起这种较大差异( $P<0.05$ )的主要原因是不同植物的植硅体质量分数及其地上生产力有很大的差异。例如,莎草科风车草、美人蕉科美人蕉、槐叶萍科槐叶萍、雨久花科凤眼莲,虽然植硅体质量分数较低,但是有较大的地上生产力,其植硅体产生通量也高于那些植硅体的质量分数较高的禾本科的狗尾草,稗,双穗雀稗*Paspalum paspaloides*,籼壳草*Leersia sayanuka*和三数马唐等植物。其中,芦苇不仅具有较高的植硅体质量分数,而且地上部分的生产力也较高,它产生的植硅体通量最大,为157.61 g·m<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>。

## 3 讨论

植物中植硅体质量分数因植物种、品种等地区的不同而有较大的差异<sup>[31]</sup>。以前的研究认为禾本科植

表1 18种植物植硅体质量分数和产生通量变化特征  
Table 1 Variations of phytolith percentage content and production fluxes in 18 plant species

生长类型	植物样品	植硅体质量分数/%	ANPP/(g·m <sup>-2</sup> ·a <sup>-1</sup> )	植物植硅体产生通量/(g·m <sup>-2</sup> ·a <sup>-1</sup> )
岸边植物	秕壳草 <i>Leersia sayanuka</i>	5.29 ± 1.64 e	8	0.42
	狗尾草 <i>Setaria viridis</i>	7.56 ± 0.23 ab	1	0.08
	牛筋草 <i>Eleusine indica</i>	4.11 ± 0.07 fg	118	4.85
	三数马唐 <i>Digitaria ternata</i>	6.88 ± 0.17 abc	20	1.38
	矛叶荩草 <i>Arthraxon lanceolatus</i>	5.51 ± 0.27 de	306	16.86
	荩草 <i>Arthraxon hispidus</i>	3.40 ± 0.52 gh	306	10.40
	狗牙根 <i>Cynodon dactylon</i>	6.35 ± 0.27 cd	1 150	73.03
	三叶草 <i>Trifolium incarnatum</i>	2.32 ± 0.70 ij	901	20.90
	稗 <i>Echinochloa crusgalli</i>	2.59 ± 0.69 hi	8	0.21
	双穗雀稗 <i>Paspalum paspaloides</i>	4.78 ± 0.22 ef	8	0.40
浅水植物	美人蕉 <i>Canna indica</i>	1.01 ± 0.31 k	2 059	20.80
	风车草 <i>Cyperus alternifolius</i>	1.51 ± 0.59 jk	3 406	51.43
	芦竹 <i>Arundo donax</i>	4.22 ± 0.27 fg	1 778	75.03
	蒲苇 <i>Cortaderia selloana</i>	7.69 ± 0.03 a	1 600	123.04
	芦苇 <i>Phragmites australis</i>	6.60 ± 0.54 bc	2 388	157.61
	荻 <i>Triarrhena sacchariflora</i>	3.84 ± 0.18 g	3 000	115.20
浮游植物	凤眼莲 <i>Heteranthera cymbalaria</i>	1.11 ± 0.26 k	918	20.923
	槐叶萍 <i>Salvinia natans</i>	1.28 ± 0.36 k	46	0.860

说明: ANPP 指每一个植物地上净初级生产力; 所列数值间的差异比较为同一指标不同样品间的比较, 不同字母表示数值间差异显著( $P<0.05$  )。

物植硅体质量分数普遍高于其他科属<sup>[32]</sup>, 本实验研究的结果与此较一致。

由图1可以看出: 植物植硅体与其总二氧化硅质量分数有较强的正相关性( $R^2=0.663\ 3$ ,  $P<0.01$ ), 表明富硅能力较强的植物, 也有较高的植硅体质量分数。以前的研究发现, 通过施用钢渣等硅肥可以明显增加植物吸收硅的质量分数<sup>[33-34]</sup>, 或许那些影响植物硅吸收的因素, 最终可能也会对植物植硅体的积累产生一定的影响。因此, 我们可以通过硅调控机制增加植物硅的质量分数来提高植物植硅体的质量分数。在湿地生态系统中, 许多植物通常是混合生长形成一个复杂的植物生态群落, 地上的生产力也常指一个群落的生物量。本研究利用文献[35]对草本植物为主的沼泽湿地植物地上部分生产力进行统计, 数值为  $1\sim29\ t\cdot hm^{-2}\cdot a^{-1}$ , 并利用本研究中18种植物植硅体质量分数平均值(4.48%), 估算的整个西溪湿地生态系统植物植硅体产生通量是  $4.48\sim129.92\ g\cdot m^{-2}\cdot a^{-1}$ 。因此, 在湿地生态系统中, 选择一种高植硅体质量分数和高生产力的植物如芦苇进行栽植对提高植物植硅体的产生通量有重要的作用。

实际上, 植物吸收硅产生植硅体的同时, 植硅体也封闭了少量植物细胞内的有机质, 随着植物的死亡以及有机残体腐烂和分解, 大量的植硅体被释放到土壤中, 植硅体封闭的碳随着植硅体较长时间的保存在一些土壤和沉积层中<sup>[3-4]</sup>。最近的研究<sup>[16]</sup>发现, 全球竹林依靠植硅体可以封闭  $1.56\times10^7\ t\cdot a^{-1}$  的二氧化

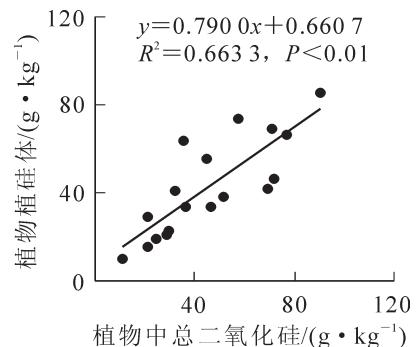


图1 植物中植硅体与其二氧化硅之间的相关  
Figure 1 Correlation of the total SiO<sub>2</sub> and the phytolith percentage content in 18 plant species

碳,如果全球潜在的耕地( $4.1 \times 10^9 \text{ hm}^2$ )都选择栽植竹子或与有类似竹子植硅体封闭碳潜力的植物,在一个 $0.36 \text{ g} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 植硅体封闭碳速率下,全球将会有 $1.5 \times 10^9 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$ 的二氧化碳被固定在植硅体中,这将会有有效降低目前全球二氧化碳的排放量。因此,植物植硅体及其包裹的碳在全球硅和碳循环中占据着重要的地位。

如何提高植物植硅体的质量分数,来增加其封闭的二氧化碳量,是十分重要的。根据植硅体的总产生通量,我们可以发现选择一种高植硅体质量分数或者是高生产力的植物进行种植,对整个生态系统植硅体质量分数的提高有很大的影响。最近的研究表明,植硅体包裹碳的质量分数为 $1.0\% \sim 6.0\%$ <sup>[14-17]</sup>。据此估算的西溪湿地植物地上部分固定的大气中二氧化碳的通量为 $0.16 \sim 1.03 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ,地上植被覆盖区植硅体固定大气中二氧化碳的速率高达 $8.29 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$ 。

#### 4 结论

西溪湿地生态系统中,不同植物植硅体的质量分数有很大的差异( $P < 0.05$ ),植硅体质量分数较高的主要是禾本科中的狗尾草(7.56%),三数马唐(6.88%),狗牙根(6.32%),蒲苇(7.69%),芦苇(6.60%)等,较少的是则是莎草科风车草(1.25%),槐叶萍科槐叶萍(1.28%),雨久花科凤眼莲(1.11%),美人蕉科美人蕉(1.01%),变化范围为 $1.01\% \sim 7.09\%$ 。一般认为禾本科植物植硅体的质量分数普遍高于其他科属。

植物中植硅体与其总二氧化硅质量分数有较强的正相关性( $R^2 = 0.6633, P < 0.01$ ),富硅能力较强的植物,其植硅体的质量分数也较高。这表明我们可以通过硅调控机制增加植物硅的质量分数,来提高植物中植硅体的质量分数。

由于植物植硅体的质量分数及其地上部分生物量的不同,每种植物植硅体产生通量有较大的差异性,变化范围为 $0.08 \sim 157.61 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。在西溪湿地生态系统中,所有植物植硅体产生的通量为 $4.48 \sim 129.92 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ,固定的大气中二氧化碳的通量为 $0.16 \sim 1.03 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ,固定的二氧化碳量高达 $8.29 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$ 。在通过硅调控机制来提高植物硅的质量分数增加植物植硅体的质量分数的同时,选择一种高植硅体质量分数和高净初级生产力的芦苇,对提高沼泽湿地生态系统植硅体产生通量及植硅体的碳汇潜力有一定的作用。

#### 参考文献:

- [1] 吕厚远,贾继伟,王伟铭,等.“植硅体”含义和禾本科植硅体的分类[J].微体古生物学报,2002,19(4):389-396.  
LÜ Houyuan, JIA Jiwei, WANG Weiming, *et al.* On the meaning of phytolith and its classification in gramineac [J]. *Acta Micropalaeontol Sin*, 2002, 19(4): 389 - 396.
- [2] 王永吉.植物硅酸体化学成分的研究[J].黄渤海海洋,1998,16(3):33-37.  
WANG Yongji. A study on the chemical composition of phytoliths [J]. *J Ocean Huanghai Bohai Sea*, 1998, 16(3): 33-37.
- [3] PARR J F, SULLIVAN L A. Soil carbon sequestration in phytoliths [J]. *Soil Biol Biochem*, 2005, 37: 117 - 124.
- [4] STROMBERG C. Using phytolith assemblages to reconstruct the origin and spread of grass-dominated habitats in the great plains of North America during the late Eocene to early Miocene [J]. *Paleogeogr Paleoclimatol Paleoecol*, 2004, 207: 239 - 275.
- [5] SOMMER M, KACAOREK D, KUZYAKOV Y *et al.* Silicon pools and fluxes in soils and landscapes: a review [J]. *J Plant Nutri Soil Sci*, 2006, 169(3): 310 - 329.
- [6] LU Houyuan, ZHANG Jianping, WU Naiqin, *et al.* Phytoliths analysis for the discrimination of foxtail millet (*Setaria italica*) and common millet (*Panicum miliaceum*) [J]. *PLoS ONE*, 2009, 4(2): e4448.
- [7] 李小强,周新郢,张宏宾,等.考古生物指标记录的中国西北地区5 000 a BP水稻遗存[J].科学通报,2007,52(6):673-678.  
LI Xiaoqiang, ZHOU Xinying, ZHANG Hongbin, *et al.* The record of cultivated rice from archaeobiological evidence in northwestern China 5 000 years ago [J]. *Chin Sci Bull*, 2007, 52(6): 673 - 678.
- [8] KELLY E F, AMUNDSON R G, MARINO B D, *et al.* Stable isotope ratios of carbon in phytoliths as a quantitative

- method of monitoring vegetation and climate change [J]. *Quat Res*, 1991, **35**: 222 – 233.
- [9] KRULL E S, SKJEMSTAD J O, GRAETZ D, *et al.* <sup>13</sup>C-depleted charcoal from C<sub>4</sub> grasses and the role of occluded carbon in phytoliths [J]. *Org Geochem*, 2003, **34**: 1337 – 1352.
- [10] 王永吉, 吕厚远, 王国安, 等. C<sub>3</sub>, C<sub>4</sub>植物和现代土壤中植物硅酸体碳同位素分析[J]. 科学通报, 2000, **45**(9): 978 – 982.  
WANG Yongji, LÜ Houyuan, WANG Guoan, *et al.* C<sub>3</sub> and C<sub>4</sub> plants and modern soil phytolith carbon isotope analysis[J]. *Chin Sci Bull*, 2000, **45**(9): 978 – 982.
- [11] CARTER J A. Phytolith analysis and pale environmental reconstruction from Lake Poukawa Core, Hawkes Bay, New Zealand [J]. *Glob Planet Change*, 2002, **33**: 257 – 267.
- [12] LU Houyuan, WU Naiqin, YANG Xiangdong, *et al.* Phytoliths as quantitative indicators for the reconstruction of past environmental conditions in China(I)phytolith-based transfer functions [J]. *Quat Sci Rev*, 2006, **25**: 945 – 959.
- [13] 葛勇, 介冬梅, 郭继勋, 等. 松嫩草原羊草植硅体对模拟全球CO<sub>2</sub>浓度升高的响应研究[J]. 科学通报, 2010, **55**(27/28): 2735 – 2741.  
GE Yong, JIE Dongmei, GUO Jixun, *et al.* Response of phytoliths in *Leymus chinensis* to the simulation of elevated global CO<sub>2</sub> concentrations in Songnei Grassland, China [J]. *Chin Sci Bull*, 2010, **55**(27/28): 2735 – 2741.
- [14] PARR J F, SULLIVAN L A, QUIRK R. Sugarcane phytoliths: encapsulation and sequestration of a long-lived carbon fraction [J]. *Sugar Technol*, 2009, **11**(1): 17 – 21.
- [15] PARR J F, SULLIVAN L A, CHEN Bihua, *et al.* Carbon bio-sequestration within the phytoliths of economic bamboo species [J]. *Global Change Biol*, 2010, **16**(10): 2661 – 2667.
- [16] PARR J F, SULLIVAN L A. Phytolith occluded carbon and silica variability in wheat cultivars [J]. *Plant Soil*, 2011, **342**: 165 – 171.
- [17] ZUO Xinxin, LÜ Houyuan. Carbon sequestration within millet phytoliths from dry-farming of crops in China [J]. *Chin Sci Bull*, 2011, **56** (32): 3451 – 3456.
- [18] WILDING L P, BROWN R E, HOLOWAYCHUK N. Accessibility and properties of occluded carbon in biogenetic opal [J]. *Soil Sci*, 1967, **103**: 56 – 61.
- [19] MULHOLLAND S, PRIOR C. AMS radiocarbon dating of phytoliths [J]. *MASCA Res Pap Sci Archaeol*, 1993, **10**: 21 – 23.
- [20] BLACKMAN E. Observations on the development of the silica cells of the leaf sheath of wheat (*Triticum aestivum*) [J]. *Can J Bot*, 1969, **47**: 827 – 838.
- [21] PIPERNO D R. *Phytolith Analysis: An Archaeological and Geological Perspective* [M]. San Diego: Academic Press, 1988.
- [22] NATALIA BORRELLI M, OSTERRIETH A, ROMANELLI M F, *et al.* Biogenic silica in wetlands and their relationship with soil and groundwater biogeochemistry in the Southeastern of Buenos Aires Province, Argentina [J]. *Environ Earth Sci*, 2012, **65**: 469 – 480.
- [23] MITSCH W J, GOSSELINK J G. *Wetlands* [M]. 2nd Ed. New York: Van Nostrand Reinhold, 1993.
- [24] 沈琪, 刘珂, 李世玉, 等. 杭州西溪湿地植物组成及其与水位光照关系的初步研究[J]. 植物生态学报, 2008, **32**(1): 114 – 122.  
SHEN Qi, LIU Ke, LI Shiyu, *et al.* Relationships of plant composition, water level and solar radiation in Xixi Wetland, Hangzhou, China [J]. *J Plant Ecol Chin Vers*, 2008, **32**(1):114 – 122.
- [25] SCOTT D A, JONES T A. Classification and inventory of wetlands: a global overview [J]. *Plant Ecol*, 1995, **118**(1/2): 3 – 16.
- [26] KEDDY P A. *Wetland Ecology: Principles and Conservation* [M]. 2nd ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2010.
- [27] MOTOMURA H, MITA N, SUSUKI M. Silica accumulation in long-lived leaves of *Sasa veitchii* (Carriere) rehder (Poaceae-Bambusoideae) [J]. *J Entry Ann Bot*, 2002, **90**: 149 – 152.
- [28] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法 [M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- [29] PARR J F, DOLIC V, LANCASTER G, *et al.* A microwave digestion method for the extraction of phytoliths from

- herbarium specimens [J]. *Rev Palaeobot Palynol*, 2001, **116**: 203 – 212.

[30] WALKLEY A, BLACK I A. An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method [J]. *Soil Sci*, 1934, **37**: 29 – 38.

[31] EPSTEIN E. Silicon [J]. *Ann Rev Plant Physiol Plant Molec Biol*, 1999, **50**: 641 – 664.

[32] HODSON M J, WHITE P J, MEAD A, *et al*. Phylogenetic variation in the silicon composition of plants [J]. *Ann Bot*, 2005, **96**: 1027 – 1046.

[33] 张玉龙, 刘鸣达, 王耀晶, 等. 施用钢渣对土壤和水稻植株中硅、铁、锰元素的影响[J]. 土壤通报, 2003, **34**(4): 309 – 311.  
ZHANG Yulong, LIU Mingda, WANG Yaojing, *et al*. Effects of slag application on Si, Fe and Mn in paddy soil and rice plant [J]. *Chin J Soil Sci*, 2003, **34**(4): 309 – 311.

[34] NORRIS A R, HACKNEY C T. Silica content of a mesohaline tidal marsh in North Carolina [J]. *Estu Coast Shelf Sci*, 1999, **49**: 597 – 605.

[35] WHEELER B D, SHAW S C. Above-ground crop mass and species richness of the principal types of herbaceous rich-fen vegetation of lowland England and Wales [J]. *J Ecol*, 1991, **79**: 285 – 301.

“竹林生态系统碳过程、碳监测与增汇技术研究”项目  
获浙江省科学技术奖一等奖

2013年6月5日，浙江省科学技术奖励大会在浙江省人民大会堂隆重举行。浙江农林大学周国模教授领衔完成的“竹林生态系统碳过程、碳监测与增汇技术研究”项目获得浙江省科学技术奖一等奖。

研究团队针对竹林碳汇面临的大科学问题和关键技术瓶颈，综合应用碳通量塔、核磁共振、卫星遥感、模型模拟等一系列先进技术和手段，历时10余年，系统深入地研究了竹林碳积累特征与过程、竹林碳储量和碳通量估算与监测方法以及竹林增汇减排技术，揭示了竹子固碳过程机理特征和影响机制，创建了竹林碳储量通量计量监测与预测方法，研发形成了竹林增汇减排综合技术体系。

梅阳阳