

DOI: 10.11766/trxb201904150631

朱浩宇, 陆畅, 高明, 黄容, 吕盛, 王子芳. 缙云山 4 种林分土壤植硅体碳分布特征[J]. 土壤学报, 2020, 57 (2): 359–369.

ZHU Haoyu, LU Chang, GAO Ming, HUANG Rong, LÜ Sheng, WANG Zifang. Distribution of PhytoOC in Soils under Four Different Types of Forest in Jinyun Mountain[J]. Acta Pedologica Sinica, 2020, 57 (2): 359–369.

## 缙云山 4 种林分土壤植硅体碳分布特征\*

朱浩宇, 陆畅, 高明, 黄容, 吕盛, 王子芳†

(西南大学资源环境学院, 重庆 400715)

**摘要:** 森林生态系统中丰富的植硅体可以将部分有机碳封存于土壤中, 形成稳定的碳库, 对全球碳平衡起到重要作用。以重庆市缙云山的竹林、阔叶林、针叶林和针阔叶混交林 4 种亚热带森林植被为研究对象, 研究不同林分下土壤植硅体及植硅体碳在 0~20、20~40、40~60 和 60~100 cm 土壤剖面上的分布规律。结果表明, 整个土壤剖面 (0~100 cm) 上, 不同林分下竹林土壤有机碳含量和储量、土壤植硅体和植硅体碳含量及植硅体碳储量均最高, 显著高于其他 3 种林分 ( $P<0.05$ )。4 种林分下有机碳和植硅体碳含量呈现一定的表层 (0~20 cm) 富集现象, 并呈现随土层深度增加含量减少的趋势。相关性分析发现, 植硅体和植硅体中的有机碳存在显著的负相关关系 ( $P<0.05$ ), 而与植硅体碳存在极显著的正相关关系 ( $P<0.01$ )。缙云山 4 种林分中, 竹林土壤有机碳含量、储量, 植硅体、植硅体碳含量、储量均为最高, 是较好的富碳森林类型。

**关键词:** 不同林分; 有机碳; 植硅体; 植硅体碳

**中图分类号:** X53      **文献标志码:** A

## Distribution of PhytoOC in Soils under Four Different Types of Forest in Jinyun Mountain

ZHU Haoyu, LU Chang, GAO Ming, HUANG Rong, LÜ Sheng, WANG Zifang†

(College of Resource and Environment, Southwest University, Chongqing 400715, China)

**Abstract:** [Objective] The abundant phytoliths in the forest ecosystem can seal part of the organic carbon in the soil, thus forming a stable carbon pool, which plays an important role in maintaining global carbon balance. [Method] Four different types of subtropical woodlots, i.e. bamboo forest, broad-leaved forest, coniferous forest and coniferous- and broad-leaved mixed forest, in the Jinyun Mountain of Chongqing were selected as research objects in this study. Distribution of soil phytolith and phytolith carbon in the 0~20, 20~40, 40~60 and 60~100 cm soil layers under the forests was studied. [Result] Results show that the soil profile (0~100 cm) under the bamboo forest was the highest in content and reserves of organic carbon, content and reserves of phytolith and content and reserves of phytolith carbon. Both organic carbon and phytolith carbon tended to concentrate in the topsoil layer (0~20 cm) in all the four types of forest soils and declined in content with soil depth. In terms of average content of

\* 国家重点研发计划项目 (2017YFD0800101) 资助 Supported by the National Key Research and Development Program of China (No.2017YFD0800101)

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail: zifangw@126.com

作者简介: 朱浩宇 (1993—), 男, 安徽宿州人, 硕士研究生, 主要从事土壤质量与环境研究。E-mail: 953744027@qq.com

收稿日期: 2019-04-15; 收到修改稿日期: 2019-07-30; 优先数字出版日期 (www.cnki.net): 2019-09-23

soil phytolith-occluded organic carbon in the 0~100 cm soil profile, the four forest soils exhibits an order of bamboo forest ( $1.96 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) > coniferous and broad-leaved mixed forest ( $0.52 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) > coniferous forest ( $0.33 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) > broad-leaved forest ( $0.28 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ); the soil phytolith and the phytolith-occluded organic carbon in the bamboo forest were the highest, and significantly higher than their respective ones in the other three forests ( $P<0.05$ ), and the lowest in the broad-leaved forest. Phytolith carbon showed a trend of surface enrichment in all the four forests. Correlation analysis found that phytolith was significantly and closely related to phytolith-occluded organic carbon ( $P<0.01$ ), but significantly and negatively related to organic carbon in phytoliths ( $P<0.05$ ). 【Conclusion】 Among the four forest types of forests in the Jinyun Mountain, bamboo forests are the highest in content and storage of soil organic carbon, phytolith, phytolith-occluded organic carbon, and hence a good carbon-rich forest type.

**Key words:** Different stand types; Organic carbon; Phytolith; Phytolith-occluded organic carbon

陆地生态系统中最大的碳库是森林生态系统<sup>[1]</sup>, 占整个陆地碳库的 56%, 在控制全球碳平衡方面起到极其重要的作用<sup>[2]</sup>。虽较草地生态系统含量高于森林生态系统凋落物中的植硅体<sup>[3-5]</sup>, 但是研究发现森林生态系统可以通过较高的地表净初级生产力分解出较多的植硅体<sup>[6-7]</sup>, 并且产生量可以达到陆地生态系统的 20% 以上<sup>[3,8-9]</sup>。森林植被中的植硅体 (Phytolith) 是指伴随高等植物通过根系从土壤中吸取可溶性二氧化硅, 经过硅化后, 沉积于植物细胞和间隙中的非晶态二氧化硅<sup>[10-11]</sup>。少量有机碳封存于植硅体中 (简称植硅体碳, PhytOC), 由于植硅体具有极强耐高温、抗氧化和抗分解等特性, 因此植硅体碳是稳定的碳库<sup>[12]</sup>。

近年来, 国内学者对不同森林生态系统中地表凋落物和土壤表层中的植硅体和植硅体碳<sup>[13-15]</sup>进行了研究。应雨骐等<sup>[16]</sup>对亚热带 5 种林分土壤的研究发现, 毛竹林凋落物中的植硅体碳含量、凋落物和 0~10 cm 表层土壤的植硅体碳贮量均表现为最高, 如果将中国亚热带毛竹林年凋落物按  $3.6 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$  来估算, 每年植硅体碳封存速率为  $\text{CO}_2 0.057 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。Song 等<sup>[17]</sup>选取我国不同气候带的 8 种不同的典型森林生态系统进行研究, 发现热带和亚热带竹林植硅体碳含量较高, 这与竹子有较高的植硅体含量 ( $101 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) 有关; 而在温带和温寒带以及亚热带和热带针叶林均表现为最低, 这是因为针叶林有较低 ( $11.9\sim 13.2 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) 的植硅体<sup>[18-19]</sup>。张晓东<sup>[20]</sup>通过对亚热带 3 种林分进行研究, 发现植硅体碳的含量随剖面深度的增加而降低, 毛竹林土壤剖面中植硅体碳的储量 ( $3.91 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ ) 明显超过板栗林 ( $2.67 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ ) 和杉木林 ( $1.18 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ )。植硅体碳是

稳定的碳库重要来源之一, 国外学者<sup>[21]</sup>对 10 种竹类固碳潜力进行研究, 估算如果全球  $4.1\times 10^9 \text{ hm}^2$  的潜在耕地变更为竹林, 按照每年  $\text{CO}_2 0.36 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$  的中等植硅体碳封存速率, 全球可有效减少 11% 的  $\text{CO}_2$  排放量。为探究植硅体可以长久地将有机碳保存于土壤中的机理, Alexandre 等<sup>[22]</sup>和 Borrelli 等<sup>[23]</sup>在研究不同气候条件下的森林土壤植硅体稳定性发现, 热带雨林凋落物中仅有 7.5% 的植硅体可以稳定保存于土壤中, 仅相当于温带森林土壤中植硅体碳的 1/3。因此温带森林土壤植硅体较热带雨林可以更稳定地保存于土壤中; 也有研究发现<sup>[3]</sup>, 在不同植被土壤表层中, 针叶林形成的植硅体可以较草本植物更稳定地保存于土壤中。可见土壤中植硅体的稳定性受多种理化因素的影响。通过国内外的研究总结发现, 目前对森林生态系统中的植硅体碳的研究主要集中于地上部分以及植硅体的稳定性方面, 而关于不同林分下土壤植硅体和植硅体碳储量以及植硅体在剖面上的分布特征还鲜有报道。并且国内对森林生态系统中土壤植硅体碳的研究目前主要集中于东南沿海亚热带地区<sup>[13-16,20]</sup>, 而对具有典型代表性的西南地区森林生态系统土壤植硅体碳的研究较少。缙云山作为国家自然保护区, 是西南重点森林保护区和植物基因库。因此, 本研究选取缙云山具有代表性的针阔叶混交林、竹林、针叶林和阔叶林 4 种典型森林类型, 分析不同林分下土壤植硅体和植硅体碳的剖面分布与含量特征, 阐明不同森林类型对土壤固碳的机理, 探讨不同森林类型对土壤植硅体和植硅体碳的影响, 以期为亚热带森林生态系统土壤碳库的高效经营管理提供理论指导。

## 1 材料与方 法

### 1.1 研究区概况

缙云山位于重庆市北碚区嘉陵江畔 (106°17'~106°24'E, 29°41'~29°52'N), 海拔介于 300~952 m。该区域属亚热带季风气候, 年均降水量为 1 612 mm, 年均气温 13.6℃, 日照时数 1 294 h, 蒸发量 777 mm, >10℃年积温 4 272℃, 相对湿度 87%。缙云山植被繁茂, 植物种类丰富, 达 249 科, 966 属, 1 915 种, 主要森林树种参见文献[24]。其中, 针叶林、针阔混交林、常绿阔叶林、灌木林和竹林面积分别为 2 280、4 299、2 507、59 和 734 hm<sup>2</sup>。不同林分的海拔高度范围为阔叶林 (844~873 m)>针阔叶混交林 (654~684 m)>竹林 (580~590 m)>针叶林 (428~461 m), 不同林分下的土壤类型为山地酸性黄壤<sup>[25]</sup>。

### 1.2 样品采集

选取重庆市北碚区缙云山针阔叶混交林、竹林、针叶林和阔叶林 4 种典型的亚热带森林类型作为研究对象。每种森林类型布设 3 个采样区, 每个采样区随机设置 3 个采样点, 首先将土壤表面的杂物清除, 采用土壤剖面取样法取每个采样点 0~20、20~40、40~60、60~100 cm 土层的土样, 按照层次将

各采样区的 3 个采样点土样进行混合, 采用四分法取 1.5 kg 土样, 去除土样中杂质, 风干并研磨, 筛取粒径 ≤2 mm 和 ≤0.25 mm 土样, 土样采集方法同陆畅<sup>[24]</sup>一致。土样于 2017 年 3 月采集, 土壤为酸性黄壤, 样点基本信息见表 1。0~20 cm 土层的土壤基本理化性质见表 2, 研究区所在位置及采样点的空间位置见图 1。

### 1.3 测定方法

土壤 pH、容重、碱解氮、全氮、速效磷、全磷、速效钾、全钾等指标采用常规方法测定, 具体参见文献[26]; 全硅采用钼蓝比色法测定; 土壤植硅体提取选用 Parr 等<sup>[27]</sup>采用的微波消解法, 后使用重液浮选来保证将有机质去除后, 烘干冷却称重确保足量。土壤植硅体碳测定选用应雨骐等<sup>[15]</sup>采用的碱溶分光光度法。称取植硅体样品 0.0100 g 于 10 mL 塑料离心管中, 加入 10 mol·L<sup>-1</sup> 的 NaOH 0.5 mL 在室温下浸提 12 h 后; 全部转移至 30 mL 玻璃离心管, 用超纯水冲洗塑料离心管液两次, 一并转至玻璃离心管中, 加入 0.800 mol·L<sup>-1</sup> K<sub>2</sub>Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub> 溶液 1.0 mL, 用浓 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 4.6 mL 摇匀显色; 于 98℃ 下水浴 45 min, 定容至 25 mL, 进行充分摇匀后冷却, 2 500 r·min<sup>-1</sup> 低速离心 10 min, 用 1 cm 光程比色皿于 590 nm 下比色。

表 1 采样点基本信息

Table 1 Basic information of the sampling point

林分	起源	坡向	郁闭度	海拔	经度	纬度
Forest type	Origin	Aspect	Canopy density	Elevation /m	Longitude	Latitude
针阔叶混交林	天然	西北	0.9	654~684	106°23'54.4"~106°23'54.8"E	29°50'32.0"~29°50'32.5"N
Broadleaf mixed forest	Natural	Northwest				
竹林	天然	西北	0.85	580~590	106°23'14.8"~106°23'15.9"E	29°49'43.7"~29°49'44.2"N
Bamboo forest	Natural	Northwest				
针叶林	天然	西北	0.8	428~461	106°23'21.9"~106°23'27.6"E	29°49'37.7"~29°49'37.9"N
Coniferous forest	Natural	Northwest				
阔叶林	天然	西北	0.9	844~873	106°23'49.9"~106°23'50.7"E	29°49'52.4"~29°49'54.3"N
Broad-leaved forest	Natural	Northwest				

### 1.4 数据分析

土壤植硅体中各项基本指标按如下公式计算<sup>[28]</sup>:

$$\text{土壤植硅体含量 (g} \cdot \text{kg}^{-1}) = \frac{\text{植硅体质量 (g)}}{\text{土壤质量 (kg)}} \quad (1)$$

$$\text{植硅体中有机碳含量 (g} \cdot \text{kg}^{-1}) = \frac{\text{植硅体碳含量 (g)}}{\text{植硅体含量 (kg)}} \quad (2)$$

$$\text{土壤植硅体碳含量 (g} \cdot \text{kg}^{-1}) = \frac{\text{植硅体碳质量 (g)}}{\text{土壤质量 (kg)}} \quad (3)$$

土壤有机碳储量和植硅体碳储量的如下公式计算:

$$X = \sum_{i=1}^n (10000 \times H_i \times BD_i \times C_i) \quad (4)$$

式中,  $X$  为土壤有机碳储量或者土壤植硅体碳储量 ( $t \cdot hm^{-2}$ );  $H_i$  为  $i$  层土壤深度 (m);  $BD_i$  为  $i$  层土壤容重 ( $g \cdot cm^{-3}$ );  $C_i$  为  $i$  层有机碳含量或者植硅体含量 ( $g \cdot kg^{-1}$ )

本试验的数据统计分析和图表制作利用 SPSS 23.0 和 Excel 2010 软件进行。本试验所有结果取 3 次重复的平均值。采用最小显著极差法 (LSD) 进行方差分析, 显著性水平为 0.05。

## 2 结果

### 2.1 不同林分下土壤理化性质和有机碳含量

4 种林分土壤 0~20 cm 土层的土壤理化性质如表 2 所示, 4 种林分下土壤均表现为酸性, 土壤 pH 平均值范围为 4.02~4.37, 各林分间无明显差异 ( $P>0.05$ ); 竹林土壤全氮和碱解氮平均含量均表现最高, 为  $1.90 g \cdot kg^{-1}$  和  $206.9 mg \cdot kg^{-1}$ , 针叶林次之, 并显著高于其他 2 种林分; 4 种林分的土壤全磷平均含量为  $0.10 \sim 0.23 g \cdot kg^{-1}$ , 有效磷平均含量为  $1.41 \sim 9.76 mg \cdot kg^{-1}$ , 其中阔叶林土壤全磷平均含量最高, 竹林土壤有效磷平均含量最高; 4 种林分土壤表层中全钾和速效钾平均含量范围为  $13.36 \sim$

表 2 0~20 cm 土层土壤基本理化性质

Table 2 Basic soil physiochemical properties of the 0~20 cm soil layers

林分 Forest type	pH	全氮	全磷	全钾	碱解氮	有效磷	速效钾	容重	$R_{0.25}$ /%
		Total nitrogen / $(g \cdot kg^{-1})$	Total phosphorus / $(g \cdot kg^{-1})$	Total potassium / $(g \cdot kg^{-1})$	Hydrolytic nitrogen / $(mg \cdot kg^{-1})$	Available phosphorus / $(mg \cdot kg^{-1})$	Available potassium / $(g \cdot kg^{-1})$	Buck density / $(g \cdot kg^{-1})$	
针阔叶混交林 <sup>①</sup>	4.37±0.02	0.64±0.00	0.13±0.00	21.60±0.61	52.56±1.67	1.41±0.00	0.06±0.00	1.27±0.01	72.87±5.71
竹林 <sup>②</sup>	4.18±0.02	1.90±0.06	0.15±0.01	24.97±1.03	206.88±2.68	9.76±0.46	0.08±0.01	1.02±0.02	77.56±5.65
针叶林 <sup>③</sup>	4.02±0.02	0.67±0.00	0.10±0.01	13.36±2.26	36.82±0.67	1.69±0.19	0.03±0.00	1.53±0.27	51.63±9.42
阔叶林 <sup>④</sup>	4.12±0.03	1.73±0.00	0.23±0.02	18.71±2.26	157.67±0.33	5.45±0.05	0.05±0.00	1.10±0.03	52.20±19.88

注:  $R_{0.25}$  为土层中土壤 0.25 mm 的水稳性团聚体含量。Note:  $R_{0.25}$  stands for content of water stable aggregates of 0.25 mm in the soil layer. ① Broadleaf mixed forest, ② Bamboo forest, ③ Coniferous forest, ④ Broad-leaved forest.

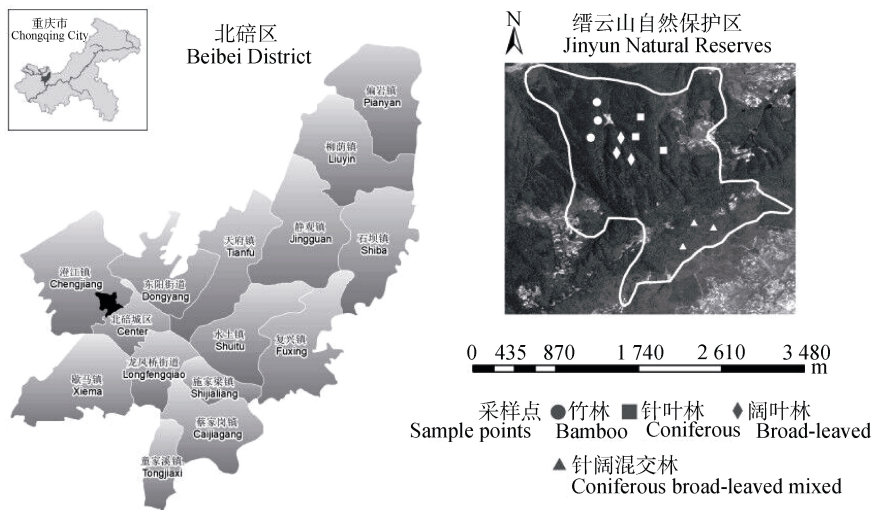


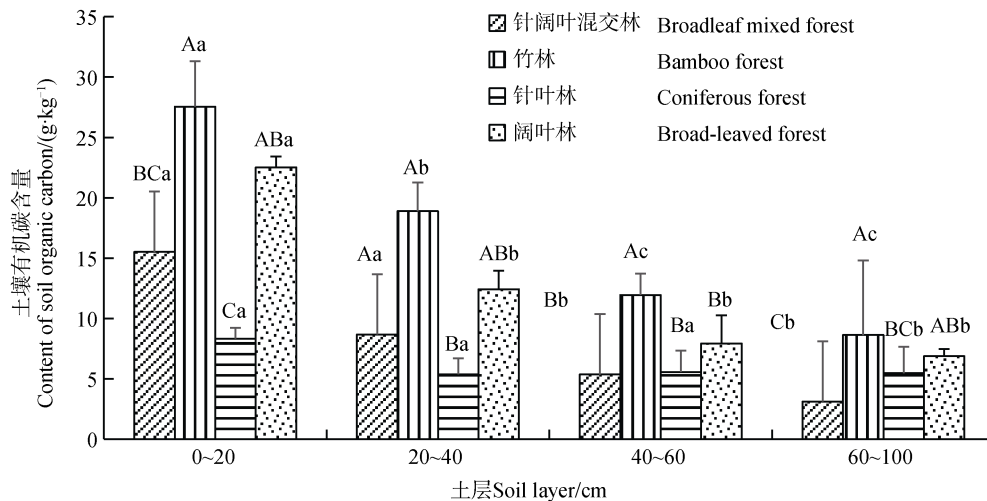
图 1 研究区所在位置及采样点的空间位置图

Fig. 1 Location of the study area and the spatial location map of the sampling points

24.97  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、0.03~0.08  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，其中竹林的全钾和速效钾的平均含量均最高；4 种林分 0~20 cm 土层中容重范围为 1.02~1.53  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，其中针叶林最大，针阔叶混交林次之，竹林最小；在 4 种林分中，竹林土壤水稳性团聚体含量 ( $R_{0.25}$ ) 表现为最大 (77.56%)，分别为针阔叶混交林、针叶林和阔叶林的 1.06 倍、1.50 倍、1.49 倍。

不同林分下土壤有机碳含量表现不同，且同一林分下的不同土层之间土壤有机碳也有所不同。如图 2 所示，在 0~100 cm 土层中，竹林土壤有机碳的平均含量最高 (16.75  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ )，分别为阔叶林、针阔叶混交林和针叶林的 1.35 倍、2.05 倍、2.71 倍，由差异性分析可知竹林和阔叶林之

间并无明显差异性，竹林和另 2 种林分之间有显著差异性 ( $P<0.05$ )。随着土壤深度的增加，不同林分下土壤有机碳含量总体上均呈现出逐渐递减的趋势，其中，除针叶林的各层土壤有机碳之间差异不显著外，其他林分土壤有机碳均在 0~20 cm 土层呈现明显的富集现象。0~20 cm，与针叶林相比，竹林、阔叶林有机碳含量分别显著提高了 19.21  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$  和 14.19  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。在 20~40 cm 土层中，土壤有机碳介于 5.38~18.89  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，竹林显著高于针阔叶混交林和针叶林 ( $P<0.05$ )。40~60 cm 和 60~100 cm 土层中，各林分下土壤有机碳表现类似，竹林最高，针阔混交林最低，且前者是后者的 3.84 倍。



注：图中大写字母表示土壤有机碳含量在同一土层中不同林分间的差异性 ( $P<0.05$ )，小写字母表示土壤有机碳含量在同一林分下不同土层间的差异性 ( $P<0.05$ )。下同。Note: Different capital letters indicate significant difference between the forests in content of soil organic carbon in the same soil layer at 0.05 level. Different lowercase letters indicate significant difference in content of soil organic carbon between soil layers in the same forest at 0.05 level. The same as below.

图 2 不同林分下土壤有机碳含量

Fig. 2 Content of soil organic carbon relative to forest type

## 2.2 不同林分下土壤植硅体含量

图 3 所示，在 0~100 cm 土层中，针阔叶混交林、竹林、针叶林和阔叶林土壤植硅体平均含量分别为 10.57  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、59.66  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、8.86  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$  和 6.49  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，其中最高的竹林较最低的阔叶林增加了 53.17  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。差异性分析结果显示，竹林土壤平均植硅体含量与其他 3 种林分之间存在显著差异性 ( $P<0.05$ )，其余 3 种林分之间并无显著差异性。在各个土层中，竹林土壤植硅体含量均为最高，且显著高于其他 3 种林分 ( $P<0.05$ )；而其他林分之间差

异并不显著 ( $P>0.05$ )。同一个林分不同土层间的土壤植硅体含量也存在差异性，竹林土壤中的植硅体主要集中在 20~40 cm 土层中，而在 60~100 cm 土层含量最低，为 41.38  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ；而针阔叶混交林、针叶林和阔叶林均以 0~20 cm 土层含量最高，且显著高于其他土层；4 种林分中，针阔叶混交林和阔叶林土壤植硅体含量随着深度加深而减少。

## 2.3 不同林分土壤植硅体中有机碳和植硅体碳含量

不同林分下土壤植硅体中有机碳含量如图 4 所

示, 4 种林分土壤的植硅体中有机碳平均含量, 阔叶混交林与阔叶林无显著差异性, 竹林与其余 2 种林分之间有显著差异性 ( $P < 0.05$ )。在 0~20 cm 土层中, 竹林含量最高, 针叶林最低, 但 4 种林分之间并无显著差异 ( $P < 0.05$ )。20~40 cm, 针阔叶混交林 ( $53.20 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ )、阔叶林 ( $49.27 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) 显著高于竹林 ( $24.21 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) 和针叶林 ( $28.18 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ )。在 40~60 cm 土层中, 针阔叶混交林最高, 为  $65.70 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 显著高于竹林和针叶林。在 60~100 cm 土层中, 针阔叶混交林、针叶林、阔叶林较竹林分别显著提高了  $32.43 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $19.65 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$  和  $15.92 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

从图 5 中可以看出, 在 0~100 cm 土层中, 平

均植硅体碳含量为竹林 ( $1.96 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) > 针阔叶混交林 ( $0.55 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) > 针叶林 ( $0.33 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) > 阔叶林 ( $0.28 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ), 竹林较其他 3 种林分有显著性差异 ( $P > 0.05$ ), 其余 3 种林分无明显差异性。在各土层中, 竹林显著高于其他 3 种林分 ( $P < 0.05$ ), 且其他森林类型之间差异不明显 ( $P > 0.05$ )。在 0~20 cm 土层中, 竹林最高, 为  $2.80 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 针叶林最低, 仅为  $0.13 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。竹林和针叶林的土壤植硅体碳主要集中于 0~20 cm 土层, 针阔叶混交林富集于 40~60 cm 土层, 阔叶林以 60~100 cm 土层为最高, 且每种林分土壤植硅体碳在 0~100 cm 各个土层之间均无显著性差异 ( $P > 0.05$ )。

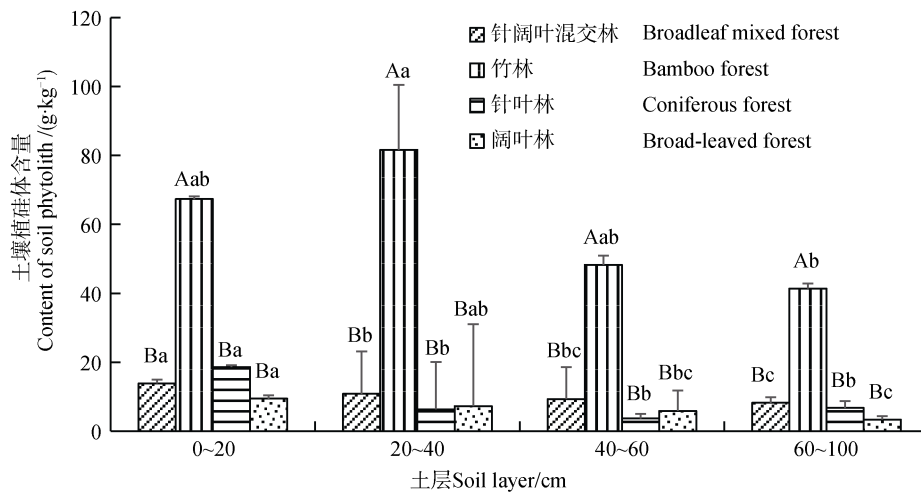


图 3 不同林分下土壤植硅体含量

Fig. 3 Content of soil phytolith relative to forest type

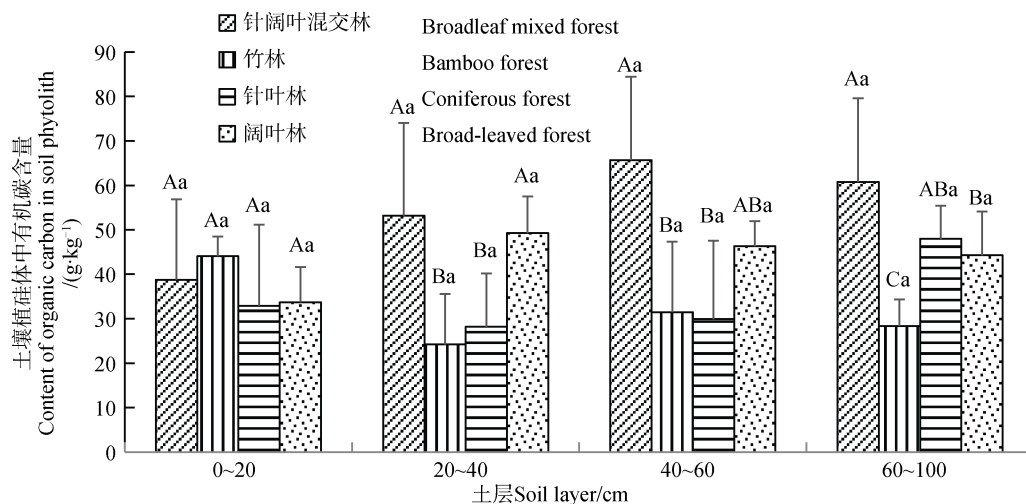


图 4 不同林分下土壤植硅体中有机碳含量

Fig. 4 Content of organic carbon in soil phytoliths relative to forest type



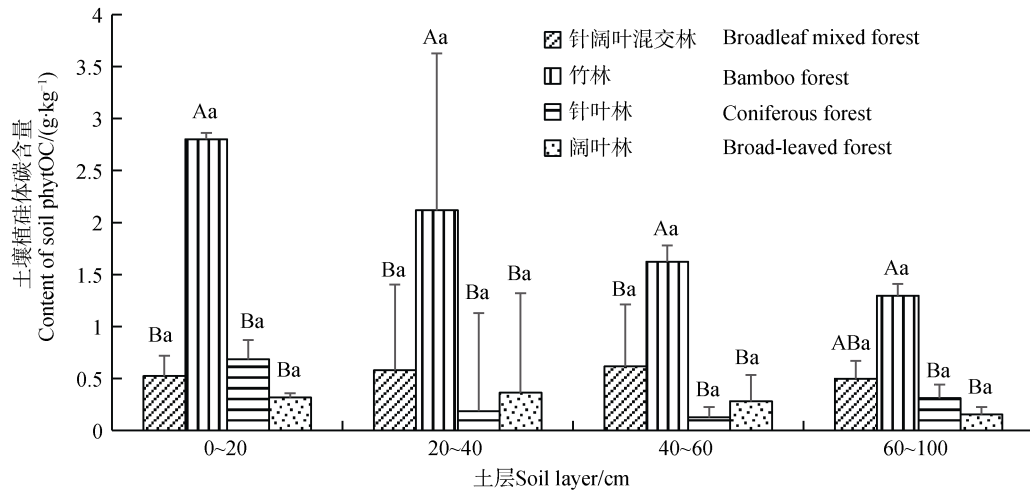


图 5 不同林分下土壤植硅体碳含量

Fig. 5 Content of soil phytOC relative to forest type

#### 2.4 不同林分土壤有机碳和植硅体碳储量

通过计算土壤有机碳储量发现 (表 3), 0~100 cm 土壤有机碳储量表现为竹林 ( $172.79 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ ) > 阔叶林 ( $134.16 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ ) > 针阔叶混交林 ( $95.51 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ ) > 针叶林 ( $95.10 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ )。其中竹林显著高于针阔叶混交林和针叶林 ( $P < 0.05$ ), 分别提高了  $77.28 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$  和  $77.69 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ ; 而阔叶林和针阔叶混交林、针叶林之间则无明显差异 ( $P > 0.05$ )。

在 0~100 cm 土层中, 不同林分土壤植硅体碳储量表现为竹林 ( $23.45 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ ) > 针阔叶混交林 ( $8.19 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ ) > 针叶林 ( $5.35 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ ) > 阔叶林 ( $3.13 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ )。其中竹林土壤中植硅体碳储量显著高于其他 3 种森林类型 ( $P < 0.05$ ), 分别为针阔叶混交林、针叶林和阔叶林的 2.86 倍、4.38 倍和 7.49 倍。而针阔叶混交林、针叶林和阔叶林 3 种林分之间差异性不显著 ( $P > 0.05$ )。

表 3 不同林分下土壤有机碳和植硅体碳储量

Table 3 Storages of soil organic carbon and phytOC relative to forest type

林分 Forest type	土壤有机碳储量 Soil organic carbon storage/ ( $\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$ )	土壤植硅体碳储量 Soil phytOC storage/ ( $\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$ )
针阔叶混交林 Broadleaf mixed forest	$95.51 \pm 13.88\text{b}$	$8.19 \pm 0.80\text{b}$
竹林 Bamboo forest	$172.79 \pm 25.78\text{a}$	$23.45 \pm 12.45\text{a}$
针叶林 Coniferous forest	$95.10 \pm 21.08\text{b}$	$5.35 \pm 4.07\text{b}$
阔叶林 Broad-leaved forest	$134.16 \pm 29.29\text{ab}$	$3.13 \pm 1.47\text{b}$

### 3 讨论

#### 3.1 不同林分对土壤有机碳含量的影响

有机物料的分解强度及其输入量会影响土壤有机碳含量, 植物残体是林地土壤有机碳的主要来源, 土壤有机碳含量受到其生物量、种类和分解难易程度的影响<sup>[26]</sup>。周焯等<sup>[29]</sup>通过对缙云山 3 种林分 (常绿阔叶林、针阔混交林、楠竹林) 凋落物的储量进行分析, 楠竹林 ( $3.09 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ ) 大于针阔混交林

( $2.51 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ ) 和常绿阔叶林 ( $1.79 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ )。本研究结果显示, 0~20 cm 土层土壤有机碳含量竹林表现最高, 针叶林的较少, 主要是由于毛竹具有生长迅速、枝叶繁茂、根系发达、落叶量大等特点, 同时竹林的地表凋落物较其他林分可以更快地分解出有机碳, 从而导致表层土壤有机碳表现出富集现象<sup>[30]</sup>。针叶林土壤有机碳含量较低是因为其植物物种单一、枝叶稀疏、地表生物量少和凋落物分解难度大<sup>[31]</sup>。李萌等<sup>[32]</sup>通过调查贡嘎山东坡常绿阔叶林、落叶阔

叶林、针阔混交林和暗针叶林 4 种典型植被类型对土壤动物群落特征影响发现,阔叶林土壤动物的生物量、群落密度以及多样性大于针阔混交林和暗针叶林,其中暗针叶林表现最低。同时,刘霞等<sup>[33]</sup>通过收集覆盖热带、亚热带与温带 3 大气候区的 569 个中国森林凋落物的分解速率记录进行研究发现,凋落物分解速率以阔叶林最高,针阔混交林次之,针叶林最低。上述结论与本研究中混交林下土壤有机碳含量介于阔叶林和针叶林之间的结果相印证。

在 0~100 cm 土体中,随土层深度加深,4 种林分土壤有机碳的含量均趋于降低,这主要由于土壤表层具有丰富的根系,使凋落物归还量更利于积累在表层<sup>[34]</sup>;植物根系密度随着深度的加深而变小;加之研究区属于自然保护区,且远离人类聚集区,人类活动影响土壤较小,避免了对森林系统中的凋落物的干预行为<sup>[35-36]</sup>,从而使土壤有机碳表现出明显的表层富集现象。

### 3.2 不同林分对土壤植硅体碳含量及剖面分布的影响

高等植物在生长过程中从土壤吸收可溶态硅形成植硅体,然后又以凋落物的形式将其返还到土壤表层。本研究表明,土壤植硅体中有机碳与土壤植硅体碳之间无显著相关性,这是由于土壤封存植硅体碳的潜力可以用植硅体中有机碳的含量来表征,而不同林分土壤植硅体的稳定性不同造成植硅体分解释放有机碳的量的多少不同<sup>[22-23,36]</sup>,致使植硅体中有机碳的含量与植硅体碳之间无明显的规律性。植硅体和植硅体中的有机碳表现出显著的负相关关系 ( $P<0.05$ ),而与植硅体碳存在极显著的正相关关系 ( $P<0.01$ )。这与林维雷<sup>[36]</sup>的研究结果具有很高的一致性。由于不同林分下所覆盖的地面植被不同,且不同林分与其地面植被合成植硅体的能力以及产生的凋落物量的多少均有所不同。因此,不同林分对土壤植硅体和土壤植硅体碳含量有着显著影响。研究表明,不同植物对从土壤中吸收硅且合成植硅体能力不同<sup>[37]</sup>,双子叶植物合成植硅体的能力要低于被子植物中的单子叶植物<sup>[38]</sup>;同时被子植物植硅体含量要高于裸子植物,其中单子叶植物的禾本科植物中植硅体含量较高<sup>[39]</sup>。除吸收硅和合成植硅体能力不同外,不同植被对凋落物的分解能力也不相同,赵培平<sup>[40]</sup>研究表明,毛竹林中凋落物中的植硅体和植硅体碳的释放速率 ( $67\sim 347\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$ 、

$1.9\sim 9.0\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$ ) 远高于其他 3 种林分(马尾松、杉木林、常绿阔叶林)的凋落叶。本研究结果显示,0~100 cm 竹林土壤植硅体含量显著高于其他林分,作为双子叶植物常绿阔叶林(四川大头茶、白毛新木姜子、四川杨桐、山矾)以及裸子植物针叶林(马尾松、华山松)土壤中植硅体含量较单子叶植物的毛竹低,它们之间有着显著的差异性 ( $P<0.05$ )。其中,不同植物对土壤中硅的吸收能力、凋落物的贡献、降解速率以及植硅体碳是否能够稳定保存在土壤中决定着植硅体碳含量<sup>[41]</sup>。本试验研究结果表明,竹林土壤植硅体碳相较于其他几种林分含量更高,原因在于竹林合成植硅体的能力强、凋落物数量多、凋落物中释放植硅体碳速率快,并且因为竹林植硅体碳的稳定性较好。

由图 6 可知,土壤植硅体碳含量与土壤有机碳含量二者之间存在极其显著的正相关关系 ( $P<0.01$ )。不同林分从土壤中吸收硅生成植硅体,植硅体封存有机碳并返还至土壤中。竹林土壤有机碳储量不仅高于其他林分,其植硅体碳储量也显著高于其他林分,由此可以推断竹林植硅体碳储量对于其土壤有机碳储量增加有一定的影响。针阔叶混交林、针叶林和阔叶林的植硅体碳储量和其有机碳储量并无明显的规律,其原因在于其植硅体碳储量较低,对有机碳储量的贡献并不明显。结果表明竹林土壤植硅体碳对维持土壤有机碳有显著影响。因此,扩大竹林种植对增加土壤长期固碳有着重要意义。

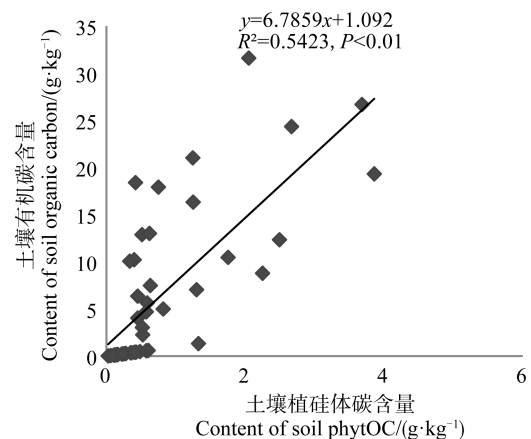


图 6 土壤植硅体碳与有机碳含量的相关性  
Fig. 6 Correlation between phytOC and organic carbon in content

植硅体碳在不同林分土壤剖面特征表现出一定



的差异。土壤孔隙度、土壤含水量、沉积作用、动物扰动和土壤侵蚀等因素影响着土壤植硅体碳在剖面中的分布特征,土壤植硅体的含量还与植硅体的稳定性以及与土壤黏粒的黏合强度密切相关<sup>[10-11]</sup>。有研究表明枯枝落叶在地表分解释放植硅体,表层土壤首先接收释放的植硅体,因此植硅体出现土壤表层富集现象<sup>[13]</sup>;此外,植硅体稳定地保存于土壤中是因为其自身具有较强的耐高温、抗分解等特性<sup>[10]</sup>;因下层土壤受到动植物的干扰较少,较上层土壤更为紧实,会进一步减少植硅体向下迁移<sup>[24,29]</sup>。本研究结果表明土壤植硅体随着土壤深度的增加而表现下降趋势,而没有出现明显的表层富集现象。这可能与竹林表层土壤的植硅体在抗分解能力弱有关<sup>[2]</sup>,而且由于植硅体的粒径大小主要集中在 20~200  $\mu\text{m}$  之间,林地土壤的 B 层(沉积层)往往由于根系的作用而具有较大的裂隙或孔隙,这样表层的植硅体可以通过土壤裂隙或孔隙向下移动<sup>[29]</sup>。此外,生物活动对土壤扰动也会导致植硅体向下迁移。因此本研究中,表现为竹林土壤植硅体在 20~40 cm 土层最高,其他林分均表现为 0~20 cm 植硅体含量最高,但差异并不显著。

植硅体碳通过植硅体的形成将其包裹在内,由于植硅体具有较强的稳定性,可以将植硅体碳稳定的保存在土壤中<sup>[24]</sup>。然而,本研究中发现土壤植硅体和植硅体碳在土壤剖面中的分布有一定的差异,土壤植硅体碳随土壤深度的增加而下降,表层富集现象较为明显。0~20 cm,竹林土壤植硅体碳显著高于其他林分,这和竹林对植硅体的生产能力较高和凋落物较多以及竹林植硅体固碳效率高有关<sup>[21]</sup>。针叶林含量在 40~60 cm 土层为最低,这与针叶林的植硅体粒径相对较小、土壤结构以及土壤裂隙/孔隙较多和较大有关<sup>[29]</sup>。

## 4 结 论

在 0~100 cm 深度内,缙云山不同林分下土壤有机碳平均含量表现为竹林>阔叶林>针阔叶混交林>针叶林。不同林分下土壤有机碳含量均表现随土层加深而降低的趋势,存在表层富集现象。土壤植硅体和植硅体碳含量分别介于 3.70~81.63  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$  和 2.80~0.13  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,其中竹林显著高于其他林分( $P<0.05$ )。土壤植硅体和植硅体碳两者之间呈显著的正相关

( $P<0.01$ ),但两者与植硅体有机碳含量之间为极显著的负相关( $P<0.01$ )。不同林分下植硅体和植硅体碳含量分别以 20~40 cm 和 0~20 cm 为最高,土壤植硅体碳存在一定表层富集现象。土壤植硅体碳储量从高到低依次为竹林>针阔叶混交林>针叶林>阔叶林。

## 参考文献 (References)

- [ 1 ] Gao Y, He N P, Wang Y F. Characteristics of carbon sequestration by ecosystem and progress in its research. *Journal of Natural Resources*, 2013, 28( 7 ): 1264—1274. [高扬, 何念鹏, 汪亚峰. 生态系统固碳特征及其研究进展. *自然资源学报*, 2013, 28 ( 7 ): 1264—1274.]
- [ 2 ] An X J, Li P, Dai W, et al. The variation characteristics of soil organic carbon and its relationship with soil properties in typical subtropical plantations. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2012, 28 ( 22 ): 53—58. [安晓娟, 李萍, 戴伟, 等. 亚热带几种林分类型土壤有机碳变化特征及与土壤性质的关系. *中国农学通报*, 2012, 28 ( 22 ): 53—58.]
- [ 3 ] Song Z L, Wang H L, Strong P J, et al. Plant impact on the coupled terrestrial biogeochemical cycles of silicon and carbon: Implications for biogeochemical carbon sequestration. *Earth-Science Reviews*, 2012, 115 ( 4 ): 319—331.
- [ 4 ] Pan G X. Study on carbon reservoir in soils of China. *Bulletin of Science and Technology*, 1999, 15 ( 5 ): 330—332. [潘根兴. 中国土壤有机碳和无机碳库量研究. *科技通报*, 1999, 15 ( 5 ): 330—332.]
- [ 5 ] Wang S Q, Zhou C H, Li K R, et al. Analysis on spatial distribution characteristics of soil organic carbon reservoir in China. *Acta Geographica Sinica*, 2000, 55 ( 5 ): 533—544. [王绍强, 周成虎, 李克让, 等. 中国土壤有机碳库及空间分布特征分析. *地理学报*, 2000, 55 ( 5 ): 533—544.]
- [ 6 ] Ma J F. Functions of silicon in higher plants. *Progress in Molecular & Subcellular Biology*, 2003, 33 ( 2 ): 127—147.
- [ 7 ] Pan W J, Yang X M, Zhang X D, et al. Advances in study of phytolith carbon sequestration in terrestrial ecosystems of China. *Advances in Earth Science*, 2017, 32 ( 8 ): 859—866. [潘文杰, 杨孝民, 张晓东, 等. 中国陆地生态系统植硅体碳汇研究进展. *地球科学进展*, 2017, 32 ( 8 ): 859—866.]
- [ 8 ] Blecker S W, Mcculley R L, Chadwick O A, et al. Biologic cycling of silica across a grassland bioclimate sequence. *Global Biogeochemical Cycles*, 2006, 20 ( 3 ): 4253—4274.
- [ 9 ] Carnelli A L, Madella M, Theurillat J P. Biogenic silica production in selected alpine plant species and plant communities. *Annals of Botany ( London )*, 2001, 87 ( 4 ): 425—434.

- [ 10 ] Pearsall R B D M. Phytolith analysis: An archaeological and geological perspective by Dolores R. Piperno. *American Antiquity*, 1989, 54 ( 4 ): 872—873.
- [ 11 ] Lu L, Jia J, Wang W, et al. On the meaning of phytolith and its classification in gramineae. *Acta Micropalaeontologica Sinica*, 2002 ( 4 ): 389—396.
- [ 12 ] Wang Y J, Lü H Y. An introduction of study on plant opal and its uses. *Journal of Oceanography of Huanghai & Bohai Seas*, 1989, 7 ( 2 ): 66—68. [王永吉, 吕厚远. 植物硅酸体的研究及应用简介. *黄渤海海洋*, 1989, 7 ( 2 ): 66—68.]
- [ 13 ] Lin W L, Ying Y Q, Jiang P K, et al. Study on phytolith-occluded organic carbon in soil of subtropical forest of southern Zhejiang. *Acta Pedologica Sinica*, 2015, 52 ( 6 ): 1365—1373. [林维雷, 应雨骐, 姜培坤, 等. 浙江南部亚热带森林土壤植硅体碳的研究. *土壤学报*, 2015, 52 ( 6 ): 1365—1373.]
- [ 14 ] He S Q, Huang Z T, Wu J S, et al. Evolution pattern of phytolith-occluded carbon in typical forest-soil ecosystems in tropics and subtropics, China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2016, 27 ( 3 ): 697—704. [何珊琼, 黄张婷, 吴家森, 等. 热带、亚热带典型森林-土壤系统植硅体碳演变规律. *应用生态学报*, 2016, 27 ( 3 ): 697—704.]
- [ 15 ] Ying Y Q, Xiang T T, Li Y F, et al. Estimation of sequestration potential via phytolith carbon by important forest species in subtropical China. *Journal of Natural Resources*, 2015, 30 ( 1 ): 133—140. [应雨骐, 项婷婷, 李永夫, 等. 中国亚热带重要树种植硅体碳封存潜力估测. *自然资源学报*, 2015, 30 ( 1 ): 133—140.]
- [ 16 ] Ying Y Q, Xiang T T, Lin W L, et al. Phytolith-occluded carbon in litters of different stands in the subtropics of China. *Scientia Silvae Sinicae*, 2015, 51 ( 3 ): 1—7. [应雨骐, 项婷婷, 林维雷, 等. 中国亚热带 5 种林分凋落物层植硅体碳的封存特性. *林业科学*, 2015, 51 ( 3 ): 1—7.]
- [ 17 ] Song Z L, Liu H Y, Li B L, et al. The production of phytolith-occluded carbon in China's forests: Implications to biogeochemical carbon sequestration. *Global Change Biology*, 2013, 19 ( 9 ): 2907—2915.
- [ 18 ] Wang D, Wang A B, Long G F, et al. Research advances of phytolith and phytolith-occluded-carbon in wetland ecosystems. *Chinese Journal of Ecology*, 2017, 36 ( 12 ): 3602—3609. [王丹, 王奥博, 龙高飞, 等. 湿地生态系统中植硅体与植硅体碳的研究进展. *生态学杂志*, 2017, 36 ( 12 ): 3602—3609.]
- [ 19 ] Zuo X X, Lü H Y. Estimation of carbon sequestration potential of millet and millet phytosilicate in dryland farming in China. *Chinese Science Bulletin*, 2011, 56 ( 34 ): 2881—2887. [左昕昕, 吕厚远. 我国旱作农业黍、粟植硅体碳封存潜力估算. *科学通报*, 2011, 56 ( 34 ): 2881—2887.]
- [ 20 ] Zhang X D. Research on phytolith accumulation and noncrystalline silicon distribution of forest soils in East China. Hangzhou: Zhejiang A & F University, 2016. [张晓东. 中国东部森林土壤中植硅体积累和硅形态分布研究. 杭州: 浙江农林大学, 2016.]
- [ 21 ] Parr J, Sullivan L, Chen B H, et al. Carbon bio-sequestration within the phytoliths of economic bamboo species. *Global Change Biology*, 2010, 16 ( 10 ): 2661—2667.
- [ 22 ] Alexandre A, Meunier J D, Lézine A M, et al. Phytoliths: Indicators of grassland dynamics during the late Holocene in intertropical Africa. *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology*, 1997, 136 ( 1—4 ): 213—229.
- [ 23 ] Borrelli N, Alvarez M F, Osterrieth M L, et al. Silica content in soil solution and its relation with phytolith weathering and silica biogeochemical cycle in Typical Argiudolls of the Pampean Plain, Argentina—A preliminary study. *Journal of Soils & Sediments*, 2010, 10 ( 6 ): 983—994.
- [ 24 ] Lu C. Effects of land uses on soil PhytOC and organic carbon of soil aggregates. Chongqing: Southwest University, 2018. [陆畅. 土地利用方式对土壤植硅体碳和团聚体有机碳的影响. 重庆: 西南大学, 2018.]
- [ 25 ] Li J L, Jiang C S, Hao Q J, et al. Effects of land use types on soil organic carbon and total nitrogen in Jinyun Mountain. *Journal of Northwest Agricultural and Forestry University ( Natural Science Edition )*, 2013, 41 ( 11 ): 137—145. [李鉴霖, 江长胜, 郝庆菊, 等. 缙云山土地利用方式对土壤有机碳及全氮的影响. *西北农林科技大学学报 ( 自然科学版)*, 2013, 41 ( 11 ): 137—145.]
- [ 26 ] Bao S D. Soil and agricultural chemistry analysis. 3rd ed. Beijing: China Agriculture Press, 2000: 14-24. [鲍士旦. 土壤农化分析. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000: 14—24.]
- [ 27 ] Parr J F, Dolic V, Lancaster G, et al. A microwave digestion method for the extraction of phytoliths from herbarium specimens. *Review of Palaeobotany and Palynology*, 2001, 116 ( 3/4 ): 203—212.
- [ 28 ] Luo D H, Wang Z F, Lu C, et al. Content of soil phytolith-occluded organic carbon in different land use patterns at Jinyun Mountain. *Environmental Science*, 2019, 40 ( 9 ): 4270—4277. [罗东海, 王子芳, 陆畅, 等. 缙云山不同土地利用方式下土壤植硅体碳的含量特征. *环境科学*, 2019, 40 ( 9 ): 4270—4277.]
- [ 29 ] Zhou Y, He T R, Wu X Q. Research on water-holding character of litter under typical vegetation in Chongqing Jinyun Mountain National Nature Reserve. *Journal of Chongqing Normal University ( Natural Science Edition )*, 2018, 35 ( 2 ): 64—70. [周焯, 何太蓉, 武雪倩. 重庆缙云山国家级自然保护区典型林分凋落物持水性研究. *重庆师范大学学报 ( 自然科学版)*, 2018,

- 35 (2): 64—70.]
- [ 30 ] Peng L, Wang X J, Huang C D, et al. Effects of litter input change on soil organic carbon in *Dendrocalamus affinis* forest. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2014, 34 (1): 129—132. [彭琳, 王晓君, 黄从德, 等. 凋落物输入改变对慈竹林土壤有机碳的影响. *水土保持通报*, 2014, 34 (1): 129—132.]
- [ 31 ] Zhou L, Zhang W Q, Tang H H, et al. Carbon storage and their allocation of young-and-middle aged conifer-broadleaf mixed forests in southern subtropical region. *Ecology and Environmental Sciences*, 2014, 23 (4): 568—574. [周丽, 张卫强, 唐洪辉, 等. 南亚热带中幼龄针阔混交林碳储量及其分配格局. *生态环境学报*, 2014, 23 (4): 568—574.]
- [ 32 ] Li M, Wu P F, Wang Y. Vertical distributions of soil fauna communities on the eastern slope of Gongga Mountain. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(7): 2295—2307. [李萌, 吴鹏飞, 王永. 贡嘎山东坡典型植被类型土壤动物群落特征. *生态学报*, 2015, 35(7): 2295—2307.]
- [ 33 ] Liu X, Zhou T, Wu H, et al. Spatial pattern and main control factors in forest litter decomposition in China-A optimal linear mixed-effect model. *Journal of Beijing Normal University(Natural Science Edition)*, 2018, 54(4): 553—560. [刘霞, 周涛, 吴昊, 等. 中国森林凋落物分解速率的空间格局及主控因子: 基于最优线性混合模型. *北京师范大学学报(自然科学版)*, 2018, 54(4): 553—560.]
- [ 34 ] Li J. Study on soil carbon stock and its spatial distribution influence factors in the forest of China. Chengdu: Sichuan Agricultural University, 2008. [李江. 中国主要森林群落林下土壤有机碳储量格局及其影响因子研究. 成都: 四川农业大学, 2008.]
- [ 35 ] Wang Y X, Weng B Q, Xing S H, et al. Advance in soil organic carbon stock and the impact factors on orchard ecosystem research. *Fujian Journal of Agricultural Sciences*, 2011, 26(6): 1113—1122. [王义祥, 翁伯琦, 邢世和, 等. 果园土壤有机碳及其影响因素的研究进展. *福建农业学报*, 2011, 26(6): 1113—1122.]
- [ 36 ] Lin W L. Study on Phytolith-occluded carbon in soil under important forest kinds. Hangzhou: Zhejiang A & F University, 2015. [林维雷. 亚热带重要森林类型土壤植硅体碳的研究. 杭州: 浙江农林大学, 2015.]
- [ 37 ] Edmonds R L, Thomas T B. Decomposition and nutrient release from green needles of western hemlock and Pacific silver fir in an old-growth temperate rain forest9 Olympic National Park, Washington. *Canadian Journal of Forest Research*, 1995, 25(7): 1049—1057.
- [ 38 ] Ding X Q, Liu M C, Yan C X. Influencing factors of carbon sequestration potential within phytolith-occluded organic carbon of soil. *Chinese Journal of Soil Science*, 2014, 45(3): 749—753. [丁新泉, 刘敏超, 闫翠香. 土壤植硅体碳积累潜力影响因素分析. *土壤通报*, 2014, 45(3): 749—753.]
- [ 39 ] Hodson M J, White P J, Mead A, et al. Phylogenetic variation in the silicon composition of plants. *Annals of Botany*, 2005, 96(6): 1027—1046.
- [ 40 ] Zhao P P. Study on evolution law of different carbon fraction and phytolith-occluded organic C in leaf litter from four forest species with the decomposition in subtropics of China. Hangzhou: Zhejiang A & F University, 2016. [赵培平. 中国亚热带四种森林类型凋落叶分解过程中不同形态碳和植硅体碳演变规律研究. 杭州: 浙江农林大学, 2016.]
- [ 41 ] Zhang J L, Fu W J, Zhou X F, et al. Spatial variability of phytolith-occluded organic carbon in soil under typical *Dendrocalamus latiflorus* Munro Groves. *Acta Pedologica Sinica*, 2017, 54(5): 1147—1156. [张金林, 傅伟军, 周秀峰, 等. 典型麻竹林土壤植硅体碳的空间异质性特征. *土壤学报*, 2017, 54(5): 1147—1156.]

(责任编辑: 檀满枝)