

植物生态系统中的植硅体闭蓄有机碳及其 在全球土壤碳汇中的重要作用

孟赐福, 姜培坤, 徐秋芳, 周国模, 宋照亮, 黄张婷

(浙江农林大学 环境与资源学院, 浙江 临安 311300)

摘要: 植硅体闭蓄有机碳(phytolith-occluded organic carbon, PhytOC)是封存在植硅体中的有机碳。在土壤环境中受到具有高度抗分解能力的植硅体的保护, 它可以长期(数千年至万年以上)封存在土壤剖面中, 从而成为陆地土壤长期(万年尺度)固碳的重要机制之一。以千年的时间尺度来衡量, 估计全球土壤有机碳的平均积累率为 $2.4 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, 其中 PhytOC 积累贡献了 15.0%~37.0%。通过选择种植高产 PhytOC 的植物物种来增加短期和长期碳汇的途径是存在的。大多数的农作物如大麦 *Hordeum vulgare*, 玉米 *Zea mays*, 水稻 *Oryza sativa*, 高粱 *Sorghum vulgare*, 甘蔗 *Saccharum officinarum* 和小麦 *Triticum aestivum* 已知是植硅体的生产者。估计全球上述作物每年生产的 PhytOC 高达 $(5.08\sim 12.01) \times 10^6 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$ 。综述了植物生态系统中 PhytOC 的形成机制与特征、积累率、提高土壤 PhytOC 积累率的农学措施及其在全球土壤碳汇中的重要作用。参 56

关键词: 土壤学; 植物生态系统; 植硅体; 植硅体闭蓄有机碳(PhytOC); 全球土壤碳汇; 综述

中图分类号: S718.51*6

文献标志码: A

文章编号: 2095-0756(2013)06-0921-09

PhytOC in plant ecological system and its important roles in the global soil carbon sink

MENG Cifu, JIANG Peikun, XU Qiufang, ZHOU Guomo, SONG Zhaoliang, HUANG Zhangting

(School of Environmental and Resource Sciences, Zhejiang A & F University, Lin'an 311300, Zhejiang, China)

Abstract: As a substantial component of soil organic carbon occluded within phytoliths, PhytOC is a result of biomineralization within plants and highly resistant to decomposition in the soil environment. PhytOC accumulation rates have contributed about 15.0%–37.0% to the estimated global mean long-term soil carbon accumulation rate which is $2.4 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ over the last 10 000 years. There are ways to enhance both short and long-term carbon sequestration by cultivation of high PhytOC-yielding plant species of agricultural crops. Most of the economically important agricultural plant species such as barley, maize, rice, sorghum, sugarcane and wheat, are producers of phytoliths. It was estimated that the above-mentioned crops globally produced PhytOC of $(5.08\sim 12.01) \times 10^6 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$. The paper reviewed the formation mechanism, characteristics and accumulation rate of PhytOC in the plant ecological system, the agronomy measures to improve the accumulation rate and its important role in the global soil carbon sink. [Ch, 56 ref.]

Key words: soil science; plant ecological system; phytoliths; PhytOC; global soil carbon sink; review

温室气体二氧化碳所导致的全球气候变化已经引起全世界的广泛关注。美国能源部估计, 2010 年全世界二氧化碳的排放量约为 $30.20 \text{ Gt}^{[1]}$ 。由于森林生态系统的碳库占全球总碳库的 46.3%^[2], 其中全球 1.0 m 土层内的有机碳含量占陆地生态系统碳储量($2\ 100 \times 10^9 \text{ t}$)的 3/4, 分别是陆地植被和大气碳储量的 3.0 倍和 2.0 倍^[3]。土壤平均每年排放到大气中的二氧化碳约为化石燃料碳排放量的 11.0 倍, 大气

收稿日期: 2012-11-14; 修回日期: 2013-05-13

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(31270667); 浙江省自然科学基金重点基金资助项目(LZ12C16003)

作者简介: 孟赐福, 研究员, 从事植物营养、土壤质量与环境学等研究。E-mail: cifu@21cn.com。通信作者: 姜培坤, 教授, 从事土壤与环境学等研究。E-mail: jiangpeikun@zafu.edu.cn

二氧化碳储量的 10.0%^[4]。自然植被下土壤长期吸存碳的潜力是 $2.4 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ，而全球平均土壤有机碳积累率只有大气中的二氧化碳增加率的 10.0%。土壤碳库的变化被认为是导致大气碳库和全球气候变化的主要原因。在陆地生态系统中，碳汇功能体现在碳库的储量和积累率，而碳源则体现在碳的排放强度。土壤有机碳库由不同周转率的组分组成，其周转期从几周到近万年。相对于储存在植被中的碳来说，储存在土壤中的植硅体闭蓄有机碳(phytolith-occluded organic carbon, PhytOC)较为稳定，如果没有经历大的地质变迁，它们将长期(数千年至万年以上)封存在土壤剖面中而形成稳定的有机碳库，因而探索增加土壤中 PhytOC 的潜力已经成为固碳技术的热点，并引起关注全球气候变化科学家的极大兴趣^[5-6]。本文综述了植物生态系统中 PhytOC 的形成机制与特征、土壤中 PhytOC 的积累率、提高土壤 PhytOC 积累率的农学措施及其在全球土壤碳汇中的重要作用。

1 植硅体(phytolith)和植硅体闭蓄有机碳(PhytOC)

1.1 植硅体闭蓄有机碳的形成机制与特征

植物硅酸体，简称植硅体，是植物内的含水非晶态二氧化硅(SiO_2)颗粒，存在于植物不同部位的细胞内。某些高等植物从土壤溶液中以单硅酸(H_4SiO_4)的形式吸收硅，随后沉淀于植物叶、茎和根的内、外细胞结构区域内^[6-8]。植物的各个部位都可产生硅酸体，其中以叶片中的数量最大。植硅体的主要成分为二氧化硅(67.0%~95.0%)，还有水分(1.0%~12.0%)，有机碳(0.1%~6.0%)。

由于不同植物的细胞形态不同，它们沉积硅的形态也就不同。在细胞壁沉积的二氧化硅往往复制活细胞的形态，而那些渗入细胞腔的二氧化硅则没有固定的形态。植物组织内二氧化硅沉积有 3 个位置，即细胞壁、细胞腔和皮层的间隙^[9]。这种硅化作用导致碳在植硅体中的闭蓄^[10]。Wilding 等^[11]认为，任何植硅体中闭蓄的有机碳很可能是植物细胞内的原有细胞质有机组分。

植硅体分布非常广，体积很小，其粒径通常为几微米至几十微米。如禾本科 Poaceae 植物叶子中有植硅体 10 万~100 万个 $\cdot\text{g}^{-1}$ 。

1.2 植硅体封存碳的特征与优点

植硅体封存碳具有以下特征与优点：①具有很高的抗氧化性和抗分解能力。与土壤中的其他有机碳组分相比，PhytOC 具有很高的抗氧化性，它的最早发现一直可以追溯到 13 300 a 前^[11]。虽然 200 a 以下的现代土中，PhytOC 占总碳库不到 10.0%，但在有机物经过 1 000 a 分解后的埋藏表土中，PhytOC 可以占总碳的 82.0%^[6]，这说明与土壤环境中的其他土壤有机碳成分相比，PhytOC 具有很强的抗分解能力。②可以长期保存在土壤中。PhytOC 是包裹在植硅体的有机碳。由于它受植硅体保护，可长期累积于土壤中达数千年之久^[1]。时间消灭了很多植物，但沉积下来的植硅体却没有被消灭。Parr 等^[6]通过对位于巴布新几内亚西不列颠省纳姆度地区的火山灰和古土壤互层中有机碳和植硅体碳研究，发现经过 2 000 a 的分解，植硅体碳所占土壤碳的比例由表土不到 10.0%上升到 2 000 a 前的 82.0%。③PhytOC 是土壤中的一个安全碳汇。PhytOC 是土壤总有机碳的一个重要成分。土壤中存在的碳的形态有物理性保护的有机无机复合体(如微团聚)、木炭等和 PhytOC，但 PhytOC 是最稳定而安全的碳的形态^[12]。土壤中的许多其他有机碳可能在一个较短的时间内分解而进入大气，而 PhytOC 在土壤中相当稳定，不参与大气的碳循环，是储存在土壤中的一个安全碳汇^[6]。④PhytOC 可以准确量化。目前，正确量化土壤有机碳很难实现，而且量化土壤碳需要采集许多样品，分析费用也十分昂贵。然而，Jeff 等^[1]通过植物产生 PhytOC 过程的研究后认为，这种碳含量可以准确量化的。只要准确地测量不同林分或农作物进入土壤的凋落物或秸秆数量和植硅体中 PhytOC 量，就可以精确地量化 PhytOC 在土壤中积累率，进而推断出某种林分或农作物的 PhytOC 的总碳汇率。

2 植物中的植硅体

在碳循环和碳汇研究中，传统的观点认为草本植物的茎秆等有机质会快速腐烂分解，其碳汇为零，因此，在长时间尺度的碳汇计算中，草本植物的贡献被忽略不计。然而，最新的研究表明，地球上广泛分布的草本植物(包括大部分农作物)可以通过植硅体长期(数千年至万年以上)封存大量的碳^[1,6]，因而，这种新的碳封存方式越来越受到学界的关注。

2.1 植物对硅的吸收

许多植物种类能有效地积累硅，因此，植物体本身就是一个相当大的硅库。陆地植物以植硅体的形式固定硅为 $1.68 \times 10^9 \sim 5.60 \times 10^9 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$ ，通过枯枝落叶返回到土壤中的植硅体有 92.5% 被植物再吸收，7.5% 进入土壤库。陆地植物从土壤植硅体库吸收的硅量远超过从岩石风化释放吸收的硅量。植物对硅的吸收有主动吸收和被动吸收 2 种方式，各自所起作用的大小取决于植物的种类和外界环境的硅浓度。

硅存在于所有植物体内。植物组织内积累的硅量以干质量计变动于 0.1%~10.0%^[13]。草类，竹类，水稻 *Oryza sativa*，甘蔗 *Saccharum officinarum* 等作物含硅量较高。禾本科植物以地上部干质量表示的二氧化硅质量分数为 1.0~3.0%^[6]，其中水稻叶片的硅质量分数可到 5.0% 以上。水稻 65.5% 的硅沉积在叶片中^[14]。一些植物物种通过蒸腾作用吸取土壤溶液中单硅酸的能力比我们从前预想的要强得多，而其他植物物种可以有效地排除单硅酸的摄取^[14]。Marschner^[14]根据植物硅质量分数(二氧化硅，以地上部干质量百分比表示)将高等植物分为 3 组：①莎草科 Cyperaceae 和禾本科湿地物种(如水稻)二氧化硅质量分数为 10.0%~15.0%；②旱地禾本科(如小麦 *Triticum aestivum*，甘蔗)和一些双子叶植物二氧化硅质量分数为 1.0%~3.0%，③大多数双子叶植物，特别是豆科 Leguminosae，二氧化硅质量分数小于 0.5%。

2.2 植物中的植硅体质量分数

根据生物矿化理论，正酸硅 $[\text{Si}(\text{OH})_4]$ 分子能与细胞壁上的多糖亲水羟基作用，聚合形成二聚体和环状聚合物，而大部分硅沉积在次生细胞壁上，最后形成有各种排列结构体的植硅体。这种植硅体很可能是以次生细胞壁为模板，在由细胞质外体的连续纳米微腔内沉积形成的^[6]。

虽然硅发生在许多植物，有些树种^[12,16-17]与禾本科和莎草科等的草本植物一般被认为是沉积植硅体的最多植物，也正是这些草本类型一般能产生最多的 PhytOC。因此，草原的长期的植硅体积累率通常比森林要大 5.0~10.0 倍^[18]。一些主要的农业作物如大麦 *Hordeum vulgare*，玉米 *Zea mays*，水稻，高粱 *Sorghum vulgare*，甘蔗和小麦都是植硅体的多产者。在印度，这些作物估计可固定 PhytOC $87.00 \times 10^6 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$ ^[13]。

植物中的植硅体所占比例很低，一般为植物干物质的 10.0% 以下。竹类的植硅体较高，如 10 个重要经济竹种落叶层中植硅体占叶干质量的 1.600%~4.000%，而禾本科植物的植硅体较低，如中国的黍 *Panicum miliaceum* 和粟 *Setaria italica* 植硅体碳分别占其干物质的 0.136% 和 0.129%^[5]。小麦、甘蔗中的植硅体分别为 2.680%~7.850%^[22] 和 1.300%~2.600%^[11]。小麦种植周期砂壤土上植硅体的生产量约为 $280.0 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。假设小麦秸秆(干质量)含有二氧化硅 $45.0 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ，那么 59 季小麦累计生产无定形植硅体硅约为 $7\,300.0 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ^[3-4]。

2.3 从农业系统中 PhytOC 的潜力和贡献

世界上最重要的农作物如大麦、玉米、水稻、高粱、甘蔗和小麦被认为是植硅体的多产者^[19-20]。这些农作物的秸秆中含有大量的 PhytOC，但其含量因作物的品种不同而有很大差异^[4,6]。假定这些作物的 30.0% 秸秆可以通过秸秆还田、动物粪便、堆肥和焚烧灰形式返回土壤，那么，印度这些作物估计最大可固定 PhytOC 约为 $0.87 \times 10^6 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$ ^[13]。全球上述作物生产的 PhytOC 为 $(5.08 \sim 18.97) \times 10^6 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$ ，其中 $(1.52 \sim 3.60) \times 10^6 \text{ t}$ 积累在土壤中。农业系统中高 PhytOC 品种贡献碳约为 $2.08 \times 10^6 \text{ t}$ 。如果以这些作物最大植硅体量计算，那么总植硅体和总 PhytOC 分别可达 $38.41 \times 10^6 \text{ t}$ 和 $1.92 \times 10^6 \text{ t}$ ^[13]。因此，用高产 PhytOC 作物品种取代低产 PhytOC 植物品种，可以增加 PhytOC $1.05 \times 10^6 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$ ^[13]。以草原 PhytOC 平均 1.5% 计算，估计中国草原和全球草原地上部中 PhytOC 的生产速率(二氧化碳)分别为 $0.6 \times 10^6 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$ 和 $41.4 \times 10^6 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$ ^[21]。

2.4 植物中 PhytOC 的形成及积累率

在植物生长过程中，活细胞中有机碳可包裹在植硅体中，被称为 PhytOC。研究发现，PhytOC 占植硅体质量的 0.20%~5.78%^[6,11,22-23]。

植硅体的生产率和长期的封存植硅体中的碳封存率随覆盖在上面的植物群落不同而不同。例如，新南威尔士州东部的一个甘蔗品种，PhytOC 积累率高达 $18.0 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ，这比以前在观察到自然植被群落高 30.0 倍以上，也比自然植被下陆地平均土壤碳封存率高 7.5 倍^[24]，而普通黍和粟 PhytOC 的积累率就低得多，分别为 $0.023 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 和 $0.020 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ^[5](二氧化碳)。

植硅体的生产速率和碳闭塞在 PhytOC 中的速率随不同的植物群落的不同而有巨大差异^[13]。来自全

世界 25 个国家的 53 个小麦品种的 PhytOC 质量分数占干叶和茎生物量的 0.06%~0.60%，其变幅高达 10 000%^[25]。不同毛竹 *Phyllostachys edulis* 品种 PhytOC 积累率的变幅(二氧化碳)为 0.008~0.709 t·hm⁻²·a⁻¹^[26]；小麦生物封存 PhytOC 的潜力(二氧化碳)为 0.246 t·hm⁻²·a⁻¹^[25]；不同甘蔗品种积累 PhytOC 率变幅(二氧化碳)为 0.120~0.360 t·hm⁻²·a⁻¹^[1]。在印度，种植高产 PhytOC 的这些作物估计可多生产 PhytOC 1.05×10⁶ t·a⁻¹^[13]。因此，在不同的农业生态系统中，选择高产 PhytOC 品种对提高陆地碳汇有很大的潜力。

植物中植硅体含量还与环境中 pH 值有关。葛勇等^[27]的研究显示，松嫩平原 5 种羊草叶片中植硅体形态特征和数量受土壤 pH 值控制。随着环境中 pH 值的增加，弱齿形、尖形以及硅化的气孔的数量都出现了增加的趋势，气孔体积有变大的趋势，植硅体总的数量有减少的趋势。

3 土壤中植硅体

土壤中的 PhytOC 可能是难以分解的有机物中的一员，其在陆地碳循环中的重要性已经逐渐被学术界关注^[25]。

3.1 土壤中的植硅体的形成与去向

植物与矿物的联系实际是很密切的，植物从土壤中吸收到硅，然后硅以蛋白石的形式沉淀在植物细胞内。土壤本身并不产生植硅体，但是随着植物的自然死亡、腐烂或通过动物的排泄、大火等原因，植硅体从有机体中释放到土壤中。在很难保存花粉和其他生物化石的地层(如第三纪乃至晚白垩纪)及火灾灰烬层中都发现了它^[29-30]。

土壤中的植硅体在陆地环境的去向由下列过程所决定，例如：侵蚀、运输由风或水造成的搬迁、森林火灾燃烧所造成的损失，或在通过动物消化系统内发生的生化变化。然而，不论最后的去向如何，植硅体的稳定性和持续性已被广泛证明^[31-33]。PhytOC 的生化变化，特别是微生物氧化几乎不会发生。有证据显示，PhytOC 不受森林火灾的影响，它在哺乳动物肠道内也不发生生化变化。5.0 cm 以下土层中植硅体约占 50.0%^[34]。在铁铝土中，PhytOC 可迁移到 2.2 m 的土层内^[35]。植硅体在砂壤土(始成土)和粉砂壤土(淋溶土)的平均移动距离分别为(3.99±1.21)和(3.86±0.56) cm·a⁻¹^[34]。这种迁移主要归因于渗滤水的作用^[36]。与此相反，Piperno^[37]则认为，PhytOC 在土壤剖面中的迁移非常小，因为植硅体通常出现在近代土壤的上层，而 B 层中的较低。决定 PhytOC 迁移的主要因素是植硅体的大小和形状。

3.2 土壤中植硅体量

虽然土壤中植硅体量通常低于土质量的 3.0%^[38]，但有的土壤达 20.0%~30.0%，某些土层几乎可以完全由植硅体构成^[39]。土壤中中硅酸体的数量可以有几个数量级差异^[18]，主要取决于地上生物量中植硅体的类型^[6,13]。例如，新墨西哥州土壤中的植硅体积累率仅为 8.0~10.0 kg·hm⁻²·a⁻¹^[30]，而俄勒冈则可高达 300.0 kg·hm⁻²·a⁻¹^[41]。后者有如此高的形成率的原因是由于土壤大多发育于易风化火山岩硅母质^[42]。Al-Ismaily^[42]估计，小麦种植周期砂壤土上植硅体的生产量约为 280.0 kg·hm⁻²·a⁻¹。假设小麦秸秆(干质量二氧化硅)含有 45.00 g·kg⁻¹，那么 59 季小麦累计生产无定形植硅体硅约为 7 300.0 kg·hm⁻²。一般热带雨林、热带岛屿、半干旱草原的土壤中的植硅体量都较高^[43]。浙江慈溪滨海沉积物上发育的 5 个具有不同植稻年龄的土壤中的植硅体质量分数变幅为 3.67~17.51 g·kg⁻¹^[44]。

并非植物产生的所有植硅体都可返回到土壤。控制土壤中植硅体的增加量有若干因素，其植物因素包括作物品种和年龄、植物的不同器官、植硅体的量、植硅体大小和形状、返回到土壤中的作物残茬数量，而土壤因素包括大孔隙的结构、土壤质地、黏粒量、土壤水分和微生物群落及其在土壤中的活动。因此，在一个特定环境和管理条件下，某种植物物种所产生的 PhytOC 数量以及返回到土壤中的 PhytOC 数量是可以量化的^[13]。

3.3 土壤中 PhytOC 的积累率

植硅体可以是土壤中总有机碳在的一个主要组分。自然植被下，土壤中的 PhytOC 所封存碳为 0.40~2.40 g·m⁻²·a⁻¹^[6,45]。据估计，热带和亚热带地区的 PhytOC 积累率常接近，其范围为 0.72~0.88 g·m⁻²·a⁻¹，而温带土壤中的 PhytOC 平均积累率为 15.00 g·m⁻²·a⁻¹^[13]。植硅体的平均质量分数为 2.40%的美国俄亥俄州的 2 个温带土壤的 PhytOC 积累率(碳)为 0.36 g·m⁻²·a⁻¹^[11]。

3.4 影响土壤 PhytOC 的累积率的因素

土壤中 PhytOC 的累积率主要取决于植物中 PhytOC 产生通量^[26]和土壤中植硅体的地球化学稳定性^[6]。土壤的植硅体积累率除了受植物物种的影响外，还受包括土壤因素(例如土壤溶液中的单硅酸浓度)、气候、地貌和土壤管理等的影响^[18]。植物中 PhytOC 产生通量除了与凋落物年产生量有关外，还受凋落物中植硅体质量分数以及植硅体中 PhytOC 质量分数控制^[17]。

土壤碳封存率(二氧化碳)，产生 PhytOC 高的比产生 PhytOC 低的甘蔗品种多 $0.4 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ^[1]。植硅体随植稻年龄的增加没有表现出有规律的增加或减少趋势。植硅体在水耕人为土中不易移动，与起源土相比，水耕人为土表层植硅体含量有较大程度的增加，说明植稻有利于植硅体在土壤表层富集^[44]。

土壤中植硅体含量随土壤层深度的增加而减少。李仁成等^[45]对桂林市境内的碳酸盐岩土壤剖面的研究显示，表土含丰富且形态多样的植硅体；从表层往下植硅体含量迅速减少，20.0 cm 以下植硅体含量极少或没有，没有发现新的植硅体富集层。

3.5 土壤碳周转的模型的重要意义

土壤有机碳在陆地碳循环中占有主导地位。陆地碳循环可用来减缓人为二氧化碳排放量的增加。在全球范围内，储存在土壤内的有机碳控制着碳循环，因而通过对它适当的管理可减缓温室气体排放^[13]。

PhytOC 已被证明是土壤中一个重要的长期陆地碳组分^[6]。长期封存的土壤有机碳只占净初级生产率的 0.7%^[46]。长期(数年至数千年)土壤有机碳封存机制被认为是对有机矿物复合体中的难分解有机质的物理保护^[47]，木炭的形成也可被认为是土壤碳的长期封存机制^[36]。鉴于 PhytOC 在土壤可以积累一定数量，而且它因抗分解而显示其十分稳定，对许多土壤物质而言，它可能是大部分土壤有机碳周转模型中一个相当重要部分。

虽然在幼年(200 a)表土层中的 PhytOC 只占土壤碳的一小部分，但由于在老年表土中的其他大部分土壤有机质相当易于分解，使得 1 000 a 后在排水良好土壤中的 PhytOC 提高到占总碳库的 42.0%^[13]。据预测，在澳大利亚 2 000 a 后埋藏于 2.0 m 表土的 PhytOC 可占总土壤碳的 82.0%，而在这一时期的总碳组分浓度则明显下降^[6]。

4 提高土壤 PhytOC 积累率的农学措施

近年来，全世界的科学家正在积极探索增加土壤中 PhytOC 的潜力。Parr 等^[6]计算的 PhytOC 积累率远低于从农地或森林改变为森林或草地的平均固碳率($33.5 \text{ g} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)^[47]，也远低于从传统耕作转变为免耕农地的平均固碳率($50.7 \text{ g} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)^[48]。然而，因土地利用方式改变所引起的固碳时间十分短暂(几十年)^[48]，而 PhytOC 内封存的碳将持续数千年。通过土地利用变化如造林绿化所固定的大部分碳是容易分解的，而 PhytOC 封存的碳是一种较为稳定的土壤碳。

由于不同的植物物种之间(或植被类型)产生 PhytOC 存在差异，使我们有可能通过选择和种植高产 PhytOC 的植物物种来提高陆地长期被封存的碳汇。例如，种植甘蔗可以在短期内增加土壤内的 PhytOC，因为甘蔗的 PhytOC 积累率高达 $18.1 \text{ g} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。此外也可以改变土地利用方式(如从传统耕作转变为免耕农地)来提高土壤中的 PhytOC^[48]。研究表明，可以通过种植高产 PhytOC 植物来提高短期和长期的碳汇以及土壤环境中 PhytOC 的稳定性^[8]。这样的作物有很多是重要的经济作物，如大麦、玉米、水稻、高粱、甘蔗和小麦^[12,51-54]。土地中造林或再造林也有这样的效果，但由于草地的长期 PhytOC 积累率比林地要大 5.0~10.0 倍^[38]，因此必须将造林或再造林提高的短期固碳效益与林下的长期 PhytOC 碳汇进行统筹考虑。

在世界范围内，土地利用的变化是人类最为强烈的经营活动之一，可引起植物群落组成与结构以及养分的生物地球化学循环的显著变化^[44]。因此，土地利用变化也有可能通过改变植物凋落物年产生量、植硅体质量分数以及土壤中植硅体的地球化学稳定性等途径影响土壤中 PhytOC 的累积率。

上述结果说明，通过土地利用变化如耕地转化为林地或草原，或从传统耕作转变为免耕，均可以提高土壤中 PhytOC 的积累率。此外，通过选择适当的作物和品种，有可能大大增加土壤在农业中长期的碳吸存率。

5 植硅体在全球土壤碳汇中的重要作用

当前对于植硅体的研究主要集中于古环境与古气候重建、农业与环境考古、古生态以及植物分类学等方面,但是近年来,土壤 PhytOC 作为一个重要的长期的陆地碳库,在调节全球碳循环和缓解全球气候变暖趋势等方面具有的重要作用已经引起环境科学家和农业科学家的极大关注^[5-6]。这是因为农业生产需求的增加使得能够进行木本植物生产的土地面积变得愈来愈少,因而,提高植物和土壤的 PhytOC 积累是增加各种农业生态系统中土壤碳汇的一个有效途径^[1,6,13,26]。目前,一些国家的研究人员正在探索减少农业中碳排放并增加土壤中捕获碳量的潜力。他们的研究认为,土壤内 PhytOC 的积累是陆地封存碳的一个重要过程。业已证明,在土壤环境中稳定的植硅体闭蓄碳被认为是土壤有机碳的一个重要部分,其积累在陆地碳封存中是一个重要的过程,它对陆地碳的长期(千年)封存具有巨大贡献^[13]。提高 PhytOC 的产量和积累具有很大的潜力,从而增加陆地碳的封存量^[6]。

应当肯定封存在植硅体内的土壤有机碳(SOC)在土壤碳封存中的作用,加深对植硅体的理解可以拓宽硅和有机碳的了解。植硅体碳有可能是生物地球化学循环中丢失碳汇的一部分,研究不同农作物植硅体封存的碳量,可以客观认识人类活动对碳循环变化的影响。

PhytOC 被称为是储存在土壤中的安全碳,因为它受植硅体保护可长期累积于土壤中,从而成为陆地土壤长期(万年尺度)固碳的重要机制之一^[30]。它在土壤中相当稳定,可以封存在土壤中数千年而不被分解,同时农业系统产生的 PhytOC 率比自然植被群落更大^[45],因而有可能通过人工的选择和培育新的作物品种来增加土壤中的 PhytOC。以千年的时间尺度来衡量,估计全球平均土壤有机碳积累率为 $2.4 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,其中 PhytOC 积累率占 $15.0\% \sim 37.0\%$ ^[45]。如果 PhytOC 是提高土壤安全碳的封存率,那么它必须满足 2 个条件:①在土壤中相对稳定,且抗分解;②农业系统产生 PhytOC 率比自然植被群落更大。

最近的研究表明,全球竹林会通过植硅体长期封存(二氧化碳) $15.6 \times 10^6 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$ 。Parr 等^[26]研究认为,如果全球 $4.1 \times 10^9 \text{ hm}^2$ 的潜在耕地都选择栽竹子,按照中等的植硅体碳封存率($0.36 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$),全球植硅体碳(二氧化碳)封存量将达到 $1.5 \times 10^9 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$ 。这一碳封存率将有效地减少全球二氧化碳排放量,其占当前增加大气二氧化碳排放量的 11.0% ^[26]。

6 需要研究的问题

尽管 PhytOC 在全球土壤碳汇中有如此的重要作用,但目前国外对植硅体的研究仅限于竹类、水稻、甘蔗、小麦等少数林木和农作物上^[5-6],中国仅对水稻、黍、粟、羊草等少数作物有少量研究,而对森林生态系统中 PhytOC 的研究尚处于空白状态。有鉴于此,必须在以下几个方面开展深入研究:①进一步研究不同作物生产系统中增加 PhytOC 在土壤固碳中的潜力,其中包括亚热带地区不同林分、不同竹种下土壤 PhytOC 积累率的比较研究和退耕还草后土壤 PhytOC 积累率的研究。②由于亚热带森林土地利用方式的改变所引起的 PhytOC 在土壤中积累率的变化。③今后应当把主要的研究集中在应用育种和生物技术选育出更高 PhytOC 产量的农作物品种,同时还需要研究通过施用硅肥的方法来提高植物生产 PhytOC 的能力。④中国竹林、甘蔗、草地、稻麦等每年通植硅体长期封存 PhytOC 的估算。⑤中国水稻栽植面积很大,所产生的秸秆大部分被燃烧,对大气造成严重污染。由于植硅体固定的碳在土壤环境中比较稳定,因此,应当强化秸秆还田对提高水稻土的长期固碳能力的研究。⑥植硅体和土壤总硅之间呈极显著正相关^[32],但植硅体中的有机碳量并不直接与植物中硅的量有相关,而是与植物封存碳的效率相关^[1],因此,有必要进一步探讨土壤硅量与 PhytOC 积累率之间的关系。

参考文献:

- [1] JEFF P J, SULLIVAN, QUIRK R. Sugarcane phytoliths: encapsulation and sequestration of a long-lived carbon fraction [J]. *Sugar Tech*, 2009, **11**(1): 17 - 21.
- [2] DIXON R K, BRORN S, HOUGHTON R A, *et al.* Carbon pools and flux of global forest ecosystems [J]. *Science*, 1994, **263**: 185 - 190.
- [3] LAL R. Soil management and restoration for C sequestration to mitigate the accelerated greenhouse effects [J]. *Prog*

- Environ Sci*, 1999, **1**(4): 307 – 326.
- [4] RAICH J W, POTTERC S, BHSGAWATI D. Interannual variability in global soil respiration [J]. *Global Change Biol*, 2002, **8**: 800 – 812.
- [5] 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.
- [6] PARR J F, SULLIVAN L A. Soil carbon sequestration in phytoliths [J]. *Soil Biol Biochem*, 2005, **37**: 117 – 124.
- [7] PIPERNO D R. *Phytoliths: A Comprehensive Guide for Archmeologists and Paleoecologists*[M]. London: Altamira Press, 2006: 117 – 124.
- [8] ROVNER I. Plant opal phytolith analysis: major advances in archmeobotanical research [G]// SCHIFFER M B. *Advances in Archmeological Method and Theory* Vol. 6. New York: Academic Press, 1983: 225 – 266.
- [9] PIPERNO D.R. *Phytolith Analysis: An Archaeological and Geological Perspective*[M]. London: Academic Press, 1988.
- [10] JONES L H P, MILNE A A. Studies of silica in the oat plant [J]. *Plant Soil*, 1963, **43**: 207 – 220.
- [11] WILING L P, BROWN R E, HOLOWAYCHUK N. Accessibility and properties of occluded carbon in biogenetic opal [J]. *Soil Sci*, 1967, **103**: 56 – 61.
- [12] EPSTEIN E. Silicon: Annual review plant physiology and plant molecular biology[J]. *Plant Mol Biol*, 1999, **50**: 641 – 664.
- [13] RAJENDIRAN S, COUMAR M Y, KUNDU S, *et al.* Role of phytolith occluded carbon of crop plants for enhancing soil carbon sequestration in agro-ecosystems [J]. *Curr Sci*, 2012, **103**(8): 911 – 920.
- [14] MARCHNER H. *Mineral Nutrition of Higher Plants* [M]. 2nd. London: Academic Press, 1995: 889.
- [15] SHARMA M., RAO K R. Investigations into the occurrence of silica in Indian timbers[J]. *Indian For*, 1970, **96**: 740 – 754.
- [16] ter WELLE B J H. Silica grains in woody plants of the neotropics, especially Surinam[J]. *Leiden Bot Ser*, 1976, **3**: 107 – 142.
- [17] BOZARTH S R. Classification of opal phytoliths formed in selected dicotyledons native to the Great Plains [G]// RAPP G J, MULHOLLAD S C. *Phytolith Systematics Emerging Issues*. Berlin: Society for Archaeological Springer, 1992: 144 – 160.
- [18] DRESS L R, WILDING L P, SMECK N E, *et al.* Silica in soils: quartz, and disordered silica polymorphs [G]// DIXON J B, WEED S B. *Minerals in Soil Environments*. 2ed. Madison: Soil Science Society of America, 1989: 471 – 552.
- [19] PIPERNO D, PEARSALL D. Phytoliths in the reproductive structures of maize and teosinte: implications for the study of maize evolution [J]. *J Archaeol Sci*, 1993, **20**: 337 – 362.
- [20] YEO A R, FLOWERS S A, RAO G, *et al.* Silicon reduces sodium uptake in rice (*Oryza sativa* L.) in saline conditions and this is accounted for by a reduction in the transpirational bypass flow[J]. *Plant Cell Environ*, 1999, **22**(5): 559 – 565.
- [21] SONG Zhaoliang, LIU Hongyan, SI Yong, *et al.* The production of phytoliths in China's grasslands: implications to the biogeochemical sequestration of atmospheric CO₂ [J]. *Glob Change Biol*, 2012, **18**(12): 3647 – 3653.
- [22] JONES R L, BEAVERS A H. Aspects of catenary and depth distribution of opal phytoliths in Illinois soils [J]. *Soil Sci Soc Amer J*, 1964, **28**: 413 – 416.
- [23] MULHOLLAG S, PRIOR C. AMS radiocarbon dating of phytoliths [J]. *MASCA Res Pap Sci Archmeol*, 1993, **10**: 21 – 23.
- [24] SULLIVAN L A, PARR J F. 'Green' geosequestration: secure carbon sequestration via plant silica biomineralisation [J]. *Geochim Cosmoch Acta*, 2007, **71**(15): A985 – A985.
- [25] PARR J F, SULLIVAN L A. Phytolith occluded carbon and silica variability in wheat cultivars[J]. *Plant Soil*, 2011, **342**: 165 – 171.
- [26] PARR J F, SULLIVAN L A., CHEN Bihua, *et al.* Carbon bio-sequestration within the phytoliths of economic bamboo species [J]. *Global Chmng Biol*, 2010, **16**(10): 2661 – 2667.
- [27] 葛勇, 介冬梅, 郭继勋, 等. 松嫩草原羊草植硅体对模拟全球 CO₂ 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 Jixuen, *et al.* Response of phytolith in *Leymus chinensis* to the simulation of *Chinensis* community on Songnen grassland [J]. *Chin Sci Bull*, 2010, **55**(27/28): 2735 – 2741.
- [28] OLDENBUG C M, TORN M S, DEANGELISK M, *et al.* *Biologically Enhanced Carbon Sequestration: Research Needs and Opportunities* [R]. Berkeley: Report on the Energy Biosciences Institute Workshop on Biologically Enhanced Carbon Sequestration, 2007.
- [29] 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 Paleocol*, 2004, **207**: 239 – 275.
- [30] PRASAD V, STROMBERG C, ALIMOHMMMAIAN H, *et al.* Dinosaur coprolites and the early evolution of grasses and grazers [J]. *Science*, 2005, **310**: 1177.
- [31] BAKER G. A contrast in the opal phytolith assemblages of two Victorian soils [J]. *Austr J Bot*, 1959, **7**(1): 88 – 96.
- [32] HART D M, HUMPHREYS G S. Plant opal phytoliths: an Australian perspective [J]. *Quat Australias*, 1997, **15**: 17 – 25.
- [33] JONES L, HANDRECK K. Silica in soils, plants and animals [J]. *Adv Agron*, 1967, **19**: 107 – 149.
- [34] FISHKIS O, INGWERSEN J, LAMERS M, *et al.* Phytolith transport in soil: a field study using fluorescent labeling [J]. *Geoderma*, 2010, **157**: 27 – 36.
- [35] ALEXANDRE A, MEEUMIER J D, LEZINE A M, *et al.* Phytoliths: indicators of grassland dynamics during the late Holocene in intertropical Africa [J]. *Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeocol*, 1997, **136**: 213 – 229.
- [36] HUMPHREYS G S, HART D M, SIMONS N A, *et al.* Phytoliths as indicator of process in soils [G]// HART D M, WALLIS L A. *Phytolith and Starch Research in the Australian-Pacific-Asian Regions: The State of the Art*. Canberra: The State-of-the-Art in Phytolith and Starch Research in the Australian-Pacific-Asian Regions, 2003: 93 – 104.
- [37] PIPERNO D R. *Phytoliths: A Comprehensive Guide for an Archaeologists and Paleocologists* [M]. New York: Altamira Press, 2006: 189 – 195.
- [38] DRESS L R, WILDING L P, SMECK N E, *et al.* Silica in soils: quartz, and disordered silica polymorphs [G]// DIXON J B, WEED S B. *Minerals in Soil Environments*. 2ed. Madison: Soil Science Society of America, 1989: 471 – 552.
- [39] RIQUIER J. *Les Phytoliths de Certain Sols Tropicaux et Des Podzols* [M]. Madison: Transactions of the Seventh International Congress of Soil Science, 1960: 425 – 431.
- [40] PEASE D S, ANDERSON J U. Opal phytoliths in *Bouteloua eriopoda* Torr. roots and soils [J]. *Soil Sci Soc A Proc*, 1969, **33**: 321 – 322.
- [41] NORGREN A. *Opal Phytoliths as Indicators of Soil Age and Vegetative History* [D]. Corvallis: Oregon State University, 1973.
- [42] AL-ISMAILY S S. *Genesis of Silica-enriched Agricultural Pans in Soils Managed Under Wheat-fallow Cropping Systems* [M]. Corvallis: Oregon State University, 1997.
- [43] CLARKE J. Occurrence and significance of biogenic opal in the regolith [J]. *Earth Sci Rev*, 2003, **60**: 75 – 194.
- [44] 陈留美, 张甘霖. 水耕人为土时间序列的植硅体及其闭留碳演变特征 [J]. 土壤通报, 2011, **42**(5): 1025 – 1029.
- CHEN Liumei, ZHANG Ganlin. Phytoliths and its occluded organic carbon in a stagnic anthrosols chronosequence [J]. *Chin J Soil Sci*, 2011, **42**(5): 1025 – 1029.
- [45] 李仁成, 农日正, 何伟松. 碳酸盐岩红土风化成因的植硅体记录 [J]. 科技风, 2012(5): 188.
- LI Renheng, NONG Rizhen, HE Weisong. Phytolith records of weathering origin of red soil derived from carbonate rock [J]. *Technol Wind*, 2012(5): 188.
- [46] SCHLESINGER W H. Evidence from chronosequence studies for a low carbon storage potential of soils [J]. *Nature*, 1990, **348**: 232 – 234.
- [47] POST W M, KWON K C. Soil carbon sequestration and land-use change: processes and potential [J]. *Glob Change Biol*, 2000, **6**(3): 317 – 327.
- [48] SKJEMSTAD J O, CLARKE P, TAYLOR J A, *et al.* The chemistry and nature of protected carbon in soil [J].

- Austral J Soil Sci*, 1996, **34**: 251 – 271.
- [49] CHRISTENSEN B T. Matching measurable soil organic matter fractions with conceptual pools in simulation models of carbon turnover: revision of model structure [G]//POWLSON D S, SMITH P, SMITH J U. *Evaluation of Soil Organic Matter Models*. Berlin: Springer-Verlag, 1996: 143 – 159.
- [50] WEST T O, POST W M. Soil organic carbon sequestration by tillage and crop rotation: a global data analysis [J]. *Soil Sci Soc Amer J*, 2002, **66**: 1930 – 1946.
- [51] LANNING F C, HOPKINS T L, LOERA J C. Silica and ash content and depositional patterns in tissues of mature *Zea mays* L. plants [J]. *Ann Bot*, 1980, **45**: 549 – 554.
- [52] PIPERNO D R, PEARSALL D M. Phytoliths in the reproductive structures of maize and teosinte: implications for the study of maize evolution [J]. *J Archaeol Sci*, 1993, **20**: 337 – 362.
- [53] PEARSALL D M, PIPERNO D R, DINAN E H, *et al.* Distinguishing rice (*Oryza sativa*, Poaceae) from wild *Oryza* species through phytolith analysis: results of preliminary research [J]. *Economic Bot*, 1995, **49**: 183 – 196.
- [54] YEO A R, FLOWERS S A, RAO G, *et al.* Silicon reduces sodium uptake in rice (*Oryza sativa* L.) in saline conditions and this is accounted for by a reduction in the transpirational bypass flow [J]. *Plant Cell & Environ*, 1999, **22**(5): 559 – 565.
- [55] ZHAO Zhijun, PEARSALL D M, BENFER R A, *et al.* Distinguishing rice (*Oryza sativa*, Poaceae) from wild *Oryza* species through phytolith analysis (II) Finalized method [J]. *Economic Bot*, 1998, **52**(2): 134 – 145.
- [56] CONLEY D J, LIKENS G E, 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.