

DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.200307

袁发英, 王霖娇, 盛茂银. 作物植硅体形态的应用及其封存有机碳研究进展[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2020, 28(12): 1932–1940

YUAN F Y, WANG L J, SHENG M Y. The application of crop phytoliths for reviewing occluded organic carbon[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2020, 28(12): 1932–1940

作物植硅体形态的应用及其封存有机碳研究进展*

袁发英^{1,3}, 王霖娇^{1,2}, 盛茂银^{1,2**}

(1. 贵州师范大学喀斯特研究院 贵阳 550001; 2. 国家喀斯特石漠化治理工程技术研究中心 贵阳 550001;
3. 贵州省喀斯特石漠化防治与衍生产业工程实验室 贵阳 550001)

摘 要: 农田生态系统是陆地生态系统的重要组成部分, 在维系生命的生长发育和环境的动态平衡等方面起着至关重要的作用, 在其生长发育和环境演变的过程中储存大量的环境变化信息, 能够反映古农业的发展变迁。植硅体是一种长期稳定存在于土壤中的非晶质二氧化硅颗粒物, 它可以指示气候变化。近年来, 植硅体分析主要应用在农业考古、古气候重建、生物地球化学循环和全球碳汇潜力估算的研究中。世界上作物分布广泛, 作物栽培历史悠久, 研究作物植硅体与植硅体碳, 对探讨农业起源与发展, 估算农田生态系统植硅体碳汇潜力, 应对全球气候变化具有重要意义。本文在查阅国内外与作物植硅体研究相关文献的基础上, 综述了作物植硅体的形态研究、植硅体在考古学中的应用、作物植硅体碳含量与分布、碳汇潜力以及植硅体碳汇在全球碳汇中的贡献, 阐明了作物植硅体未来的研究方向。1)不同作物产生的植硅体形态不同, 而且对作物植硅体形态的研究较多处于优势的禾本科中, 其他作物的研究较少; 2)作物植硅体碳含量与其本身的固碳能力和效率有关, 不完全由植硅体含量的多少决定, 此外, 植硅体碳含量的多少也可能受生长环境和植物基因型的影响; 3)不同生态系统中气候、地表植被、土壤环境等诸多因素直接或间接地影响区域植硅体的碳汇潜力; 4)农田生态系统不同作物植硅体碳汇存在显著差异, 施加硅肥或硅-磷复合肥、种植高植硅体含量和高植硅体碳含量的作物等均可显著提高农田生态系统碳汇潜力。今后应进一步研究不同作物植硅体碳汇, 以帮助识别过去的农业碳汇, 评估当前农业碳汇潜力; 加强植物、根系、土壤迁移规律的探讨, 进一步分析不同作物植硅体积累与碳汇效应; 阐明不同植物吸硅机制、植物根系硅化过程与其植硅体含量、植硅体碳含量间的关系; 了解西南喀斯特生态脆弱区农业碳汇潜力, 以为作物科学种植、农田生态系统碳汇估算等提供参考。

关键词: 作物; 植硅体; 植硅体碳; 碳汇; 农田生态系统

中图分类号: S181

开放科学码(资源服务)标识码(OSID):



The application of crop phytoliths for reviewing occluded organic carbon*

YUAN Faying^{1,3}, WANG Linjiao^{1,2}, SHENG Maoyin^{1,2**}

(1. Institute of Karst Research, Guizhou Normal University, Guiyang 550001, China; 2. National Engineering Research Center for Karst Rocky Desertification Control, Guiyang 550001, China; 3. Guizhou Engineering Laboratory for Karst Rocky Desertification Control and Derivative Industry, Guiyang 550001, China)

* 国家自然科学基金项目(31660136)、贵州省科学技术基金(黔科合基础[2019]1224 号)、贵州省科技计划项目(黔科合平台人才[2017]5726 号)、贵州省优秀青年科技人才支持计划项目(黔科合平台人才[2017]5638)和贵州省普通高等学校科技拔尖人才支持计划(黔教合 KY 字 [2016]064)资助

** 通信作者: 盛茂银, 主要研究方向为喀斯特生态与石漠化治理。E-mail: shmoy@163.com

袁发英, 主要研究方向为喀斯特生态建设与区域经济。E-mail: yuanfaying0230@163.com

收稿日期: 2020-04-23 接受日期: 2020-08-09

* This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (31660136), the Project of Guizhou Science and Technology Fund (Qiankehe Jichu [2019] 1224), the Program of Guizhou Science and Technology (Qiankehe Pingtai Rencai [2017] 5726), the Support Plan for Excellent Young Science and Technology Talents of Guizhou Province (Qiankehe Pingtai Rencai [2017] 5638), and the Support Plan for Science and Technology Top-notch Talents of Guizhou Higher Education Institutions (Qianjiaohe KY zi [2016]064).

** Corresponding author, E-mail: shmoy@163.com

Received Apr. 23, 2020; accepted Aug. 9, 2020

Abstract: Farmland ecosystems are important for maintaining terrestrial ecosystems and environmental homeostasis. As farmland ecosystems develop and evolve, change information is stored in the environment such as in phytoliths, which are stable, non-crystalline minerals in the soil that can indicate climate change. Phytolith analysis has been used for agricultural archaeology, paleoclimate reconstruction, and for estimating biogeochemical cycles and global carbon sequestration potential. Crop cultivation has a long history, and crops are globally distributed. Therefore, studying crop phytoliths and phytolith-occluded carbon is useful for exploring the origin and development of agriculture, estimating farmland ecosystem carbon sequestration, and responding to global climate change. The content and distribution of phytolith-occluded carbon, the phytolith carbon sequestration potential, and the contribution to global carbon sequestrations were analyzed (by literature review and phytolith morphological and archaeological information) to determine future crop phytolith research directions. The results showed that crops had differing phytolith characteristics, and most crop phytolith research had been completed in the family Gramineae. The crop phytolith carbon content was correlated to crop's carbon sequestration capacity and efficiency, and the phytolith-occluded carbon content may also be affected by the growth environment and plant genotypes. The climate, surface vegetation, and soil environment of the ecosystem had direct and indirect effects on the regional phytolith carbon sequestration potential. Significant differences in carbon sequestration between farmland crops were observed. Applying a silicon fertilizer or a silicon-phosphorus compound fertilizer and planting crops with high silicon content can significantly improve the carbon sequestration potential. Future studies should investigate the phytolith carbon sequestration of specific crops to identify past carbon sequestration levels and compare them with the current potential. The plant migration law, root systems, and soil should be improved, and crop silicon levels should be analyzed to determine the effect on accumulation volume and carbon sequestration. Future studies should investigate the silicon absorption mechanism, root silicification process, and phytolith-occluded carbon content of crops and the agricultural carbon sequestration potential of the ecologically fragile karst area in Southwest China to improve farmland ecosystem crop planting and carbon sink estimation.

Keywords: Crops; Phytoliths; Phytolith-occluded carbon (PhytOC); Carbon sequestration; Farmland ecosystem

植硅体(phytoliths)也被称为植物蛋白石,是指植物在生长发育过程中,通过根系吸收土壤溶液中的单硅酸 $[\text{Si}(\text{OH})_4]$ 而后沉淀于植物细胞壁、内腔和细胞壁间的非晶质二氧化硅颗粒物^[1-2]。在植硅体形成过程中,常会在其中包裹一定量的有机碳,这部分碳即为植硅体封存有机碳(phytolith-occluded carbon, PhytOC),简称植硅体碳^[3-4]。植硅体碳有很强的物理抗性,在植物死亡后,植物残体或凋落物在微生物分解作用下,植硅体与植硅体碳能够在土壤中中长期稳定存在^[2-3]。所以,植硅体具有封存大气中 CO_2 、缓解全球气候变化的潜力^[5-7],而植硅体碳汇也被认为是陆地长期封存有机碳的重要机制之一,在陆地生态系统碳循环乃至全球碳循环中有着重要作用。

近年来,植硅体分析广泛应用于古环境^[8]、古气候^[9]、农业考古^[10]、地质学^[11]和生物地球化学循环^[12]等领域。然而,目前已有研究主要是通过测定植物体中植硅体含量、植硅体中封存有机碳含量以及对应植物的现存生物量,估算森林^[13]、湖泊^[14]、湿地^[15]等生态系统的植硅体碳封存潜力,并取得了重大进展。而作为陆地生态系统中植硅体碳汇贡献较大的农田生态系统,分析研究其作物植硅体与植硅体碳的含量与分布、固碳能力显得尤为重要。

全球作物栽培有着悠久的历史,中国是世界最大的作物生产国之一^[16]。农田生态系统中水稻(*Oryza sativa*)、小麦(*Triticum aestivum*)、黍(*Panicum miliaceum*)和粟(*Setaria italica*)等作物植硅体碳含量较高,具有较大的碳汇潜力^[17-18]。已有研究表明,中国农田生态系统碳封存量约占世界农田生态系统的18%,农田作物贡献率达 $40\% \pm 18\%$,主要作物水稻、小麦、玉米(*Zea mays*)的贡献率分别为25%、19%和23%^[17],在全球长期碳汇中扮演着重要角色^[18-19]。国内外关于农田生态系统内作物植硅体与植硅体碳研究也取得了较多成果,但大多数研究致力于对作物个体的分析讨论,而缺乏对农田生态系统的综合探讨。本文通过介绍国内外有关作物植硅体研究的重要进展,进一步明确未来作物植硅体的研究方向,以促进农田生态系统植硅体研究工作的深入发展。

1 作物植硅体形态研究

植硅体形态的识别与描述随着植硅体研究的深入也有了较多的探讨。前人根据统计的几百种现代植物植硅体类型,建立了多个以禾本科(Gramineae)植物植硅体为基础的分类体系^[20-21]。目前,国内普遍采用的是包括弱齿型、多齿型、哑铃型等在内的14个植硅体类别,这些植硅体又分为示冷型、示暖

型^[20]。在温暖、湿润的气候区主要分布方形和扇形植硅体;寒冷、干旱区主要分布棒型和尖型植硅体;在高海拔的湿冷气候区主要分布齿型和帽型植硅体^[15]。然而,直到 2005 年,国际植硅体命名小组提出了基于详细形态类型描述的国际植硅体命名法则,初步统一了各类植硅体的名称。

在中国,作为草本植物的作物有着广阔的种植面积以及悠久的栽培历史,开展作物植硅体形态研究对指示古环境具有重要意义。何蕊等^[22]研究表明,同一竹秆不同部位植硅体大小表现为基部>中部>顶部,说明植物不同部位产生的植硅体形态具有显著差异^[23]。同一植物的不同细胞体可能会产生不同的植

硅体形态,禾本科植物表皮细胞中的短细胞发育的植硅体主要是哑铃型、鞍型,而泡状细胞为扇型^[24]。常见作物稃壳的主要植硅体类型如表 1 所示,作物中黍、粟、稗(*Echinochloa crusgalli*)的主要植硅体类型分别为 3 级稃片 η 型、3 级稃片 Ω 型和 3 级稃片 β 型;小麦中主要植硅体类型包括苞片树枝状和叶片组织乳突状两种;水稻中植硅体类型主要为鱼鳞纹扇型、双峰型和并排哑铃型;玉米中植硅体类型主要有哑铃型、尖型和棒型。说明不同作物产生的植硅体存在差异。总的来说,世界作物类型多种多样,但现在植硅体形态的研究多在常见的处于优势的禾本科中,之后的研究应更多地致力于不常见作物的探究。

表 1 不同作物稃壳主要植硅体类型
Table 1 Main phytolith types in shell of different crop species

作物 Crop	类型 Type	参考文献 Reference
黍 Proso millet	3 级稃片 η 型 η type	[25]
粟 Millet	3 级稃片 Ω 型 Ω type	
稗 Trtf	3 级稃片 β 型 β type	
小麦 Wheat	苞片内树枝状、叶片组织内乳突状 Dendritic type in inflorescence tissue, papilla type in leaf tissue	
水稻 Rice	鱼鳞纹扇型、双峰型、并排哑铃型 Bulliforms, double peaked, parallel bilobate types	
玉米 Maize	哑铃型、尖型、棒型 Bilobate, pointed, elongate types	[26]

2 作物植硅体在考古学中的应用

随着大气 CO_2 浓度的增加,全球气温在不断提高,预测全球变暖可能产生的影响引起了学者的广泛关注。因此,结合过去生态环境的变化预测未来生态环境对气候的响应成为目前全球气候变化研究的重要组成部分。农业活动是人类社会发展到一定阶段的产物,是人类文明产生和发展的基础,也是考古学研究的热点问题^[27]。农业生产过程中产生的凋落物、植物残体等随时间的推移储存于土壤中,会记录古农业的发展过程及环境演变过程。这些记录对分析农业的发展进程、认识先民物质文化生活与社会生产状况、重建古环境、揭示人类与环境相互关系等具有十分重要的意义。植硅体形态多样且易于分辨,具有抗氧化能力强、原地沉积、保存期长、分布广泛、容易保存、能够反映母源植物类型等特点,记录了历史农业时期环境变化的信息,是探索古农业的重要工具^[28]。

通过获取、鉴定和分析遗址内外出土的植硅体,可以探索农业考古学文化演变及社会形态等问题。例如,Weisskopf 等^[29]通过植硅体分析长江下游新石

器时期稻田水资源利用模式,发现包括杂草组合在内的植物残骸,可以表征湿润、干燥的生长条件,揭示水稻种植从淹水田和排水田到大规模集中灌溉稻田的变化;Weisskopf^[30]研究表明河南考古遗址中水稻与粟的耕作方式存在差异;Zuo 等^[10]利用植硅体 ^{14}C 测定水稻遗骸的年代,揭示了全新世初期的水稻驯化可能开始于长江下游尚山;Ranere 等^[31]通过对玉米和南瓜(*Cucurbita moschata*)遗骸的分析,介绍了墨西哥巴尔萨斯河谷中部全新世早期玉米和南瓜驯化的文化和年代背景。根据植硅体本身特性,探讨农业的起源、作物的驯化过程以及作物在不同时期的耕作方式等研究为现代农业考古提供了研究方法,同时也为现代社会了解古农业发展提供了重要证据,推进了农业考古学的研究进程。相关研究已广泛应用在我国浙江^[32]、河南^[33]、陕西^[34]等省的考古学研究中。

3 作物植硅体封存有机碳含量、分布与碳汇估算

植硅体具有抗氧化能力强、耐酸、耐高温(植硅体在 $<700^\circ\text{C}$ 加热,其物理、化学性质不会有很大的

变化, 加热到 1 050 , 植硅体才能达到结晶程度) 等特点^[1,20], 说明植硅体碳相较于陆地生态系统内其他形式的碳更易稳定保存于土壤中。也有研究者提出植硅体碳不参与大气碳循环^[3], 因此, 植硅体碳基本不会掺杂其他类型碳, 使其成为陆地生态系统内土壤长期固碳的重要机制。农田生态系统具有悠久的历史, 全球分布范围广, 目前, 关于农田生态系统作物植硅体的分析研究主要在植被与土壤之间开展。因此, 在当前全球变暖情况下, 探讨不同作物植硅体固碳潜力、植硅体碳的含量与分布, 揭示其对全球碳汇的贡献, 有助于抑制碳的释放和合理调控作物的种植结构与分布, 有利于缓解 CO₂ 浓度过高的局面^[5]。

3.1 作物植硅体封存有机碳含量与分布

3.1.1 作物植株封存有机碳含量与分布

植硅体主要由二氧化硅、水和有机碳等组成, 其中有机碳含量约为 0.1%~6%。植物体内植硅体主要赋存于植物根、茎、叶等表皮细胞中, 其中大多数植物叶片植硅体含量最高^[23]。Ding 等^[35]的研究则表明, 水稻稻壳里面的植硅体含量总体高于叶片。不同植物组织中的植硅体受时间影响, 其含量在 7 月最高, 而后随时间的变化其含量呈逐渐降低的趋势^[36]。在耕地、湿地、草原、森林等只要有植被存在的地方就会产生植硅体, 喜硅植物封存的碳也较多^[15]。但由于不同植物根系吸收硅的能力大小不一致^[37]以及不同生态系统内植被、水文、气候条件的差异, 植物中植硅体与植硅体碳的含量也有所区别。

国内外学者对不同作物类型植硅体碳含量与分

布进行了研究。李自民等^[38]对嘉兴稻田生态系统中 5 个品种水稻进行研究, 发现不同品种水稻各器官中植硅体含量均表现出鞘>叶>茎>根>穗的趋势, 且水稻各器官植硅体含量差异显著, 平均值为 15.63 g·kg⁻¹。Sun 等^[39]对我国栽培的 51 个水稻品种进行比较, 得出水稻各器官中植硅体含量为 9.69~175.52 g·kg⁻¹, 且各品种各器官植硅体含量差异显著。胡晓薇等^[40]选取浙江杭州临安区的青山和玲珑山的毛竹(*Phyllostachys edulis*)为研究对象, 分析得出毛竹鲜叶中植硅体和植硅体碳含量分别为 23.45~101.07 g·kg⁻¹和 0.73~1.98 g·kg⁻¹。Zuo 等^[18]对分布于北京、辽宁、甘肃 3 地的黍和粟的研究表明, 植硅体碳的百分含量平均值分别为 1.92%和 2.51%。Prajapati 等^[41]研究表明, 水稻植硅体碳含量在秸秆(1.4%~3.3%)中分布最高。Song 等^[17]总结了我国主要农作物的植硅体碳含量(表 2), 表明水稻、甘蔗(*Saccharum officinarum*)、小麦、玉米及其他谷类的植硅体碳含量较高, 而其他作物类型相对较低; 从整个农田生态系统来看, 其他作物类型的植硅体碳含量虽然较低, 但由于他们属于农田生态系统的重要组成部分, 其固碳能力对估算农田生态系统碳汇以及陆地生态系统碳汇具有重要意义。此外, Zuo 等^[18]得出黍和粟的植硅体碳含量和干物质之比与植硅体中封存的碳含量有关, 证实了作物植硅体碳含量与其本身的固碳能力和效率有关, 不完全由植硅体含量的多少决定。同时也说明植硅体碳含量的多少可能受植硅体含量、植硅体固碳效率、生长环境和植物基因型的影响。

表 2 不同作物植硅体碳含量^[17]
Table 2 Contents of phytolith-occluded carbon in different crop species^[17]

作物 Crop	种植面积 Planting area (×10 ⁶ hm ²)	器官 Organ	植硅体碳含量 Phytolith-occluded carbon content (%)
水稻 Rice	30.1	茎、叶鞘、叶 Stem, sheath, leaf	0.25±0.07
小麦 Wheat	24.3	茎、叶鞘、叶 Stem, sheath, leaf	0.16±0.07
玉米 Maize	33.5	茎、叶鞘、叶 Stem, sheath, leaf	0.16±0.06
其他谷类 Other cereals	6.2	茎、叶鞘、叶 Stem, sheath, leaf	0.17±0.09
豆类 Soybeans	10.7	茎、叶 Stem, leaf	0.02±0.01
薯类 Tubers	8.9	茎、叶 Stem, leaf	0.02±0.01
油料作物 Oil-bearing crops	13.9	茎、叶 Stem, leaf	0.08±0.07
棉花 Cotton	5.0	茎、叶 Stem, leaf	0.02±0.01
甘蔗 Sugarcane	1.9	叶鞘、叶 Sheath, leaf	0.25±0.07

3.1.2 农田生态系统土壤封存有机碳含量与分布

植物从土壤中吸收硅, 通过光合作用封存大气中的 CO₂, 被植物生长发育过程中产生的植硅体包裹着形成植硅体碳。植物死亡分解后, 植硅体及植

硅体碳可以长期保存在土壤层中^[3], 是土壤的重要组成部分。已有研究表明植硅体碳约占土壤稳定性碳的 15%~30%^[15]。土壤中的植硅体主要来源于表层植物凋落物或植物残体的分解转移到植物根部甚至

土壤中,且植硅体含量主要富集于表层土,一般呈现随土层深度不断增加而含量逐渐降低的分布格局^[42]。世界上农作物的种植历史悠久,土壤层中植硅体碳含量一定十分丰富。因此,开展农田生态系统内土壤植硅体碳的研究,对维持全球 CO₂ 平衡,准确估算农田生态系统封存碳的潜力及探讨其对全球碳汇的贡献具有重要意义。

罗东海等^[43]探讨了不同土地利用方式下植硅体碳含量在不同深度土壤剖面(0~20 cm、20~40 cm、40~60 cm 和 60~100 cm)的分布规律,结果表明,在 0~100 cm 土壤深度内,各土地利用方式土壤植硅体含量和植硅体碳含量总体呈现出随着土层深度的增加而下降的趋势,这与 Zuo 等^[44]的研究结果一致。陈留美等^[45]通过分析浙江慈溪滨海沉积物上发育的 5 个不同植稻年龄的水耕人为土剖面得出,水耕人为土时间序列土壤中植硅体的含量为 3.67~17.51 g·kg⁻¹。李自民等^[38]通过对种植 50 a 稻田 0~10 cm 土壤研究发现,土壤中植硅体积累通量为 40.38 kg·hm⁻²·a⁻¹,植硅体包裹大气中 CO₂ 的通量约为 1.48~8.88 kg·hm⁻²·a⁻¹。此外,根据 AL-Ismaily^[46]估计,种植在砂壤土上的小麦植硅体的生产量约为 280 kg·hm⁻²·a⁻¹,59 季小麦累计生产无定形植硅体硅约为 7 300 kg·hm⁻² (假设小麦秸秆含有干质量二氧化硅为 45 g·kg⁻¹)。整体来说,土壤植硅体的研究在森林、草地、湿地、农田等生态系统中已有较多成果^[47-48]。然而,世界作物种植面积广,加上人类活动、自然侵蚀与植硅体自身的迁移,土壤中植硅体含量的分布存在差异。另外,对土壤中植硅体含量变化的探究有利于加强农田生态系统农作物的选择与配置,进而增加农田生态系统的植硅体碳汇。

3.2 作物植硅体封存有机碳碳汇估算

植硅体分布范围广,陆地生态系统内植被、土壤都富含植硅体,且富硅能力越强的植物植硅体含量越高^[2],尤其是禾本科植物,总趋势表现为稻亚科 (Oryzoideae)> 竹亚科 (Bambusoideae)> 黍亚科

(Panicoideae)> 早熟禾亚科 (Pooideae)> 画眉草亚科 (Eragrostoideae)^[49]。植硅体碳以其较强的稳定性与不参与大气碳循环的特点能够安全地存在于土壤中数千年,随着全球 CO₂ 增加、气温上升,科学家对植硅体碳这种通过植物封存有机碳的方式产生了极大兴趣,许多学者对不同生态系统以及同一生态系统内不同单体的碳汇潜力进行了研究和估算。

3.2.1 不同作物物种碳汇潜力差异

农作物受其本身特性及生长环境的影响,植硅体与植硅体碳含量差异明显。Zuo 等^[18]对 8 个品种的粟和黍研究发现,粟的植硅体碳平均封存量为 (0.023±0.015) t(CO₂)·hm⁻²·a⁻¹,黍的植硅体碳平均封存量为 (0.02±0.01) t(CO₂)·hm⁻²·a⁻¹;而根据 Parr 等^[50]的研究,甘蔗植硅体碳平均封存量为 0.12~0.36 t(CO₂)·hm⁻²·a⁻¹,这可能是因为粟、黍和甘蔗的植硅体碳含量(分别约为 1.29 g·kg⁻¹、1.36 g·kg⁻¹、1.90 g·kg⁻¹)和生物量(分别约为 4.789 t·hm⁻²、4.086 t·hm⁻²、7.961 t·hm⁻²)的大小不同。相关研究表明,水稻^[51]、小麦^[52]、玉米^[17]的植硅体含量通常比其他作物高,如油料作物(2.57%)、棉花(*Gossypium* spp.) (0.79%)^[17]。根据国家统计局统计数据,2018 年我国小麦、稻谷、玉米等作物种植面积分别为 2 427 万 hm²、3 019 万 hm² 和 4 213 万 hm²,占全国粮食种植的 83%,种植面积广,碳汇潜力比较大。

如表 3 所示,我国甘蔗的植硅体碳产生通量 [96.0 kg(CO₂)·hm⁻²·a⁻¹] 高于水稻 [67.8 kg(CO₂)·hm⁻²·a⁻¹]、玉米 [44.4 kg(CO₂)·hm⁻²·a⁻¹] 和小麦 [37.5 kg(CO₂)·hm⁻²·a⁻¹]。但由于在我国水稻、玉米和小麦种植面积大于甘蔗种植面积,因此,这 3 种作物的植硅体碳产生量高于甘蔗,甘蔗又明显高于棉花。此外, Sun 等^[51]通过对 35 个水稻籽壳中植硅体碳汇潜力进行评估,结果表明水稻籽壳植硅体碳封存约为 0.45~3.46 kg(CO₂)·hm⁻²·a⁻¹。中国耕地中作物(主要为小麦和玉米)吸收的 CO₂ 比美国和印度多,且主要分布在中国的中南部(28%)和东部(26%)^[17]。

表 3 不同作物植硅体碳产生通量和产生量^[17]
Table 3 The phytolith-occluded carbon production flux and rate of different crop species^[17]

作物 Crop	种植面积 Planting area (×10 ⁶ hm ²)	植硅体碳产生通量 Phytolith-occluded carbon production flux [kg(CO ₂)·hm ⁻² ·a ⁻¹]	植硅体碳产生量 Phytolith-occluded carbon production rate [×10 ⁶ t(CO ₂)·a ⁻¹]
水稻 Rice	30.1	67.8	2.04
小麦 Wheat	24.3	37.5	0.91
玉米 Maize	33.5	44.4	1.49
甘蔗 Sugarcane	1.9	96.0	0.19
棉花 Cotton	5.0	16.9	0.08

3.2.2 农田生态系统与自然生态系统植硅体碳汇潜力对比

不同生态系统中气候、地表植被、土壤环境等诸多因素直接或间接地影响区域植硅体的碳汇潜力^[48]。根据潘文杰等^[48]的研究, 陆地生态系统内的草地、农田、森林、湿地和灌丛的植硅体碳产生通量与植硅体碳产生量存在明显差异。植硅体碳产生通量湿地 $[(40.0 \pm 37.0) \text{ kg}(\text{CO}_2) \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}] >$ 农田 $[(36.0 \pm 13.0) \text{ kg}(\text{CO}_2) \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}] >$ 森林 $[(13.6 \pm 3.1) \text{ kg}(\text{CO}_2) \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}] >$ 灌丛 $[(6.0 \pm 1.0) \text{ kg}(\text{CO}_2) \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}]$, 植硅体碳产生量农田 $[(4.9 \pm 1.7) \times 10^6 \text{ t}(\text{CO}_2) \cdot \text{a}^{-1}] >$ 森林 $[(1.9 \pm 0.4) \times 10^6 \text{ t}(\text{CO}_2) \cdot \text{a}^{-1}] >$ 灌丛 $[(1.3 \pm 0.3) \times 10^6 \text{ t}(\text{CO}_2) \cdot \text{a}^{-1}] >$ 湿地 $[(0.6 \pm 0.5) \times 10^6 \text{ t}(\text{CO}_2) \cdot \text{a}^{-1}] =$ 草地 $[(0.6 \pm 0.1) \times 10^6 \text{ t}(\text{CO}_2) \cdot \text{a}^{-1}]$ ^[48], 这表明不同类型的植被、气候、水文等状况可能会影响植物植硅体碳汇量^[53], 也侧面说明对农田生态系统碳汇潜力估算具有较高的价值。此外, 也有研究表明, 通过施加硅肥或硅-磷复合肥可以增加植物有效硅含量, 从而提高植物植硅体含量^[54-56], 进而增加植物植硅体碳封存量。因此, 为了增加农田植硅体碳汇, 可筛选高植硅体含量、高植硅体碳的作物如水稻、甘蔗等进行广泛种植。

3.3 作物植硅体碳汇在全球碳汇中的贡献

植硅体碳形成于植物生理活动中^[3], 植硅体内碳封存可以缓解大气中 CO_2 的增加, 是一个长期稳定的陆地碳库, 在全球陆地生态系统硅-碳耦合生物地球化学循环中起关键作用^[4]。前人研究表明, 植物的植硅体碳含量可能与其植硅体本身的固碳能力和效率相关^[18], 我国不同作物碳封存速率甘蔗 $>$ 小麦 $>$ 水稻 $>$ 黍和粟^[53], 而且不同作物碳封存潜力差异明显(表 3)。研究表明, 假如在全球 $4.1 \times 10^9 \text{ hm}^2$ 的潜在耕地上都种植竹类植物, 按竹类植物中等植硅体碳封存速率 $0.36 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 计算, 全球植硅体每年可增加封存 $1.5 \times 10^9 \text{ t CO}_2$, 占当前大气 CO_2 总增长排放量的 11%^[3]; 根据 Zuo 等^[18]的研究, 如果以 2006 年底全国耕地面积为 $1.30 \times 10^8 \text{ hm}^2$ 计算, 我国占全国耕地面积 48% 的旱作农业耕地作物植硅体每年可封存约 $2.37 \times 10^6 \text{ t CO}_2$; 孟赐福等^[57]的研究也表明, 全球大麦(*Hordeum vulgare*)、玉米、水稻、高粱(*Sorghum bicolor*)、甘蔗和小麦每年生产的植硅体碳高达 $(5.08 \sim 12.01) \times 10^6 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$ 。这些结果足以证明, 作物在生长过程中封存的植硅体碳将会有效地减少全球 CO_2 的含量。

尽管很早就有学者发现大多数禾本科草本植物的农作物中含有植硅体^[32], 但一直以来忽视了其对

碳循环研究的重要性, 深入理解作物植硅体碳的封闭机制并研究不同作物植硅体碳含量及其碳汇潜力, 将有助于准确估算全球植硅体碳封存速率。增加作物残体的归还量, 有助于增加植硅体积累通量, 提高农田长期碳汇, 因此, 我们可以在作物内合理配置作物品种, 通过种植植硅体含量较高的水稻、玉米、小麦等作物增加植硅体碳封存量, 还可以在耕地施加适量硅肥等以提高植硅体的碳封存量, 从而缓解气候变化^[58]。

4 研究展望

近年来, 国内外学者关于植硅体分析的研究主要集中于古环境、古气候重建与农业考古方面, 对于作物来说, 更多关注于主要作物的形态、含量、分布及其在农业考古方面的研究。全球气候的变化影响着作物的生产潜力和产量^[59], 而有关作物系统植硅体的研究相对较少, 今后的研究可从以下几个方面进行。

1) 全球耕地面积大, 农作物分布广且作物类型多样, 有必要进一步探讨不同作物植硅体碳汇的重要性, 以帮助识别过去的农业碳汇, 评估当前农业碳汇潜力。目前, 对作物植硅体的研究仍然集中在水稻、玉米和小麦等主要农作物上, 而关于马铃薯(*Solanum tuberosum*)、花生(*Arachis hypogaea*)、茶(*Camellia sinensis*)等作物的研究还鲜见报道, 今后, 应开展其他作物类型的研究, 阐明农业碳汇对全球碳汇研究的重要性。

2) 国内外众多学者研究了水稻、小麦、甘蔗等农作物的植硅体形态、含量及其分布, 但大多数研究在作物-土壤之间, 而对于连接土壤-植被的植物根系则鲜有报道。土壤是植被养分的来源, 而植物根系是植物从土壤吸收养分、水分的主要器官, 探讨植硅体在植物、根系、土壤的迁移规律, 有助于进一步分析不同作物植硅体积累与碳汇效应。

3) 草地、森林、湿地等生态系统内关于植硅体与植硅体碳研究已有大量成果, 但对生态系统内植硅体周转情况及影响其碳汇潜力因素的研究还不够深入。为充分发挥植硅体在全球碳汇中的潜力, 今后应加强各种环境因素对植硅体碳汇潜力影响方面的研究。此外, 植物体内所含的转运蛋白的协同作用可以促进植物硅的积累和高效运转^[60-63], 且植硅体在硅-碳耦合循环中起关键作用。因此, 研究不同植物吸硅机制、根系硅化过程与其植硅体、植硅体碳含量间的关系尤为重要。

4)中国东北、中部、西北部地区关于植硅体的研究已有大量成果。西南喀斯特地区生态脆弱,喀斯特作用强烈,土壤水土保持能力差、土壤贫瘠且水土流失迅速^[64-65],可能会影响喀斯特地区植被与土壤中硅含量的储存以及土壤中植硅体的迁移,进而影响喀斯特地区碳封存潜力。另外,Yang等^[66]研究表明,地形坡度和坡位对区域植硅体和植硅体碳汇也有显著影响,西南喀斯特地区地处云贵高原,山体高差大,作物的种植面积相对较广,可开展西南喀斯特不同作物植硅体含量、碳汇的研究以及分析不同海拔高度植硅体含量的变化,探讨生态脆弱区不同生态系统的碳积累过程,有利于地区农业研究的深入,为生态脆弱区碳汇潜力估算提供理论参考。

参考文献 References

- PIPERNO D R. Phytoliths: A Comprehensive Guide for Archaeologists and Paleoecologists[M]. Lanham: Altamira Press, 2006, 238
- HODSON M J. The development of phytoliths in plants and its influence on their chemistry and isotopic composition. Implications for palaeoecology and archaeology[J]. Journal of Archaeological Science, 2016, 68: 62–69
- PARR J F, SULLIVAN L A. Soil carbon sequestration in phytoliths[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2005, 37(1): 117–124
- 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[J]. Earth-Science Reviews, 2012, 115(4): 319–331
- PARR J, SULLIVAN L, CHEN B H, et al. Carbon bio-sequestration within the phytoliths of economic bamboo species[J]. Global Change Biology, 2010, 16(10): 2661–2667
- ZHANG X D, SONG Z L, HAO Q, et al. Storage of soil phytoliths and phytolith-occluded carbon along a precipitation gradient in grasslands of northern China[J]. Geoderma, 2020, 364: 114–200
- WU Y, WANG C S. Extended depth of focus image for phytolith analysis[J]. Journal of Archaeological Science, 2009, 36(10): 2253–2257
- LÜ H Y, WU N Q, YANG X D, et al. Phytoliths as quantitative indicators for the reconstruction of past environmental conditions in China : Phytolith-based transfer functions[J]. Quaternary Science Reviews, 2006, 25(9/10): 945–959
- BREMOND L, ALEXANDRE A, WOOLLER M J, et al. Phytolith indices as proxies of grass subfamilies on East African tropical mountains[J]. Global and Planetary Change, 2008, 61(3/4): 209–224
- ZUO X X, LÜ H Y, JIANG L P, et al. Dating rice remains through phytolith carbon-14 study reveals domestication at the beginning of the Holocene[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2017, 114(25): 6486–6491
- 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 H Y, JIA J W, WANG W M, et al. On the meaning of phytolith and its classification in Gramineae[J]. Acta Micropalaeontologica Sinica, 2002, 19(4): 389–396
- SONG Z L, MCGROUTHER K, WANG H L. Occurrence, turnover and carbon sequestration potential of phytoliths in terrestrial ecosystems[J]. Earth-Science Reviews, 2016, 158: 19–30
- 应雨琪, 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[J]. 自然资源学报, 2015, 30(1): 133–140
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[J]. Journal of Natural Resources, 2015, 30(1): 133–140
- 刘星辰, 计勇, 周娟, 等. 湖泊湿地生态系统植硅体指示古环境研究进展[J]. 南昌工程学院学报, 2019, 38(4): 41–46
LIU X C, JI Y, ZHOU J, et al. Research progress of phytosilicon applied to paleoenvironment in lake wetland ecosystem[J]. Journal of Nanchang Institute of Technology, 2019, 38(4): 41–46
- 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[J]. 生态学杂志, 2017, 36(12): 3602–3609
WANG D, WANG A B, LONG G F, et al. Research advances of phytolith and phytolith-occluded-carbon in wetland ecosystems[J]. Chinese Journal of Ecology, 2017, 36(12): 3602–3609
- PIAO S L, FANG J Y, CIAIS P, et al. The carbon balance of terrestrial ecosystems in China[J]. Nature, 2009, 458(7241): 1009–1013
- SONG Z L, WANG H L, STRONG P J, et al. Phytolith carbon sequestration in China's croplands[J]. European Journal of Agronomy, 2014, 53: 10–15
- ZUO X X, LÜ H Y. Carbon sequestration within millet phytoliths from dry-farming of crops in China[J]. Chinese Science Bulletin, 2011, 56(32): 3451–3456
- LI Z M, SONG Z L, PARR J F, et al. Occluded C in rice phytoliths: Implications to biogeochemical carbon sequestration[J]. Plant and Soil, 2013, 370(1/2): 615–623
- 王永吉, 吕厚远. 植物硅酸体研究及应用[M]. 北京: 海洋出版社, 1993, 4
WANG Y J, LÜ H Y. Phytoliths Study and Its Application[M]. Beijing: China Ocean Press, 1993, 4
- BROWN D A. Prospects and limits of a phytolith key for grasses in the central United States[J]. Journal of Archaeological Science, 1984, 11(4): 345–368
- 何蕊, 邱坚, 罗蓓, 等. 慈竹植硅体形态及其发育变化研究[J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2018, 46(4): 68–74
HE R, QIU J, LUO B, et al. Developmental changes and morphology of phytolith in *Bambusa emeiensis*[J]. Journal of

- Northwest A&F University: Natural Science Edition, 2018, 46(4): 68–74
- [23] 张新荣, 胡克, 王东坡, 等. 植硅体研究及其应用的讨论[J]. 世界地质, 2004, 23(2): 112–117
ZHANG X R, HU K, WANG D P, et al. Discussion on research and application of phytolith[J]. Global Geology, 2004, 23(2): 112–117
- [24] BOZARTH S R. Classification of opal phytoliths formed in selected dicotyledons native to the Great Plains[M]//RAPP JR G, MULHOLLAND S C. Phytolith Systematics. Boston: Springer, 1992: 193–241
- [25] 温昌辉, 吕厚远, 左昕昕, 等. 表土植硅体研究进展[J]. 中国科学: 地球科学, 2018, 48(9): 1125–1140
WEN C H, LÜ H Y, ZUO X X, et al. Advance of research on modern soil phytolith[J]. Science China Earth Sciences, 2018, 48(9): 1125–1140
- [26] 李仁成, 谭淑慧, 覃翔, 等. 玉米生长周期内植硅体的变化研究[J]. 微体古生物学报, 2016, 33(2): 170–179
LI R C, TAN S H, QIN X, et al. Studies on the phytolith variation in maize during its growing season[J]. Acta Micropalaeontologica Sinica, 2016, 33(2): 170–179
- [27] 葛利花, 王振祥, 靳桂云. 植硅体分析与稻作农业[J]. 农业考古, 2019, (4): 13–22
GE L H, WANG Z X, JIN G Y. Application of phytolith analysis in paddy rice cultivation in China[J]. Agricultural Archaeology, 2019, (4): 13–22
- [28] GU Y S, WANG H L, HUANG X Y, et al. Phytolith records of the climate change since the past 15000 years in the middle reach of the Yangtze River in China[J]. Frontiers of Earth Science, 2012, 6(1): 10–17
- [29] WEISSKOPF A, QIN L, DING J L, et al. Phytoliths and rice: From wet to dry and back again in the Neolithic Lower Yangtze[J]. Antiquity, 2015, 89(347): 1051–1063
- [30] WEISSKOPF A. A wet and dry story: Distinguishing rice and millet arable systems using phytoliths[J]. Vegetation History and Archaeobotany, 2017, 26: 99–109
- [31] RANERE A J, PIPERNO D R, HOLST I, et al. The cultural and chronological context of early Holocene maize and squash domestication in the Central Balsas River Valley, Mexico[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2009, 106(13): 5014–5018
- [32] 金和天, 潘岩, 杨颖亮, 等. 浙江余姚田螺山遗址土壤植硅体 AMS14C 测年初步研究[J]. 第四纪研究, 2014, 34(1): 1–7
JIN H T, PAN Y, YANG Y L, et al. A primary study on AMS 14C dating of phytolith at Tianluoshan Site, Zhejiang Province[J]. Quaternary Sciences, 2014, 34(1): 1–7
- [33] 郭荣臻. 河南新密史前先民食物结构的考古学观察[J]. 农业考古, 2018, (3): 26–32
GUO R Z. Archaeological observations on the food structure of the prehistoric ancestors in Xinmi of Henan[J]. Agricultural Archaeology, 2018, (3): 26–32
- [34] 刘莉, 王佳静, 赵昊, 等. 陕西蓝田新街遗址仰韶文化晚期陶器残留物分析: 酿造谷芽酒的新证据[J]. 农业考古, 2018, (1): 7–15
LIU L, WANG J J, ZHAO H, et al. Analysis on pottery residue of the Late Yangshao culture in Xinjie Site of Lantian, Shaanxi: New evidence of Guya beer brewing[J]. Agricultural Archaeology, 2018, (1): 7–15
- [35] DING T P, MA G R, SHUI M X, et al. Silicon isotope study on rice plants from the Zhejiang Province, China[J]. Chemical Geology, 2005, 218(1/2): 41–50
- [36] 赵玉莹. 草地生态系统植硅体碳汇及其控制机制[D]. 杭州: 浙江农林大学, 2016
ZHAO Y Y. Research on silicon distribution and phytolith carbon sequestration of grassland ecosystem[D]. Hangzhou: Zhejiang A&F University, 2016
- [37] MA J F, YAMAJI N. Silicon uptake and accumulation in higher plants[J]. Trends in Plant Science, 2006, 11(8): 392–397
- [38] 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 Z M, SONG Z L, JIANG P K. The production and accumulation of phytoliths in rice ecosystems: A case study to Jiaying paddy field[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(22): 7197–7203
- [39] SUN X, LIU Q, ZHAO G M, et al. Comparison of phytolith-occluded carbon in 51 main cultivated rice (*Oryza sativa*) cultivars of China[J]. RSC Advances, 2017, 7(86): 54726–54733
- [40] 胡晓薇, 黄程鹏, 黄张婷, 等. 毛竹林植硅体碳封存速率估算的最佳鲜叶采样时间[J]. 应用生态学报, 2019, 30(9): 2949–2954
HU X W, HUANG C P, HUANG Z T, et al. Sampling time of living leaf for estimating phytolith-occluded organic carbon sequestration rate of *Phyllostachys edulis*[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2019, 30(9): 2949–2954
- [41] PRAJAPATI K, RAJENDIRAN S, COUMAR M V, et al. Bio-sequestration of carbon in rice phytoliths[J]. National Academy Science Letters, 2015, 38(2): 129–133
- [42] 杨杰, 吴家森, 姜培坤, 等. 苦竹林植硅体碳与硅的研究[J]. 自然资源学报, 2016, 31(2): 299–309
YANG J, WU J S, JIANG P K, et al. Study on phytolith-occluded organic carbon and silicon in a *Pleioblastus amarus* forest[J]. Journal of Natural Resources, 2016, 31(2): 299–309
- [43] 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[J]. 环境科学, 2019, 40(9): 4270–4277
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[J]. Environmental Science, 2019, 40(9): 4270–4277
- [44] ZUO X X, LÜ H Y, GU Z Y. Distribution of soil phytolith-occluded carbon in the Chinese Loess Plateau and its implications for silica-carbon cycles[J]. Plant and Soil, 2014, 374(1/2): 223–232
- [45] 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): 1025–1030
CHEN L M, ZHANG G L. Phytoliths and its occluded organic

- carbon in a stagnic anthrosols chronosequence[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2011, 42(5): 1025–1030
- [46] AL-ISMAILY S S. Genesis of silica-enriched agricultural pans in soils managed under wheat-fallow cropping systems[D]. Corvallis: Oregon State University, 1997
- [47] NGUYEN M N, DULTZ S, MEHARG A, et al. Phytolith content in Vietnamese paddy soils in relation to soil properties[J]. Geoderma, 2019, 333: 200–213
- [48] 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[J]. 地球科学进展, 2017, 32(8): 859–866
- PAN W J, YANG X M, ZHANG X D, et al. Advances in study of phytolith carbon sequestration in terrestrial ecosystems of China[J]. Advances in Earth Science, 2017, 32(8): 859–866
- [49] 介冬梅, 刘红梅, 葛勇, 等. 长白山泥炭湿地主要植物植硅体形态特征研究[J]. 第四纪研究, 2011, 31(1): 163–170
- JIE D M, LIU H M, GE Y, et al. Phytolith analysis: Morphological characteristics of peatland plant species in Changbai Mountains[J]. Quaternary Sciences, 2011, 31(1): 163–170
- [50] PARR J, SULLIVAN L, QUIRK R. Sugarcane phytoliths: Encapsulation and sequestration of a long-lived carbon fraction[J]. Sugar Tech, 2009, 11(1): 17–21
- [51] SUN X, LIU Q, GU J, et al. Evaluation of the occluded carbon within husk phytoliths of 35 rice cultivars[J]. Frontiers of Earth Science, 2016, 10(4): 683–690
- [52] PARR J F, SULLIVAN L A. Phytolith occluded carbon and silica variability in wheat cultivars[J]. Plant and Soil, 2011, 342(1/2): 165–171
- [53] 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[J]. Global Change Biology, 2013, 19(9): 2907–2915
- [54] LI Z M, GUO F S, CORNELIS J T, et al. Combined silicon-phosphorus fertilization affects the biomass and phytolith stock of rice plants[J]. Frontiers in Plant Science, 2020, 11: 67
- [55] SONG A L, NING D F, FAN F L, et al. The potential for carbon bio-sequestration in China's paddy rice (*Oryza sativa* L.) as impacted by slag-based silicate fertilizer[J]. Scientific Reports, 2015, 5(1): 17354
- [56] SUN X, LIU Q, TANG T T, et al. Silicon fertilizer application promotes phytolith accumulation in rice plants[J]. Frontiers in Plant Science, 2019, 10: 425
- [57] 孟赐福, 姜培坤, 徐秋芳, 等. 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[J]. 浙江农林大学学报, 2013, 30(6): 921–929
- MENG C F, JIANG P K, XU Q F, et al. PhytOC in plant ecological system and its important roles in the global soil carbon sink[J]. Journal of Zhejiang A&F University, 2013, 30(6): 921–929
- [58] 许子娟, 左昕昕, 范百龄, 等. 植硅体圈闭碳地球化学研究进展[J]. 地球科学进展, 2017, 32(2): 151–159
- XU Z J, ZUO X X, FAN B L, et al. Advances in geochemical study of phytolith occluded carbon[J]. Advances in Earth Science, 2017, 32(2): 151–159
- [59] 卢燕宇, 孙维, 唐为安, 等. 气候变化背景下安徽省冬小麦气候生产潜力和胁迫风险研究[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2020, 28(1): 17–30
- LU Y Y, SUN W, TANG W A, et al. Climatic potential productivity and stress risk of winter wheat under the background of climate change in Anhui Province[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2020, 28(1): 17–30
- [60] MA J F, YAMAJI N. A cooperative system of silicon transport in plants[J]. Trends in Plant Science, 2015, 20(7): 435–442
- [61] YAMAJI N, MA J F. A transporter at the node responsible for intervascular transfer of silicon in rice[J]. The Plant Cell, 2009, 21(9): 2878–2883
- [62] YAMAJI N, SAKURAI G, MITANI-UENO N, et al. Orchestration of three transporters and distinct vascular structures in node for intervascular transfer of silicon in rice[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2015, 112(36): 11401–11406
- [63] PONTIGO S, RIBERA A, GIANFREDI L, et al. Silicon in vascular plants: Uptake, transport and its influence on mineral stress under acidic conditions[J]. Planta, 2015, 242(1): 23–37
- [64] 李菲, 刘杰, 张习敏, 等. 喀斯特适生植物的共生微生物的研究进展[J]. 贵州师范大学学报: 自然科学版, 2019, 37(3): 1–5
- LI F, LIU J, ZHANG X M, et al. Research advances on symbiotic microbes of karst adapted plants[J]. Journal of Guizhou Normal University: Natural Sciences, 2019, 37(3): 1–5
- [65] 吴清林, 梁虹, 熊康宁, 等. 喀斯特地区水土流失监测方法评述[J]. 贵州师范大学学报: 自然科学版, 2020, 38(3): 30–38
- WU Q L, LIANG H, XIONG K N, et al. Reviews of soil leakage loss monitoring in karst areas[J]. Journal of Guizhou Normal University: Natural Sciences, 2020, 38(3): 30–38
- [66] YANG X M, SONG Z L, SULLIVAN L, et al. Topographic control on phytolith carbon sequestration in moso bamboo (*Phyllostachys pubescens*) ecosystems[J]. Carbon Management, 2016, 7(1/2): 105–112