

DOI: 10.11766/trxb202005310409

刘丽君, 黄张婷, 孟赐福, 姜培坤. 中国不同生态系统土壤硅的研究进展[J]. 土壤学报, 2021, 58 (1): 31–41.

LIU Lijun, HUANG Zhangting, MENG Cifu, JIANG Peikun. Research Progress on Soil Silicon in Different Ecosystems in China[J]. Acta Pedologica Sinica, 2021, 58 (1): 31–41.

中国不同生态系统土壤硅的研究进展*

刘丽君^{1, 3}, 黄张婷^{1, 2, 3}, 孟赐福^{3†}, 姜培坤^{1, 2, 3†}

(1. 浙江农林大学亚热带森林培育国家重点实验室, 浙江临安 311300; 2. 浙江省竹资源与高效利用协同创新中心, 浙江临安 311300; 3. 浙江农林大学环境与资源学院, 浙江临安 311300)

摘要: 硅是土壤和岩石的一种基本成分, 具有促进植物的生长、增强植物抗性、参与生物地球化学循环过程、调节全球碳循环和缓解全球气候变暖趋势等方面的作用。本文在全面介绍土壤硅的形态、有效性及生物循环特征基础上, 分析了我国不同生态系统中土壤硅及植硅体含量状况, 阐明了影响土壤有效硅及植硅体的因素, 重点阐述了近年来有关稻田土壤有效硅与水稻生长及森林土壤有效硅与林分植硅体形成关系, 以及植硅体的形成机制及其在全球土壤碳汇中的重要作用, 并提出需要进一步研究的问题, 可为未来我国开展土壤有效硅与植硅体研究提供借鉴。

关键词: 生态系统; 土壤硅; 有效硅; 植硅体; 影响因素; 中国

中图分类号: S157.1 **文献标志码:** A

Research Progress on Soil Silicon in Different Ecosystems in China

LIU Lijun^{1, 3}, HUANG Zhangting^{1, 2, 3}, MENG Cifu^{3†}, JIANG Peikun^{1, 2, 3†}

(1. State Key Laboratory of Subtropical Silviculture, Zhejiang A&F University, Lin'an, Zhejiang 311300, China; 2. Zhejiang Provincial Collaborative Innovation Center for Bamboo Resources and High-efficiency Utilization, Lin'an, Zhejiang 311300, China; 3. School of Environmental and Resource Sciences, Zhejiang A&F University, Lin'an, Zhejiang 311300, China)

Abstract: Silicon is a basic component of soil and rock. It can promote plant growth, enhance plant resistance, participate in biogeochemical cycle, regulate global carbon cycle and mitigate global warming trend. Based on the comprehensive introduction of fractions, availability, and biological cycling characteristics of soil silicon, this paper analyzes the contents of silicon and phytoliths in the soils of different ecosystems in China, and expounds the differences and influencing factors of available silicon and phytolith contents in the soils of different ecosystems in China. The research progress on the relationship between available silicon in paddy soils and rice growth, the relationship between available silicon in forest soils and the formation of phytoliths and in the forests are mainly discussed in this paper. The mechanisms of phytolith formation and its important role in global soil carbon sink are also pointed out. Some issues which are to be further studied proposed in the last section provide a good reference for the development of study on soil available silicon and phytoliths in China in the future.

Key words: Ecosystem; Soil silicon; Available silicon; Phytolith; Influencing factor; China

* 国家自然科学基金项目 (41471197) 资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 41471197)

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail: cifu@21cn.com; jiangpeikun@zafu.edu.cn

作者简介: 刘丽君 (1993—), 女, 硕士研究生, 从事森林土壤与气候变化研究。E-mail: lijunliuzj@163.com

收稿日期: 2020-05-31; 收到修改稿日期: 2020-07-26; 网络首发日期 (www.cnki.net): 2020-08-21

硅 (Si) 是土壤的基本成分, 也是土壤中最丰富的元素之一, 其丰度约为 29.5%, 广泛存在于 370 多个成岩矿物及植物体中^[1-2]。硅虽不是必需元素, 但其在植物生长发育过程中的作用是多方面的, 主要表现在增加作物产量和提高产品品质及增强作物抗逆性等^[3-4]。增强作物抗逆性主要包括抗贫瘠胁迫、盐分胁迫、干旱胁迫、重金属胁迫及机械胁迫等^[5]。硅在陆地生态系统内的迁移转化是维持地球化学循环的重要过程, 因而具有重要的生态和环境意义。硅通过 CO₂ 从大气圈到岩石圈转移来调节大气中 CO₂ 的浓度, 从而减缓大气中 CO₂ 的浓度^[6-9]。土壤 Si 库中的黏土矿物硅、溶解态硅 (Dissolved silicon, DSi) 和淀积在其他矿物表面的无定形硅均源自硅酸盐矿物的化学风化过程^[10]。陆地植被每年固定硅的量 (60~180 Tmol)^[11]。植物在陆地生态系统和水生生态系统硅的循环中均起着非常重要的作用^[12]。陆地植物从土壤生物硅 (Biogenic silicon, BSi) 库吸收的硅量远超过从岩石风化释放吸收的硅量。

鉴于不同生态系统的土壤全硅和有效硅含量因成土母质气候、植物、施肥等因素而造成巨大的差异, 而不同植物对硅的需求也各不相同, 本文综述了不同生态系统土壤有效硅和植硅体含量的差异及影响因素, 重点阐述了最近几年来有关稻田土壤有效硅与水稻生长及森林土壤有效硅与林分植硅体形成关系的研究进展, 并提出了需要进一步研究的问题。

1 土壤中的硅

1.1 土壤中的硅库

硅在植物生态系统中主要分布在植被、土壤有机质、土壤矿物质和土壤溶液中。生态系统中的硅, 均来源于矿物风化及火山热液排放。全球硅可以分成原生硅库和次生硅库。前者是指大陆和海洋地壳岩石中的含硅矿物, 后者是指岩石经风化过程产生的含硅组分, 主要包括溶解态硅以及大陆和海洋中进一步通过地质、生物、化学等过程新形成的各种含硅物质。

1.2 土壤中硅存在的形态

土壤中的硅形态是以有机态和无机态存在的, 以无机态硅为主。土体中硅主要包括矿物储库和生物储库。生物硅库是从陆地生态系统到水生生态系

统 Si 通量的关键因素, 而且是水溶性 Si 短期变化的主要驱动因素^[13]。交换态硅与水溶态硅保持着动态平衡。水溶态硅是指溶于土壤溶液的硅, 通常以单硅酸 (H₄SiO₄) 形式存在, 是土壤溶液的主要成分。地球表面硅酸盐矿物质的风化是土壤中硅的主要来源。可提取态硅包括水溶态硅、交换态硅、胶体态硅和无定形硅。分步提取土壤中的 4 种形态硅 (AcidNaAc-Si、H₂O₂-Si、NH₂OH·HCl-Si 和 NaOHSi) 分别代表有效硅、有机结合态硅、铁锰 (氢) 氧化物结合态硅和无定形硅^[14]。蔡彦彬^[15]的研究显示, 5 种不同岩性类型土壤中主要可提取态的硅形态以无定形硅 (77.31%~94.16%) 为主。

1.3 土壤有效硅

土壤中硅的存在形态对土壤中硅的植物有效性以及淋溶流失行为有重要控制作用。土壤中的有效硅包括水溶态、吸附态和部分矿物态硅等^[9]。土壤有效硅含量是衡量土壤供硅能力的重要指标^[16]。可被植物直接利用的有效硅仅占全硅的 0.02%~0.04%。土壤中有有效硅的含量一般仅为 50~250 mg·kg⁻¹。全球每年有 210~240 亿 t 的硅被植物从土壤中吸收^[17]。影响土壤中有有效硅的含量的因素有:

1) 成土母质及过程: 土壤中有有效硅的含量主要由成土母质的种类及成土过程决定^[18]。山东省不同土类有效硅含量土壤有效硅含量从高到低依次为: 褐土 (319.2 mg·kg⁻¹)、砂姜黑土 (297.5 mg·kg⁻¹)、盐土 (242.8 mg·kg⁻¹)、潮土 (227.8 mg·kg⁻¹)、棕壤 (150.6 mg·kg⁻¹)、粗骨土 (113.3 mg·kg⁻¹);

2) pH 及氧化铁铝: 土壤中的硅酸盐、石英等固态硅在强酸性 (pH < 2) 或碱性 (pH > 8.5) 时溶解度相对较大;

3) 土壤 Eh: 在低 Eh 的土壤溶液中, 与铁结合的硅被还原成溶解态硅;

4) 微生物: 微生物能够通过分解植物凋落物使其中的硅返还到土壤中;

5) 温度: 土壤溶液中有有效硅含量与土壤温度呈正相关关系。

1.4 植物-土壤硅循环

在硅的生物循环中, 储存在地壳中硅可通过风化释放出来, 最后经微生物的分解作用由动植物残体或排泄物返回环境。硅酸盐矿物的化学风化是地球表层所有次生 Si 的来源。植物生长过程中吸收土壤中的 DSi 形成生物 Si, 然后经微生物分解过程返

还给土壤；地表径流将流域陆源 Si 以悬移质 Si 和 DSi 的形式输入河流、海洋。

在各种物理、化学和生物过程的作用下，硅会在土壤、植物系统中发生迁移转化，并以各种形式的含硅矿物组分或形态保存下来。植物以溶解态单硅酸 ($\text{Si}(\text{OH})_4$) 的形式从土壤溶液中吸收溶解态硅，并通过木质部导管随着蒸腾流输送到植物各器官形成生物硅，植物体死亡后，随着凋落物的分解而进入土壤中。

2 我国不同生态系统中土壤硅

我国幅员辽阔，植物生态和土壤类型众多，由北到南横跨寒带、温带、亚热带和热带，因此土壤全硅和有效硅的含量变幅极大。不同生态类型的土壤全硅含量变动于 $244.5\sim 757.5 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，而土壤有效硅含量变动于 $2.1\sim 681.4 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (表 1)。随着土壤酸化和作物收获以及森林采伐的不断加强，土壤中可提取态硅因植被吸收和淋溶作用而呈亏损趋势。我国土壤有效硅含量变化范围为 $15.7\sim 725.5 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，缺硅土壤 (土壤有效硅含量低于 $100 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) 占农业土壤面积的 40% 以上^[19]。

2.1 湿地与草地

湿地土壤也是重要的硅汇。硅在湿地生态系统中的迁移转化是一个反复的过程。湿地类型和所在地域不同，土壤全硅含量差异极大。我国白洋淀湿地土壤全硅含量变动于 $506\sim 555 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，平均含量为 $528 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ^[21]，但西溪湿地土壤全硅平均含量仅 $113 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ^[22]。然而，这两个湿地土壤的有效硅的含量却差异很小 (表 1)。东北芦苇湿地土壤 pH 与有效硅为正相关^[40]。

草地退化可以显著影响全球草地 Si 循环。施肥和避免过度放牧等可使土壤中非晶硅的含量和储存增加一倍，从而提高土壤 Si 的生物利用度 17%^[40]。

2.2 稻田

2.2.1 稻田土壤硅素状况 中国水稻种植面积 3 300 多万 hm^2 ，占全国粮食作物播种面积的 1/4，占全世界水稻面积的 23%，其产量约占全国粮食总产量的 1/2，占全世界水稻总产量的 39%^[43]。黄智刚和胡克林^[37]的研究显示，稻田土壤全硅含量为 $244\sim 235 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，平均为 $96 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。据估算，高产水稻一个生长季可从土壤中吸收带走硅 (SiO_2) $75\sim$

$130 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ^[44]。总体而言，水稻土生态系统的输出大于输入。在表 1 所列的几个生态体系中，水稻土的有效硅含量较低，其范围为 $2.7\sim 150.2 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，9 个研究结果的平均为 $162.3 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (表 1)。

我国存在大面积的缺硅水稻土，水稻土有效硅含量低于临界指标 ($100 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) 的土壤占总面积的 50% 以上。湖北、湖南、安徽土壤中有有效硅含量低于 $100 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的面积占 40% 左右^[45-46]。据估算，我国长江以南的缺硅水稻土就有 $1.33\times 10^6 \text{ hm}^2$ ^[47]。江西土壤有效硅含量低于 $100 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的面积占 80% 以上^[48]，福建土壤有效硅含量多在 $100 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 以下^[49]。

2.2.2 影响水稻土壤有效硅含量的因素 影响因素主要有：

地带性：我国水稻土有效硅含量总体呈由南向北增加的趋势 (表 1)。

土壤类型：张翠珍等^[27]对山东省水稻土的研究结果表明，湿潮土、砂姜黑土、盐化潮土、棕壤的有效硅含量分别为 328.2 、 306.5 、 170.4 、 $110.9 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ；宁波市耕地有效硅含量：滨海盐土 ($133 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) 高于潮土 ($110 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) 和 水稻土 ($61 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)^[31]。

地貌类型：不同地貌的土壤有效硅含量有效硅含量次序递减：滨海平原 ($109 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)、水网平原 ($67 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)、河谷平原 ($50 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)、丘陵山区 ($49 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)^[31]。

环境温度：温度的升高有利于土壤可溶性硅的释放。黑土型水稻土中，在 $5\sim 40 \text{ }^\circ\text{C}$ 范围内，温度每提高 $1 \text{ }^\circ\text{C}$ ，可溶性硅的释放量增加 $0.64 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

成土母质：安徽省发育于不同成土母质的土壤按如下次序递减：淮河冲积物 ($163 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)、花岗岩 ($101 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)、 Q_3 黄土 ($98 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)、长江冲积物 ($41 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)、山河冲积物 ($26 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)、湖积物 ($22 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)^[50]。

土壤性质：pH 越高，黏粒含量越多，土壤有效硅含量越高。土壤可溶性硅与土壤溶液 pH 呈正相关^[51]，许景钢等^[23]的研究结果则相反，当 pH 在 $4.5\sim 9.0$ 范围内，黑土型水稻土中可溶性硅释放随 pH 的升高呈下降趋势。施用磷肥可增加土壤中水溶性硅和活性硅的含量，从而提高硅的有效性^[24]。

水浆管理：许景钢等^[23]的研究显示，水稻土中，有效硅含量以渗育水稻土最高 ($88 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)，淹育水稻土最低 ($49 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)。

施肥：施硅钙钾镁肥可使 $0\sim 15 \text{ cm}$ 和 $15\sim$

表 1 中国不同生态系统中土壤 SiO₂ 和有效硅含量Table 1 The contents of SiO₂ and available Si in the soils of different ecosystems in China

生态系统 Ecosystem	地区 Area	样品数 Sample number	SiO ₂ / (g·kg ⁻¹)		有效硅 Available Si/(mg·kg ⁻¹)		文献 Reference
			范围 Range	均值 Mean	范围 Range	均值 Mean	
			草地 Grassland	内蒙东部	12	697~758	
湿地 Wetland	白洋淀	7	506~555	528	—	—	[21]
	西溪湿地	6	—	—	—	—	[22]
	黑龙江	1	—	—	—	—	[23]
	辽宁	4	—	—	140~273	236	[24]
	湖北潜江	100	244~235	96	—	—	[25]
稻田 Rice field	黄河流域	1	—	—	—	128	[26]
稻田、旱地 Rice field, upland	山东	3	—	—	111~328	229	[27]
	洞庭湖区	146	—	—	21~574	170	[28]
	海南岛	179	—	—	2.1~245	32	[29]
	辽宁	24	—	—	150~432	231	[30]
	浙江宁波	747	—	—	10~405	68	[31]
稻田、旱地 Rice field, upland	江苏如皋	290	—	—	—	144	[32]
苹果园 Apple orchard	山东	1818	—	—	15.3~780	234	[18]
	陕西	159	—	—	75~980	391	[33]
烟区 Tobacco area	新疆石河子	205	—	—	113~748	313	[34]
	陕西洛川	180	—	—	63~77	67	[35]
蔗区 Sugarcane area	贵州遵义	87	—	—	30~445	170	[36]
	广西	175	—	—	10~375	118	[37]
菜地 Vegetable land	辽宁	7	—	—	62~335	127	[38]
	亚热带林 Subtropical forest	漳江流域	—	—	—	34~67	59
毛竹林 <i>Phyllostachys edulis</i> forest	浙江临安	8	182.3~225	208.6	—	—	[40]
丛生竹林 <i>Sympodial bamboo</i> forest	浙江	5	286~879.5	788	42~238	92	[15]
	福建	14	—	—	0.6~11.4	12.4	[41]
雷竹林 <i>Phyllostachys praecox</i> forest	南方五省	8	440~584	534	19~87	44	[42]
雷竹林 <i>Phyllostachys praecox</i> forest	西天目	12	633~687	6545	840~31	171	[14]

30 cm 土层土壤 pH 分别提高了 1.22~1.58 和 0.35~0.64 个单位^[52]。稻壳是最有效的土壤改良剂,因为它们释放的有效硅量最高^[53]。

2.2.3 水稻土壤有效硅含量的测定方法及缺硅的临界值 通常将有效硅作为衡量土壤供硅能力的指

标。测定土壤有效硅含量的方法很多,但其测量结果差异较大。土样浸提剂及土壤的初始 pH 不同,测得的土壤中有有效硅含量差别可达 10 倍以上^[54]。目前有效硅测定方法有乙酸缓冲液浸提-硅钼蓝比色法;柠檬酸浸提-硅钼蓝比色法;稀硫酸浸提-硅钼

蓝比色法,以乙酸缓冲液浸提法和柠檬酸浸提法应用比较广泛^[55-56]。经过相关性分析,在测量碱性土壤中有效硅含量时,0.01 mol·L⁻¹ 硫酸法较其他方较好^[57]。于淼^[58]对辽宁地区水稻土有效硅 6 种浸提剂的比较显示,水浸法测得的土壤有效硅含量与水稻植相对产量相关性最好。安徽省水稻土有效硅测定以浓度 1% 柠檬酸法和 pH 4.0 醋酸-醋酸钠浸提剂最好^[46]。

目前一般认为,土壤有效硅含量小于 50 mg·kg⁻¹ 为严重缺硅土壤,50~100 mg·kg⁻¹ 为缺硅土壤,大于 100 mg·kg⁻¹ 为不缺硅土壤^[46]。我国大多将有效硅含量低于 100 mg·kg⁻¹ 作为临界指标^[49, 51, 59-61]。然而,许多研究表明,有效硅含量高于 100 mg·kg⁻¹ 时,施用硅肥仍有增产效果,如商全玉等^[62]在有效硅含量为 119.5 mg·kg⁻¹ 的稻田中施用硅肥可以使水稻产量提高,同时改善稻米品质;吴英等^[63]在黑龙江有效硅含量为 200~300 mg·kg⁻¹ 的水稻土施硅仍有增产效果;张翠珍等^[27]对山东省水稻土研究结果表明,湿潮土、砂姜黑土、盐化潮土、棕壤的有效硅含量分别为 328.2、306.5、170.4、110.9 mg·kg⁻¹ 时,施硅对水稻均有增产效果。

2.3 蔗区、烟区、设施蔬菜

甘蔗的吸硅量是其所有营养元素吸收量中最多的。每年能从土壤中带走 500~700 kg Si。广西中部蔗区土壤有效硅平均含量 117.7 mg·kg⁻¹,接近土壤临界值 100 mg·kg⁻¹。蔗区土壤有效硅含量变幅(10~375 mg·kg⁻¹)较大;在 175 个土样中,低于临界值的占 52%^[37]。

洛川县永乡阿寺村 5 年生苹果园土壤的土壤有效硅含量 66~77 mg·kg⁻¹,平均 67 mg·kg⁻¹。5、20、60 年生苹果园土壤的土壤有效硅含量没有显著性差异^[35]。

贵州遵义县和仁怀市 87 份烟区耕层土样的分析结果表明^[36],土壤有效硅含量为 30~445 mg·kg⁻¹,平均值为 170 mg·kg⁻¹。土壤有效硅含量低于 100 mg·kg⁻¹ 的土壤样品占 21%。不同类型土壤有效硅含量平均值:黄壤最高(191 mg·kg⁻¹),石灰土次之(168 mg·kg⁻¹),水稻土最低(147 mg·kg⁻¹)。不同母质发育的土壤有效硅含量从高到低依次为:页岩(230 mg·kg⁻¹)、石灰岩(182 mg·kg⁻¹)、白云岩(168 mg·kg⁻¹)、泥灰岩(153 mg·kg⁻¹)、白云质灰岩(148 mg·kg⁻¹)、第四纪黏土(120 mg·kg⁻¹)、黄色砂岩(30 mg·kg⁻¹)。在酸性至中性土壤中,有效硅含

量与 pH 存在极显著的正相关。

设施蔬菜栽培具有采用人工控制、集约化程度和复种指数高、蔬菜种类单一等特点。设施蔬菜施肥量大、灌溉频繁、土壤受外界气候变化影响小。设施内部形成了一个特殊的生态微环境导致了连作障碍的加剧和土壤环境的恶化。氮肥或生理酸性化肥施用过多致使土壤酸根离子积累过多,pH 明显下降,造成土壤酸化^[64]。赵庚星等^[65]在山东青州市耕地不同利用方式的土壤有硅含量的比较发现,菜地的土壤硅含量(200 mg·kg⁻¹)显著低于粮地(>30 mg·kg⁻¹);菜地中,露天菜地土壤硅含量(198 mg·kg⁻¹)高于设施菜地(188 mg·kg⁻¹)。

王程秀等^[38]的研究发现,温室土壤水溶态硅、活性硅含量与有效硅含量之间分别呈极显著的直线和对数正相关。0~20 cm 土层土壤有效硅含量与土壤 pH 之间呈极显著的幂函数正相关。

2.4 森林

不同的森林系统中,可溶性硅的分布和来源不同。我国森林生态系统土壤全硅含量为 56~788 g·kg⁻¹,平均含量 464 g·kg⁻¹,有效硅含量 0.6~84.0 mg·kg⁻¹,平均含量 79.8 mg·kg⁻¹(表 1)。

在森林生态系统硅循环中,参与循环的硅多来自于硅酸体的释放而非含硅岩石的风化。研究表明,热带雨林生态系统中,来自于硅酸体所释放的硅是岩石风化所释放的硅的 2 倍多^[12]。热带森林土壤中可溶性和无定形 Si 浓度在局部和区域尺度上的变化与土壤风化阶段、土壤化学和降雨密切相关^[66]。土壤全硅含量主要取决于土壤母质。不同岩性条件下发育的各种土壤的总硅含量差异很大,最低玄武岩仅 286 g·kg⁻¹,而最高凝灰岩却高达 879 g·kg⁻¹,但有效硅含量却是玄武岩的最高,凝灰岩的最低^[15]。刘俊霞^[67]对浙江安吉雷竹林下发育不同母岩的研究也证明了这一点:土壤 SiO₂ 含量从高到低依次为:花岗岩(537 g·kg⁻¹)、砂页岩(522 g·kg⁻¹)、凝灰岩(424 g·kg⁻¹);浙江省临安不同林分下土壤中的 SiO₂ 含量从高到低依次为:毛竹林(225 g·kg⁻¹)、马尾松林(219 g·kg⁻¹)、杉木林(197 g·kg⁻¹)、青冈林(193 g·kg⁻¹)。

张金林^[68]研究发现,麻竹林下 0~100 cm 土体中的 SiO₂ 均随土层深度的增加而降低。赵送来等^[14]的研究显示,雷竹林表层土壤无定形硅含量(2.6~5.2 g·kg⁻¹)随种植年限的增加呈上升趋势,雷竹林

土壤不同土层有效态硅的含量 ($84\sim 318\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) 随种植年限和有机物覆盖年限的增加呈先下降后上升趋势。森林植被可提高土壤中含硅岩石的风化率。Schaller 等^[66]的研究表明, 土壤矿物质的风化强度, 落叶林生态系统至少是针叶林生态系统的 5.3 倍, 落叶林生态系统地上生物量中硅含量也是针叶林的 2 倍多。

不同气候带和不同森林类型在土壤所累积的硅通量差异极大: 热带和亚热带竹林土壤中硅的累积通量 ($\text{Si } 210\sim 485\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$) 远高于赤道雨林土壤中硅 ($4\sim 6\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$), 温带草原土壤中的累积通量 ($4\sim 16\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$) 以及温带落叶阔叶林土壤的累积通量 ($0\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$) 和针叶林土壤的累积通量 ($1\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$)。覆盖有机物可同时促进无定形硅向有效态硅、有机结合态硅、铁锰(氢)氧化物结合态硅转变。赵送来等^[14]的研究发现, 覆盖有机物可提高雷竹林土壤硅的有效性。毛竹生长过程中易吸收土壤中的有效态硅而使其损耗, 使得竹林土壤中有效硅的含量降低。同时毛竹根部分泌的有机酸会加速结晶态硅酸盐的分解风化又增加了无定形硅^[69]。

3 我国不同生态系统土壤植硅体

3.1 植硅体的形成机制及其在全球土壤碳汇中的重要作用

植物从土壤中吸收的可溶性单硅酸 (H_4SiO_4), 通过蒸腾作用在植物体内沉淀并硅化而成植硅体 (phytolith)^[70-71]。植物残体腐烂分解后释放到土壤表层成为土壤中的植硅体。土壤中植硅体量通常低于土壤质量的 3.0%^[72]。研究表明, 在热带雨林中由枯枝落叶等释放到土壤中的植硅体有 92.5% 溶解后又被植物重新吸收, 仅 7.5% 的植硅体保存在林地土壤中, 成为稳定硅库的一部分^[12, 73]。

植物体内的植硅体在其形成过程中包裹了部分有机碳 (0.1%~6.0%) 而成为植硅体闭蓄态碳 (Phytolith-occluded organic carbon, Phyt OC), 简称植硅体碳。植硅体碳在植硅体抗腐蚀、抗氧化的保护下, 能长时间的保存在土壤中。土壤植硅体碳占土壤总碳的比例将随着土壤年龄的增加而升高。全球平均土壤有机碳积累率达 $24\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$, 其中植硅体态碳的封存率占 15%~37%^[73]。虽然植硅体碳仅占 SOC 的 0.72%~9.26%^[70], 但其周转期要较其

他 SOC 长两个数量级以上, 因此植硅体碳稳定性对全球陆地土壤碳库贡献比植硅体碳封存速率要大得多^[71, 74]。植硅体碳是陆地生态系统中千年甚至万年尺度的固碳重要机制之一, 在调节全球碳循环和缓解全球气候变暖趋势等方面具有重要作用^[8, 70]。

3.2 我国不同生态系统中土壤植硅体含量

我国不同生态系统中的植硅体含量的变动范围为 $1.5\sim 68.3\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 平均为 $23.6\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (表 2)。土壤植硅体仅占土壤全硅含量的 0.51%~4.80%^[75]。对草原、稻田、湿地生态系统土壤中植硅体分布的研究发现, 随着土壤深度的增加, 植硅体占全硅的比例逐渐减少^[74-77]。但杨杰等^[77]的研究发现, 苦竹林土壤中植硅体含量的变化范围在 $6.7\sim 32.1\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间。发育于供 Si 能力较强的流纹岩 (SiO_2 73.37%~77.08%) 的土壤植硅体含量显著高于发育于砂页岩和凝灰岩土壤植硅体含量^[78]。

3.3 我国不同生态系统中植硅体的积累及其影响因素

许多研究发现, 气候、植物种类、土壤条件 (例如 pH, 溶解态硅浓度) 及植硅体本身化学组成成分通常会影 响植硅体的生物地球化学稳定性^[12, 66, 81-84]。Alexandre 等^[12]报道植物产生的大量植硅体中, 大约 8% 具有较强的抗分解和抗氧化能力。

植硅体在土壤中的积累速率主要取决于植物残体输入和植硅体自身生物地球化学稳定性之间的动态平衡^[12, 66, 81]。不同生态系统中植硅体的积累速率差异很大, 例如, 在生物地球化学稳定性相对较低的热带雨林土壤植硅体的积累通量为 $4\sim 6\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ ^[12], 而温带落叶阔叶和针叶森林土壤中的植硅体积累通量仅分别为 0 和 $1\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ ^[66]; 草原生态系统中的植硅体积累通量为 $4\sim 16\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ ^[12]。相反, 在一些亚热带和温带植物凋落量输入相对较大的生态系统中, 其植硅体积累速率相对较高。例如: 在种植 50 年的稻田 0~10 cm 土壤中植硅体的积累通量为 $40.4\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ ^[83], 而在土壤沉积年龄为 100 a 的白洋淀芦苇湿地生态系统中, 0~15 cm 土壤植硅体积累通量高达 $337\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ ^[21]。

3.4 土壤中硅含量与植物植硅体含量之间的相关性

植物体中的 Si 约有 90% 都是以植硅体的形式存在, 而植硅体中的含 Si 量大于 90%^[83]。由于植物中植硅体含量与 Si 含量之间存在的显著正相关性^[7, 38, 40, 78-79], 因此, 国内外一些学者用植物中的

表 2 中国不同生态系统中土壤的 SiO₂ 和植硅体含量Table 2 The contents of SiO₂ and phytoliths in the soils of different ecosystems in China

生态系统 Ecosystem	地区 Area	样品数 Sample number	SiO ₂ / (g·kg ⁻¹)		植硅体 Phytolith/ (g·kg ⁻¹)		文献 Reference
			范围 Range	均值 Mean	范围 Rang	均值 Mean	
湿地 ^①	白洋淀	7	506~555	528	14.8~25.1	20.0	[21]
热带林 ^②	雷琼地区	5	329~415	333.8	1.54~21.95	6.9	[75]
	海南岛	3	256~401	341	5.9~54.0	20.5	[76]
竹林 ^③	浙江	—	479~680	581	8.0~125	35.6	[79]
麻竹林 ^④	福建南靖	4	172~351	245	14.7~38.3	24.8	[68]
绿竹林 ^⑤	浙江苍南	4	427~446	338	10.6~43.0	20.2	[80]
雷竹林 ^⑥	浙江安吉	12	439~545	429	19.8~68.3	41.3	[67]
苦竹林 ^⑦	杭州余杭	10	56~59	—	6.7~32.1	—	[77]

①Wetland; ②Tropical forest; ③Bamboo forest; ④*Dendrocalamus latiflorus* Munro forest; ⑤*Dendrocalamopsis oldhami* forest; ⑥*Phyllostachys praecox* forest; ⑦*Pleioblastus amarus* forest.

Si 含量来估算植物中植硅体含量^[7, 84]。

由于植物中 Si 来自土壤，因此植物植硅体含量与土壤中硅含量之间也存在着显著的相关性。杨杰^[77]等和尹帅^[41]的研究发现，竹类植硅体的含量并非取决于土壤中总硅含量，而是取决于土壤中植物可利用硅。

4 需要进一步研究的问题

1) 系统研究不同生态系统和不同类型土壤的硅素状况，尤其是土壤有效硅含量和植硅体含量，以便根据土壤有效硅含量和植硅体含量之间的转换系数更精准地估算不同生态系统和不同类型土壤的硅储量及土壤封存长期稳定的植硅体碳的潜力；

2) 利用不同时间序列的不同生态系统的土壤剖面，研究我国不同生态系统土壤硅的演变趋势及硅在土壤剖面上的移动，以便为生态系统土壤硅施肥管理提供科学依据；

3) 为了使植硅体碳汇在全球碳汇中发挥最大的潜力，应开展不同生态系统，尤其是不同林分下土壤植硅体碳稳定性的研究，以便更准确估算和评价全球植物的植硅体碳 (Phyt OC) 的封存潜力；

4) 鉴于设施蔬菜生态系统集约化程度和复种指数高及施肥量大、灌溉频繁等特点，今后应当加强设施蔬菜生态系统土壤硅素状况和不同蔬菜的土壤缺硅临界值的研究；

5) 植硅体作为陆地生态系统硅—碳耦合生物地球化学循环的重要参与者，应当重视森林生态系统和草地生态系统中植硅体碳封存潜力较高的植物的研究；

6) 应当进一步开展通过合理施用硅肥、覆盖有机物等有效管理措施来提高植物植硅体碳封存潜力的研究。

参考文献 (References)

- [1] Tubana B S, Babu T, Datnoff L E. A review of silicon in soils and plants and its role in US agriculture: History and future perspectives[J]. *Soil Science*, 2016, 181 (9/10): 393—411.
- [2] Sommer M, Kaczorek D, Kuzyakov Y, et al. Silicon pools and fluxes in soils and landscapes—A review[J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2006, 169 (4): 582. <https://doi.org/10.1002/jpln.200690016>.
- [3] Wang M H, Nie J Q, Ren Y, et al. Effects of different application rates of silicon fertilizer on rice growth[J]. *Guangdong Agricultural Sciences*, 2020, 47(2): 61—67. [王茂辉, 聂金泉, 任勇, 等. 不同硅肥用量对水稻生长的影响研究[J]. *广东农业科学*, 2020, 47(2): 61—67.]
- [4] Epstein E. Silicon[J]. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*, 1999, 50 (1): 641—664.
- [5] Xiong W, Hu Y K, Song Y B, et al. Ecological roles of silicon in higher plants[J]. *Journal of Hangzhou Normal University: Natural Science Edition*, 2017, 16 (2): 164—172. [熊蔚, 胡宇坤, 宋垚彬, 等. 高等植物中硅元素的生态学作用[J]. *杭州师范大学学报: 自然科学版*, 2017, 16 (2): 164—172.]

- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 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. [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.]
- [9] Li R C, Wen M D, Tao X Y, et al. Advance of study on chemical composition of Phytolith[J]. *Quaternary Sciences*, 2020, 40 (1): 283—293. [李仁成, 温梦丹, 陶欣悦, 等. 植硅体化学组成研究进展[J]. *第四纪研究*, 2020, 40 (1): 283—293.]
- [10] Conley D J. Terrestrial ecosystems and the global biogeochemical silica cycle[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2002, 16 (4): 68-1-68-8. <https://doi.org/10.1029/2002GB001894>.
- [11] Treguer P, Nelson D M, van Bennekom A J, et al. The silica balance in the world ocean: A reestimate[J]. *Science*, 1995, 268 (5209): 375—379.
- [12] Alexandre A, Meunier J D, Colin F, et al. Plant impact on the biogeochemical cycle of silicon and related weathering processes[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1997, 61 (3): 677—682.
- [13] Puppe D, Höhn A, Kaczorek D, et al. How big is the influence of biogenic silicon pools on short-term changes in water-soluble silicon in soils? Implications from a study of a 10-year-old soil-plant system[J]. *Biogeosciences*, 2017, 14 (22): 5239—5252.
- [14] Zhao S L, Song Z L, Jiang P K, et al. Fractions of silicon in soils of intensively managed *Phyllostachys praeceox* stands and their plant-availability[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2012, 49 (2): 331—338. [赵送来, 宋照亮, 姜培坤, 等. 西天目集约经营雷竹林土壤硅存在形态与植物有效性研究[J]. *土壤学报*, 2012, 49 (2): 331—338.]
- [15] Cai Y B. Effects of different land-use types and soil parent materials on silicon and aluminum forms in the subtropical forest soils[D]. Hangzhou: Zhejiang A & F University, 2013. [蔡彦彬. 土地利用方式和岩性对森林土壤和铝形态影响研究[D]. 杭州: 浙江农林大学, 2013.]
- [16] Ma C H, Yang L, Hu S Y. Silicon supplying ability of soil and advances of silicon fertilizer research[J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 2009, 48 (4): 987—989. [马朝红, 杨利, 胡时友. 土壤供硅能力与硅肥应用研究进展[J]. *湖北农业科学*, 2009, 48 (4): 987—989.]
- [17] Xing X R, Zhang L. Review of the studies on silicon nutrition of plants[J]. *Chinese Bulletin of Botany*, 1998, 33 (2): 33. [邢雪荣, 张蕾. 植物的硅素营养研究综述[J]. *植物学通报*, 1998, 33 (2): 33.]
- [18] Quan W J, Zou Q, Du C X, et al. Available silicon content in soil and its distribution in Shandong Province[J]. *Shandong Agricultural Sciences*, 1999, 31 (5): 11—14. [泉维洁, 邹强, 杜春祥, 等. 山东省土壤有效硅含量及分布[J]. *山东农业科学*, 1999, 31 (5): 11—14.]
- [19] Feng Y Q. Silicon fertilizer: A essential element for soil[J]. *China Petroleum and Chemical Industry*, 2001 (1): 33—35, 57. [冯元琦. 硅肥——土壤不可或缺[J]. *中国石油和化工*, 2001 (1): 33—35, 57.]
- [20] Pan W J. Study on the accumulation of soil PhytOC and its factors in grasslands of Northern China[D]. Hangzhou: Zhejiang A & F University, 2017. [潘文杰. 中国北方草地土壤植硅体碳累积及其影响因素研究[D]. 杭州: 浙江农林大学, 2017.]
- [21] Li Z M, Song Z L, Li B L. Generation and accumulation of phytoliths in Baiyangdian reed wetland ecosystems[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2013, 50 (3): 632—636. [李自民, 宋照亮, 李蓓蕾. 白洋淀芦苇湿地生态系统中植硅体的产生和积累研究[J]. *土壤学报*, 2013, 50 (3): 632—636.]
- [22] Zhao Y Y. Research on silicon distribution and phytolith carbon sequestration of grassland ecosystem[D]. Hangzhou: Zhejiang A & F University, 2016. [赵玉营. 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.]
- [23] Xu J G, Yang D Z, Sun T, et al. Effect study on environment factors of paddy phaeozem soluble silicon in Xiangfang district of Harbin City[J]. *Modern Agricultural Science and Technology*, 2016 (14): 194—196. [许景钢, 杨大志, 孙涛, 等. 哈尔滨市香坊区黑土型水稻土可溶性硅受环境因子的影响研究[J]. *现代农业科技*, 2016 (14): 194—196.]
- [24] Hu K W, Zhao X S, Guan L Z, et al. Study on interaction and forms of silicon and phosphate in paddy soil[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2002, 33 (4): 272—274. [胡克伟, 肇雪松, 关连珠, 等. 水稻土中硅磷元素的存在形态及其相互影响研究[J]. *土壤通报*, 2002, 33 (4): 272—274.]
- [25] Ding H H, Wu J Q, Liu K Z, et al. Distribution characteristics of available silicon in paddy soil of Qianjiang City[J]. *Modern Agricultural Science and Technology*, 2015 (22): 204—205. [丁亨虎, 吴家琼, 刘克芝, 等. 潜江市水稻土有效硅分布特征[J]. *现代农业科技*, 2015 (22): 204—205.]
- [26] Yang J T, Gao E M, Huo X T, et al. Study on the characteristics of absorption and distribution of Si in rice[J]. *Journal of Henan Agricultural University*, 2000,

- 34(1): 37—39, 42. [杨建堂, 高尔明, 霍晓婷, 等. 沿黄稻区水稻硅素吸收、分配特点研究[J]. 河南农业大学学报, 2000, 34(1): 37—39, 42.]
- [27] Zhang C Z, Shao C Q, Meng K, et al. Available silicon content in paddy soil and silicon fertilizer effects in Shandong Province[J]. Shandong Agricultural Sciences, 1999, 31(6): 10—12, 18. [张翠珍, 邵长泉, 孟凯, 等. 山东省水稻土有效硅含量及硅肥效应研究[J]. 山东农业科学, 1999, 31(6): 10—12, 18.]
- [28] Lu Z Y, Wei X, Li H, et al. Distribution characteristics and influencing factors of silicon in paddy soil around dongting lake region[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2017, 37(4): 27—32. [卢召艳, 魏晓, 李红, 等. 洞庭湖地区稻田土壤中硅分布特征及其影响因素[J]. 水土保持通报, 2017, 37(4): 27—32.]
- [29] Zhang D M, Xie L S, Xiao T B, et al. Analysis on available silicon content and its influencing factors of rice field in Hainan island[J]. Modern Agricultural Science and Technology, 2017(8): 197—198, 206. [张冬明, 谢良商, 肖彤斌, 等. 海南岛水稻田有效硅含量及其影响因素分析[J]. 现代农业科技, 2017(8): 197—198, 206.]
- [30] Yu M, Wang X Y, Li J, et al. Relationship between output of rice and silicon fertilizer level of soil in main rice production areas of Liaoning Province[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2007, 35(16): 4891—4892. [于淼, 王喜艳, 李军, 等. 辽宁省水稻主产区土壤硅素肥力与产量的关系研究[J]. 安徽农业科学, 2007, 35(16): 4891—4892.]
- [31] Qin F J, Wang F, Lu H, et al. Study on available silicon contents in cultivated land and its influencing factors in Ningbo City[J]. Acta Agriculturae Zhejiangensis, 2012, 24(2): 263—267. [秦方锦, 王飞, 陆宏, 等. 宁波市耕地有效硅含量及其影响因素[J]. 浙江农业学报, 2012, 24(2): 263—267.]
- [32] Li Q L, Su J P, Kan J L, et al. Availability assessment of medium elements contents in soils of Rugao, Jiangsu[J]. Soils, 2019, 51(2): 263—268. [李巧玲, 苏建平, 阚建鸾, 等. 江苏省如皋市土壤中微量元素含量有效性评价[J]. 土壤, 2019, 51(2): 263—268.]
- [33] Dai G L, Duanmu H S, Wang Z, et al. Study on characteristics of available silicon content in soils in Shaanxi Province[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2004, 18(5): 51—53. [代革联, 端木合顺, 王铮, 等. 陕西省耕地土壤有效硅分布规律初探[J]. 水土保持学报, 2004, 18(5): 51—53.]
- [34] Ma X. Soil available Si spatial distribution and effect of Si fertilizer on maize in Shihezi region[D]. Shihezi, Xinjiang: Shihezi University, 2015. [马新. 石河子垦区土壤有效硅的空间分布与硅肥肥效[D]. 新疆石河子: 石河子大学, 2015.]
- [35] Deng L, He M Y. The vertical distribution of phosphorus, calcium, silicon, magnesium in apple orchard of different ages[J]. Journal of Earth Environment, 2017, 8(1): 72—77. [邓丽, 贺茂勇. 不同种植年限苹果园土壤磷、钙、硅、镁常量元素垂直分布特征[J]. 地球环境学报, 2017, 8(1): 72—77.]
- [36] Liang Y J, Liu D X, Peng C L, et al. Soil available silicon content in flue-cured tobacco in Zhunyi[J]. Chinese Tobacco Science, 2011, 32(5): 68—69, 80. [梁永江, 刘德雄, 彭成林, 等. 遵义烟区土壤有效硅含量评价[J]. 中国烟草科学, 2011, 32(5): 68—69, 80.]
- [37] Huang Z G, Hu K L. Spatial variability of soil available Silicon in the sugarcane field of red soil area[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2006, 19(1): 96—99. [黄智刚, 胡克林. 红壤蔗区土壤有效硅的空间变异特征[J]. 西南农业学报, 2006, 19(1): 96—99.]
- [38] Wang C X, Yang D, Zhang Y L, et al. Study on the fertility of silicon in greenhouse soils[J]. Northern Horticulture, 2010(4): 54—57. [王程秀, 杨丹, 张玉龙, 等. 温室土壤硅素肥力的初步研究[J]. 北方园艺, 2010(4): 54—57.]
- [39] Wang X F, Ye W, Chen S B, et al. Changes of Si concentration in leaves of plants along the Zhangjiang River Watershed, southeastern China[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2007, 29(6): 47—52. [汪秀芳, 叶文, 陈圣宾, 等. 漳江流域沿岸植物叶片中 Si 元素含量的变化[J]. 北京林业大学学报, 2007, 29(6): 47—52.]
- [40] Yang S L, Hao Q, Liu H Y, et al. Impact of grassland degradation on the distribution and bioavailability of soil silicon: Implications for the Si cycle in grasslands[J]. Science of the Total Environment, 2019, 657: 811—818.
- [41] Yin S. Study on phytolith-occluded carbon sequestration potential of above-ground part of two important species of sympodial bamboo and its relationship with available silicon in soils[D]. Hangzhou: Zhejiang A & F University, 2017. [尹帅. 两种重要丛生竹植硅体碳封存及其与土壤有效硅的关系[D]. 杭州: 浙江农林大学, 2017.]
- [42] Yang J. Phytolith-occluded carbon sequestration of typical monopodial bamboo ecosystems in China[D]. Hangzhou: Zhejiang A & F University, 2016. [杨杰. 中国重要散生竹生态系统植硅体碳汇研究[D]. 杭州: 浙江农林大学, 2016.]
- [43] Meng C F. A review on the book origin and evolution of irrigated rice fields and quality of related ancient and present paddy soils in China[J]. Acta Pedologica Sinica, 2018, 55(1): 258—260. [孟赐福. 《中国灌溉稻田起源与演变及相关古今水稻土的质量》评述[J]. 土壤学报, 2018, 55(1): 258—260.]
- [44] Chen P P. The role of silicon in rice life[J]. Bulletin of Biology, 1998, 33(8): 5—7. [陈平平. 硅水稻生活中的作用[J]. 生物学报, 1998, 33(8): 5—7.]
- [45] He L Y, Li X L. Content and distribution of available silicon in paddy soils of Hubei Province[J]. Journal Huazhong Agricultural University, 1995, 14(4): 363—368. [贺立

- 源, 李孝良. 湖北省水稻土有效硅的含量与分布[J]. 华中农业大学学报, 1995, 14 (4): 363—368.]
- [46] Zheng L. Distribution of available silicon content in cultivated land in Anhui Province[J]. Chinese Journal of Soil Science, 1998, 29 (3): 126—128. [郑路. 安徽省耕地土壤有效硅含量分布[J]. 土壤通报, 1998, 29(3): 126—128.]
- [47] Zang H L, Zhang X P, He D Y. Study on the silicon supplying capacity of paddy soils in South China[J]. Acta Pedologica Sinica, 1982, 19 (2): 131—140. [臧惠林, 张效朴, 何电源. 我国南方水稻土供硅能力的研究[J]. 土壤学报, 1982, 19 (2): 131—140.]
- [48] Fan Y C, Tao Q X, Zhang M H. The silicon effectiveness of the main paddy soils in Jiangxi Province[J]. Chinese Journal of Soil Science, 1981, 12 (3): 7—9. [范业成, 陶其骧, 张明辉. 江西省主要水稻土硅素有效性的研究[J]. 土壤通报, 1981, 12 (3): 7—9.]
- [49] Peng J G, Lu H D, Luo T, et al. Studies on available silicon in soil and the effect of Si fertilizer in cultivated land of Fujian[J]. Journal of Fujian Academy of Agricultural Sciences, 1994, 9 (3): 36—41. [彭嘉桂, 卢和顶, 罗涛, 等. 福建省主要耕地土壤有效硅含量及硅肥施用效果研究[J]. 福建省农科院学报, 1994, 9(3): 36—41.]
- [50] Cao K L. Analysis methods comparison and influencing factors research of available silicon in paddy soils, Anhui Province[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2013, 41 (28): 11549—11551. [曹克丽. 安徽省水稻土有效硅测定方法及影响因素[J]. 安徽农业科学, 2013, 41 (28): 11549—11551.]
- [51] Meunier J D, Sandhya K, Prakash N B, et al. pH as a proxy for estimating plant-available Si? A case study in rice fields in Karnataka (South India) [J]. Plant and Soil, 2018, 432 (1/2): 143—155.
- [52] Ji J H, Li X H, Liu X M, et al. Effect of Si-Ca-K-Mg fertilizer remedying acid paddy soil in South China[J]. Acta Pedologica Sinica, 2019, 56 (4): 895—906. [冀建华, 李絮花, 刘秀梅, 等. 硅钙钾镁肥对南方稻田土壤酸度的改良作用[J]. 土壤学报, 2019, 56 (4): 895—906.]
- [53] Hogan B, McDermott F, Schmidt O. Release of plant-available silicon from various silicon-rich amendments into soil solutions and leachates[J]. Journal of Soils and Sediments, 2019, 19 (3): 1272—1285.
- [54] Zhang X P. Study of soil effective silicon determination method[J]. Soils, 1982, 14 (2): 188—192. [张效朴. 土壤有效硅测定方法的研究[J]. 土壤, 1982, 14 (2): 188—192.]
- [55] Tang X D, Hou J, Qu M, et al. The study summary of silicon nutrition about rice soil in our country[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2008 (1): 1—5, 39. [唐晓东, 侯捷, 屈明, 等. 我国水稻土的硅素营养研究[J]. 中国土壤与肥料, 2008 (1): 1—5, 39.]
- [56] Liu M D. Study on evaluation method of silicon supplying capacity in paddy soil and fertilizer response of silicon on rice[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2002. [刘鸣达. 水稻土供硅能力评价方法及水稻硅素肥料效应的研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2002.]
- [57] Hong X J, Zhang J, Yang X H. The effects of different extraction methods on the determination of silica content in paddy fields [J]. Bulletin of Agricultural Science and Technology, 2011 (12): 31—33. [洪秀杰, 张俊, 杨秀红. 不同浸提方法对稻田土壤硅含量测定结果的影响[J]. 农业科技通讯, 2011 (12): 31—33.]
- [58] Yu M. Comparative study on effective silicon analysis of paddy soil in Liaoning Province[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2007. [于淼. 辽宁地区水稻土有效硅分析方法的对比研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2007.]
- [59] Ma T S. Reasons for the lack of silicon in paddy soils in China[J]. Chinese Journal of Soil Science, 1997, 28(4): 169—171. [马同生. 我国水稻土中硅素丰缺原因[J]. 土壤通报, 1997, 28 (4): 169—171.]
- [60] Su G D, Ye Z B, Wu B Q, et al. Sugarcane cultivation biology[M]. Beijing: Light Industry Press, 1980. [苏广达, 叶振邦, 吴伯全, 等. 甘蔗栽培生物学[M]. 北京: 轻工业出版社, 1980.]
- [61] Liu M D, Zhang Y L, Chen W F. The evaluation methods of soil silicon supplying capacity: A review[J]. Soils, 2006, 38 (1): 11—16. [刘鸣达, 张玉龙, 陈温福. 土壤供硅能力评价方法研究的历史回顾与展望[J]. 土壤, 2006, 38 (1): 11—16.]
- [62] Shang Q Y, Zhang W Z, Han Y D, et al. Effect of silicon fertilizer application on yield and grain quality of Japonica rice from northeast China[J]. Chinese Journal of Rice Science, 2009, 23 (6): 661—664. [商全玉, 张文忠, 韩亚东, 等. 硅肥对北方粳稻产量和品质的影响[J]. 中国水稻科学, 2009, 23 (6): 661—664.]
- [63] Wu Y, Zhao X C, Li S F. Effects of silicon application on rice in different types of soils in China[J]. Heilongjiang Agricultural Science, 1987 (5): 8—12. [吴英, 赵秀春, 李树藩. 我省不同类型土壤水稻施硅肥效果的探讨[J]. 黑龙江农业科学, 1987 (5): 8—12.]
- [64] Liu Z H, Li X L, Zhu H L, et al. Nutrient properties in protected soils[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2001, 32 (5): 206—208. [刘兆辉, 李晓林, 祝洪林, 等. 保护地土壤养分特点[J]. 土壤通报, 2001, 32(5): 206—208.]
- [65] Zhao G X, Li X J, Li T, et al. Analysis of soil nutrient situation under different cultivated land use types[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2005, 21 (10): 55—58. [赵庚星, 李秀娟, 李涛, 等. 耕地不同利用方式下的土壤养分状况分析[J]. 农业工程学报, 2005, 21 (10): 55—58.]
- [66] Schaller J, Turner B L, Weissflog A, et al. Silicon in tropical forests: Large variation across soils and leaves suggests ecological significance[J]. Biogeochemistry, 2018, 140 (2): 161—174.

- [67] Liu J X. Effect of parent rock and bamboo age on phytolith-occluded carbon in moso bamboo forest[D]. Hangzhou: Zhejiang A & F University, 2017. [刘俊霞. 母岩与竹龄对毛竹林植硅体碳的影响研究[D]. 杭州: 浙江农林大学, 2017.]
- [68] Zhang J L. Spatial heterogeneity of phytolith-occluded organic carbon for typical *Dendrocalamus latiflorus* Munro[D]. Hangzhou: Zhejiang A & F University, 2017. [张金林. 典型麻竹林土壤植硅体碳的空间异质性特征[D]. 杭州: 浙江农林大学, 2017.]
- [69] Cai Y B, Song Z L, Jiang P K. Silicon fractions in *Phyllostachys edulis* soils derived from different parent materials[J]. Journal of Zhejiang A & F University, 2013, 30 (6): 799—804. [蔡彦彬, 宋照亮, 姜培坤. 岩性对毛竹林土壤硅形态的影响[J]. 浙江农林大学学报, 2013, 30 (6): 799—804.]
- [70] Yang S L, Song Z L, Hao Q, et al. Impact of grassland degradation on plant silicon distribution and phytolith carbon sequestration[J]. Quaternary Sciences, 2019, 39 (1): 89—98.
- [71] 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.
- [72] Richard Drees L, Wilding L P, Smeyck N E, et al. Silica in soils: Quartz and disordered silica polymorphs[M]//SSSA Book Series. Madison: Soil Science Society of America, 1989: 471—552.
- [73] Schlesinger W H. Evidence from chronosequence studies for a low carbon-storage potential of soils[J]. Nature, 1990, 348 (6298): 232—234.
- [74] He S Q, Meng C F, Huang Z T, et al. Research progress and forecast of phytolith-occluded organic carbon stability in soil[J]. Journal of Zhejiang A & F University, 2016, 33 (3): 506—515. [何珊琼, 孟赐福, 黄张婷, 等. 土壤植硅体碳稳定性的研究进展与展望[J]. 浙江农林大学学报, 2016, 33 (3): 506—515.]
- [75] Zhang J, Li H X, Li D C, et al. Phytoliths in chronosequence soils derived from basalt in Leiqiong area and its implication in pedogenesis[J]. Acta Pedologica Sinica, 2011, 48 (3): 453—460. [张瑾, 李辉信, 李德成, 等. 雷琼地区玄武岩发育时间序列土壤中植硅体特征及其发生学意义[J]. 土壤学报, 2011, 48 (3): 453—460.]
- [76] He Y, Zhang G L. Biogenic silicon in basalt-derived soils in Hainan island and its implications in pedogenesis[J]. Acta Pedologica Sinica, 2010, 47 (3): 385—392. [何跃, 张甘霖. 热带地区玄武岩发育土壤中的生物硅及其发生学意义[J]. 土壤学报, 2010, 47 (3): 385—392.]
- [77] Yang J, Wu J S, Jiang P K, et al. Study on phytolith-occluded organic carbon and silicon in a *Pleiblastus amarus* forest[J]. Journal of Natural Resources, 2016, 31 (2): 299—309. [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.]
- [78] Luo H D, 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, 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[J]. 环境科学, 2019, 40 (9): 4270—4277.]
- [79] Feng S F. Study on phytolith-occluded carbon in the soils under important bamboo plants in Zhejiang Province[D]. Hangzhou: Zhejiang A&F University, 2018. [冯晟斐. 浙江省重要竹类植物土壤植硅体碳汇研究[D]. 杭州: 浙江农林大学, 2018.]
- [80] Yang J, Xiang T T, Jiang P K, et al. Phytolith-occluded organic carbon accumulation and distribution in a *Dendrocalamopsis oldhami* bamboo stand ecosystem[J]. Journal of Zhejiang A & F University, 2016, 33 (2): 225—231. [杨杰, 项婷婷, 姜培坤, 等. 绿竹生态系统植硅体碳积累与分布特征[J]. 浙江农林大学学报, 2016, 33 (2): 225—231.]
- [81] Ding X Q, Liu M C, Yan C X. Influencing factors of carbon sequestration potential within phytolith-occluded organic carbon of soil[J]. 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[J]. 土壤通报, 2014, 45 (3): 749—753.]
- [82] Zhang J, Guo W, Qi L H, et al. Study of phytolith carbon of bamboo plants in China[J]. World Forestry Research, 2019, 32 (4): 46—50. [张建, 郭雯, 漆良华, 等. 中国竹类植物植硅体碳研究[J]. 世界林业研究, 2019, 32(4): 46—50.]
- [83] Li Z M, Song Z L, Jiang P K. The production and accumulation of phytoliths in rice ecosystems: A case study to Jiaxing Paddy Field[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33 (22): 7197—7203. [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.]
- [84] 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.

(责任编辑: 卢 萍)