

白洋淀芦苇湿地生态系统中植硅体的产生和积累研究*

李自民¹ 宋照亮^{1,2,3†} 李蓓蕾¹

(1 浙江农林大学环境与资源学院 浙江临安 311300)

(2 浙江农林大学浙江省森林生态系统碳循环与固碳减排重点实验室, 浙江临安 311300)

(3 北京大学地表过程分析与模拟教育部重点实验室, 北京 100871)

GENERATION AND ACCUMULATION OF PHYTOLITHS IN BAIYANGDIAN REED WETLAND ECOSYSTEMS

Li Zimin¹ Song Zhaoliang^{1,2,3†} Li Beilei¹

(1 Institute of Environment and Resources, Zhejiang A & F University, Lin'an, Zhejiang 311300, China)

(2 Zhejiang Provincial Key Laboratory of Carbon Cycling in Forest Ecosystems and Carbon Sequestration, Zhejiang A & F University, Lin'an, Zhejiang 311300, China)

(3 Ministry of Education Laboratory for Earth Surface Processes, Peking University, Beijing 100871, China)

关键词 芦苇; 植硅体; 产生通量; 积累通量; 归还量

中图分类号 S151 文献标识码 A

植硅体 (phytoliths), 又称植物蛋白石, 存在于大部分植物组织细胞中, 主要是依靠植物的根系吸取土壤溶液中的可溶性二氧化硅, 在植物细胞或细胞内沉淀硅化而形成的一种固体的非晶质含水二氧化硅颗粒物^[1]。植硅体主要组成部分是二氧化硅 (67%~95%)、水 (1%~12%)、碳 (0.1%~6%) 及少量的无机元素 Na、K、Ca、Fe、Al、Ti 等^[2], 由于其具有较强的抗分解、抗腐蚀和耐高温等特性, 可以长时间较稳定地保存在一些岩石和土壤中^[3-5], 在硅的生物地球化学循环中有着重要的作用, 是全球硅循环的重要参与者^[6]。虽然植硅体作为生物硅的重要组成部分, 在全球硅的生物地球化学循环中占据着重要地位, 但在湿地生态系统中植硅体产生和积累研究则鲜见报道^[7]。

芦苇 (*Phragmites australis*) 在全球有着广泛的生态幅, 在一些浅水湿地较容易形成密集的单优群落, 而且在盐碱和荒漠等地, 也可以广泛生长^[8]。芦苇在禾本科中是富硅能力较强的植物, 有着很大

的生物量, 在陆地表层硅的生物地球化学中有着重要的作用^[9]。白洋淀湿地系统中芦苇是最典型的水生植被, 分布面积最大, 在湿地生物硅的循环中占据着重要的地位。因此, 本研究选取白洋淀湿地生态系统芦苇和土壤剖面为研究对象, 研究其植硅体含量的分布特征, 来阐明芦苇湿地生态系统中植硅体的产生和积累规律, 为芦苇湿地生态系统中植硅体碳汇调控提供科学参考的依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

白洋淀湿地地处华北平原中部, 位于北京、天津、保定和石家庄之间, 海拔 5~10 m, 地势平坦, 在河流泥沙冲淤和人为因素的共同影响下, 主要是由 143 个淀泊和 3 700 多条壕沟汇成的洼淀, 流域面积达 $3.12 \times 10^4 \text{ km}^2$, 湖区表面积达 360 km^2 。其地貌景观主要也是以水体为主, 大约贯穿 8 条河流之水,

* 国家自然科学基金项目 (41103042) 和地表过程分析与模拟教育部重点实验室开放基金联合资助

† 宋照亮, 博士, 副教授。Tel: 0571-63740889, E-mail: songzhaoliang78@163.com

作者简介: 李自民 (1986—), 男, 河南鹿邑人, 硕士研究生, 主要从事植硅体与生物地球化学研究。E-mail: lizimin322@126.com

收稿日期: 2012-09-10; 收到修改稿日期: 2012-12-11

适宜水位为 7~9 m, 年均地表径流达 $4.52 \times 10^9 \text{ m}^3$ 。该地为大陆暖温带季风性气候, 冬季寒冷干燥, 夏季炎热多雨, 年均气温为 $7.3^\circ\text{C} \sim 12.7^\circ\text{C}$, 年均降水量为 563.7 mm, 且年内分配不均, 7、8、9 月的降水量占年降水量的 80%^[10]。

1.2 样品采集及分析方法

样品采集点选择在白洋淀湿地的一个孤岛上 (N38°54.764', E115°696'), 于 2011 年 10 月份的芦苇成熟期采样, 此时样品具有较高的硅含量^[11]。在靠近水边的 0.5、1、4、7、11、15 和 20 m 处, 分别选择 8~10 株芦苇, 用不锈钢剪刀在其露地处剪断, 收集茎、鞘和叶等器官, 同时采集各点附近的 0~5 cm 表层土。然后在靠近水边距离的 11 m 处, 挖取 3 个 100 cm 的土壤剖面, 每间隔 5 cm 取土样, 编号装袋, 同时, 在土壤剖面中收集芦苇根。

采集的根、茎、鞘、叶等芦苇器官样品分别用自来水多次冲洗, 根用超声波洗过后, 与其他器官一起再用去离子水反复冲洗干净, 105℃ 杀青 20 min, 75℃ 烘干至恒重, 称其干重。各器官剪碎后混匀, 分成两份, 其中一份用不锈钢植物粉碎机粉碎供总硅分析, 另一份用剪刀剪至 0.5 cm 左右供植硅体分析。样品中的总硅含量按照文献[12]方法测定, 用植物标样灌木枝叶 GBW07602 (GSV-1) 进行监测。植物样品植硅体按照微波消解的方法来提取^[13], 同时用 Walkley-Black 方法彻底地除去植硅体外面多余的有机质^[14]。提取出的植硅体放在干燥过的离心管内 (已称重), 在 75℃ 鼓风烘箱中干燥 24 h, 然

后称重得出植硅体质量。

采集回来的土样, 经自然风干后, 挑根, 研磨先过 10 目筛, 然后取出均匀的三分之一的 10 目土样过 100 目筛供土壤硅全量分析。土壤 pH、有机质、总硅、容重 (环刀法) 等含量按文献[12]方法测定。总硅测定时用土壤标样黄红壤 GBW07405 (GSS—5) 作为参考。土壤植硅体按照文献[15]方法提取。为了提取更高纯度的植硅体含量, 本实验的每份样品进行多次重复提取, 同时重液密度维持在 2.38 左右。植硅体含量的测定同植物样品。

1.3 数据处理

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

2 结果与讨论

2.1 芦苇湿地生态系统植硅体产生通量及其影响因素

在芦苇湿地生态系统中, 芦苇靠近水边距离的不同, 其对硅的吸收转运能力也有一定的差异, 因此植硅体和 SiO_2 含量在每个芦苇植株内也有很大的不同 (表 1)。但是从表 1 中, 可以看出芦苇各器官中植硅体含量变化趋势呈现出: 叶 (76.28 g kg^{-1}) > 鞘 (64.42 g kg^{-1}) > 根 (21.67 g kg^{-1}) > 茎 (19.88 g kg^{-1})。

表 1 芦苇各器官中植硅体含量变化

芦苇离水边的距离 (m)	植硅体含量 (g kg^{-1})			
	叶片	鞘	茎	根
0.5	71.14 ± 7.03	66.49 ± 14.85	30.03 ± 0.26	—
1	78.57 ± 11.75	68.65 ± 8.14	15.57 ± 5.07	—
4	77.00 ± 3.65	60.06 ± 6.36	29.86 ± 2.28	—
7	62.36 ± 6.03	61.89 ± 5.17	22.48 ± 8.57	—
11	96.36 ± 1.87	61.67 ± 6.76	14.78 ± 2.27	21.67 ± 4.26
15	70.87 ± 1.56	67.38 ± 8.03	17.27 ± 1.86	—
20	77.67 ± 0.87	64.79 ± 11.14	9.16 ± 0.44	—
平均值	76.28	64.42	19.88	21.67

注: 平均值 ± 标准差芦苇。地下芦苇根的生长是丛生, 所以本研究仅在 11m 土壤剖面处收集了根

以前的研究也表明植物在生长过程中主要依靠根部吸收土壤溶液的中单硅酸 ($\text{Si}(\text{OH})_4$) 和 H_4SiO_4 , 在蒸腾作用下, 转移至植物地上各个器官中, 大部分在植物细胞或细胞内沉淀硅化而形成的一

种固体的非晶质含水二氧化硅颗粒物, 也就是所谓的植硅体^[1-2]。因此, 植硅体和 SiO_2 在芦苇植株各器官中的分布呈现出相同的分布趋势: 叶 > 鞘 > 根 > 茎。

实际上,植物在吸收硅产生植硅体的过程中,也封存了一些有机质,由于其较强抗分解能力,可以非常稳定地保存在土壤和一些沉积层中^[4],所以植物产生的植硅体及其封存的碳在全球硅和碳生物地球化学循环中有着重要的作用^[5-6]。因此,根据芦苇各器官根、茎、鞘和叶各器官的净初级生产力(分别为 1.09、1.14、0.38 和 0.40 kg m⁻² a⁻¹)和本研究测出的植硅体含量,估算出了芦苇根、茎、鞘和叶各器官植硅体产生通量分别为:23.65、22.69、24.47 和 30.52 g m⁻² a⁻¹,芦苇植硅体产生总通量为 98.06 g m⁻² a⁻¹。其中芦苇叶产生的植硅体通量最大,其次为鞘、根和茎(图 1)。

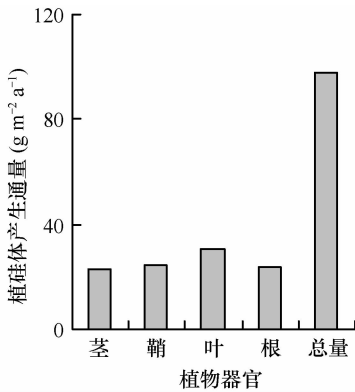


图 1 芦苇各器官植硅体产生通量

关于如何提高植物植硅体的产生量,也就显得尤为重要。由图 2 可以看出,植物 SiO₂ 与其植硅体含量有较强的正相关性 ($R^2 = 0.734, p < 0.01$),表明芦苇各部分吸收硅的含量越高,其所沉淀在组织内的植硅体量也就越大。以前的研究也表明,通过施用钢渣等硅肥可以明显增加植物吸收的硅含量^[16],因此,那些影响植物硅吸收的因素,最终也会对植物植硅体的积累产生一定的影响,可以通过硅调控机制来增加植物植硅体的产生通量。

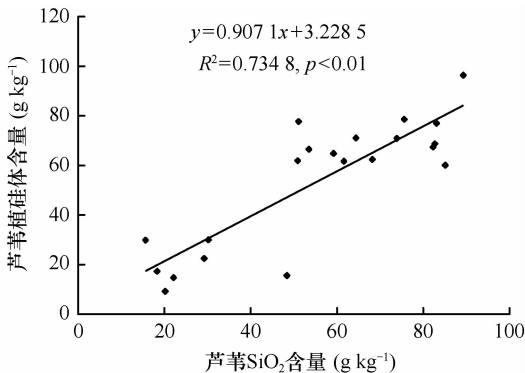


图 2 植物 SiO₂ 和植硅体含量的相关性

2.2 芦苇湿地生态系统土壤中植硅体积累通量及其影响因素

最近的研究表明湿地生态系统土壤中植硅体及其封存的碳在全球硅碳生物地球化学循环中占据着的重要作用^[7,17],因此,对土壤中植硅体的积累量进行估算也就显得十分重要。从图 3 可以看出,芦苇湿地生态系统土壤剖面中植硅体积累量随着土壤深度的增加,呈现出下降的趋势。在 0 ~ 15 cm 土壤剖面中,如果土壤容重为 1.32 × 10⁶ g m⁻³,土壤植硅体平均含量为 17.15 g kg⁻¹,那么估算的植硅体积累量达 3.37 kg m⁻²。其次在 15 ~ 45、45 ~ 60、60 ~ 80 和 80 ~ 100 cm,估算量分别为 4.05、2.71、2.01、1.79 和 3.37 kg m⁻²。实际上,土壤植硅体积累量主要集中在土壤上层(表 2 和表 3)。而且本研究结果也表明植硅体在芦苇湿地土壤剖面中的分布特征,总体上表现植硅体有向表层土壤积累的趋势,这和以前有关其他生态系统土壤剖面植硅体分布趋势的研究结果较符合^[15,18]。随着植物的死亡和腐烂,大量的植硅体释放到土壤中,虽然由于其稳定性较强,可以在土壤中长期较稳定地存在^[4],而且不易移动,但是实际上,植硅体在土壤剖面中的分布有很大的变异性,引起这个差异的原因主要是植硅体在土壤中的分布会受到植物生长^[19]、一些人为及部分穴居动物的扰动、自身的垂直迁移、一些自然的侵蚀和沉积事件等因素的影响^[20]。芦苇湿地生态系统中土壤受河水冲蚀和土壤沉积事件影响较强,会使各种物质在自然状态下的迁移程度较大。而引起这种变化的另一个原因,主要是和土壤中植物残体等有机物质的归还有很大的关系。因为土壤本生不会产生植硅体,它主要来自于

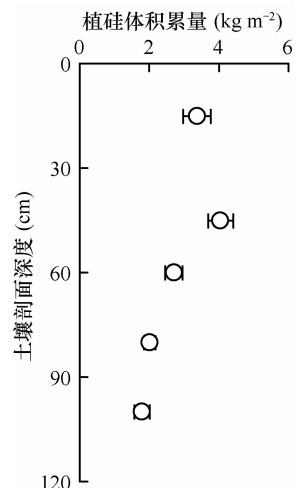


图 3 土壤剖面中植硅体积累量随深度的变化

表 2 表层土壤中植硅体含量和基本参数变化

表层土壤离水边的距离(m)	植硅体含量(g kg ⁻¹)	SiO ₂ 含量(g kg ⁻¹)	有机碳含量(g kg ⁻¹)	pH
0.5	14.75 ± 2.54	514.9 ± 19.7	21.19 ± 0.96	7.74 ± 0.05
1	17.11 ± 1.96	506.3 ± 1.57	15.53 ± 0.45	7.83 ± 0.12
4	21.64 ± 1.89	529.0 ± 65.0	27.03 ± 1.00	7.81 ± 0.02
7	15.67 ± 0.99	518.5 ± 33.6	24.08 ± 1.92	7.84 ± 0.05
11	20.32 ± 1.30	528.1 ± 28.4	25.62 ± 0.81	7.69 ± 0.04
15	25.07 ± 2.64	552.5 ± 10.9	35.70 ± 1.65	7.27 ± 0.13
20	18.31 ± 2.72	554.5 ± 6.47	32.13 ± 1.75	7.46 ± 0.12
平均值	18.98	528.1	25.89	7.66

注:平均值 ± 标准差

表 3 土壤剖面中植硅体含量和基本参数变化

土壤剖面深度 (cm)	植硅体含量 (g kg ⁻¹)	SiO ₂ 含量 (g kg ⁻¹)	土壤容重 (10 ⁶ g m ⁻³)	有机碳含量 (g kg ⁻¹)	pH
0~2	21.73 ± 0.76	537.9 ± 11.4	1.32	22.40 ± 0.61	7.41 ± 0.13
2~5	18.99 ± 1.08	522.5 ± 23.4		14.10 ± 2.09	7.82 ± 0.07
5~10	14.29 ± 0.28	509.0 ± 59.5		12.34 ± 1.13	7.93 ± 0.12
10~15	13.59 ± 0.72	532.3 ± 64.6		11.47 ± 0.01	7.98 ± 0.12
15~20	15.11 ± 1.01	496.3 ± 29.4	1.50	7.82 ± 0.37	8.11 ± 0.04
20~25	11.06 ± 1.74	464.4 ± 76.5		9.42 ± 0.33	8.11 ± 0.17
25~30	6.03 ± 1.71	508.2 ± 30.7		9.06 ± 0.57	8.04 ± 0.09
30~35	7.70 ± 1.20	496.4 ± 2.4		8.91 ± 0.57	8.08 ± 0.07
35~40	6.60 ± 0.03	498.3 ± 6.5		10.92 ± 0.21	7.94 ± 0.05
40~45	6.36 ± 1.12	527.2 ± 6.4		12.11 ± 0.23	7.83 ± 0.18
45~50	12.04 ± 1.02	514.7 ± 1.9	1.64	9.84 ± 0.75	7.94 ± 0.09
50~55	10.55 ± 1.06	512.9 ± 24.8		10.46 ± 0.84	7.96 ± 0.31
55~60	9.12 ± 0.91	506.7 ± 48.2		9.93 ± 0.21	8.02 ± 0.35
60~65	5.65 ± 1.13	498.9 ± 38.5	1.68	8.36 ± 0.45	7.99 ± 0.29
65~70	6.68 ± 1.52	483.3 ± 23.6		7.72 ± 0.94	7.92 ± 0.36
70~75	5.83 ± 1.22	537.1 ± 39.4		10.31 ± 1.25	7.86 ± 0.23
75~80	5.02 ± 0.83	527.5 ± 2.8		11.15 ± 1.04	7.86 ± 0.10
80~90	8.81 ± 1.30	530.7 ± 5.1	1.79	11.33 ± 0.88	7.92 ± 0.12
90~100	10.70 ± 1.74	562.9 ± 20.6		10.90 ± 0.32	7.91 ± 0.02

注:平均值 ± 标准差

植物根部和地上枯落物腐烂后植硅体的释放。例如,我们从图 4 和图 5 可以看出,土壤表层及土壤剖面中有机质与植硅体有很好的相关性($R^2 = 0.505$, $p < 0.05$ 和 $R^2 = 0.4469$, $p < 0.01$)。表明随着土壤有机质含量增加,其植硅体的含量也有明显的增加。然而在白洋淀湿地,每年的 10 月份成熟期,芦苇地上部收割,只剩下部分的残茬及一些枯落物留在土壤中,从而大大降低了芦苇湿地生态系统土壤剖面中的植硅体积累量。假如地上部分芦苇植株

(茎叶鞘)约 1/5 秸秆归还土壤中,那么芦苇植株植硅体归还通量为 $39.19 \text{ g m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 。如果在 0~15 cm 的土壤剖面中,土壤沉积年龄为 100 a,那么土壤剖面中植硅体积累通量为 $33.70 \text{ g m}^{-2} \text{ a}^{-1}$,而这积累通量明显小于芦苇植硅体产生通量 $98.06 \text{ g m}^{-2} \text{ a}^{-1}$,也小于约 1/5 芦苇植株的归还通量 $39.19 \text{ g m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 。因此,如果能加大芦苇湿地生态系统土壤中芦苇秸秆及残体的归还量,会增加芦苇湿地生态系统土壤植硅体的积累通量。

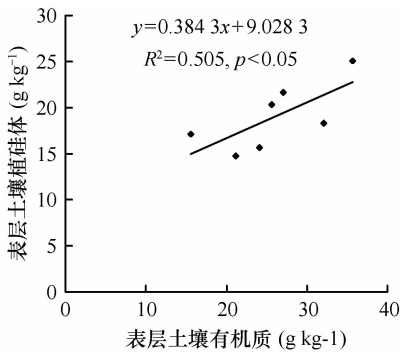


图4 表层土壤有机质与植硅体相关性

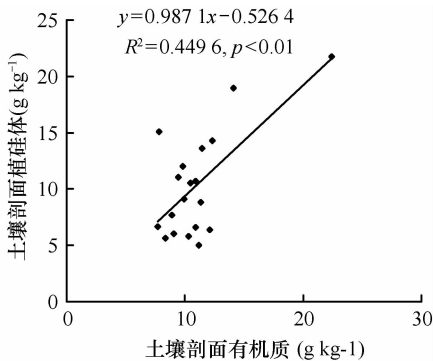


图5 土壤剖面有机质与植硅体相关性

3 结论

在白洋淀芦苇湿地生态系统中,离水边距离不同的芦苇植株各器官中植硅体和 SiO_2 含量分布呈现出相同的分布趋势:叶 > 鞘 > 根 > 茎。而且芦苇植株中的 SiO_2 含量与其植硅体含量有很好的相关性。芦苇根、茎、鞘和叶各器官植硅体产生通量为: 23.65、22.69、24.47 和 30.52 $\text{g m}^{-2} \text{a}^{-1}$, 芦苇植硅体产生总通量为 98.06 $\text{g m}^{-2} \text{a}^{-1}$ 。在 0~15 cm 的土壤剖面中,植硅体积累速率为 33.70 $\text{g m}^{-2} \text{a}^{-1}$ 。表层和剖面土壤中有机质与植硅体含量均表现出较好的相关性,增加芦苇秸秆等有机物质的归还,对提高土壤中植硅体的积累量有一定的影响。

参考文献

[1] Piperno D R. Phytolith analysis: An archaeological and geological perspective. San Diego: Academic Press, 1988
 [2] 王永吉. 植物硅酸体化学成分的研究. 黄渤海海洋, 1998, 16(3):33—37

[3] Parr J F, Sullivan L A. Soil carbon sequestration in phytoliths. Soil Biol Biochem, 2005, 37(1):117—124
 [4] Strömberg 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. Paleogeogr Paleoclimatol Paleoecol, 2004, 207: 239—275
 [5] Prasad V, Strömberg C, Alimohammadian H, et al. Dinosaur coprolites and the early evolution of grasses and grazers. Science, 2005, 310: 1177—1180
 [6] Sommer M, Kacaorek D, Kuzyakov Y, et al. Silicon pools and fluxes in soils and landscapes—A review. J Plant Nutr Soil Sci, 2006, 169(3):310—329
 [7] Natalia Borrelli M, Osterrieth A, Romanelli M F, et al. Biogenic silica in wetlands and their relationship with soil and groundwater biogeochemistry in the Southeastern of Buenos Aires Province, Argentina. Environ Earth Sci, 2012, 65(2): 469—480
 [8] Zhu X Y, Wang S M, Zhang C L. Responses of different ecotypes of reed growing in the Hexi Corridor to natural drought and salinity. Plant Physiol Commun, 2003, 39(4): 371—376
 [9] Epstein E. Silicon: Its manifold roles in plants. Ann Appl Biol, 2009, 155(2): 155—160
 [10] 赵翔, 崔保山, 杨志峰. 白洋淀最低生态水位研究. 生态学报, 2005, 25(5): 1033—1040.
 [11] Motomura H, Mita N, Susuki M. Silica accumulation in long-lived leaves of *sasa veitchii* (Carriere) rehder (Poaceae-Bambusoideae). Ann Bot, 2002, 90(1): 149—152
 [12] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法. 北京: 中国农业科技出版社, 2000
 [13] Parr J F, Dolic V, Lancaster G, et al. A microwave digestion method for the extraction of phytoliths from herbarium specimens. Rev Palaeobot Palyno, 2001, 116: 203—212
 [14] Walkley A, Black I A. An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method. Soil Sci, 1934, 37(1): 29—38
 [15] 陈留美, 张甘霖. 水耕人为土时间序列的植硅体滞留碳演变特征. 土壤通报, 2011, 42(5): 1026—1030
 [16] Ma J F, Yamaji N, Tamai K, et al. An efflux transporter of silicon in rice. Nature, 2007, 448(6): 209—212
 [17] Norris A R, Hackney C T. Silica content of a mesohaline tidal marsh in North Carolina. Estuar Coast Shelf Sci, 1999, 49(4): 597—605
 [18] Blecker S W, Meculle R L, Chadwick O A, et al. Biogenic cycling of silica across a grassland bioclimate sequence. Global Biogeochem Cycles, 2006, 20: 1—11
 [19] 杨帆, 邓伟, 章光新, 等. 苏打盐渍土地区芦苇地土壤盐分离子空间变异与群落关系研究. 土壤学报, 2008, 45(4): 594—600
 [20] Clarke J. The occurrence and significance of biogenic opal in the regolith. Earth Sci Rev, 2003, 60:175—194