

漳江流域沿岸植物叶片中 Si 元素含量的变化

汪秀芳^{1,2} 叶文¹ 陈圣宾³ 关少华¹ 杨伟伟¹ 李振基¹

(1 厦门大学生命科学学院 2 中国科学院武汉植物园 3 中国科学院植物研究所)

摘要:该文研究了漳江流域沿岸 48 种植物成熟叶片中 Si 元素含量及其随环境因子和在不同植物类群中的变化。结果表明,这些植物叶片平均 Si 含量为 1.23%;不同植物叶片 Si 含量差异显著,含量最高的是笔管草,达 5.88%;最低的是桃金娘,仅 0.02%。48 种植物中的 17 种是 Si 积累者,叶片 Si 平均含量为 2.53%;31 种是非积累者,叶片中 Si 平均含量为 0.28%。从植物所属科来看,含 Si 量较高的主要有禾本科、木贼科、紫萁科、凤尾蕨科、鸭跖草科和桑科植物。研究还发现从上游到下游,土壤 Si 含量随土壤粘粒含量和含水量的升高而增加。马缨丹和鸭跖草叶片 Si 含量与对应土壤的有效 Si 含量呈正相关,桐花树和秋茄叶片 Si 含量与对应土壤的盐度呈正相关。

关键词:植物叶片, Si 含量, 漳江流域

中图分类号:Q948.1 文献标识码:A 文章编号:1000-1522(2007)06-0047-06

WANG Xiu-fang^{1,2}; YE Wen¹; CHEN Sheng-bin³; GUAN Shao-hua¹; YANG Wei-wei¹; LI Zhen-ji¹.

Changes of Si concentration in leaves of plants along the Zhangjiang River Watershed, southeastern China. *Journal of Beijing Forestry University* (2007) 29(6) 47-52 [Ch, 32 ref.]

1 College of Life Sciences, Xiamen University, Fujian Province, 361005, P. R. China;

2 Wuhan Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, 430074, P. R. China;

3 Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100093, P. R. China.

The authors determined the Si concentration of mature leaves from 48 plant species along the Zhangjiang River Watershed, Fujian Province, and then investigated its relation to soil traits and its phenogenetic variations in different taxonomic groups. The results showed that the Si concentration varied significantly within different plant species, and the average value was 1.23%. Among these plants, *Hippochaete debile* beared the highest content as up to 5.88%, while *Rhodomirtus tomentosa* was the lowest, only 0.02%. In terms of plant family, the plants of Graminae, Equisetaceae, Osmundaceae, Pteridaceae, Commelinaceae and Moraceae were rich in Si, with 17 species could be identified as Si accumulators, which shared the average Si content of 2.53%, while the other 31 species were non-accumulators since the average Si content was only 0.28%. The authors also noticed that water and clay content of soil increased along the upstream of Zhangjiang River to the downstream, which resulted in the increase of Si content in the soil accordingly. The Si concentrations of *Lantana camara* and *Commelina communis* were positively related to the effective Si content in the soil, while that of *Aegiceras corniculatum* and *Kandelia obovata* had positive relationships with the salinity of soil.

Key words plant leaf, Si concentration, Zhangjiang River Watershed

植物的化学成分与植物的遗传特性和生境特征有关,反映了植物在一定的生境下从土壤中吸收和蓄积矿质养分的能力。研究植物化学成分,不仅能指示土壤化学性质和肥力,还可以在在实践中指导生产。Si 作为土壤中含量仅次于氧的元素,在许多生物地

球化学过程中起着非常重要的作用,如作为陆地^[1]和海洋^[2]生物的营养,缓冲土壤 pH 值,调节大气中的 CO₂ 和全球气候^[3],而且 Si 普遍存在于植物的各个器官中,特别是禾本科植物累积了较高水平的 Si^[4-6]。Takahashi 和 Miyake (1976)^[6-7]提出了 Si 积累

收稿日期:2006-0-0

<http://www.bjfujournal.cn>

基金项目:福建省自然科学基金项目(C0310004)、福建省青年科技人才创新项目(2001J051)。

第一作者:汪秀芳,博士生。主要研究方向:群落与生态系统。电话:0592-2181963 Email: wxfhongan@126.com 地址:430074 武汉武昌墨水山中国科学院武汉植物园湿地组。

责任作者:李振基,教授。主要研究方向:森林生态学与生物多样性。电话:0592-2181431 Email: zhenji1@163.com 地址:361005 福建省厦门大学生命科学院。

者的概念,他们以干叶中 Si 含量是否超过 1%的植物来区分积累者和非积累者.植物中的 Si 含量与 K、Ca 相当,比 P 高出一个数量级,但传统的化学成分研究主要集中在植物的 N、P、K、Ca 等必需元素上,而且以前多数学者尚未认同 Si 是植物的必需元素^[8],因此有关 Si 的研究相对较少.

Si 以溶解态单硅酸(H₄SiO₄)的形式被植物吸收,以凝胶态生物硅(BSi)的形式沉积到特殊的硅细胞和某些器官的表皮细胞中^[9],BSi 以针刺、针叶状^[10]结构存在,大小从一到几十毫米不等^[11].植物对 Si 的吸收有主动吸收和被动吸收两种方式,在同一种植物中两种方式同时存在,各自所起作用的大小取决于植物的种类和外界环境的 Si 浓度^[12].Si 在植物体内的作用体现在两个方面:①作为物理屏障, Si 沉积到表皮下方,形成表皮-Si 质双层保护结构,减少水分散失,增强植物组织的硬度使植物不易倒伏,并且使水稻等植物的叶片朝垂直方向生长,增加了光合作用的表面积从而提高生物量和产量,还能增强植物抵抗真菌感染的能力,减少草食动物的消费和减少有毒金属的吸收和累积^[1-13].②植物生理调节,植物体内的溶解态 Si 能促使植物生产酚醛类物质和植物抗毒素,还能刺激一些保护酶(如几丁质酶、过氧化物酶和多酚氧化酶)的增加,从而起到保护植物抵抗各种生物和非生物胁迫的作用. Si 对植物的这些作用主要以其在叶中的积累为特征^[14].

植物 Si 含量的高低是植物种的一个特征,同时也受外界环境的影响.如 Winslow 等(1997)^[15]曾经注意到热带南美从山地到低地不同生态型的水稻中硅含量在 4.2~48.5 kg/hm² 之间变化,低地水稻 Si 含量较高,生长较好,抗病能力强,而山地水稻因缺 Si 而感染谷物锈病.

基于此,我们认为同种植物在不同环境可能有不同的 Si 含量,而且从流域的上游到下游的河口,土壤中的 Si 含量应该越来越多.为了验证这一点,并探讨植物体内 Si 含量多或少的机理,我们选择了流域面积相对较小,且污染程度较轻的漳江流域进行研究.

1 研究地自然概况与研究方法

1.1 自然概况

漳江位于东经 117°17'~117°23',北纬 23°16'~24°13'之间,发源于福建省博平岭东麓的大峰山,经云霄注入东山湾,流域面积 961 km²,干流长 58 km,是福建省南部主要江河之一.河口处为福建漳江口红树林湿地国家级自然保护区.土壤母质主要是火山岩和花岗岩,土壤是赤红壤.本流域属亚热带海洋性季风气候,暖热湿润,年均气温 21.3℃,年平均降水量 1 731 mm,地带性植被为亚热带常绿阔叶林,人工植被多为枇杷林.本研究涉及的各个取样地点的自然条件概况见表 1.

表 1 各样点的自然条件概况

TABLE 1 Natural conditions of each sample site						
样点号	1	2	3*	4	5	6
地点	梅林	下河	云霄	竹塔	竹塔	竹塔
经度	117°12'28"	117°30'58"	117°21'43"	117°41'21"	117°37'44"	117°27'57"
纬度	24°03'43"	24°03'50"	24°03'21"	24°00'04"	24°06'44"	23°57'10"
海拔/m	293	47	36	7	3	7
主要颗粒组成	砾粒	粉粒	沙粒	粘粒	粘粒	粘粒
含水情况	湿润	潮湿	干燥	渍水	渍水	渍水

注: * 因筑坝而采自堤岸.

1.2 材料与方法

1.2.1 样品采集

于 2006 年 4 月顺着河流在漳江沿岸设置 6 个样点(见图 1),采集漳江沿岸 2 m 范围内生长良好植物的成熟叶片和土壤样品,共采集了 48 种植物 124 个样品和土壤样品 18 个.

1.2.2 样品处理与测定方法

各样品清洗后,经 80℃烘干,磨粉后干燥保存待测.测定时每次取样 0.3 g,每个样品 2~3 次重复,同时用国家标准物质灌木枝叶 GB-W076033(含 Si(0.6±0.07)%)做对照,置于瓷坩埚中放入马福炉灰化后用 HF 溶解灰分^[16],用 Si 钼蓝分光光度法测定^[17].用该方法测定国家标准灌木枝叶 GB-W076033 中 Si 含量为 0.503%±0.015%,回收率



图 1 沿漳江取样地点分布图
FIGURE 1 Distribution of sample sites along the Zhangjiang River, Fujian Province

83.33%.土壤样品用 pH4.0 的 HOAC-NaOAC 缓冲液浸提,同样用 Si 钼蓝分光光度法测定其有效 Si 的含量^[18].

1.2.3 药品与仪器

本实验所有用水均来自 MILLIPORE 系统制备的超纯水. SiO₂ 标准液购自美国 SPEX Certi-Prep, 批号为 11-167S1. 分光光度计为 721 型(上海第三分析仪器厂), 恒温调速摇床来自江苏太仓医疗仪器厂.

1.2.4 数据处理

采用 Excel 和 SPSS 10.0 作回归分析和显著性检验.

2 结果与分析

2.1 不同植物叶片中 Si 含量差异

漳江沿岸植物叶片 Si 含量测定结果见表 2, 48

种植物叶片 Si 含量平均为 1.23%, 其中木贼科的笔管草 Si 含量最高, 达 5.88%, 桃金娘科的桃金娘叶片 Si 含量最低, 仅 0.02%, 最高含量与最低含量相差 294 倍, 可见植物累积 Si 的能力差异显著. 木贼科、桑科、紫萁科、鸭跖草科和禾本科植物叶片 Si 含量较高, 桃金娘科、蓼科、茄科和伞形科等植物叶片 Si 含量大多低于 0.5%. 按 Takahashi 和 Miyake^[6-7] 提出的积累者和非积累者的界定标准, 则 48 种植物中有 17 种是 Si 积累者, 平均 Si 含量 2.53%; 非积累者 31 种的平均 Si 含量为 0.28%, 积累者和非积累者的物种数比例约为 1:2.

表 2 漳江沿岸 48 种植物叶片的 SiO₂ 含量(占干重的百分数)
TABLE 2 Concentrations of SiO₂ in the leaves of 48 plants along the Zhangjiang River

中文名科名	中文名(拉丁名)	样点号	含量	中文名科名	中文名(拉丁名)	样点号	含量
木贼科	笔管草(<i>Hippochaete debile</i>)	1	5.88±0.05	桃金娘科	番石榴(<i>Psidium guajava</i>)	2	0.41±0.03
紫萁科	华南紫萁(<i>Osmunda vachellii</i>)	1	2.53±0.14	野牡丹科	多花野牡丹(<i>Melastoma affine</i>)	1	0.12±0.21
凤尾蕨科	金钗凤尾蕨(<i>Pteris fauriei</i>)	1	5.52±0.17	红树科	秋茄(<i>Kandelia obovata</i>)	4, 5, 6	0.20±0.20
肾蕨科	肾蕨(<i>Nephrolepisauriculata</i>)	1	0.03±0.17	无患子科	龙眼(<i>Dimocarpus longan</i>)	2	0.60±0.55
蹄盖科	菜蕨(<i>Callipteris esculenta</i>)	1	0.83±0.46	酢酱草科	黄花酢酱草(<i>Oxalis pes-caprae</i>)	3	0.10±0.53
金星蕨科	华南毛蕨(<i>Cyclosorus parasiticus</i>)	1	0.77±0.51	酢酱草科	红花酢酱草(<i>Oxalis corymbosa</i>)	2	0.16±0.48
樟科	红楠(<i>Machilus thunbergii</i>)	1	1.27±0.58	伞形科	积雪草(<i>Centella asiatica</i>)	2	0.30±0.01
樟科	刨花楠(<i>Machilus pauhoi</i>)	1	0.33±0.31	天胡荽科	天胡荽(<i>Hydrocotyle sibthorpioides</i>)	2	0.35±0.01
毛茛科	毛茛(<i>Ranunculus japonicus</i>)	2	0.58±0.36	天胡荽科	水芹(<i>Oenanthe javanica</i>)	2	0.02±0.00
桑科	梨果榕(<i>Ficus pyriformis</i>)	1	3.59±0.36	茄科	少花龙葵(<i>Solanum photeinocarpum</i>)	3	0.03±0.16
荨麻科	苎麻(<i>Boehmeria nivea</i>)	3	3.36±0.03	马鞭草科	许树(<i>Clerodendrum inerme</i>)	4	0.11±0.01
蓼科	酸模叶蓼(<i>Polygonum lapathifolium</i>)	1	0.18±0.49	马鞭草科	白骨壤(<i>Avicennia marina</i>)	6	0.13±0.12
蓼科	大箭叶蓼(<i>Polygonum sagittifolium</i>)	2	0.05±0.02	马鞭草科	马缨丹(<i>Lantana camara</i>)	2, 3, 5, 6	2.78±0.51
山茶科	油茶(<i>Camellia oleifera</i>)	1	0.53±0.52	菊科	一年蓬(<i>Erigeron annuus</i>)	2	0.21±0.46
水东哥科	水东哥(<i>Saurauia tristyla</i>)	1	0.20±0.42	菊科	小蓬草(<i>Conyza canadensis</i>)	1	1.33±0.05
锦葵科	肖梵天花(<i>Urena lobata</i>)	2, 3	0.49±0.16	菊科	金钮扣(<i>Spilanthes paniculata</i>)	1, 3	1.27±0.34
紫金牛科	桐花树(<i>Aegiceras corniculatum</i>)	4, 5, 6	0.27±0.12	菊科	狼把草(<i>Bidens tripartita</i>)	3	0.22±0.58
蔷薇科	枇杷(<i>Eriobotrya japonica</i>)	3	0.13±0.01	天南星科	石菖蒲(<i>Acorus tatarinowii</i>)	1	0.09±0.13
蔷薇科	蛇莓(<i>Duchesnea indica</i>)	3	0.51±0.01	鸭跖草科	鸭跖草(<i>Commelina communis</i>)	2, 3, 5	2.84±0.49
含羞草科	小叶羊公豆(<i>Abarema elliptica</i>)	1	0.24±0.50	禾本科	芦苇(<i>Phragmites communis</i>)	4	4.37±0.14
含羞草科	金合欢(<i>Acacia farnesiana</i>)	1	0.10±0.11	禾本科	类芦(<i>Neyraudia reynaudiana</i>)	4	1.96±0.56
蝶形花科	海刀豆(<i>Canavalia lineata</i>)	4	3.00±0.48	禾本科	大画眉草(<i>Eragrostis cilianensis</i>)	1	2.22±0.24
蝶形花科	鱼藤(<i>Derris trifoliata</i>)	4	1.42±0.51	禾本科	铺地黍(<i>Panicum repens</i>)	2	1.25±0.42
桃金娘科	桃金娘(<i>Rhodomyrtus tomentosa</i>)	1	0.02±0.13	禾本科	芒(<i>Miscanthus sinensis</i>)	1	3.03±0.57

2.2 不同样地土壤的有效 Si 含量(以 SiO₂ 计)

各样地土壤的 Si 含量如图 2 所示, 总体趋势是, 从上游到下游, 随着土壤颗粒越来越细, 有效 Si 的含量随之明显增高. 入海口竹塔红树林保护区内的 3 个采样点 4、5、6 之间距离近, 相距 500 m 左右, 其土壤的颗粒组成、含水量和 Si 含量都相近.

2.3 从流域上游至下游同种植物叶片 Si 含量变化

2.3.1 土壤有效 Si 含量与植物 Si 含量的关系

选择在漳江上下游分布较广的马缨丹和鸭跖草, 研究沿岸土壤有效 Si 含量大小对植物 Si 含量的影响. 结果表明不同样点同种植物叶片 Si 含量有明显差异, 与对应的土壤呈正相关(见表 3), 样点 6 处

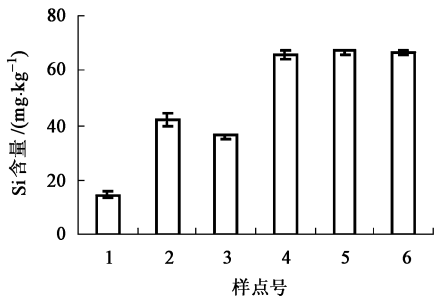


图 2 6 个样点土壤有效 Si 含量
FIGURE 2 Effective Si content of soil in the six sample sites

马缨丹叶片 Si 含量高达 3.82%, 样点 3 处只有 2.06%, 前者是后者的 1.85 倍. 鸭跖草的情况也类

似,最高点是最低点的 1.94 倍.对比植物叶片与对应土壤有效 Si 含量,发现土壤有效 Si 含量越高,叶中沉积的 Si 元素也越多,即马缨丹和鸭跖草叶片 Si 含量与生长土壤中的有效 Si 含量呈正相关,线性回归方程分别为: $y=19.672x+1.775\ 5$, $R^2=0.875\ 4$ ($P<0.05$), $y=11.03x+17.063$, $R^2=1$ ($P<0.05$).

表 3 陆岸不同样地马缨丹和鸭跖草中 SiO₂ 含量和土壤有效硅含量(以 SiO₂ 计)

TABLE 3 SiO ₂ content of <i>Lantana camara</i> and <i>Commelina communis</i> at different sample sites on land and the effective Si content in soil (calculated by SiO ₂)			
样点号	土壤/(mg·kg ⁻¹)	马缨丹/%	鸭跖草/%
2	41.92±1.83	2.14±0.82	2.25±0.42
3	34.35±1.64	2.06±0.64	1.57±0.82
5	66.91±1.52	3.10±0.62	4.52±0.61
6	66.50±1.61	3.82±0.55	—

2.3.2 土壤盐度高低对红树植物叶片 Si 含量影响

在漳江入海口有较大面积的红树林,林地土壤有效 Si 含量和土壤盐度如表 4 所示,从表中可以看出,各样点的土壤有效 Si 含量差异不显著,但桐花树和秋茄叶片 Si 含量表现为越往下游越高,与土壤盐度成正相关,回归方程分别为: $y=37.244x+7.806\ 8$, $R^2=0.999\ 9$ ($P<0.01$), $y=55.27x+7.428\ 9$, $R^2=0.995\ 1$ ($P<0.05$).

表 4 红树林滩涂不同样地桐花树和秋茄中 SiO₂ 含量和土壤盐度及有效 Si 含量(以 SiO₂ 计)

TABLE 4 SiO ₂ content of <i>Aegiceras corniculatum</i> and <i>Kandelia obovata</i> at different sample sites on mangrove fudfalt, the salinity and the effective Si content in soil (calculated by SiO ₂)				
样点号	桐花树/%	秋茄/%	土壤有效 Si 含量/(mg·kg ⁻¹)	土壤盐度/%
4	0.10±0.32	0.07±0.51	67.03±1.71	115.0
5	0.30±0.55	0.22±0.34	66.91±1.52	190.5
6	0.46±0.35	0.31±0.43	66.50±1.51	249.0

3 讨 论

3.1 土壤有效 Si 含量的影响因子

高等植物和硅藻吸收硅的主要形态是单硅酸^[4],因此土壤有效硅是指土壤溶液中的单硅酸及各种易于转化为单硅酸的成分,如多硅酸、交换态硅以及胶体态硅的一部分等^[18].有研究表明酸性土壤中有效 Si 含量与土壤粘粒含量呈正相关;在淹水还原的条件下,土壤溶液中 Si 的浓度升高^[18-19].本研究表明,从上游到下游,河岸边土壤中有有效 Si 的含量有增高的趋势,也意味着土壤中有有效 Si 含量与土壤粘粒含量呈正相关,样点 3 则因筑坝而采自堤岸,有效 Si 含量较低,这可能与土壤来源较复杂有关.

Walbridge(1991)^[20]认为叶片养分元素含量一般

情况下能成功地反映植物养分供应水平,我们也注意到,马缨丹和鸭跖草叶片中 Si 含量随土壤有效 Si 含量的升高而增加.实际上,植物体内 Si 营养元素的累积是一个复杂的过程,不仅与植物种类、土壤营养元素供应有关,还与植物的蒸腾作用、生长状况、年龄有关,甚至同一品种中因遗传基因的不同也可以改变组织中 Si 的含量^[21-23].

3.2 不同植物类群叶片 Si 含量

侯学煜(1982)^[24]报道了中国多种植物叶片 Si 的含量,如芦苇(2.07%~14.81%)、蕨(1.66%~9.43%)、枇杷(0.45%)、白骨壤(0.45%)、油茶(0.08%~0.27%),本研究的结果与之相近.Takahshi 和 Miyake^[7]研究了栽培于同一生境下的 175 种植物,表明 34 种积累者的平均 Si 含量为 1.96%,非积累者 141 种的平均 Si 含量为 0.25%,本研究的结果与之有一定的差异;并且积累者与非积累者数量的比例也有差异,分别约为 1:2 和 1:4,这可能是由于所选择物种的差异造成的.Jone 等(1967)^[25]也曾报道低湿地禾本科植物比旱地禾本科植物的 Si 含量更高.那么,由此进一步研究不同植物群落的平均 Si 含量的差异以及积累者与非积累者比例的差异,可能在更深层次上揭示 Si 元素的生态功能.

尽管在同一种植物中,叶片内 Si 含量高低受环境的影响,但不同类群间的含量差异更为明显,我们的研究表明,禾本科、木贼科、紫萁科、凤尾蕨科、鸭跖草科和桑科植物叶片 Si 含量较高,伞形科、蓼科、茄科和桃金娘科植物叶片 Si 含量较低.

3.3 Si 元素对植物的生态学意义

自然植被所具有的 Si 元素特征是植物本身的特点,是植物长期历史演化的结果,也反映了其起源上的特点,又因漳江生境较少受人为活动尤其是施肥的影响,所以对 these 植物 Si 元素特征的阐明,是讨论 Si 元素地球化学特征和生物地球化学循环的重要资料^[26].陆地和海洋环境中生态上最成功的禾本科、松科的一些植物和硅藻,体内都积累了高浓度的硅^[5, 9, 27],这对它们在生态上取得成功的作用还有待探讨.

一般认为豆类植物积累 Si 的能力很低^[7],但本研究发现海刀豆(*Canavalia lineata*)和鱼藤(*Derris trifoliata*)叶片 Si 含量分别达到了 3.00%和 1.42%,可能是由于其生境中盐度较高的缘故.本研究还表明,生长于海岸潮间带的桐花树和秋茄叶片中 Si 含量与土壤盐度呈正相关,我们认为,这是它们对高盐度条件的一种适应,这也证实了 Matoh 等^[11, 28-30](1986)所提出的积累 Si 可显著提高作物的抗盐性,

降低作物的盐害程度的观点,这可能与 Si 能改变植物体内超氧化物歧化酶(SOD)和抗坏血酸氧化酶(APX)等多种抗氧化酶的活性有关^[29-30],还需要进一步的证实.

生态化学计量学是近年来新兴的一个生态学研究领域,目前主要关注的是生物体内的碳氮磷比值^[31],作为植物的必需元素,Si 和其他无机元素的化学计量学研究可能具有一定的意义.

3.4 植物 Si 含量的系统发育特征

早期的研究发现禾本科植物 Si 含量 10~20 倍于非单子叶植物,Takahash^[7]与其合作者的研究结果也表明,富集 Si 的主要是原始陆生植物和某些单子叶植物类群(如禾本科、莎草科和鸭跖草科);另外双子叶植物的荨麻科和葫芦科也可能是富集 Si 的^[32]. 本研究中,木贼科、鸭跖草科和禾本科植物叶片 Si 含量较高,部分地支持上述结论.

最近,Hodson 等对从不同文献中收集的 735 种植物的 Si 含量数据进行分析,发现 7 个不同进化分支的植物类群 Si 含量具有显著差异,含量大小的顺序为地钱>木贼>石松>苔藓>被子植物>裸子植物>蕨类植物^[32].但是他们所收集的均为实验室栽培材料的数据,不是野外采样所得;而且仍然有一些系统发育类群未被包含.本研究中,紫萁科和凤尾蕨科植物 Si 含量仅次于木贼科,高于其他的许多科,与之不符.到底是取样大小的问题,还是实验室栽培植物与野外植物数据间的差异,还有待探讨.因此进一步的野外采样是非常必要的,本文对河流沿岸植物 Si 含量的报道填补了一定的空白.

致谢 研究过程中牟美蓉、蒋巧兰、朱小龙、宋爱琴和福建漳江口红树林湿地国家级自然保护区的吴秋城提供了大力帮助,特此致谢!

参 考 文 献

[1] EPSTEIN E. The anomaly of silicon in plant biology [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 1994, 91: 11-17.

[2] NELSON D M, GOERING J J, BOISSEAU D W. Consumption and regeneration of silicon acid in three coastal upwelling systems[C]// RICHARDS F A. *Coastal upwelling*. Washington, DC: American Geophysical Union, 1981: 242-256.

[3] BELANGER R R, BOWEN P A, EHERT D L, *et al.* Soluble silicon: Its role in crop and disease management of greenhouse crops [J]. *Plant Disease*, 1995, 79(4): 329-336.

[4] LI Z J, LIN P, HE J Y, *et al.* The organic pool and biological cycle of silicon in moso bamboo community in Wuyishan Biosphere Reserve[J]. *Journal of Zhejiang University Science-B*, 2006, 7 (11): 849-857.

[5] EPSTEIN E. Silicon[J]. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*, 1999, 50: 541-664.

[6] TAKAHASHI E, MIYAKE Y. Distribution of silica accumulator plants in the plant kingdom⁽⁵⁾; Monocotyledons[J]. *Journal of the Science of Soil and Manure*, 1976, 47: 296-300.

[7] TAKAHASHI E, MIYAKE Y. Distribution of silica accumulator plants in the plant kingdom⁽⁶⁾; Dicotyledons[J]. *Journal of the Science of Soil and Manure*, 1976, 47: 300-306.

[8] 邹邦基. 植物的硅素营养[J]. *土壤通报*, 1980, 11(3): 44-46.

ZOU B J. Silicon nutrient of plant [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 1980, 11(3): 44-46.

[9] MORIKAWA C K, SAIGUSA M. Mineral composition and accumulation of silicon in tissues of blueberry (*Vaccinium corymbosum* cv. Bluecrop) cuttings[J]. *Plant and Soil*, 2004, 258: 1-8.

[10] 邢雪荣,张蕾. 植物的硅素营养的研究综述[J]. *植物学通讯*, 1998, 15(2): 33-40.

XING X R, ZHANG L. Review of the studies on silicon nutrition of plants[J]. *Chinese Bulletin of Botany*, 1998, 15(2): 33-40.

[11] MATOHT, KAIRUSMEE P, TAKAHASHI E. Salt-induced damage to rice plants and alleviation effect of silicate[J]. *Soil Science and plant Nutrition*, 1986, 32: 295-304.

[12] LIANG Y C, HUA H X, ZHU Y G, *et al.* Importance of plant species and external silicon concentration to active silicon uptake and transport[J]. *New Phytologist*, 2006, 172(1): 63-72.

[13] 叶晓青,徐汉卿,李惠芬,等. 梅果实的发育解剖学初探[J]. *北京林业大学学报*, 1999, 21(2): 31-36.

YE X Q, XU H Q, LI H F, *et al.* Preliminary studies about developmental anatomy on the fruits of Mei trees [J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 1999, 21(2): 31-36.

[14] MITANI N, MA J F. Uptake system of silicon in different plant species [J]. *Journal of Experiment Botany*, 2005, 56 (414): 1 255-1 261.

[15] WINSLOW M D, OKADA K, CORREA-VICTORIA F. Silicon deficiency and the adaptation of tropical rice ecotypes[J]. *Plant and Soil*, 1997, 188: 239-248.

[16] VAN DER VORM P D J. Dry ashing of plant material and dissolution of the ash in HF for the colorimetric determination of silicon[J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 1987, 18: 1 181-1 189.

[17] 中国土壤学会农业化学专业委员会. 土壤农业化学常规分析方法[M]. 北京: 科学出版社, 1983.

Committee of Agrochemicals Division of Soil Science Society of China. *General analytical method of soil and agriculture chemistry* [M]. Beijing: Science Press, 1983.

[18] 刘鸣达,张玉龙. 水稻土硅素肥力的研究现状与展望[J]. *土壤通报*, 2001, 32 (4): 187-192.

LIU M D, ZHANG Y L. Advance in the study of silicon fertility in paddy fields[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2001, 32 (4): 187-192.

[19] 邹邦基. 土壤供 Si 能力及 Si 与 N、P 的相互作用[J]. *应用生态学报*, 1993, 4(2): 150-155.

ZOU B J. Silicon supplying capacity of soil and interaction of silicon and nitrogen or phosphous[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1993, 4(2): 150-155.

[20] WALBRIDGE M R. Phosphorud availability in acid organic soils of the lower North Carolina Coastal Plain[J]. *Ecology*, 1991, 72(6): 2 083-2 100.

[21] JONES L H P, MILNE A A, WADHAM S M. Studies of silica in the oat plant (Ⅱ): Distribution of silica in the plant[J]. *Plant and Soil*, 1963, 18: 358-371.

[22] HANDRECK K A, JONES L H P. Studies of silica in the oat plant (Ⅳ): Silica content of plant parts in relation to stage of growth, supply of silica and transpiration[J]. *Plant and Soil*, 1968, 29: 449-459.

[23] GALI H U, SMITH C C. Effect of silicon supply on growth, fertility and mineral composition of an annual brome, *Bromus secalinus* L. (Gramineae) [J]. *American Journal of Botany*, 1992, 79 (11): 1 259-1 263.

[24] 侯学煜. 中国植被地理及优势植物化学成分[M]. 北京: 科学出版社, 1982.
HOU X Y. *Vegetation geography of China and chemical composition of the dominant plants* [M]. Beijing: Science Press, 1982.

[25] JONES L H P, HANDREECK K A. Silica in soils, plants and animals[J]. *Advances in Agronomy*, 1967, 19: 107-149.

[26] 蒋高明, 黄银晓, 林舜华, 等. 海河流域 61 种植物磷元素化学特征及地理分异[J]. 植物资源与环境, 1995, 4 (11): 47-53.
JIANG G M, HUANG Y X, LIN S H, *et al.* The characteristics of phosphorus chemistry, geographical distribution of 61 plants in the Haihe River, North China [J]. *Journal of Plant Resources and Environment*, 1995, 4(11): 47-53.

[27] WERNER D, ROTH R. Silicon metabolism [C]//LAUCHI A, BIELESHI R L. *Inorganic plant nutrition*. Berlin: Springer-Verlag, 1983: 683-694.

[28] AHMAD R, ZAHEER S, ISMAIL S. Role of silicon in salt tolerance of wheat (*Triticum aestivum* L.) [J]. *Plant Science*, 1992, 85: 43-50.

[29] ZHU Z J, WEI G Q, LI J, *et al.* Silicon alleviates salt stress and increases antioxidant enzymes activity in leaves of salt-stressed cucumber (*Cucumis sativus* L.) [J]. *Plant Science*, 2004, 167 (3): 527-533.

[30] LIANG Y C, ZHANG W H, CHEN Q, *et al.* Effects of silicon on tonoplast H⁺ - ATPase and H⁺ - PPase activity, fatty acid composition and fluidity in roots of salt-stressed barley (*Hordeum vulgare* L.) [J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2005, 55: 29-37.

[31] ELSER J J, STERNER R W, GOROKHOVA E, *et al.* Biological stoichiometry from genes to ecosystems[J]. *Ecology Letters*, 2000, 3: 540-550.

[32] HODSON M J, WHITE P J, MEAD A, *et al.* Phylogenetic variation in the silicon composition of plants[J]. *Annals of Botany*, 2005, 96: 1 027-1 046.

(责任编辑 赵 勃)

欢迎订阅 2008 年《大豆科学》

《大豆科学》是由黑龙江省农科院主办的学术性期刊。《大豆科学》是中国自然科学核心期刊, 中国科学引文数据库来源期刊及国内外多家权威数据库收入期刊源。主要刊登有关大豆的遗传育种, 品种资源, 生理生态, 耕作栽培、病、虫、杂草防治, 营养施肥, 生物技术, 食品加工, 药理研究和工业用途等方面的科研报告, 学术论文、国内外研究进展评述、研究简报、学术活动简讯、新品种介绍等。

《大豆科学》主要面向从事大豆科学研究的科技工作者、大专院校师生、各级农业技术推广部门的技术人员及科技种田的农民。

国内外公开发行, 双月刊, 16 开本, 每期 200 页。国内每期订价 10.00 元, 全年 60.00 元。邮发代号: 14-95。国外每期订价 10.00 美元(包括邮资), 全年 60 美元。国外由中国国际图书贸易总公司(北京 399 信箱)发行。国外代号: Q5587。

本刊热忱欢迎广大科研及有关企事业单位刊登广告, 广告经营许可证号: 2301004010071。

联系地址: 150086 哈尔滨市南岗区学府路 368 号《大豆科学》编辑部

电话: 0451-86668735 Email: dadoux@sina.com; ddkexue@126.com