

森林生态系统硅素循环研究进展

王 惠¹,马振民¹,代力民²

(1. 济南大学城市发展学院, 济南 250002 ;2. 中国科学院沈阳应用生态研究所, 沈阳 110161)

摘要 硅是植物生长发育的有益元素,其在生态系统内的迁移转化是维持生态系统结构与功能的决定性因素之一。近年来,陆地生态系统硅循环特别森林生态系统硅循环在全球生物地球化学循环中的重要性,受到越来越多的关注。该文总结了国内外森林生态系统硅循环研究的成果,在综述了硅在森林生态系统中的存在形态、分布、循环过程的基础上,总结了森林生态系统硅循环的特点、作用及其影响因素,并指出典型森林生态系统类型中硅循环规律的研究、森林生态系统与其它生态系统硅循环的比较研究、森林生态系统硅循环对全球气候变化的影响和响应研究和人类干扰对森林生态系统硅循环的影响的研究将是今后开展森林生态系统硅循环研究的重点。

关键词 森林生态系统 ;硅循环 ;进展

文章编号 1000-0933 (2007) 07-3010-08 中图分类号 Q143 文献标识码 A

A review of silicon cycling in forest ecosystem

WANG Hui¹,MA Zhen-Min¹,DAI Li-Min²

1 School of city development ,University of Jinan ,Jinan 250002 ,China

2 Institute of Applied Ecology ,Chinese Academy of Sciences ,Shenyang 110016 ,China

Acta Ecologica Sinica 2007 27 (7) 3010 ~ 3017.

Abstract :Silicon biogeochemistry plays an important role in controlling structure and function of forest ecosystems. Forest vegetation does recycle substantial amounts of silicon from and back to the soil solution with phytoliths as an intermediate phase. However ,silicon as a beneficial inorganic element in forest ecosystems has not been systematically studied. In recent years ,the importance of silicon biogeochemistry in terrestrial ecosystems ,especially in forest ecosystem ,has received increasingly more attention. Advances of silicon cycling in forest ecosystem were reviewed in this paper introducing silicon chemical forms of silicon and distribution ,and the silicon biological cycling including characteristics ,significance and influencing factors in forest ecosystems. Specific questions that should be addressed in future research may be included ,but not limited to : (1) The mechanism of silicon cycling in typical forest ecosystems ; (2) The difference of silicon cycling between forest ecosystems and other ecosystems ; (3) The influence of silicon cycling in forest ecosystem on global climate change and the response of silicon cycling in forest ecosystem to the global climate change ;and (4) The effect of human interference on silicon cycling in forest ecosystem.

Key Words :forest ecosystem ;silicon cycling ;review

基金项目 国家自然科学基金 (40672158) ;山东省优秀中青年科学家科研奖励基金 (2006BS08004) ;济南大学博士启动基金 (BS0535)

收稿日期 2006-12-26 ;修订日期 2007-06-15

作者简介 王惠 (1972 ~) ,女 ,山东曲阜人 ,博士 ,副教授 ,主要从事生态系统生态学和森林生态学研究. E-mail :Hwang_118@ 163. com

Foundation item :The project was financially supported by National Science Foundation (No. 40672158) ,Shandong distinguished middle-aged and Young scientist encourage and reward foundation (No. 2006BS08004) and Ph. D. start-up foundation of University of Jinan (No. BS0535)

Received date 2006-12-26 ;**Accepted date** 2007-06-15

Biography :WANG Hui ,Ph. D. ,Associate professor ,mainly engaged in ecosystem ecology and forest ecology. E-mail :Hwang_118@ 163. com

硅是地壳中除氧外,含量最丰富的元素,其丰度约为 29.50%^[1]。在地球圈层中,大多数的硅存在于岩石中,参与生物地球化学循环的硅只有很少的一部分^[2]。关于硅的全球生物地球化学循环的研究,多从含硅岩石的风化过程与海洋生态系统中的硅沉积等方面展开^[3-6]。国内外,对陆地生态系统硅循环的研究进行了相关探讨,研究重点在于,硅元素与其它化学元素的生物地球化学循环过程之间的耦合作用、硅循环对人类干扰活动的反馈效应及植物个体或群落对硅的风化过程及其生物地球化学循环的影响等方面^[7-10]。目前,硅的生物地球化学循环研究的热点,多集中在硅酸盐风化过程与二氧化碳从大气圈到岩石圈转移相关联,可改变大气中 CO₂ 的浓度,对全球气候变化产生较大的影响等方面^[2]。尽管在森林生态系统中,植物对生物硅(Biogenic Silica)的积累量与海洋生物对生物硅的积累量相当,但在以往的研究中,在利用溶解的硅含量来研究岩石的风化动力学时,往往忽视植被对硅的吸收、固定和释放^[11,12]。直到 20 世纪 90 年代以来,人们才开始重视森林生态系统中的硅在全球生物地球化学循环中的作用,并展开了多方面的研究^[7,13-19]。我国,关于硅的全球生物地球化学循环的研究还较少^[5,20,21],森林生态系统中硅循环的研究还鲜见报道^[10]。

本文从森林生态系统中硅的形态与分布、森林生态系统硅循环过程与特点、森林生态系统硅循环的作用及其影响因素等方面,回顾和分析了森林生态系统中硅循环研究的现状和发展趋势,总结了今后森林生态系统硅循环开展研究的重点,这有利于促进和推动我国生物地球化学循环领域及相关领域的研究。

1 森林生态系统硅的形态与分布

1.1 硅的形态

硅被认为是植物生长发育的非必需营养元素。但近年来的研究表明,硅可间接参与植物的营养过程,并可对植物的生长产生积极的影响^[22,23]。在某些植物中,其积累浓度甚至高于大量营养元素^[24]。在森林生态系统中,硅的存在的形态主要有两种,即不溶性硅酸盐($(\text{SiO}_2)_n$)和可溶性的能被植物吸收的单硅酸(H_4SiO_4)。根据硅氧组成的分子结构的不同,硅酸盐又细分为岛状硅酸盐类、环状硅酸盐类等不同种类,这些种类的形成受土壤 pH 值、土壤的粘粒含量和土壤母质状况等因素的影响。多数硅酸盐化学性质稳定,其风化能力对土壤中循环硅的数量有一定的影响^[15]。土壤溶液中的单硅酸呈游离状态,当硅以单硅酸分子形式被植物吸收后,以非聚合态被运输,而后以水化无定型硅($\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$)或称作“生物起源蛋白石”的形式沉积,这些沉积在植物体内的生物硅,统称之为硅酸体(phytoliths)。硅酸体多以毛簇状沉积在植物专门的内部细胞中或表皮细胞中。在分类学上,有时也将这些毛簇状堆积物的独特形状,作为植物分类的标准^[2]。硅在陆地植物体内的含量一般都能达到可分析的数量,占到了干物质的百分之一至百分之十,有些植物中甚至占到了干物质重量的 10% 以上^[25]。植物体单位干物质中所含有的硅的数量,取决于该种植物对水的吸收能力和植物的蒸腾能力^[12]。因此,Marschner 指出,高等植物中含硅的数量也可作为植物分类的标准^[26]。

1.2 硅的分布

硅在森林生态系统中主要分布在四大天然储库中,即植被、土壤有机质、土壤矿物质和土壤溶液^[14]。不溶性的硅酸盐多分布在土壤矿物质中,尤其是在高岭石含量较高的土壤中,不溶性硅酸岩含量更高^[15]。可溶性硅分布在植物体内、土壤和土壤溶液中。在不同的森林生态系统类型中,参与生物地球化学循环的可溶性硅的分布与来源不同。硅在植物中多以游离状态分布在草本植物专门的硅细胞中和木本植物的组织内部与叶、茎、根等器官的表皮细胞中^[27]。在植物体内,硅的作用类似于木质素,是抵抗外来压力的结构成分,而且,在维持植物的热力学机制和植物生长中,起重要作用^[28]。硅在土壤有机质中普遍存在,尤其是在生长季节后期,随着植物有机物质的腐烂,硅酸体作为亚稳定的成分,沉积在土壤下层,土壤有机质中硅的数量与土壤上生长的植物群落的种类有密切关系^[12,17,29]。土壤矿物质——作为森林生态系统中硅的储存库之一,通过风化作用参与硅的循环过程,它的风化过程受植物和其共生微生物的直接影响^[15]。

2 森林生态系统硅循环过程及其特点

2.1 森林生态系统硅循环的过程

硅的生物地球化学循环属于沉积型循环。在该种循环类型中,元素储存在地壳中,经过自然风化和人类

的作用 ,从陆地岩石中释放出来 ,在植物的生长过程中被植物吸收 ,参与生命物质的形成 ,并在生态系统的营养级之间转移。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^[30]。森林生态系统内的硅循环 ,是指硅在森林生态系统的植物子系统、土壤子系统及水子系统等之间的运动 ,即硅在森林生态系统内部植物-土壤-水之间的迁移转化过程 (图 1)。该过程是以可溶性硅被植物吸收为起点 ,以枯枝落叶等分解释放硅到土壤和水中 ,再被植物吸收利用为终点的反复过程。在此循环过程中 ,循环硅的来源主要有 : (1)森林产出 ,即植物所吸收的游离的硅的释放 ; (2)土壤中硅酸体的分解 ; (3)硅酸盐矿物质的风化。硅循环后的主要流向有 : (1)以硅酸体的形式被沉积 ,保存到土壤风化层中 ; (2)植物吸收游离硅后 ,在体内固定成硅酸体 ,构成植物体的一部分 ; (3)流通到地下水中 (或者土壤溶液中)或被自然活动和人为活动带出森林生态系统^[12]。

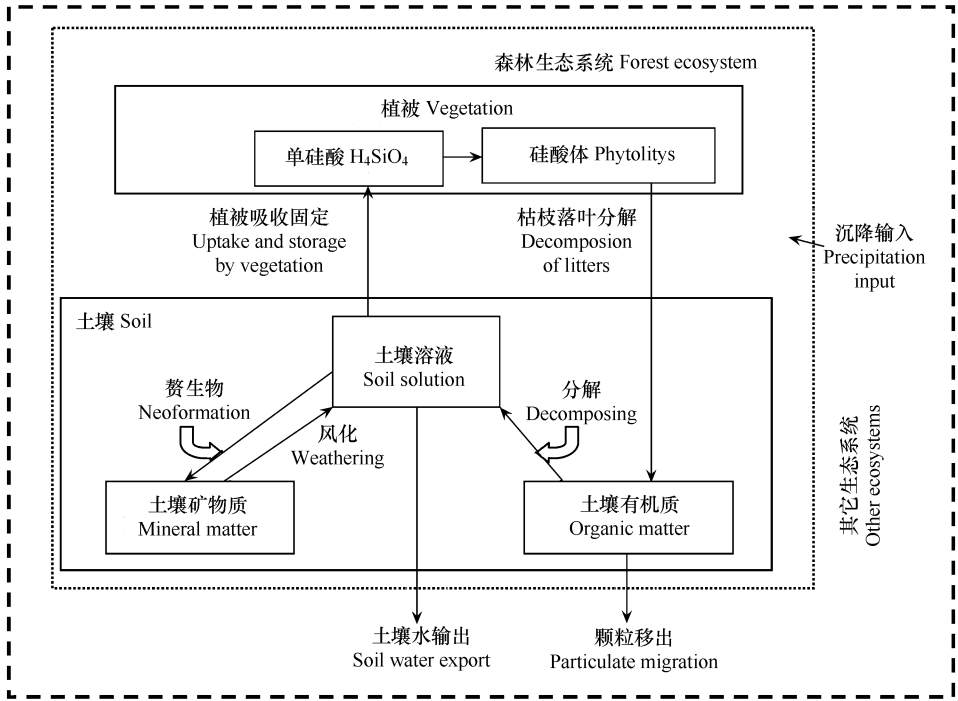


图 1 森林生态系统硅生物地球化学循环模型

Fig. 1 A model of the biogeochemical cycle of silicon in forest ecosystem

森林生态系统硅循环的动力主要来自于生物作用 ,特别是森林植被对硅的吸收与土壤微生物对枯枝落叶的分解 ,此外 ,风化作用下岩石的分解 ,也是森林生态系统硅循环的动力之一^[31]。但研究表明 ,森林生态系统中 ,参与营养循环的硅主要源于生物作用的释放 ,而不是缓慢的矿物岩石的风化^[12]。因此 ,推断生物作用将是森林生态系统中硅循环的主要动力。研究表明 ,植物对硅的吸收主要通过主动型、排斥型、被动型 3 种方式 ,不同的植物对硅的吸收能力可能与机体内 ATP 的水平、植物蒸腾量等关系密切^[32]。马建峰关于控制硅积累的水稻基因的发现 ,再次证明了植物对硅的吸收中存在着主动型吸收方式^[33]。另外 ,植物种类间地上部分与地下部分的分配比例 ,也影响硅的吸收数量 ,地上部分占的比例较大的植物 ,吸收硅的数量就大^[34]。吸收来的硅可通过质外体和共质体两条途径进入导管 ,而后输送至地上部植物体。以可溶性硅酸盐形式吸收来的硅进入植物体后 ,大多由 $SiO_n(OH)_{4-2n}$ 球形纳米粒子组装成各种形状的结构体 ,亦即植物体内沉淀形成的硅酸体^[34]。当枯枝落叶等植物有机体腐烂后 ,硅酸体作为下层土壤的亚稳定成分 ,沉积在土壤中。森林土壤中能被植物吸收的可溶性的硅 ,来自于硅酸体和含硅岩石 ,它们经过生物过程和物理化学过程释放到土壤中或水中^[35]。其中 ,生物过程对岩石的风化过程有重要的影响 ,主要原因在于 ,森林植物通过光合作用将 CO_2 固定形成有机化合物 ,一部分在根的吸收作用下运输到根部。植物的根和土壤微生物在呼吸过程中分解有机物 ,释放 CO_2 ,这些释放的 CO_2 多积累在根部 ,导致根际环境的 pH 值降低 ,加快了可溶性硅酸和金属碳酸

盐的形成,从而促进了硅酸盐的风化^[8]。可溶性的硅酸又可通过植物的吸收,进入植物体内参与循环。

2.2 森林生态系统硅循环的特点

森林生态系统作为陆地生态系统的主体,它是以植被为主体的复杂生态系统。系统内硅循环的特点主要体现在以下方面:(1)森林生态系统内,硅循环的强度较大,且其强度与系统内土壤矿物质的风化率呈正相关^[14]。与森林生态系统内的其它元素循环相比,森林生态系统输入和输出的可溶性硅酸盐的数量极小,沉积于土壤中硅酸体是维持森林生态系统硅总量平衡的重要的组成成分^[14]。(2)在森林生态系统硅循环中,相对于硅固定的数量而言,硅循环的数量较大。Alexandre 等使用双分隔室分布模型研究热带雨林生态系统的结果表明,森林生态系统的硅酸体,有 92% 分解参与到硅循环中,只有 8% 的硅酸体可作为相对稳定的供体硅库^[12]。(3)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。数据表明,热带雨林生态系统硅循环中,来自于硅酸体释放的硅的数量是岩石风化释放的数量的 2 倍多^[12,14]。虽然研究表明,森林植被可提高土壤中含硅岩石的风化率,但参与系统内循环的硅主要仍为硅酸体分解后的可溶性硅酸盐。森林生态系统硅循环的特点,决定了森林在硅的全球生物地球化学循环过程中的缓冲器地位^[16]。

3 森林生态系统硅循环的作用及其影响因素

3.1 森林生态系统硅循环的作用

首先,森林生态系统中营养的可获得性,是影响森林生产力的一个重要因素。因此,系统内物质的生物地球化学循环对维持生态系统的功能具有重要的意义。硅作为森林植被生长发育的有益营养元素,其对植物生长发育的功能,正逐渐被人们认识^[37~39]。大量研究表明,森林生态系统硅循环对促进系统内营养物质的运输,维持植被的正常生长发育和抵抗不良环境具有重要作用^[40~42]。其次,森林生态系统是全球生物地球化学循环的重要缓冲区,是硅的全球生物地球化学循环的重要组成部分。森林生态系统不仅是生物硅的重要储库,而且影响岩石的风化过程^[43]。森林植被对岩石风化的影响机制在于:(1)促进硅的螯合物的形成;(2)通过产生 CO₂ 或有机酸改变土壤的 pH 值;(3)改变矿物质暴露在外的面积;(4)改变水流在矿物质表面停留的时间^[44]。Derry 等的研究数据表明,输入到夏威夷河流的硅,大都是在储存生物硅的库内循环后释放出来的。而且,只有很少部分是通过森林土壤矿物质的风化直接释放而来的^[36]。已有的研究还证明,地表水中硅酸盐的含量不仅仅是由含硅岩石的分解所控制,生物硅的输入也是地表水中硅的重要的来源^[2]。可见,森林生态系统硅循环在硅的全球生物地球化学循环过程中起着重要的调节作用。再次,森林生态系统硅循环可调节大气中 CO₂ 的水平。森林生态系统的植被通过光合作用固定大气中的 CO₂,被固定的部分 CO₂ 最终以有机碳运输到根部^[8],再通过植物和土壤微生物的呼吸释放到土壤间隙中^[43],使土壤中 CO₂ 浓度高出大气中浓度 2 个数量级,土壤中高浓度的 CO₂ 增加了其与硅酸盐反应的速度^[45]。通过该反应过程,土壤中 CO₂ 被固定到重碳酸盐中,因而促进了有机碳化合物分解释放 CO₂,从而加速光合作用产物的消耗,促进光合作用进行,使大气中 CO₂ 得以大量固定。由于该生物过程可改变大气中 CO₂ 的浓度,减缓温室效应,影响全球气候变化,因而,正逐渐成为人们关注的热点^[46]。

3.2 森林生态系统硅循环的影响因素

森林生态系统内的硅在植被-土壤-水亚系统中的迁移转化过程,由植物自身的遗传特性(植物种类)和土壤内的生物化学过程共同控制^[47]。二者的影响大小随环境条件和土壤中硅的供应情况的改变而变化。土壤中各种生物和化学因素的作用强度因森林生态系统的类型、人为干扰程度而异^[10]。同一生态系统中季节的改变导致植物物候的变化和土壤特性的改变,也会改变硅循环中生物和物理化学过程的控制强度。以下将从植物自身的遗传因素、森林生态系统类型及季节和生态系统干扰等方面,对森林生态系统硅循环影响的研究予以介绍。

3.2.1 植物自身的遗传因素

植物自身的遗传特性决定了其对硅的利用效率,包括土壤中硅的活化、吸收和对硅的同化能力,以及对土壤中硅含量变化的响应程度和硅的周转率。不同的植物种类,对硅的吸收固定能力差异较大,如莎草属植物

的硅含量占芽中干物质重量的 10% ~ 15% ,而鹰嘴豆属中能在干燥环境中生活的植物中硅含量只占 1% ~ 3%。研究还表明 ,大多数双子叶植物中 ,硅含量只占芽中干物质的 0.5% 或者更少^[25]。同一植物在不同的物候期和生长阶段对硅的吸收和利用率也不同 ,通常随着年龄的增大 ,体内沉积的硅含量也增加^[48]。Hodson and Sangster 等研究表明 ,老龄化的植物体内 ,硅含量可达到幼龄时含量的 5 倍以上^[49]。因此 ,森林生态系统内的乔木、灌木和草本植物的种类组成与不同的发育时期 ,是影响森林生态系统硅循环的重要因素。进一步开展不同植物种类吸收固定硅的能力的机制的研究 ,将有利于深入了解不同植物间硅吸收的差异 ,合理调节硅循环的过程 ,更好地发挥森林生态系统在全球生物地球化学循环中的杠杆和缓冲器作用。

3.2.2 森林生态系统类型

不同的森林生态系统类型 ,决定了系统内的土壤、气候环境状况的差异 ,其对硅的吸收、固定和释放的影响也显著不同^[15]。Bartoli 的研究结果表明 ,落叶林生态系统中 ,土壤矿物质的风化强度至少是针叶林生态系统的 2.5 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 (表 1)。落叶林生态系统的硅循环速度为 26kg/(hm²·a) ,针叶林生态系统硅循环速度为 8 kg/(hm²·a)。显然 ,落叶林生态系统硅循环速度远远大于针叶林生态系统中硅循环的速度^[14]。以后对亚马逊雨林循环硅的数量的研究、非洲刚果近赤道雨林中循环硅的数量的研究及印度洋留尼旺岛竹林循环硅的数量的研究的数据 ,更体现了森林生态系统类型对系统内硅循环的不同影响^[13,16,50]。但对不同森林生态系统中硅循环的主要影响因子贡献力的研究 ,目前国内外还未有涉及。

表 1 不同森林生态系统硅储库的数量^[14]

生态系统类型 The type of ecosystem	易于风化的矿物质 Minerals liable to weathering	地上活体生物量 Above-ground living biomass
落叶林生态系统 Deciduous forest ecosystem	335 ± 40	0.18 ± 0.10
针叶林生态系统 Coniferous forest ecosystem	140 ± 20	0.09 ± 0.05

3.2.3 季节变化和生态系统干扰

季节的改变 ,可改变生物活动、大气降水、大气土壤温度等因素 ,从而间接影响生态系统内元素循环的数量和速度。对日本北海道白桦林生物地球化学的质子和基础阳离子流通量的季节动力学的研究表明 ,植被的活动和水的流动 ,是生物地球化学循环季节动力学的重要推动力^[51]。Leblanc 等在对地中海西北部沿海贫营养区域硅循环的季节性变化的研究中指出 ,生物硅储量在春季和夏季较高 ,岩石硅储量在秋季和冬季较高 ,浮游植物硅需求量受限的时期在浮游植物春季开花时期^[52]。可见 ,季节对生态系统硅循环有显著的影响。关于森林生态系统硅循环的季节动态的研究目前国内外还鲜有涉及 ,但对水生生态系统硅循环的季节动态变化研究表明 ,不同季节中陆地植被固定硅的数量对水生生态系统中硅循环的季节变化有显著的影响 ,如 Fulweiler 等在对新西兰南部沿海河流的可溶性硅循环的季节性变化的研究中推测 ,河流中硅浓度在春季降低 ,可能是由于陆地植被春季固定硅增多所引起的^[53]。关于森林生态系统硅循环随季节变化的动态规律及季节变化对其影响的机制研究少有涉及 ,需要在以后的工作中进一步开展此方面的研究。

干扰可破坏或改变森林生态系统原有的环境 ,对森林生态系统产生深远的影响。森林生态系统对干扰的反应为植被结构的重组和通过更新形成新的植被^[54]。植被的变化 ,影响了其对生物硅的固定 ,从而影响森林生态系统的硅循环^[17]。与气候变化将在较长的时期内对生态系统营养循环产生较大的影响相比 ,生态系统干扰在较短的时间内将对其营养循环产生较强的影响^[55]。如一些掠夺式的人为干扰 (植物体的收获、果实种子的采摘等)活动 ,使森林生态系统硅营养盐流失 ,将直接改变森林生态系统硅循环的平衡和稳定 ,影响森林生态系统的硅循环过程。

4 讨论与展望

森林生态系统营养循环是一个集生物作用、物理化学作用为一体的复杂的生物地球化学作用过程。与其它营养元素的循环一样,森林生态系统内的硅循环对维持森林生态系统的结构、发挥森林生态系统的功能具有重要意义^[2]。国外对森林生态系统硅循环的研究已取得了一定的研究成果,但对森林生态系统硅循环的深入研究还比较缺乏,今后亟需开展的研究有:(1)继续开展典型森林生态系统类型中硅循环的系统研究,分别揭示硅在这些森林生态系统中的迁移、转化过程及其对全球生物地球化学循环的贡献;(2)加强对森林生态系统硅循环与其它生态系统硅循环的对比研究,进一步探索森林生态系统中硅循环的机制;(3)开展森林生态系统硅循环对全球气候变化的影响和响应研究;(4)深入研究人类干扰对森林生态系统硅循环的影响,尤其森林采伐、果实采摘等对森林生态系统硅循环稳定性的影响等。

我国对森林生态系统硅循环研究的意义还没有足够的认识,对生态系统内硅循环的研究,多集中在硅作为营养元素,应用于农业生态系统和草原生态系统所产生的效应^[56 57]。森林生态系统硅循环的探索几乎空白^[10]。因此,开展我国森林生态系统硅循环的研究,对于维持我国森林生态系统的结构和功能,充分发挥森林生态系统在全球生物地球化学循环中的杠杆作用,实现森林资源的可持续利用都将产生重要的意义。

References :

[1] Jones H P. and Handreck K A. Silica in soils , plants , and animals. *Advances Agronomy* ,1967 ,19 :107 — 149.

[2] Daniel J C. Terrestrial ecosystems and the global biogeochemical silica cycle. *Global Biogeochemical Cycles* ,2002 ,16 (4) :1121 — 1128.

[3] Aston S. *Silicon Geochemistry and Biogeochemistry*. London :Academic Press ,1983 ,39 — 76.

[4] Tr guer P ,Nelson D M ,Van Bennekom A J ,*et al.* The silica balance in the world ocean :a reestimate. *Science* ,1995 ,268 :375 — 379.

[5] Yang D F ,Gao Z H ,Chen Y ,*et al.* The biogeochemical process of silicon. *Marine Sciences* ,2003 ,2626 (3) :39 — 42.

[6] Ye X W ,Liu S M ,Zhao Y F ,*et al.* The distribution of biogenic silica in the sediments of the East China Sea and the Yellow Sea and its environmental signification. *China Environmental Science* ,2004 ,24 (3) 265 — 269.

[7] Drever J I. The effect of land plants on weathering rates of silicate minerals. *Geochimica et Cosmochimica Acta* ,1994 ,58 :2325 — 2332.

[8] Raven J A. Cycling silicon-the role of accumulation in plants. *New Phytologist* ,2003 ,158 (3) :419 — 430.

[9] Meunier J D. Le rôle des plantes dans le transfert du siliciumà la surface des continents. *Comptes Rendus Geosciences* ,2003 ,335 (16) :1199 — 1206.

[10] Li Z J ,Lin P ,He J Y ,*et al.* Silicon's organic pool and biological cycle in moso bamboo community of Wuyishan Biosphere Reserve. *Journal of Zhejiang University Science B* ,2006 ,7 (11) :849 — 857.

[11] De La Rocha C L ,Brzezinski M A and DeNiro M J. A first look at the distribution of the stable isotopes of silicon in natural waters. *Geochimica et Cosmochimica Acta* ,2000 ,64 :2467 — 2477.

[12] Alexandre A ,Meunier J D ,Colin F ,*et al.* Plant impact on the biogeochemical cycle of silicon and related weathering processes , *Geochimica et Cosmochimica Acta* ,1997 ,61 (2) 677 — 682.

[13] Cornu S ,Lucas Y ,Ambrosi J P ,*et al.* Transfer of dissolved Al ,Fe and Si in two Amazonian forest environment in Brazil. *European Journal of Soil Science* ,1998 ,3 :77 — 84.

[14] Bartoli F. The biogeochemical cycle of silicon in two temperate forest ecosystems. In :Hallberg R O ed. *Environmental Biogeochemistry Ecology Bull* (Stockholm) ,1983 ,35 469 — 476.

[15] Lucas Y ,Luizao F J ,Chauvel A ,*et al.* The relation between biological activity of the rain forest and mineral composition of soils. *Science* ,1993 ,260 :521 — 523.

[16] Rose A W ,Kato T ,Machesky M L. The significance of biogenic element cycling in ancient tropical soils. *Chemical Geology* ,1993 ,107 :401 — 403.

[17] Carnelli A L ,Madella M ,Theurillat J P. Biogenic Silica Production in Selected Alpine Plant Species and Plant Communities. *Annals of Botany* ,2001 ,87 :425 — 434.

[18] Isabelle B D ,Jean D M ,Claude P. Another continental pool in the terrestrial silicon cycle. *Nature* ,2005 ,433 :399 — 402.

[19] Farmer V C. Forest vegetation does recycle substantial amounts of silicon from and back to the soil solution with phytoliths as an intermediate phase , contrary to recent reports. *European Journal of Soil Science* ,2005 ,56 (2) ,271 — 272.

[20] Song J M ,Luo Y X ,Li P C. Biogeochemical cycling models of P and Si near the sediment-seawater in Bohai sea. *Marine Sciences* ,2000 ,24

(12) : 30—32.

[21] Chen H Q , Li M T. Dissolved silicate flux fluctuation from river into the sea : a case study in Changjiang. Resources and Environment in the Yangtze Basin , 2001 , 10 (6) : 558—563.

[22] Chang Z L. Silicon nutrition in plant and the popularization of silicate fertilizer. Journal of Weifang University , 2004 , (2) : 25—26.

[23] Epstein E. The anomaly of silicon in plant biology. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America , 1994 , 91 : 11—17.

[24] Epstein E Silicon. Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular. Biology , 1999 , 50 : 641—664.

[25] Lanning F C , Eleuterius L N. Silica deposition in some C₃ and C₄ species of grasses , sedges and composites in the USA. Annals of Botany , 1989 , 63 : 395—410.

[26] Marsch H. Mineral nutrition in higher plants. 2nd , California : Academic Press , 1995. 3—369.

[27] Kaufman P B , Dayanandan P , Takeoka Y , *et al.* Silica in shoots of higher plants. In : Simpson T L and Volcani B E ed. Silicon and siliceous structures in biological systems. New York : Springer-Verlag , 1981. 409—449.

[28] Raven J A. The transport and function of silicon in plants. Biological Reviews , 1983 , 58 : 179—207.

[29] Runge F. The opal phytolith inventory of soils in central Africa-Quantities , shapes , classification and spectra. Review of Palaeobotany and Palynology , 1999 , 107 : 23—53.

[30] Huang J H and Han X G. A review on the biogeochemical cycling in forest ecosystems : theories and methods. Chinese Bulletin of Botany , 1995 , 12 : 195—223.

[31] Yu X X , Zhang Z Q , Chen L H , *et al.* Forest eco-hydrology. Beijing : Chinese Forestry Press , 2004. 160—200.

[32] Zhang Y L , Wang X Y , Liu M D. The Research Status and Prospects about Plant Silicon Nutrition and Soil Silicon Fertility. Chinese Journal of Soil Science , 2004 , 35 (6) : 785—788.

[33] Ma J F. A silicon transporter in rice. Nature , 2006 , 440 : 688—691.

[34] Wang L J , Li M , Li T J , *et al.* Nanostructure SiO₂ in the plant. Science Aviso , 2001 , 46 (8) : 625—632

[35] Iler R K. The Chemistry of Silica : Solubility , Polymerization , Colloid and Surfaces Properties , and Biochemistry. New York : Wiley , 1979. 29—168.

[36] Derry L A , Kurtz A C , Ziegler K , *et al.* Biological control of terrestrial silica cycling and export fluxes to watersheds. Nature , 2005 , 433 : 728—731.

[37] Motomura H , Fujii T , Suzuki M. Silica Deposition in Relation to Ageing of Leaf Tissues in *Sasa veitchii* (Carrie re) Rehder (Poaceae : Bambusoideae). Annals of Botany , 2004 , 93 : 235—248.

[38] Lux A , Luxov M , Abe J , *et al.* Silicification of bamboo (*Phyllostachys heterocycla* Mitf.) root and leaf. Plant and Soil , 2003 , 255 : 85—91.

[39] Melo S P , Kornd rfer G H , Korndörfer C M , *et al.* Silicon accumulation and water deficit tolerance in *Brachiaria* grasses. Scientia Agricola , 2003 , 60 (4) : 755—759.

[40] Datnoff L E , Snyder G H , Korndorfer G H. Silicon in agriculture : studies in plant science. Amsterdam : Elsevier , 2001. 10—16.

[41] Ma J F , Sasaki M , Matsumoto H. Al-induced inhibition of root elongation in corn , *Zea mays* L. is overcome by Si addition. Plant and Soil , 1997 , 188 : 171—176.

[42] Marschner H. Mineral nutrition of higher plants. 2nd. London : Academic Press , 1995. 200—463.

[43] Lucas Y. The role of plants in controlling rates and products of weathering : importance of biological pumping. Annual Review of Earth and Planetary Sciences , 2001 , 29 : 135—163.

[44] Hinsinger P , Fernandes Barros O N , Benedetti M F , *et al.* Plant-induced weathering of a basaltic rock : Experimental evidence. Geochimica et Cosmochimica Acta , 2001 , 65 : 137—152.

[45] Berner E U , Berner R A. Global environment : water , air , and geochemical cycles. New Jersey : Prentice Hall , 1996. 80—165.

[46] Berner R A. Weathering , plants , and the long-term carbon cycle. Geochimica et Cosmochimica Acta , 1992 , 56 : 3225—3231.

[47] Mayland H F , Wright J L , Sojka R E. Silicon accumulation and water uptake by wheat. Plant and Soil , 1991 , 137 : 191—199.

[48] Ma J F , Takahashi E. Soil , fertilizer , and plant silicon research in Japan. Amsterdam : Elsevier , 2002. 40—280.

[49] Hodson M J , Sangster A G. Mineral deposition in the needles of white spruce [*Picea glauca* (Moench.) Voss]. Annals of Botany , 1998 , 82 (3) : 375—385.

[50] Meunier J D , Colin F , Alarcon C. Biogenic silica storage in soils. Geology , 1999 , 27 : 835—838.

[51] Nagata O , Managi A , Hayaawa Y , *et al.* Seasonal dynamics of biogeochemical proton and base cation fluxes in a white birch forest in Hokkaido , Japan. Water , Air , and Soil Pollution , 2001 , 130 : 691—696.

[52] Leblanc K , Qu guiner B , Garcia N , *et al.* Silicon cycle in the NW Mediterranean Sea : seasonal study of a coastal oligotrophic site. Oceanologica

Acta ,2003 26 (4):339—355.

[53] Fulweiler R W , Nixon S W. Terrestrial vegetation and the seasonal cycle of dissolved silica in a southern New England coastal river. Biogeochemistry ,2005 ,74 :115—130

[54] Liang J P , Wang A M , Liang S F. Disturbance and forest regeneration. Forest Research ,2002 ,15 (4):490—498.

[55] Beier C , Schmidt I K , Kristensen H L. Effects of climate and ecosystem disturbances on biogeochemical cycling in a semi-natural terrestrial ecosystem. Water , Air , and Soil Pollution , Focus ,2004 4 :191—206.

[56] Guo Z G , Tian F P , Wang S M , *et al.* Effect of silicon supply on alfalfa growth. Acta Ecologica Sinica ,2006 ,26 (10):3302—3307.

[57] Morikawa C K , Saigusa M. Mineral composition and accumulation of silicon in tissues of blueberry (*Vaccinium corymbosum* cv. Bluecrop) cuttings. Plant and Soil ,2004 ,258 :1—8.

参考文献：

[5] 杨东方 ,高振会 ,陈豫 ,等. 硅的生物地球化学过程的研究动态. 海洋科学 ,2002 ,26 (3):39~42.

[6] 叶曦雯 ,刘素美 ,赵颖翡 ,等. 东、黄海沉积物中生物硅的分布及其环境意义. 中国环境科学 ,2004 ,24 (3) 265~269.

[20] 宋金明 ,罗延馨 ,李鹏程. 渤海沉积物——海水界面附近磷与硅的生物地球化学循环模式. 海洋科学 ,2000 24 (12):30~32.

[21] 程和琴 ,李茂田. 河流入海溶解硅通量的变化及其影响——以长江为例. 长江流域资源与环境 2001 ,10 (6):558~563.

[22] 常志隆. 植物的硅素营养及硅肥的推广使用. 潍坊学院学报 ,2004 , (2):25~26.

[30] 黄建辉 ,韩建国. 森林生态系统的生物地球化学循环 理论和方法. 植物学通报 ,1995 ,12 :195~223

[31] 余新晓 ,张志强 ,陈丽华 ,等. 森林生态水文学. 北京 :中国林业出版社 ,2004. 160~200.

[32] 张玉龙 ,王喜艳 ,刘明达. 植物硅素营养与土壤硅素肥力研究现状和展望. 土壤通报 ,2004 ,35 (6):785~788.

[34] 王荔军 ,李敏 ,李铁津 ,等. 植物体内的纳米结构 SiO₂. 科学通报 ,2001 46 (8):625~632.

[54] 梁建萍 ,王爱民 ,梁胜发. 干扰与更新. 林业科学研究 ,2002 ,15 (4) 490~498

[56] 郭正刚 ,田福平 ,王锁民 ,等. 硅对紫花苜蓿生物学特性的影响. 生态学报 ,2006 ,26 (10):3302~3307.