

## 河口海岸带硅的生物地球化学研究进展

朱华刚

(九江市水利电力规划设计院, 江西 九江 332000)

**摘要:** 硅(Si)作为地壳中的第二大元素,是全球碳循环和陆—海相互作用过程中的关键元素之一。河口海岸带作为沟通陆地与海洋的关键区域,其间的硅循环过程受到了广泛的关注。对于河口而言,尤其是具有最大悬浊带的大潮河口,受沉降—再悬浮、生物硅(biogenic silica, BSi)的生消过程及悬浮物与水体之间发生的长期输运分离等因素的影响,硅的迁移转化过程可能极其复杂。因此,研究河口海岸带硅循环过程要综合考虑多因素耦合作用的影响。

**关键词:** 河口海岸带; 硅; 生物地球化学; 硅循环

**中图分类号:** P593

**文献标识码:** B

**文章编号:** 1007-7839 (2017) 10-0032-05

### Advances in bio-geochemistry of silicon in estuary and coastal zones

ZHU Huagang

(Jiujiang Design Institute of Water Conservancy and Hydro-electric Power,  
Jiujiang 332000, Jiangxi)

**Abstract:** Silicon (Si), as the second largest element in the crust, is one of the key elements in the global carbon cycle and land sea interaction. The estuary and coastal zones are key areas for communication between land and sea, during which the silicon cycling process has received extensive attention. For the estuaries, especially the tide estuary with the largest suspension zone, the migration process of silicon might be extremely complex due to factors such as sedimentation – resuspension, biogenic silica (BSi) and the long-term transport separation between suspended matter and water. Therefore, it's necessary to comprehensively consider the effects of multi-factor coupling in the study of the silicon cycling process in estuary and coastal zones.

**Key words:** estuary and coastal zones; silicon; bio-geochemistry; silicon cycling

河口海岸带是陆地生态系统与海洋生态系统的过渡区域,同时也是自然过程与人类活动相互作用最频繁剧烈的区域,其间生物地球化学过程动态多变,演变机制复杂多样,生态环境脆弱易损。随着人类社会的飞速发展,流域高强度的人类活动,诸如植被破坏、大型水库的建设、流域间调水、

生活污水及工农业废水的排放等形成的环境压力会向河口转移并最终汇聚,再加上全球气候变化(如海平面上升造成的海岸带侵蚀)所带来的环境压力,导致河口生态环境严重恶化、资源破坏及生态灾害频发,对人类生存发展构成潜在威胁。近年来,河口生态环境问题已经成为国际海岸带陆—

收稿日期: 2017-06-26

作者简介: 朱华刚(1986-),男,博士,研究方向为水资源保护与生态修复。

海相互作用研究计划的关注热点和重要研究内容。与开阔深海水域相比, 河口生态系统通常具有生物多样性高和生物地球化学梯度跨越大的特点, 使得河口海岸带的环境及物质迁移转化研究具有特定的科学价值和现实意义。

硅(Si)元素是地壳中的第二大元素, 仅次于氧, 约占到地壳质量的 28%。在地球表层系统中 Si 的生物地球化学循环具有重要的生态和环境意义。近年来, 由于硅循环过程与碳循环过程联系紧密, 海洋与陆地生态系统中硅的生物地球化学循环受到了广泛的关注。河口海岸带作为沟通陆地与海洋的关键区域, 其间的硅循环过程对于入海硅通量存在重要影响。新近修订的全球硅循环模型显示, 河口海岸带水域生物硅埋藏量占海洋生物硅埋藏总量的 40% 以上, 但其所占面积不到海洋面积的 10%, 这意味着河口海岸带硅循环过程在海洋乃至全球硅循环过程中占有重要地位<sup>[1-2]</sup>。本文详细综述了关于河口海岸带硅循环的研究进展, 包括河口海岸带硅循环过程、生物硅的产生及再循环, 以期推动我国硅循环领域的研究。

## 1 自然环境中硅的赋存形态

自然环境中硅的赋存形态主要包括溶解态硅、无定形态硅(amorphous silica)、弱晶格态硅(poorly crystalline silica)及晶格态硅(crystalline silica)(如图 1)。溶解态硅主要以单体硅酸( $\text{Si}(\text{OH})_4$ )的形式存在于水体当中, 是水圈中最为重要的活性硅。颗粒相吸附的硅、无定形态硅和弱晶格形态硅, 相对于晶格态硅而言, 具备较强的迁移转化潜力又可称为颗粒态活性硅。

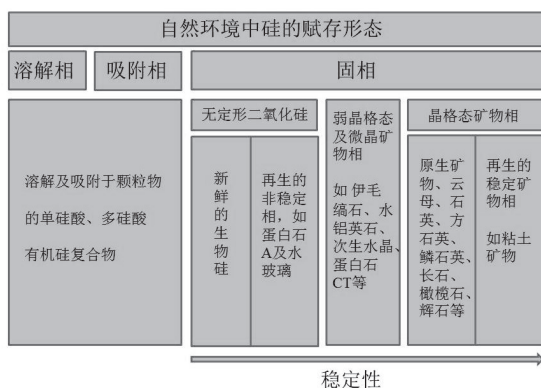


图 1 自然环境中硅的赋存形态

在水生态系统中, 对 Si 元素有特定需求的浮游生物(如硅藻、放射虫等)能够吸收固定硅元素

形成硅质骨架以支撑其细胞结构, 该硅质骨架即为生物硅, 生物硅的化学结构为无定形态水合二氧化硅( $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ )<sup>[3]</sup>。在地质学上, 生物硅又被称为生源蛋白石(biopal)。一般来说, 生源蛋白石中 90% 以上为  $\text{SiO}_2$ , 含水率通常在 4% 到 9% 之间, 但个别含水率可高达 20%。陆地生态系统的一些高等植物也能够通过根系吸收 DSi 形成无定形态二氧化硅, 并储存在不同组织结构当中, 这种由高等植物合成的无定形态二氧化硅通常被称为植物岩(phytoliths)<sup>[4]</sup>。从广义上来讲, 植物固定的植物岩和某些浮游生物硅的硅质骨架都属于生物硅的范畴。现有的研究表明, 生物硅是沉积物或土壤乃至悬浮颗粒物中较为重要的活性硅。

## 2 河口海岸带硅循环过程概述

在硅的生物地球化学循环过程当中, 最主要的两个过程为溶解态硅(dissolved silica, DSi)被高等植物和浮游生物吸收转化为生物硅(biogenic silica, BSi)的过程和 BSi 重新溶解再生 DSi 的过程。地球圈层中硅主要以硅酸盐矿物的形式存在, 受地表侵蚀及风化作用的影响, 硅酸盐矿物被破碎或分解, 通过地表径流或地下水排泄进入河流, 并最终向海洋输送。硅酸盐矿物风化之后产生溶 DSi, 其中一部分向河流输送, 另一部分被陆地生态系统中的一些植物吸收形成植物岩。植物死亡之后, 一部分植物岩会发生溶解重新进入水圈, 一部分在土壤当中埋藏下来。当表层土壤被水流侵蚀时, 地表径流可以携带植物岩, 进入河流系统。在河流中, DSi 能够被硅藻吸收利用, 转化为生物硅。另一方面, 生物硅在水体中能够发生溶解, 使一部分硅元素重新进入水体。

河流输送是河口活性硅的主要来源。典型的河口硅循环过程如图 2 所示。有研究表明在河口咸淡水混合过程当中, 由于悬浮物的吸附、絮凝及沉降作用的影响, 水体中 10% ~ 20% 的 DSi 会被移出并在沉积物界面埋藏起来<sup>[5]</sup>。这种移出作用, 可以称之为物理化学移出。除此之外, 在河口系统中, DSi 会被浮游或底栖硅藻吸收, 而且这种吸收过程表现出明显的季节变化<sup>[6-7]</sup>。理论上讲, 在秋冬两季, 硅藻生长量低, DSi 几乎不被生物吸收利用, 从而在 DSi 向海输送的过程中, 其传输过程表现为保守稀释过程, 即随着盐度的升高





(硅藻)的生长<sup>[20-21]</sup>;另一方面,相比于许多表面积/体积比较高的纳米级(nanometer)或微微米级(picometer)浮游植物,硅藻由于其较小的表面积/体积比,在高营养盐水体中比较容易产生优势<sup>[22]</sup>。而河口水域由于大量陆源物质的输入,其营养盐含量通常处于较高水平,有利于硅藻的生长繁殖。因此,硅藻的生长特性及外界影响因素(如光照、营养盐及微量元素的含量)是影响河口海岸带水域生物硅产率的重要因素。光照是影响硅藻生长的重要外界因素之一。自然环境中营养盐及一些微量元素的可供性是影响生物硅产率的另外一个重要因素。在硅藻的生长繁殖过程当中,其对营养元素(N、P、Si等)或微量元素(如Fe)通常遵循莫诺方程。当外环境营养盐浓度发生变化时,硅藻的生长繁殖过程中极可能出现营养盐限制问题。

### 3.2 生物硅的再循环及其影响因素

生物硅的再循环主要通过生物硅颗粒物在水体中发生溶解来实现。生物硅颗粒的溶解速率很大程度上取决于其本身内在的物理化学特性。硅藻的硅质化程度及形态结构上的差异造成不同硅藻所产生的生物硅的溶解速率存在巨大差异。另外,硅藻胞外的细菌繁殖情况、硅藻的团聚行为、水生生物捕食、水环境理化条件对生物硅溶解也存在重要影响。

当生物硅颗粒沉降至沉积物界面后,沉积物中的生物硅一部分会继续溶解,另外一部分通过成岩作用进入地球圈层的化学循环。沉积物界面的早期成岩反应是控制硅元素生物地球化学循环并影响海洋硅藻生产力的主要因素。最近,在诸多河口海岸带水域的沉积物中观测到了生物硅颗粒发生早期成岩改变的现象。例如,在亚马逊河口水下三角洲沉积物中的生物硅颗粒可以部分或全部转变为富含铁、富含钾的自生黏土矿物;在密西西比河口沉积物中也发现了类似的现象。而且,由于富含Fe/Al氧化物的陆源碎屑中通常对河口沉积物具有重要贡献,因此河口沉积物中生物硅的含量是决定自生黏土矿物生成量的主要因素。Michalopoulos等人通过室内模拟发现,硅藻转变为自生黏土矿物所需的时间大约为23个月。在早期成岩过程中,生物硅与海水及成岩矿物之间的反应能够促进硅在沉积物中的埋藏。例如,在亚马逊河口,包括生物硅的早期成岩产物,活性硅的埋藏量可以占到河流入海硅通量的22%左右,是

早期所估算的埋藏量的5倍以上,该结果对修正全球硅循环具有重要意义。

## 4 结语

硅元素是地球上重要的矿物元素,在许多生物地球化学过程中扮演重要角色。目前,关于硅的生物地球化学循环研究已经取得了长足的进步与丰富的成果,但是由于河口海岸带系统的复杂性,关于河口海岸带硅循环研究存在一下几个亟待研究的问题:

(1)由于缺乏悬浮物生物硅长序列数据,难以透彻认识河口硅循环的历史变化。如何进一步理解流域入海水沙、营养盐条件的变化对于河口生物地球化学过程的影响,需要开展持续的研究。

(2)众多河口存在潮滩湿地,实际上,部分研究已经关注河口潮滩湿地沉积物以及植物中生物硅的时空分布情况。但仍需要开展潮滩湿地系统与河口活性硅交换通量的定量研究、潮滩系统沉积物界面早期成岩过程对于硅循环的影响研究等。

(3)加强河口硅同位素分馏机制方面的研究,从而提高人们对河口硅循环过程的认识。

### 参考文献:

- [1] Laruelle G G, Roubex V, Sferratore A, et al. Anthropogenic perturbations of the silicon cycle at the global scale: Key role of the land-ocean transition[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2009, 23 (4): B4031.
- [2] Tréguer P J, De La Rocha C L. The World Ocean Silica Cycle[J]. *Annual Review of Marine Science*, vol 5, 2013, 5: 477-501.
- [3] Van Cappellen P, Dixit S, van Beusekom J. Biogenic silica dissolution in the oceans: Reconciling experimental and field-based dissolution rates[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2002, 16 (4): 21-23.
- [4] Rapp Jr G, Mulholland S C. Phytolith systematics: Emerging issues[M]. Springer Science & Business Media, 1992.
- [5] Riley J P, Chester R. Chemical Oceanography[M]. 2 ed. London: Academic Press, 1978.
- [6] Clark J F, Simpson H J, Bopp R F, et al. Geochemistry and loading history of phosphate and silicate in the hudson

- estuary[ J ]. *Estuarine Coastal and Shelf Science*, 1992, 34 (3): 213–233 .
- [ 7 ] Sharp J H, Church T M. The chemistry of the delaware estuary. general considerations[ J ]. *Limnology and Oceanography*, 1982, 27 (6): 1015–1028 .
- [ 8 ] Loucaides S, Koning E, Van Cappellen P V. Effect of pressure on silica solubility of diatom frustules in the oceans: results from long-term laboratory and field incubations[ J ]. *Marine Chemistry*, 2012, 136–137 (2): 1–6.
- [ 9 ] Struyf E, Dausse A, Van D S, et al. Tidal marshes and biogenic silica recycling at the land-sea interface[ J ]. *Limnology and Oceanography*, 2006, 51 (2).
- [ 10 ] Struyf E, Van Damme S, Gribsholt B, et al. *Phragmites australis* and silica cycling in tidal wetlands[ J ]. *Aquatic Botany*, 2007, 87 (2): 134–140 .
- [ 11 ] Zhu Z Y, Ng W M, Liu S M, et al. Estuarine phytoplankton dynamics and shift of limiting factors: a study in the changjiang (yangtze river) estuary and adjacent area[ J ]. *Estuarine Coastal and Shelf Science*, 2009, 84 (3): 393–401.
- [ 12 ] Shen Z, Zhou S, Pei S. Transfer and transport of phosphorus and silica in the turbidity maximum zone of the Changjiang estuary[ J ]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2008, 78 (3): 481–492 .
- [ 13 ] Carbonnel V, Vanderborght J, Lionard M, et al. Diatoms, silicic acid and biogenic silica dynamics along the salinity gradient of the Scheldt estuary (Belgium/The Netherlands)[ J ]. *Biogeochemistry*, 2013, 113 (1–3): 657–682 .
- [ 14 ] Asmus R M, Sprung M, Asmus H. Nutrient fluxes in intertidal communities of a south european lagoon (Ria Formosa) – similarities and differences with a northern wadden sea bay (Sylt-Romo bay)[ J ]. *Hydrobiologia*, 2000, 436 (1–3): 217–235 .
- [ 15 ] Dugdale R C, Wilkerson F P. Understanding the eastern equatorial Pacific as a continuous new production system regulating on silicate[ J ]. *Nature*, 1998, 391: 270–273 .
- [ 16 ] Nelson D M, Dortch Q. Silicic acid depletion and silicon limitation in the plume of the Mississippi River: evidence from kinetic studies in spring and summer[ J ]. *Marine Ecology Progress Series*, 1996, 136: 163–178 .
- [ 17 ] Ragueneau O, Quéguiner B, Tréguer P. Contrast in biological responses to tidally-induced vertical mixing for two macrotidal ecosystems of Western Europe[ J ]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 1996, 42 (5): 645–665 .
- [ 18 ] Ragueneau O, Varela E D B, Tréguer P, et al. Phytoplankton dynamics in relation to the biogeochemical cycle of silicon in a coastal[ J ]. *Marine Ecology Progress Series*, 1994, 106: 157–172 .
- [ 19 ] Rojas De Mendiola B. Seasonal phytoplankton distribution along the Peruvian coast[ A ]. Richards F A. *Coastal Upwelling*[ M ]. Washington: American Geophysical Union, 1981. 330–347 .
- [ 20 ] Legendre L, Le Fèvre J. Hydrodynamical singularities as controls of recycled versus export production in oceans[ A ]. Berger W H, Smetacek V S, Wefer G. *Productivity of the ocean: present and past*[ M ]. Wiley, 1989 .
- [ 21 ] Margalef R. Life-forms of phytoplankton as survival alternatives in an unstable environment[ J ]. *Oceanologica Acta*, 1978, 4 (1): 493–509 .
- [ 22 ] Chisholm S W. Phytoplankton size[ A ]. Falkowski P G, Woodhead A D. *Primary Productivity and Biogeochemical Cycles in the Sea*[ M ]. New York: Plenum, 1992. 213–238 .

(责任编辑: 华智睿)