

闽江河口典型植被群落带及交错带植物—土壤 体系中硅素的分布特征

高会^{1,2,3}, 李家兵^{1,2,3}, 何涛^{1,2,3}, 孙志高^{1,2,3},
范爱连², 祝贺⁴, 任鹏⁵, 翟水晶^{1,2,3}

(1. 福建师范大学, 湿润亚热带生态地理过程教育部重点实验室, 福州 350007;

2. 福建师范大学地理科学学院, 福州 350007; 3. 福建师范大学地理研究所, 福州 350007;

4. 中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所, 山地表生过程与生态调控重点实验室, 成都 610041;

5. 中国海洋大学化学化工学院, 山东 青岛 266100)

摘要: 为研究闽江河口湿地典型植被群落带及交错带硅素空间分布特征, 以鳝鱼滩湿地为研究对象, 于2015年7月由陆向海方向设置2条样带, 对植物生物硅含量及储量分配比、表层土壤生物硅及有效硅含量进行测定分析。结果表明: (1) 闽江河口湿地典型植被群落带植物生物硅含量均低于交错带, 且不同类型植物硅含量差异较大($p > 0.05$), 其中芦苇、短叶江荃、互花米草和扁穗莎草硅含量分别为15.66, 9.09, 7.17, 7.77 mg/g。从空间来看, 高潮滩不同植物生物硅含量均高于低潮滩。就不同器官而言, 不同植物地上部分均高于地下部分, 具体表现为枯体>茎>叶>根, 其含量分别为13.40, 12.49, 11.72, 6.58 mg/g。(2) 交错带植物(短叶江荃与芦苇)地下根系生物硅分配比大于地上各器官, 而典型群落带植物生物硅分配比则与之相反。(3) 湿地表层土壤近岸方向2条样带生物硅含量变化趋势基本一致, 近海方向2条样带则呈现相反的变化趋势; 由岸及海方向2条样带表层土壤有效硅含量变化趋势基本一致。研究表明, 植物的生态学特性及其生长环境条件不同、地形条件和潮汐作用带来水文条件的差异对湿地硅素的分布具有一定的影响, 这对研究河口潮汐湿地硅素生物地球化学循环有重要意义。

关键词: 硅; 交错带; 分布特征; 湿地; 闽江河口

中图分类号: X171.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-2242(2017)01-0279-07

DOI: 10.13870/j.cnki.stbxb.2017.01.046

Silica Distribution Characteristics in Plant-soil Systems of Typical Vegetation Communities and Ecotones in Min River Estuary Wetland

GAO Hui^{1,2,3}, LI Jiabing^{1,2,3}, HE Tao^{1,2,3}, SUN Zhigao^{1,2,3},
FAN Ailian², ZHU He⁴, REN Peng⁵, ZHAI Shuijing^{1,2,3}

(1. Key Laboratory of Humid Subtropical Eco-geographical Process, Ministry of Education, Fujian Normal University, Fuzhou 350007; 2. College of Geographical Sciences, Fujian Normal University, Fuzhou 350007;

3. Institute of Geography, Fujian Normal University, Fuzhou 350007; 4. Key Laboratory of Mountain Surface Processes and Ecological Regulation, Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041; 5. College of Chemistry and Chemical Engineering, Ocean University of China, Qingdao, Shandong 266100)

Abstract: The Shanyutan wetland was the largest tidal wetland in the Min River estuary, southeast China. Yet the related researches had been only carried on about porewaters and sediments while little was known about Si distribution in typical vegetation communities and its ecotones. Two transects from land to sea were laid in July 2015 to analyze the spatial distribution of Si in plant-soil systems in typical vegetation communities and ecotones. Results showed that the biogenic silica content in vegetation of ecotones was higher than the vegetation of typical communities while the spatial distribution of different vegetations had significant differences ($p > 0.05$), and the contents in *Phragmites australis*, *Cyperus malaccensis*, *Spartina alterniflora* and *Cyperus compressus* were 15.66 mg/g, 9.09 mg/g, 7.17 mg/g and 7.77 mg/g, respectively. The dif-

收稿日期: 2016-09-12

资助项目: 国家自然科学基金项目(41401114); 福建省基金面上项目(2016J01184); 福建省公益类科研院所专项(2016R1032-1); 福建省“高等学校新世纪优秀人才计划”项目; 福建省“闽江学者奖励计划”项目; 大学生创新创业训练计划项目(201610394011)

第一作者: 高会(1993—), 男, 硕士研究生, 主要从事湿地生态与环境研究。E-mail: GH1090093751@163.com

通信作者: 翟水晶(1979—), 女, 博士, 副教授, 主要从事湿地生态与环境研究。E-mail: zhaisj@fjnu.edu.cn

ferent vegetation tissues in high tide beach contained more biogenic silica than those in low tide beach. The aboveground parts of vegetation, such as litter, stem and leaf with the contents of 13.40 mg/g, 12.49 mg/g and 11.72 mg/g, respectively, had more biogenic silica contents than underground roots (6.58 mg/g). Contrary to typical vegetations community, the allocation proportions of biogenic silica in underground tissues were higher than those in aboveground tissues in ecotones (*P. australis* and *C. malaccensis*) of the Shanyutan wetland. Biogenic silica contents in surface soil between two transects showed the same trend in high tide beach and the opposite trend in low tide beach. And the available silicon contents in surface soil between two transects showed a same trend from land to sea. This study found that the differences of ecological characteristics of different vegetations and its growth conditions, and discrepancies of topographic and hydrological conditions caused by tide might affect the accumulation, absorption and spatial distribution of silicon in wetland, this would be of great significance for studying the biogeochemistry of Si in estuarine tidal wetland.

Keywords: silicon; ecotones; distribution; wetland; Min River estuary

硅(Si)是多种植物生长所需的营养元素^[1-2],也是控制陆地和水生生态系统机能的重要元素^[3]。河口湿地是陆地、河流与海洋间的过渡区,是陆海相互作用中各种物理、化学、生物及地质过程最为集中和活跃的地区,被认为是研究硅素的重要区域。湿地植被普遍认为是硅聚集体,湿地土壤也被认为是巨大的硅库^[3]。硅作为河口近岸地区最基本的生源要素之一,其生物地球化学循环对河口近岸生态系统具有极其重要的作用,硅的输入在一定程度上会限制河口近岸浮游植物的生长,影响群落结构^[4-5],而陆地硅的输出则是近海水体富营养化的重要因素^[3]。

目前,国外关于河口地区生态系统硅的研究主要分布于比利时、美国、法国等湿地,研究对象包括湿地植物硅的累积、分配及影响机制,土壤或间隙水中的空间分布特征等方面^[6-8]。与之相比,国内关于河口地区硅的研究主要在长江口、黄河口和闽江口湿地^[2,9-11],多集中于典型植被群落硅的分布特征和富集机制^[12],沉积物硅的空间分布、沉积物—水界面硅的迁移交换^[12],间隙水中硅的动态变化^[11]等方面,而湿地典型植被交错带硅的相关研究还比较薄弱。交错带是指典型群落之间狭窄的过渡区或相邻斑块之间的交错区域^[13],具有生产力高、能够有效维持生物多样性以及改善水体质量等特点,同时,物种之间竞争作用明显,生态边缘效应显著^[14]。开展交错带的相关研究,对于阐明物种入侵及其竞争机制等具有重要意义。

闽江河口鱉鱼滩湿地位于闽江入海口,地处南亚热带与中亚热带的过渡地带,是闽江河口面积最大(约 3 120 hm²)的天然潮滩湿地^[15]。湿地不同植被群落由陆向海方向整体呈条带状分布,群落之间的交错区域明显。21 世纪初,外来物种互花米草入侵本区中低潮滩,不断向土著植被扩张,交错带尤为典型。当前关于闽江河口湿地硅的分布仅限于典型植被带土壤及间隙水^[11],鉴于此,本文以闽江河口鱉鱼滩湿

地为研究对象,对不同水文条件下湿地典型植被群落带和交错带植物及土壤中硅素空间分布特征及其竞争机制进行对比研究,以期为闽江河口湿地硅生物地球化学循环关键过程研究提供基础数据,为研究闽江河口物种入侵或竞争提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

闽江河口鱉鱼滩湿地(119°34'12"—119°40'40" E, 26°00'36"—26°03'42" N)地处中亚热带和南亚热带海洋性季风气候的过渡区,气候暖热潮湿,雨热同期,年平均气温 19 ℃,降水量可达 1 300 mm。研究区位于鱉鱼滩湿地中西部的潮滩地段,潮汐属正规半日潮,潮水涨落频繁,潮沟纵横,水文条件相对复杂。土壤类型属滨海盐土和沙土,偏酸性。区内主要天然植被包括芦苇(*Phragmites australis*, PA)、短叶荳蔻(*Cyperus malaccensis*, CM)、互花米草(*Spartina alterniflora*, SA)和扁穗莎草(*Cyperus compressus*, CC)等,不同湿地植被群落由陆向海方向整体呈条带状分布,不同群落之间交错带明显。

1.2 样品采集与处理

夏季(7—8 月)是闽江河口植物生长茂盛期,植被交错带明显。为了更好地研究典型植被群落带及交错带硅素的空间分布特征,于 2015 年 7 月在闽江河口鱉鱼滩湿地中西部的潮滩地段由陆向海方向设置水文差异较大的 A(远离潮沟,退潮后地表无积水)和 B(靠近潮沟,退潮后地表有部分积水)2 条样带,二者平行相距约 80 m。每条样带设置 7 个间距 30 m 左右的采样点(图 1),分别代表短叶江荳蔻(CM)、短叶江荳蔻与芦苇交错带(CP)、芦苇(PA)、芦苇与短叶江荳蔻交错带(PC)、短叶江荳蔻(CM)、互花米草(SA)、扁穗莎草(CC)群落,根据由陆向海方向植被的分布特点,交错带群落分别记为 A2—CP、B2—CP 和 A4—PC、B4—PC。每个样点设 3 个相距 5 m 左右的重

复,分别采集植物和土壤样品,其中植物样品 42 个,土壤样品 252 个。

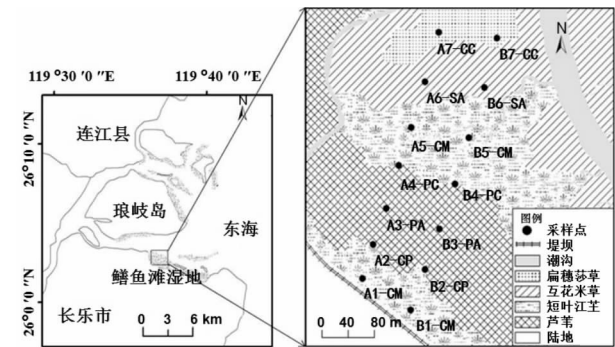


图 1 研究区域与采样点

用直径 10 cm,高 80 cm 的土壤柱状采样器采集 0—60 cm 土样,以 10 cm 为间距分成 6 层,立即装入自封袋带回实验室,自然风干后研磨,过 80 目筛,保存待测。植物地上生物量采用收获法,在每个样点随机选取 3 个 50 cm×50 cm 样方,用剪刀沿地面剪下地上部分,带回实验室,并按茎、叶和枯体进行分离。地下生物量采用挖掘法,将样方内 0—40 cm 的土全部挖出,放在细纱网袋中将根冲洗干净。将采集的地上及地下植物样品先用自来水洗净,再用蒸馏水冲洗,于 105 ℃下杀青 15 min,65 ℃下烘至恒重。粉碎后,过 60 目筛备用。

1.3 样品测定

土壤生物硅(Biogenic Silica)的测定:用热碱法提取,称取重量约 200 mg 土壤样品于 50 ml 聚丙烯离心管中,加入 5 ml H₂O₂ (10%)振荡摇匀,30 min 后,加入 5 ml 1 mol/L HCl 摇匀并静置 30 min,去除碳酸盐和有机质。再加入 20 ml 去离子水,以 4000 r/min 离心 10 min,弃去上清液,去除多余的酸和过氧化物。然后,将样品置于烘箱中 60 ℃干燥 12 h 后,加入 85 ℃ 2 mol/L 的 Na₂CO₃ 提取液 50 ml,振荡混匀,放入 85 ℃恒温水浴,间隔 1,2,3,5,8 h 各提取一次,每次提取 0.2 ml,提取液中的硅酸盐含量用硅钼蓝比色法测定,根据提取液中硅含量随时间变化做动力曲线,利用其直线部分的反延长线与 Y 轴的交点值确定土壤样品中生物硅含量^[2]。

土壤有效硅(Available Silicon)含量的高低是衡量土壤供给植物营养元素的重要标志。土壤有效硅的测定采用柠檬酸提取—钼蓝比色法^[16]。

植物生物硅的测定:称取 30 mg 左右植物样品,放于 50 ml 聚乙烯离心管中,加入 50 ml 85℃ 0.1 mol/L 的 Na₂CO₃,放入 85 ℃恒温水浴 5 h,用硅钼蓝比色法测定提取液中的硅含量^[17]。

1.4 指标计算

植物各器官生物硅储量(R_i ,mg/m²)为各器官硅

浓度与生物量的乘积,即:

$$R_i=C_i\times B_i$$

生物量分配比为各器官生物量与总生物量之比(A_i ,%),计算公式为:

$$A_i=\frac{B_i}{\sum B_i}\times 100\%$$

式中: i 表示植物根系、茎、叶与枯体; C_i 表示第 i 种器官的生物硅浓度(mg/g); B_i 表示第 i 种器官生物量(g/m²)。生物硅储量分配比计算公式同生物量分配比公式。

植物不同器官生物硅的富集系数(BCF)^[18],可用不同器官生物硅含量与土壤中生物硅含量的比值来表征,计算公式为:

$$BCF_i=C_i/C_{\text{土壤}}$$

式中: C_i 中 i 表示植物中根、茎、叶和枯体中生物硅平均含量; $C_{\text{土壤}}$ 表示土壤中生物硅的平均含量。

1.5 数据分析

运用 Origin 8.0 进行作图,采用 Excel 2007 进行数据处理与统计,运用 SPSS 19.0 对植物和土壤数据进行计算和单因素方差分析(One-way ANOVA),显著性水平设定为 $\alpha=0.05$ 。

2 结果与分析

2.1 典型植被群落带及交错带植物各器官硅分布特征

由岸及海方向中,A 样带和 B 样带典型植被群落带及交错带各器官生物硅含量变化趋势基本一致,均呈现出近岸区(高潮滩)高于近海区(低潮滩)的趋势($p<0.05,n=20$)(图 2)。以采样点 4 为界,近岸方向植物生物硅含量及其变化幅度均较高,而近海方向生物硅含量较低且变化趋于稳定。另外,2 条样带典型植被群落带生物硅含量均低于交错带,分别为 10.16,12.01 mg/g,但无显著性差异($p>0.05,n=35$)。

不同湿地植物由于自身生态学特性和所处的生长环境不同,其各器官生物硅含量差异较大。具体而言,A 样带不同植物各器官生物硅含量均存在显著性差异($p<0.05,n=35$),其中,地下根系硅含量(1.65~9.82 mg/g)均低于地上部分(5.74~32.73 mg/g),地上部分枯体硅含量最高(16.19 mg/g),其次为叶(14.44 mg/g),茎最低(14.43 mg/g)。A2—CP(交错带芦苇)各器官硅含量均最高(茎、枯体、叶和根系分别为 25.15,32.73,23.15,9.82 mg/g),A4—PC(交错带芦苇)处,除叶片外,各器官硅含量均最低(茎、枯体、叶和根系分别为 13.23,19.27,19.40,7.14 mg/g)。B 样带不同植物各器官生物硅含量之间无显著性差异($p>0.05,n=35$),除叶片外,不同植物各器官硅含量均于 B2—CP(交错带芦苇)处取得最大值,其中枯体、茎、根和叶的硅含量分别为 20.58,18.08,14.00,9.69 mg/g。比较而言,除根系外,A 样带

不同植物各器官生物硅含量和变化幅度均显著高于 B 样带 ($p < 0.05, n = 26$)。其中, 枯体与根系的硅含量在 A、B 样带之间均存在显著性差异 (枯体: $p =$

0.033, $n = 9$; 根系: $p = 0.023, n = 9$), 而茎和叶的硅含量在 A、B 样带之间均不存在显著性差异 (茎: $p = 0.184, n = 8$; 叶: $p = 0.079, n = 9$)。

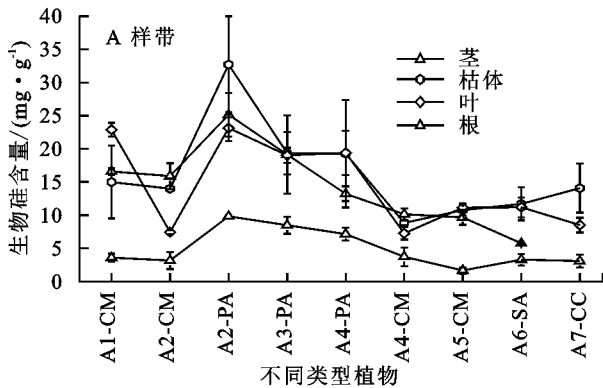
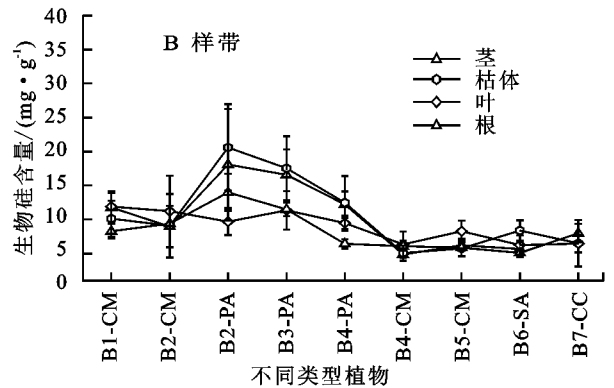


图 2 典型植被群落带及交错带植物各器官生物硅含量分布特征

2.2 典型植被群落带及交错带植物各器官生物量与生物硅分配比

从图 3 可以看出, 鳊鱼滩湿地典型植被群落带及交错带各器官生物量分配比存在较大差异 ($p < 0.01, n = 35$)。2 条样带交错带 (采样点 2 和采样点



4) 不同植物的地下根系生物量分配比均显著高于典型植被群落带同种植物 (短叶江茛: $p < 0.01, n = 8$; 芦苇: $p < 0.05, n = 6$)。

对比 2 条样带, 不同植物各器官生物量分配比之间均无显著性差异 ($p > 0.05, n = 35$)。

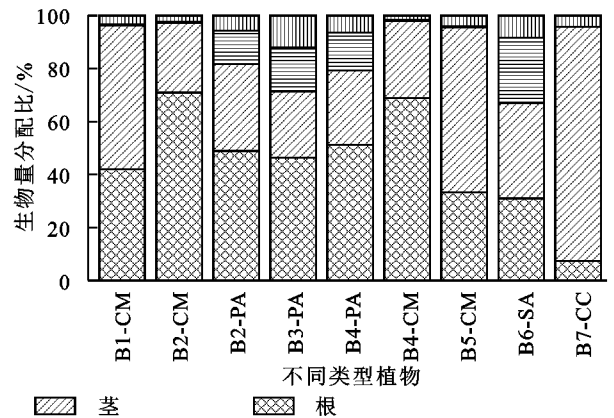
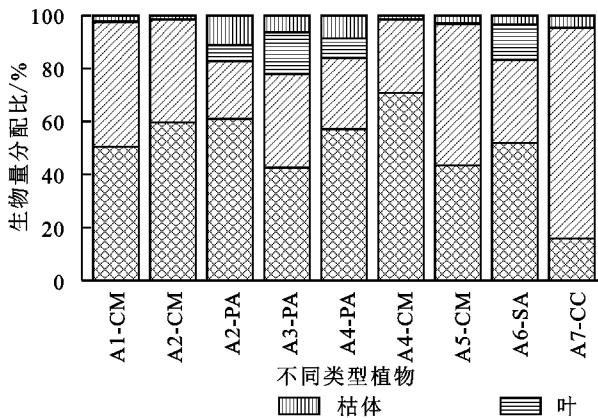


图 3 不同植物各器官生物量分配比

不同植物各器官生物硅分配比主要取决于该器官生物量的大小与硅含量, 一般而言, 生物量大且硅含量高的部分, 硅的分配比较大。本研究中, 2 条样带典型植被群落带及交错带各器官生物硅分配比均存在显著性差异 ($p < 0.01, n = 35$) (图 4)。具体而言, 典型植被群落带生物硅分配比大部分集中于茎 (53.99%), 且均高于其他器官 (除 W7—CC 外), 而交错带植物短叶茛茞与芦苇地下根系生物硅分配比 (53.84%, 39.12%) 明显高于典型植被群落带同种植物 (23.88%, 32.18%) (短叶江茛: $p < 0.01, n = 8$; 芦苇: $p > 0.05, n = 6$), 这与交错带同种植物地下生物量分配比具有很好的一致性, 说明交错带植物之间的竞争会在一定程度上改变植物不同器官硅的分配情况。

2.3 湿地上层土壤生物硅和有效硅的空间分布特征

鳊鱼滩湿地 A、B 样带表层土壤生物硅含量变化以采样点 3 为界, 近岸方向变化趋势基本一致, 近海

方向则呈现相反的趋势 (图 5 a)。除采样点 7 外, A 样带表层土壤生物硅含量极显著高于 B 样带 ($p < 0.01, n = 21$)。A 样带表层土壤生物硅含量变化整体呈不规则“M”型, 最大值和最小值分别出现在采样点 A2—CP 和 A7—CC, 其生物硅含量分别 8.22, 5.94 mg/g。B 样带表层土壤生物硅含量变化大致呈“W”型, 且在采样点 B7—CC 和 B3—PA 处取得最大值和最小值, 生物硅含量分别为 6.66, 5.37 mg/g。

鳊鱼滩湿地 A、B 样带表层土壤有效硅含量变化趋势基本一致, 且无显著性差异 ($p > 0.05, n = 21$) (图 5 b), 具体表现为近海区高于近岸区, 采样点 W4—PC、W7—CC 处有效硅含量较高。其中, A 样带表层土壤有效硅含量最大值和最小值分别出现在采样点 W4—PC (588.55 mg/kg) 和 W5—CM (317.03 mg/kg), B 样带最大值和最小值分别在采样点 W7—CC (562.38 mg/kg) 和 W1—CM (254.96 mg/kg)。

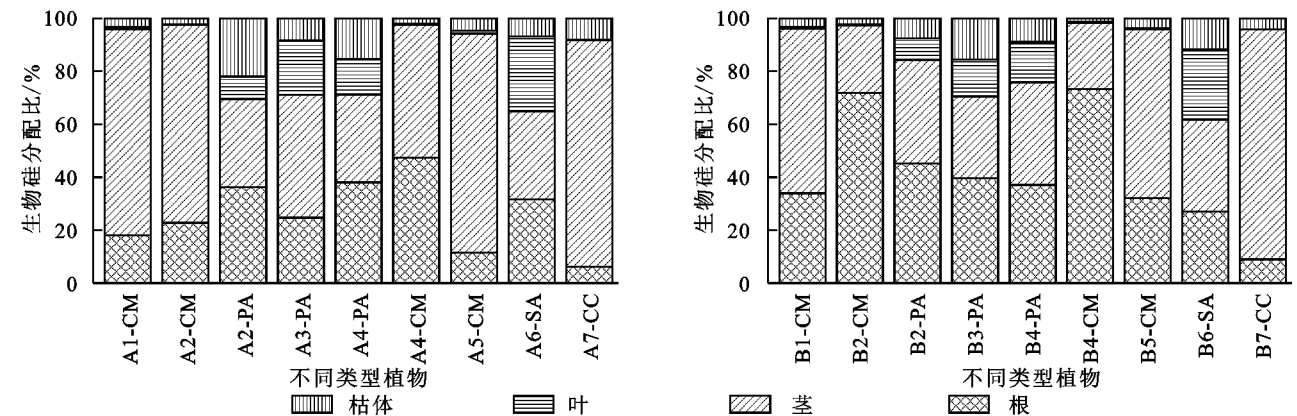
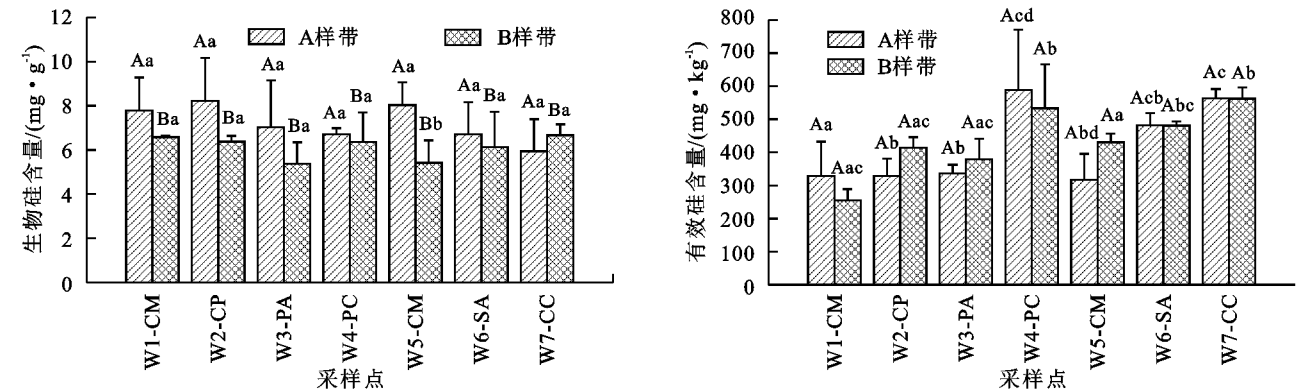


图 4 不同植物各器官生物硅分配比



注: A, B 表示不同样带之间的差异; a, b, c, d 表示相同植物类型湿地之间的差异, 字母不同表示二者在 $P<0.05$ 水平上差异显著。

图 5 表层土壤硅含量分布特征

3 讨论

3.1 典型植被群落带与交错带硅素分布的差异

与典型植被群落带相比,交错带处于不同植物的边缘地带,植物根系之间竞争作用更加明显。植物根系间的竞争可以决定邻近个体的长势,影响植物的根冠比、生物量和植物群落等,进而影响植物对营养元素的吸收与富集能力^[19]。本研究表明,交错带植物地下根系生物量分配比均明显高于同类型典型植被群落带,这可能与根冠比(表 1)及总生物量不同有关。根冠比是植物地下生物量与地上生物量的比值,是描述植物地上部分生物量与地下部分生物量配置

关系的一个重要参数^[20]。鱊鱼滩湿地交错带短叶茛苳与芦苇根冠比均大于典型植被群落带(表 1),这表明交错带植物在竞争过程中均将更多的能量分配给根部,特别是集中于地下对于水分、养分的吸收,从而促进了植物地下根系的生长。此外,交错带短叶江茛和芦苇总生物量均低于典型群落带同种植物,交错带和典型群落带总生物量分别为 1 008.78,1 886.42 g/m²,芦苇分别为 1 255.09,2 311.63 g/m²,相对而言,交错带植物根系生物量占总生物量比例会相应上升。因而交错带地下根系生物量(61.07%)明显高于典型植被群落带(36.44%)。

表 1 不同类型植物根冠比

采样点	W1-CM	W2-CM	W2-PA	W3-PA	W4-PA	W4-CM	W5-CM	W6-SA	W7-CC
A 样带	1.02	1.48	1.56	0.74	1.33	2.44	0.77	1.08	0.19
B 样带	0.72	2.44	0.96	0.87	1.05	2.21	0.50	0.45	0.08
平均	0.87	1.96	1.26	0.80	1.19	2.32	0.63	0.77	0.13

典型植被群落带生物硅分配比大部分集中于茎,且均高于其他器官(除 W7—CC 外)。这主要是由于生长旺季不同植物各器官对养分需求存在差异,而茎在养分充足的条件下生长迅速,生物量迅速增加,茎生物量及其分配比均高于其他各器官,尽管其生物硅含量较低,但其生物硅分配比仍高于其他各器官。而对于交错带植物来说,地下根系生物硅分配比高于典

型植被群落带同种植物的根系,这主要与交错带根系生物硅含量和生物量比较高有关。研究表明,生物量与营养元素含量反映了不同器官的营养元素累积量及其分配状况,植物各器官的生物量决定了植物营养元素的积累量^[21]。另外,交错带不同植物根系的竞争能够提高根系活力及对营养元素的吸收与累积能力^[2],增强了根系对硅的富集,可能导致交错带植物

根系硅含量较高。此外,交错带短叶江茛和芦苇根系生物量分配比均高于典型群落带,导致地下根系生物硅分配比高于典型群落带同种植物,为交错带植物的竞争提供理论依据。

3.2 典型植被群落带及交错带植物各器官生物硅含量的差异

不同植物对硅的吸收与累积机制以及不同器官对硅素的营养功能不同,在植物体内的分布存在着器官间的差异,且具有“末端分布现象”的规律,从根到叶呈现逐渐增加的趋势^[22]。本研究发现,鱊鱼滩湿地 A、B 样带不同类型植物各器官生物硅含量具体表现为枯体>茎>叶>根,其中植物枯体含硅量最高(13.40 mg/g),这是因为枯体部分生物硅含量会随着枯体易变成分(如有机碳和有机氮)的淋溶和分解(碳、氮分解比硅快)而导致硅在枯体中相对累积^[2]。由于植物正处于生长期,硅在各器官中的分配比例因不同的生长阶段而异,早期(生长期)以茎的分配比例最大,其次为穗和叶,此外,由根系吸收的水体硅酸盐可能会在茎中沉淀^[6],因为在向上传输过程中硅素从茎到叶的转移存在一个过渡期,因此我们推断这种存在于茎的硅是否是沉淀形态而较难向其他器官转移由此造成叶含硅量低,这还需要进一步证实。本研究还发现,地下根系生物硅含量最低,原因主要包括两个方面:一是地下根系硅的富集能力较地上各部分低(茎、枯体、叶和根系的富集系数分别为 1.85, 1.77, 2.04, 0.97),且植物根系吸收生物硅后并不在根系中沉积,而是通过茎向地上部分输送,并在蒸发作用最强烈的地方因生物硅饱和而沉积下来^[6];二是由于地下根系生物量分配比(47.38%)明显高于地上各器官(茎、枯体和叶分别为 32.00%, 4.94%, 15.67%),稀释效应较为明显,导致地下根系生物硅含量较低(6.58 mg/g)。

3.3 不同水文条件对湿地硅素分布的影响

植物自身的生态学特性及其生长环境条件,对硅的吸收与累积机制存在差异。不同植物对硅的吸收能力相差很大,植物体内硅含量差异明显^[22]。本研究发现鱊鱼滩湿地两条样带植物生物硅含量均呈现近岸区(高潮滩)高于近海区(低潮滩)的趋势($p<0.05, n=20$)。这与 Querné 等^[7]在法国布鲁斯特湾潮汐湿地得出的夏季互花米草生物硅含量在不同潮滩梯度下也存在显著性差异,从低潮滩到高潮滩生物硅含量呈增加趋势的结论相近。这可能是由于植物均依靠庞大的根系来吸收可溶性硅酸盐,尤其是侧根在硅吸收过程中起主要作用^[1]。鱊鱼滩湿地近岸区地下根系生物量相对于近海区较高(均值分别为 810.23, 640.44 g/m²),且地下茎和须根多横向分布,对土壤中可溶性硅酸盐的吸收能力强;而近海区互花米草通过根系

吸收土壤可溶性硅酸盐的能力较低^[2],扁穗莎草根系不发达,吸收硅素的能力相对较弱,因而造成近海区植物生物硅含量低于近岸区。

本研究发现,A 样带不同植物地上各器官(根系除外)生物硅含量均显著高于 B 样带($p<0.05, n=26$)。已有研究表明,潮汐湿地不同植物所处的生长环境(尤其是潮汐带来的水文条件的差异),特别是周期性潮汐淹水和盐度的胁迫在一定程度上会降低植物呼吸作用和初级生产力,进而影响其对营养元素的吸收与储存能力^[23]。本研究中,B 样带靠近潮沟,受潮汐作用以及周期性淹水的影响,涨潮时植物根系淹水时间长,易缺氧,呼吸作用微弱,其蒸腾作用亦会受到限制;同时涨潮带来大量高盐度的海水,退潮时水流较慢,部分海水会蒸发,蒸发的部分带来盐分进一步聚集,造成表层土壤盐度较高,植物生长会受到盐分胁迫的限制,进而降低植物的初级生产力,对可溶性硅酸盐的吸收与累积较差^[6-7],而枯体随易变成分的淋溶和分解亦受到限制,生物硅的累积较低,使得 B 样带植物地上各器官生物硅含量均低于 A 样带。但由于 A 样带根系生物量高于样带 B(分别为 809.98, 647.15 g/m²),“稀释效应”明显,使得 A 样带根系生物硅含量显著低于 B 样带($p<0.05, n=9$)。

水文条件差异对湿地硅素分布的影响不仅体现在植物对硅的吸收与富集上,还表现在表层土壤生物硅含量的分布上。本研究中,A 样带表层土壤生物硅极显著高于 B 样带($p<0.01, n=21$)。原因在于 B 样带淹水时间长,土壤发育程度低,对硅酸盐的吸附及储存能力较弱,部分硅酸盐随潮水的冲刷而被带走^[10],表层土壤生物硅浓度和储量远远低于 A 样带,另一方面,A 样带远离潮沟,在排水不良和氧化还原电位低的土壤溶液中,可能与硅结合的铁被还原溶解而释放出硅,此外,在土壤通气不良的条件下,有机质的矿化速率低而易于累积和保存,有机质的溶解也会增加土壤含硅量^[24]。研究还发现,A、B 样带由陆向海方向表层土壤生物硅含量变化特征截然相反,A 样带整体呈不规则“M”型,最大值和最小值分别出现在采样点 A2—CP 和 A7—CC;B 样带大致呈“W”型,且在采样点 B7—CC 和 B3—PA 处取得最大值和最小值。这主要与不同植物对硅素的吸收和归还能力强弱以及潮汐的影响有关。就 A 样带而言,芦苇和互花米草可以将吸收的硅素长期储存于植物体内,且死亡后残体分解速率以及硅素的释放速率相对于短叶江茛和扁穗莎草也低很多^[25],故短叶江茛群落表层土壤生物硅含量较高,且于交错带 A2—CP 处取得最大值;而 A7—CC 处受潮汐作用的影响,扁穗莎草表层土壤植物残体被海水冲刷带走,使得相对归还量

较低,且退潮后地表无积水,潮水中的硅酸盐不易在土壤中富集,表层土壤生物硅含量最低。就B样带而言,芦苇对硅素的吸收能力强而归还能力较弱,这可能是B3—PA处表层土壤生物硅含量最低的原因。尽管B7—CC处受潮汐影响较为频繁,但退潮后地表有部分积水,潮水中硅酸盐亦可由潮汐携带于此富集,加之扁穗莎草硅素归还能力及归还量较高,使得表层土壤生物硅含量最高。

4 结论

(1)与典型群落带相比,交错带不同植物根系之间的竞争改变了植物生物量、硅的富集能力及生物硅的分配,导致交错带地下根系生物量及硅分配比均高于典型植物群落带。

(2)典型植被群落带及交错带植物各器官地上部分生物硅含量均高于地下部分,表现为枯体>茎>叶>根的特点。

(3)鳝鱼滩湿地植物硅的空间分布表现为近岸区高于近海区,这与不同类型植物的生态学特性及其生长环境(主要是水文条件)的差异有关。

(4)鳝鱼滩湿地表层土壤2条样带生物硅含量在近岸区、近海区的变化规律相反;而2条样带表层土壤有效硅含量由陆向海方向则整体呈增加的趋势。

参考文献:

- [1] Ma J F, Yamaji N. Silicon uptake and accumulation in higher plants[J]. *Trends in Plant Science*, 2006, 11(8): 392-397.
- [2] Hou L J, Liu M, Yang Y, et al. Biogenic silica in intertidal marsh plants and associated sediments of the Yangtze Estuary[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2010, 22(3): 374-380.
- [3] Struyf E, Conley D J. Silica: An essential nutrient in wetland biogeochemistry[J]. *Frontiers in Ecology & the Environment*, 2009, 7(2): 88-94.
- [4] Shipe R F, Curtaz J, Subramaniam A, et al. Diatom biomass and productivity in oceanic and plume-influenced waters of the western tropical Atlantic ocean[J]. *Deep-Sea Research*, 2006, 53(8): 1320-1334.
- [5] 闫慧敏. 长江口潮滩湿地生物硅分布与富集机制[D]. 上海: 华东师范大学, 2008.
- [6] Struyf E, Damme S V, Gribsholt B, et al. Biogenic silica in tidal freshwater marsh sediments and vegetation (Schelde estuary, Belgium) [J]. *Marine Ecology Progress*, 2005, 303(1): 51-60.
- [7] Querné J, Ragueneau O, Poupart N. In situ biogenic sili-

ca variations in the invasive salt marsh plant, *Spartina alterniflora*: A possible link with environmental stress [J]. *Plant and Soil*, 2012, 352(1/2): 157-171.

- [8] Triplett L D, Engstrom D R, Conley D J, et al. Silica fluxes and trapping in two contrasting natural impoundments of the upper Mississippi River [J]. *Biogeochemistry*, 2008, 87(3): 217-230.
- [9] 陈晖, 刘敏, 侯立军, 等. 崇明东滩海三棱藨草生物硅分布及季节变化[J]. *中国环境科学*, 2009, 29(1): 73-77.
- [10] 刘森, 冉祥滨, 车宏, 等. 黄河口湿地土壤中生物硅的分布与植硅体的形态特征[J]. *土壤*, 2014, 46(5): 886-893.
- [11] 翟水晶, 薛丽丽. 闽江口潮滩湿地不同植被带土壤及间隙水中硅的分布特征[J]. *生态学报*, 2016, 36(21): 1-11.
- [12] 闫慧敏, 刘敏, 侯立军, 等. 长江口沙洲表层沉积物中生物硅分布特征[J]. *环境科学*, 2008, 29(1): 164-169.
- [13] Cadenasso M L, Pickett S T A, Weathers K C, et al. A framework for a theory of ecological boundaries[J]. *Bioscience*, 2011, 53(8): 750-758.
- [14] Theriot J M, Conkle J L, Pesheski S R, et al. Will hydrologic restoration of Mississippi River riparian wetlands improve their critical biogeochemical functions? [J]. *Ecological Engineering*, 2013, 60(6): 192-198.
- [15] 刘剑秋. 闽江河口湿地研究[M]. 北京: 科学出版社, 2006: 1-3.
- [16] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2008: 235-236.
- [17] Saccone L, Conley D J, Sauer D. Methodologies for amorphous silica analysis [J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2006, 88(1): 235-238.
- [18] 吴浩, 卢志军, 黄汉东, 等. 三种植物对土壤磷吸收和富集能力的比较[J]. *植物生态学报*, 2015, 39(1): 63-71.
- [19] 弋良朋, 马健, 李彦. 盐胁迫对3种荒漠盐生植物苗期根系特征及活力的影响[J]. *中国科学*, 2006, 36(增刊2): 86-94.
- [20] Mokany K, Raison R J, Prokushkin A S. Critical analysis of root:shoot ratios in terrestrial biomes[J]. *Global Change Biology*, 2006, 12(1): 84-96.
- [21] 黎学文. 西南桦人工林生物量、养分含量和碳氮储量的研究[D]. 南宁: 广西大学, 2013.
- [22] 李晓艳, 孙立, 吴良欢. 不同吸硅型植物各器官硅素及氮、磷、钾素分布特征[J]. *土壤通报*, 2014, 45(1): 193-198.
- [23] 阎光宇. 潮汐活动对亚热带地区红树林生态系统水平衡的影响[D]. 厦门: 厦门大学, 2012.
- [24] 刘春生. 土壤肥科学[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2006: 34-38.
- [25] 刘白贵. 闽江河口湿地芦苇、短叶茳芏和互花米草三种植物枯落物分解研究[D]. 福州: 福建师范大学, 2008.