

DOI: 10.5846/stxb201911272578

邱思婷, 米慧珊, 高会, 翟水晶. 闽江河口湿地不同植被带土壤全硅的含量及分布特征. 生态学报, 2020, 40(22): 8306-8314.

Qiu S T, Mi H S, Gao H, Zhai S J. Total Silicon Content and Distribution Characteristics of Wetland Soil in Different Vegetation Zones in the Min River Estuary. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(22): 8306-8314.

闽江河口湿地不同植被带土壤全硅的含量及分布特征

邱思婷^{1,2}, 米慧珊², 高会², 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

摘要: 硅是湿地系统元素循环所关注的重要内容之一, 土壤全硅的分布特征与湿地土壤-植物系统活跃程度密切相关。于 2016 年 1—12 月, 以闽江河口鳝鱼滩湿地为研究对象, 通过野外原位采样及室内实验分析, 对短叶荻、短叶荻与互花米草交错带、互花米草 3 种植物类型湿地的土壤全硅含量和储量的变化特征进行观测。结果表明: 短叶荻、短叶荻与互花米草交错带、互花米草湿地土壤全硅的年平均含量依次为 197.67、201.21、210.33 mg/g, 表现为由陆向海方向逐渐增加的趋势; 季节上均呈现秋冬高于春夏的趋势; 土壤全硅含量和储量均表现为上部土层 (0—30cm) 高于下部土层 (30—60cm)。经统计分析发现, 湿地土壤全硅含量与有机质显著负相关 ($P < 0.05$), 与含水率和 pH 有极显著正相关关系 ($P < 0.01$)。除短叶荻湿地外, 其余 2 种湿地土壤全硅含量与有效硅含量显著负相关 ($P < 0.05$)。研究闽江河口湿地不同植被带土壤全硅含量和储量及其分布特征, 旨在揭示湿地土壤全硅水平在不同类型湿地植被生长影响下的变化过程, 为本研究区的硅素研究补充关键数据。

关键词: 土壤全硅; 分布特征; 湿地; 闽江河口

Total Silicon Content and Distribution Characteristics of Wetland Soil in Different Vegetation Zones in the Min River Estuary

QIU Siting^{1,2}, MI Huishan², GAO Hui², ZHAI Shuijing^{1,2,3,*}

1 Key Laboratory of Humid Subtropical Eco-geographical Process, Ministry of Education, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China

2 College of Geographical Sciences, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China

3 Institute of Geography, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China

Abstract: Silicon is one of the important components of the element cycle in wetland systems, and its distribution characteristics in the soil are closely related to the activity of the soil-plant systems in wetlands. To investigate the variation in total silicon content and storage in soils in typical vegetation communities and ecotones in the Min River Estuary, the *Cyperus malaccensis* marsh, *Spartina alterniflora* marsh, and their ecotones (*C. malaccensis*-*S. alterniflora* marsh) were studied from January to December 2016 using field sampling and laboratory experiments. The results showed that the average annual silicon content in soils in the *C. malaccensis* marsh, *C. malaccensis*-*S. alterniflora* marsh, and *S. alterniflora* marsh were 197.67, 201.21, and 210.33 mg/g, respectively, and increased gradually from the land to the sea. The total silicon content in soils in different types of marshes in autumn and winter were higher than those in spring and summer. The total silicon content and storage in soils in different types of marshes in the upper layer (0—30 cm) were higher than those in the lower layer (30—60 cm). Statistical analysis showed that the total silicon content of wetland soils was significantly negatively correlated with the amount of organic matter ($P < 0.05$) and positively correlated with moisture and pH ($P <$

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41401114)

收稿日期: 2019-11-27; 网络出版日期: 2020-09-23

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: s2008shuijing@163.com

0.01)。In addition to the *C. malaccensis* marsh, there was a significant negative correlation between the total silicon content and available silicon content in the *C. malaccensis*-*S. alterniflora* marsh and *S. alterniflora* marsh ($P < 0.05$). The study of the total silicon content and distribution characteristics in wetland soils in different vegetation zones in the Min River Estuary revealed that the changing in total silicon content in wetland was under the influence of different types of wetland vegetation growth and provided key data for silicon research in this study area.

Key Words: total Silicon; distribution characteristics; wetland; Min River Estuary

硅(Silicon, Si)是地壳中含量第二丰富的元素,也是湿地生物地球化学循环过程中的一种基本养分^[1],在促进植物生长、缓冲土壤酸碱度、调节大气二氧化碳浓度等许多生物地球化学过程中起着重要作用^[2-4]。一般认为,硅酸盐矿物的风化作用和溶解作用控制着土壤溶液和水系中的二氧化硅通量^[5],生物过程只通过影响矿物的风化程度和溶解速度参与硅的生物地球化学循环过程^[6]。然而研究发现活生物体在地球硅循环过程中具有驻留和释放硅的作用^[3],特别是植物可以从土壤溶液中吸收大量的硅,最终通过凋落物返还到土壤中。不同类型的植物对土壤硅的利用程度不同,陆地硅循环明显也依赖于植被类型。在硅的生物地球化学循环过程研究中,关于土壤生物硅、有效硅等形态的硅素研究占绝大多数,而关于二氧化硅或全硅的研究偏少。由于对土壤硅的重视程度低,目前大多数国家的土壤监测系统中,硅只作为一种作物养分,其研究范围主要局限在水稻种植区^[7],而在非水稻土壤数据库(尤其是自然湿地)中很少有土壤全硅的记录^[8]。在中国早期对土壤全硅含量的调查,一般是全量(容量因素)和有效态(强度因素)研究同步进行,但局限于农业土壤硅素研究^[9-10]。

河口沼泽湿地是响应全球变化和人类活动最敏感的生态系统之一^[1,11],也是重要的生物硅汇^[12-13]。闽江河口湿地处于热带与亚热带的过渡地带,其典型的酸性土壤在强降雨和高温的影响下,风化淋溶作用明显,且其复杂的水文状况和植被生长能有效反映湿地硅生物地球化学变化的交互作用。目前已开展了湿地土壤间隙水中活性硅酸盐^[14-15]、土壤生物硅^[16]和有效硅^[17]等研究,研究发现植物对这些较为活跃的硅影响较大,而关于植物类型对土壤全硅含量的影响尚不清楚。鉴于此,本研究于2016年1—12月,以闽江河口鱧鱼滩的短叶茳茳湿地、互花米草湿地及其二者的交错带湿地土壤为研究对象,采用定位研究方法,探讨了生长不同类型植物的湿地土壤全硅的时空分布特征及其影响因素,以期为全面认识河口湿地土壤硅素的生物地球化学循环提供重要基础数据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

鱧鱼滩湿地(119°34'12"—119°41'40"E, 26°00'36"—26°03'42"N)是闽江河口最大(约120 hm²)的砂泥质洲滩天然湿地,位于琅岐岛至长乐区潭头镇和梅花镇的梅花水道,呈近东西走向的弯曲长条状分布。研究区处于中亚热带和南亚热带的过渡地带,气候暖热潮湿,雨热同期,年平均气温19℃,年平均降水量可达1380 mm^[18]。区内潮汐属于典型的正规半日潮,水文条件相对复杂。土壤类型为滨海盐土和沙土,偏酸性。研究区位于闽江入海口,2002年以来外来物种互花米草(*Spartina alterniflora*)入侵本区中低潮滩,不断向土著植被扩张。短叶茳茳(*Cyperus malaccensis*)是该湿地的优势土著种。植物群落由陆向海方向总体呈带状分布,群落之间的交错区域明显,且有一定宽度(约50—100 m)。

1.2 样品采集与处理

根据植物生长特点,在鱧鱼滩湿地中西部的潮滩地段设置一条样带(图1),由陆向海方向选取3个样地,分别是短叶茳茳湿地(记为W1)、短叶茳茳与互花米草的交错带湿地(简称交错带湿地,记为W2)以及互花米草湿地(记为W3)。2016年1—12月,采用定位研究方法,在每个样地里分别设置3个重复(相距5 m左右),

每月用直径 10cm,高 80cm 的柱状土壤采样器采集 0—60cm 土壤样品,以 10cm 厚度现场分割为 6 层(0—10、10—20、20—30、30—40、40—50 和 50—60 cm),立即将土壤样品装袋,带回实验室,待自然风干后,捡去杂质,研磨过 80 目筛,保存待测。

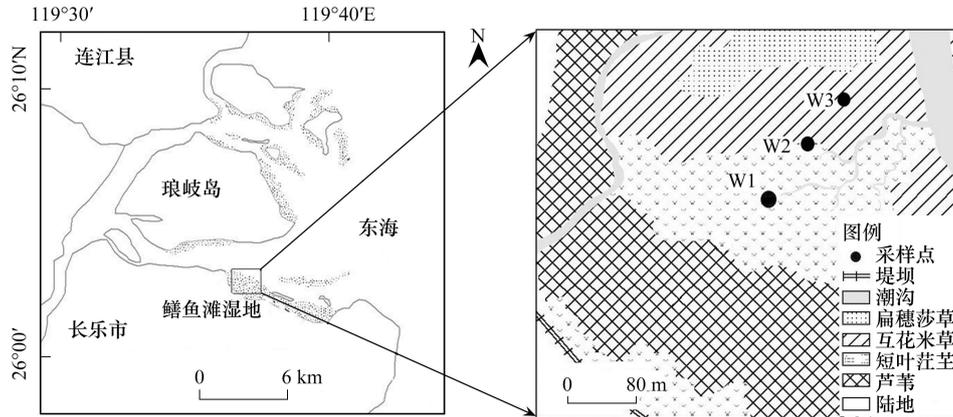


图 1 研究区和采样点位置

Fig.1 Locations of study area and sampling sites

W1、W2 和 W3 分别代表短叶茛苳湿地、交错带湿地和互花米草湿地

1.3 样品测定

土壤全硅含量采用碱融-钼蓝比色法测定二氧化硅的方法测定^[19-20]。

每月采集土壤的同时,采用便携式仪器原位测定各土层土壤的理化性质。土壤电导率采用便携式电导率仪(ECTestr11+)测定;土壤 pH 和温度采用便携式 pH 计(IQ150, USA)测定;土壤含水量采用便携式土壤墒情速测仪(TZS-1, China)测定;土壤有机质用高温外热重铬酸钾容量法测定^[20]。土壤粒度采用 Master Sizer2000 激光粒度分析仪测定,按照国际制分类^[21]。闽江河口湿地 2016 年 1—12 月不同类型湿地土壤理化性质见表 1,表中数值为 12 个月 6 层土壤的平均值±标准误($n=216$)。

表 1 不同类型湿地土壤理化性质

Table 1 Physical and chemical properties in soils in different types of marshes

湿地类型 Marsh types	电导率 EC Electrical conductivity/ (mS/cm)	pH	含水率 Moisture/%	土温 Soil temperature/°C	有机质 Organic matter/%	粘粒 Clay/%	粉粒 Silt/%	砂粒 Sand/%
W1	3.05±1.02	6.16±0.66	47.55±4.46	23.98±5.93	5.54±1.23	12.88±2.44	64.18±6.24	22.94±8.17
W2	2.43±0.93	6.26±0.72	48.75±5.6	23.80±6.21	5.41±1.22	13.41±0.93	60.30±2.75	26.29±3.34
W3	2.93±1.01	6.16±0.7	48.44±4.75	23.46±6.09	5.22±1.35	13.94±2.69	56.45±7.54	29.60±9.96

W1: 短叶茛苳湿地 *Cyperus malaccensis* marsh; W2: 交错带湿地 *C. malaccensis*-*S. alterniflora* marsh; W3: 互花米草湿地 *Spartina alterniflora* marsh

1.4 指标计算

土壤剖面第 j 层单位面积全硅储量 L_{Si} (kg/m^2):

$$L_{Si} = C_{Si} \times dv_j \times h_j / 100$$

式中, C_{Si} 表示第 j 层土壤全硅含量 (g/kg), dv_j 表示土壤容重 (g/cm^3), h_j 表示土壤剖面深度 (cm), 100 为换算系数。

土壤全硅总储量 (T_{Si} , kg/m^2) 为单位面积某深度 (j 到 n 层) 土壤全硅储量之和, 即:

$$T_{Si} = \sum_{j=n}^n C_{Si} \times dv_j \times h_j/100$$

1.5 数据分析

运用 Microsoft Excel 2010 和 Origin 8.0 对土壤全硅含量、储量以及土壤理化性质等数据进行分析处理和制图,采用 SPSS 19.0 对土壤全硅含量进行单因素方差分析(One-way ANOVA),并对土壤全硅含量和土壤理化性质等数据进行 Pearson 相关分析(Pearson's correlation coefficient)、主成分分析(Principal component analysis, PCA)和逐步线性回归分析(Stepwise linear regression analysis),显著性水平设定为 0.05。

2 结果

2.1 闽江河口湿地各植被带土壤全硅含量的时空变化特征

2016 年 1—12 月期间,闽江河口湿地 3 种植物类型湿地土壤全硅含量均表现为先降低后升高、秋冬季高于春夏季的趋势(图 2)不同植被带土壤全硅含量在不同月份之间均存在显著性差异($P < 0.01$)。各植被带土壤全硅含量在 4—5 月降到全年最低水平,1—3 月与 10—12 月土壤全硅含量均在 200mg/g 以上,整体高于其他月份。其中,1—3 月短叶茳茳湿地和互花米草湿地的土壤全硅含量基本保持不变,而二者交错带湿地的土壤全硅含量有明显波动变化。

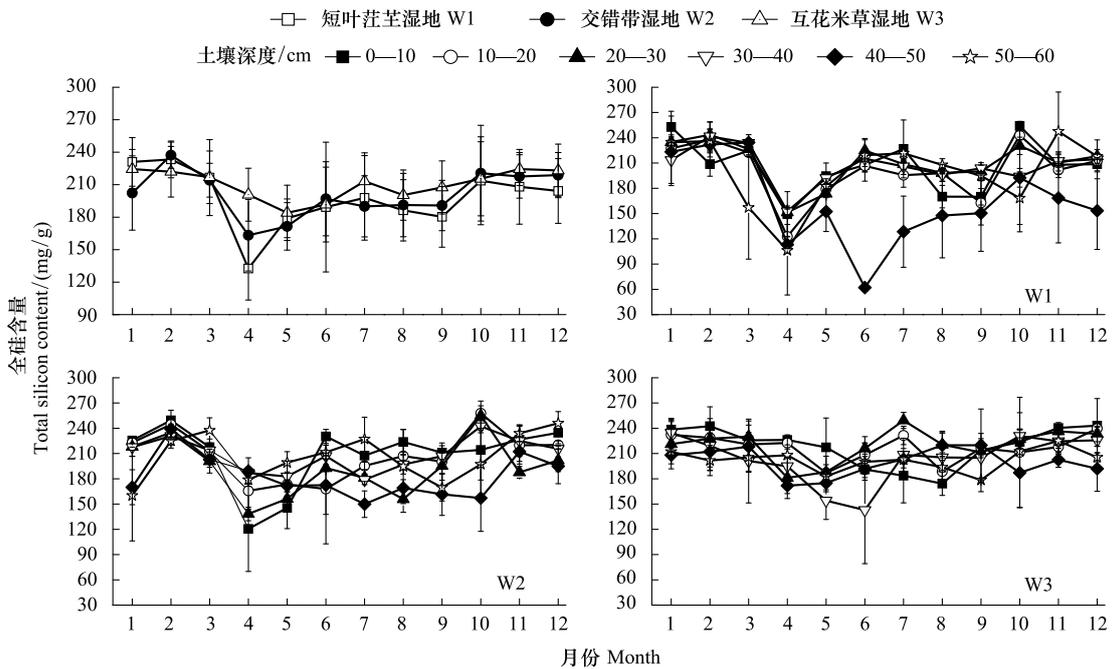


图 2 闽江河口不同类型湿地土壤全硅含量的时间变化特征

Fig.2 Temporal variance of total silicon content in soils in different types of marshes in the Min River estuary

2.2 闽江河口湿地各植被带土壤全硅含量的剖面变化特征

从剖面来看,闽江河口 3 种植物类型湿地土壤全硅年平均含量随深度增加略呈下降趋势(图 3),不同土层之间存在显著性差异($P < 0.01$)。不同植物类型湿地土壤全硅平均含量整体表现为短叶茳茳湿地(197.67 mg/g) < 交错带湿地(201.21 mg/g) < 互花米草湿地(210.33 mg/g),其中交错带湿地土壤全硅含量在 20—30cm 土层(193.17 mg/g)远低于纯植物群落湿地。3 种植物类型湿地土壤全硅含量在 30—40cm 土层达到相同水平(206.28 mg/g),且均在 40—50cm 土层最低。

2.3 闽江河口湿地各植被带土壤全硅储量分布特征

闽江河口不同类型植物湿地 0—60 cm 土壤全硅储量由陆向海方向整体上呈递增趋势(图 4),表现为短

叶荳芰湿地 (102.94kg/m²) < 交错带湿地 (106.02 kg/m²) < 互花米草湿地 (109.11 kg/m²)。3 种植物类型湿地 0—30cm 土层土壤全硅储量整体高于 30—60cm 土层, 其中 0—10cm 土层土壤全硅储量最高。方差分析表明, 0—60 cm 土层土壤全硅储量在不同类型湿地之间均具有显著性差异 ($P < 0.01$)。

3 讨论

3.1 影响土壤全硅含量的主要因素

利用 Pearson 分析河口湿地土壤全硅的含量与土壤理化性质 (表 1) 的相关性发现: 土壤全硅含量与 pH、含水率和粘粒之间均呈极显著正相关关系 ($P < 0.01$); 与土温呈极显著负相关关系 ($P < 0.01$), 与有机质和 EC 均呈显著负相关关系 ($P < 0.05$) (表 2)。为了明确影响闽江河口湿地土壤全硅含量分布的主要因子, 对影响不同类型湿地全硅含量 (Y) 的主要环境因素 (X_{EC} , X_{pH} , $X_{含水率}$, $X_{土温}$, $X_{有机质}$, $X_{粘粒}$, $X_{粉粒}$, $X_{砂粒}$) 进行主成分分析 (表 3)。结果表明: 影响短叶荳芰湿地土壤全硅含量的主要因子是有机质、土温和粉粒; 影响交错带湿地土壤全硅含量的主要因子是含水量、土温和砂粒; 影响互花米草湿地土壤全硅含量的主要因子是土温、pH 和砂粒。进一步对不同湿地识别出的主要影响因子进行逐步线性回归分析, 结果发现: 短叶荳芰湿地中只有有机质进入回归方程, 即 $Y_{W1} = 223.651 - 4.690X_{有机质}$ ($P < 0.01$), 说明其土壤全硅含量主要受土壤有机质含量的影响; 交错带湿地中只有含水率进入回归方程, 即 $Y_{W2} = 123.446 - 1.581X_{含水率}$ ($P < 0.01$), 说明其土壤全硅含量主要受土壤水分含量的影响; 互花米草湿地中只有 pH 进入回归方程, 即 $Y_{W3} = 116.976 - 15.059X_{pH}$ ($P < 0.01$), 说明其土壤全硅含量主要受土壤酸碱状况影响。综上, 闽江河口鳝鱼滩湿地土壤全硅含量受土壤有机质含量、含水率和 pH 值的共同影响。

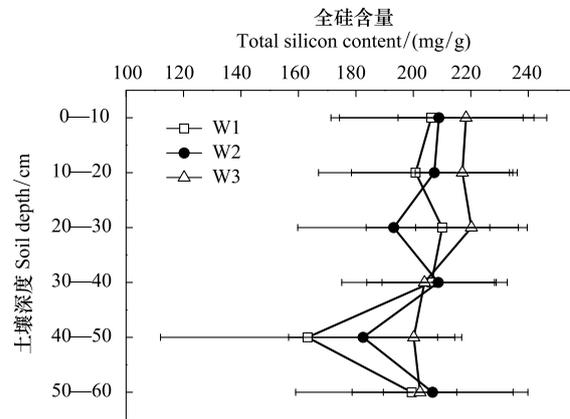


图 3 闽江河口不同类型湿地土壤全硅含量的剖面变化特征
Fig. 3 Vertical variance of total silicon content in soils in different types of marshes in the Min River estuary

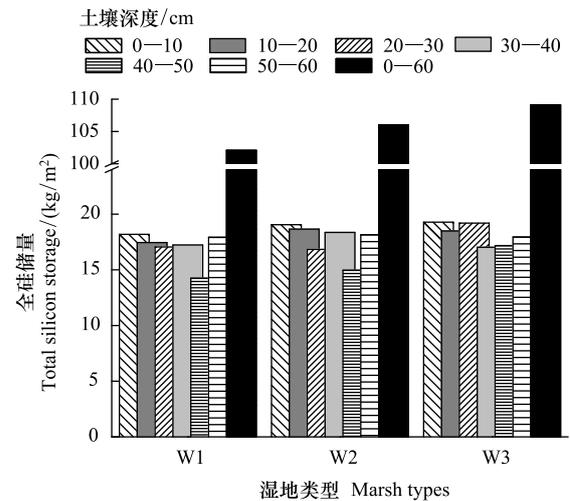


图 4 闽江河口不同类型植物湿地土壤全硅储量分布
Fig. 4 Distribution of total silicon storage in soils in different types of marshes in the Min River estuary

表 2 闽江河口湿地 2016 年土壤全硅含量与土壤理化性质相关关系

Table 2 Correlation coefficients for soil total silicon contents and properties in the Min River estuary

湿地类型 Marsh types	电导率 EC Electrical conductivity/ (mS/cm)	pH	含水率 Moisture/%	土温 Soil temperature/°C	有机质 Organic matter/%	粘粒 Clay/%	粉粒 Silt/%	砂粒 Sand/%
W1	-0.203 **	0.173 *	0.121	-0.353 **	-0.167 *	-0.022	-0.113	0.093
W2	0.147 *	0.115	0.111	-0.340 **	-0.093	0.097	-0.069	0.030
W3	-0.173 *	0.215 **	0.242 **	-0.292 **	-0.137 *	0.219 **	0.254 **	-0.251 **
整体 Total	-0.800 *	0.157 **	0.152 **	-0.327 **	-0.103 **	0.102 **	-0.045	0.009

* 表示相关性达到 0.05 显著水平, ** 表示相关性达到 0.01 极显著水平

有研究表明, 含有有机质较多的土壤全硅含量较高^[22], 但也有研究发现土壤全硅含量与有机质含量之间的

相关关系并不显著^[23],甚至负相关^[24]。本研究中有有机质与土壤全硅含量之间呈显著负相关关系($P < 0.05$),这可能与土壤容重有关。闽江河口湿地有效硅含量与土壤容重显著负相关($P < 0.05$)^[25],容重大的土壤其土层坚硬度大,植物根系生长时根系遇到的阻力大,地下生物量小^[26],不利于有效硅累积。研究发现土壤全硅含量与土壤有效硅含量之间无显著相关性,或者变化趋势相反^[27-28],原因可能是矿物分解使得土壤中可以转化为单硅酸的成分增多。相关分析结果表明,闽江河口短叶荳芡湿地土壤全硅含量与土壤有效硅含量之间无显著相关关系($P > 0.05$);短叶荳芡-互花米草交错带湿地、互花米草湿地中土壤全硅含量均分别与土壤有效硅含量存在显著负相关关系($P < 0.05$)。另外,土壤容重大、根系生物量少,的情况下,由根系衰败腐烂转化而成的土壤有机质也相应变少,因此导致闽江河口湿地土壤全硅含量与有机质含量呈现一种反相关的趋势。本研究也发现土壤含水率与土壤全硅含量之间呈极显著正相关关系($P < 0.01$),土壤中可溶性硅含量会随土壤水分滞留时间增加而增加^[1]。有研究发现互花米草湿地土壤间隙水含硅量(359mg/g)高于短叶荳芡(344mg/g)^[14],原因可能在于互花米草湿地靠近海洋,受潮汐影响大,水淹时间较短叶荳芡湿地长,原本可能与硅结合的铁在排水不良的土壤溶液中被还原而释放出硅,而且有机质的矿化速率在土壤通气不良的条件下变低从而易于其累积保存和溶解,这都能够增加土壤含硅量^[16,22]。土壤酸碱度对土壤全硅的影响与土壤粘粒对硅酸的吸附作用有关。土壤中的单硅酸可吸附在各种氧化物及铝硅酸盐矿物表面裸露的—OH基团上成为吸附态硅酸^[29],随着pH值的增加,土壤粘粒对硅酸的吸附量也增加,硅酸盐吸附到带电的土壤颗粒上^[30],淋溶作用减弱,硅酸不容易被淋失。但是这种正效应只在 $6 < \text{pH} < 8$ 的情况下成立,即在土壤呈酸性或中性

表3 特征值及主成分矩阵

Table 3 Eigenvalues and Principal components matrix

湿地类型 Marsh types	成分 Components	初始特征值 Initial eigenvalue			环境因子 Variables	主成分 Principal components		
		特征值 Eigenvalue	贡献率 Contribution rate/%	累积贡献率 Accumulative contribution/%		Z1	Z2	Z3
W1	1	4.0890	51.1125	51.1125	EC	0.2149	0.1381	-0.1875
	2	1.8138	22.6731	73.7856	pH	0.0011	0.4919	-0.0885
	3	1.0878	13.5970	87.3826	含水量	-0.2121	-0.0899	0.1614
	4	0.4269	5.3365	92.7191	土温	0.0690	-0.5062	-0.1985
	5	0.2849	3.5607	96.2798	有机质	-0.0306	0.0611	0.8751
	6	0.1707	2.1338	98.4135	粘粒	0.2039	-0.1004	0.1633
	7	0.1269	1.5864	100.0000	粉粒	0.2391	-0.0723	0.0417
	8	0.0000	0.0000	100.0000	砂粒	-0.2429	0.0848	-0.0799
W2	1	2.5852	32.3153	32.3153	EC	0.0197	-0.0076	-0.5408
	2	1.6927	21.1587	53.4739	pH	-0.0013	0.1440	0.3092
	3	1.2403	15.5035	68.9775	含水量	-0.0759	0.6119	0.1059
	4	0.9913	12.3912	81.3686	土温	-0.0051	-0.0402	0.5414
	5	0.5626	7.0328	88.4014	有机质	0.0057	0.5279	0.0183
	6	0.4885	6.1058	94.5072	粘粒	0.3122	0.0329	0.0330
	7	0.4394	5.4928	100.0000	粉粒	0.3790	-0.0655	-0.0252
	8	0.0000	0.0000	100.0000	砂粒	-0.3987	0.0448	0.0116
W3	1	3.1748	39.6844	39.6844	EC	-0.2061	0.2106	-0.2763
	2	1.2280	15.3497	55.0341	pH	-0.0752	0.6021	0.0583
	3	1.1683	14.6035	69.6377	含水量	0.0341	0.5407	-0.0449
	4	0.9822	12.2772	81.9149	土温	0.0263	-0.1465	0.6785
	5	0.7700	9.6248	91.5397	有机质	-0.0532	0.2919	0.5508
	6	0.5335	6.6682	98.2079	粘粒	0.2990	0.0083	-0.0392
	7	0.1434	1.7921	100.0000	粉粒	0.2975	0.0339	-0.0553
	8	0.0000	0.0000	100.0000	砂粒	-0.3063	-0.0279	0.0525

表 1、表 2 和表 3 中数据使用同一批样品测定结果 ($n=216$)

的湿润地区, pH 值与土壤含硅量正相关; 在土壤呈中性或碱性的干旱地区, pH 值与土壤含硅量负相关^[23]。鱧鱼滩湿地位于亚热带湿润地区, 降水量丰富, 土壤呈弱酸性, 淋溶作用强, 土壤 pH 值(均值为 6.19) 与全硅含量之间存在显著正相关关系 ($P < 0.01$)。总之, 土壤有机质含量多, 容重大, 含水量高, 以及酸性土和中性土的酸碱度增大都会造成土壤含硅量高。

3.2 闽江河口湿地各植物带土壤全硅的分布差异

除了土壤理化性质对闽河口湿地全硅含量有一定影响, 其生长的植物对土壤全硅的年平均含量和储量也有重要的影响, 大致上由陆向海方向整体上呈递增趋势。首先, 有研究发现互花米草入侵使河口湿地土壤有机碳含量显著增加^[31], 土壤结构得到改善, 土壤吸附作用增强, 土壤溶液中的单硅酸不易被淋失。而且互花米草湿地具有良好的促淤作用, 能有效地将水体中的颗粒物、粘粒成分和营养物质拦截下来^[32], 减缓了土壤硅水平迁移幅度的同时, 粘粒在互花米草湿地累积变多, 增强了土壤对硅酸的吸附能力。其次, 闽江河口互花米草湿地由于淤积层的存在, 土壤吸附硅酸的能力较强, 且土壤还原性增强, 硅的释放量增加, 这就导致互花米草湿地土壤全硅含量和储量均高于其他两个群落。翟水晶^[14]研究闽河口潮滩湿地各植被带土壤及间隙水中硅的分布特征时发现近海区互花米草湿地土壤生物硅含量和土壤间隙水中的活性硅酸盐含量均大于近岸区短叶茳茳湿地, 这与本文研究结论基本一致。由于互花米草的促淤功能以及对硅素较强的累积功能, 导致短叶茳茳和互花米草的交错带湿地土壤全硅含量和储量均高于短叶茳茳湿地。本研究中短叶茳茳湿地土壤全硅储量 (102.94 kg/m^2) 低于交错带湿地 (106.02 kg/m^2) 和互花米草湿地 (109.11 kg/m^2), 这与高会^[25]在闽河口鱧鱼滩得到的短叶茳茳湿地土壤生物硅储量小于互花米草湿地的研究结果吻合。

鱧鱼滩湿地 3 种植物湿地土壤全硅含量 2016 年 1—12 月整体表现为先降低再升高, 秋冬季高于春夏季, 这可能是由于秋冬季节土壤淋溶作用弱, 土壤硅淋失量低, 且植物枯落物返还地面显著增加了土壤硅的含量。闽江河口湿地是闽江入海携带的物质流、能量流的必经之地, 闽江汛期(4—9 月) 多年平均径流量占年径流量的 71.2%—79.1%, 其中 4—6 月径流量约占全年的 50%。而非汛期(1—3 月、10—12 月) 径流量只占年径流量的 20.9%—28.8%^[33]。自 4 月份开始大量淡水被输入到河口区域, 对鱧鱼滩湿地有一定的“稀释”效应。同时, 湿地植物一般在 3—4 月开始快速生长, 从土壤中吸收硅酸盐的量也大大增加, 从而导致土壤全硅含量在 4 月份最低。另外, 闽江河口不同植被类型湿地土壤全硅含量和储量均表现为上部土层(0—30cm) 高于下部土层(30—60cm), 这一方面可能与地表岩石容易被风化侵蚀有关, 另一方面与植物分解也有一定关系。一般来说土壤表层的矿物更易遭受风化剥蚀作用, 硅素释放量较多^[34]。以岩石矿物的风化作用为起点, 硅被释放到土壤溶液中; 植物生长时, 依靠其发达的根系从土壤中吸收并累积硅素营养^[34]; 植物死亡后, 枯落物在土壤表层堆积分解, 释放硅素^[35], 二者共同增加土壤表层硅的输入。而湿地下层土壤受风化作用、枯落物返还作用、地表径流和潮汐作用的影响比上层土壤弱, 因此, 导致其土壤全硅含量和储量低于上部土层。

3.3 闽河口湿地土壤全硅含量与国内外其他地区对比

有研究表明土壤全硅含量主要受母质组成的影响^[27,36]。据统计, 中国东部热带、亚热带地区土壤中全硅的含量变化范围是 230.14—668.05 mg/g, 其中发育于花岗岩母质的土壤剖面中全硅的含量 ($> 66\%$) 明显高于发育于玄武岩母质的土壤剖面中全硅的含量 ($< 45\%$)^[27,36]。此外, 土地利用方式和地域不同也会导致土壤全硅含量的差异。耕地、农田经常施加硅肥, 其土壤的硅含量一般都较高^[27,37]。同是耕作性土壤, 安徽省的土壤全硅含量 (594.50 mg/g)^[26] 明显高过夏威夷 (280.00 mg/g)^[38]、海南岛 (353.89 mg/g)^[27] 的土壤全硅含量。这是由于土壤的脱硅富铝化作用使热带和亚热带土壤中的硅酸和盐基遭受淋失, 黏粒和次生矿物不断形成, 铁铝氧化物明显聚积。南方持续的湿热天气使土壤长期处于脱硅富铝化的过程中, 硅酸大量淋失。而北方地区的降雨量和地面径流偏少, 流域面积也偏小, 能较好地保存土壤中可淋溶的那部分硅。一般越靠近赤道的地区, 其土壤受气候和水文条件的影响越强烈, 矿物风化淋溶作用较强, 粘粒淋溶淀积作用十分明显。纬度高的地区, 即使有充足的水分, 土壤中的硅在低温环境条件下也很难释放出来^[39]。闽河口湿地位于亚热带

和亚热带海洋性季风气候区的过渡带,雨热同期。一方面,高温促进了岩石矿物的风化和硅的释放,而另一方面,规律性的半日潮、丰富的降水量和地表径流量加速了硅的流失。另外,闽江河口湿地土壤是偏酸性的滨海盐土和沙土,透水通气性能好,利于植物扎根生长,但是对硅酸的吸附能力不强,导致鳝鱼滩湿地的土壤全硅含量低于其他地区(表 4)。

表 4 不同地区土壤全硅含量比较

Table 4 Published data on soil total silicon contents from different areas

地区 Area	年均温 Annual average temperature/°C	经纬度位置 Latitude and longitude position	土壤类型 Soil typ	全硅平均含量 Average silicon content/(mg/g)	参考文献 References
海南岛	—	18°10'—20°10'N, 108°37'—111°03'E	玄武岩	322.11	[37]
山东省	14	34°22'—38°24'N, 114°47'—122°42'E	花岗岩风化壳	643.47	[36]
广东省	18	20°13'—25°31'N, 109°39'—117°19'E	花岗岩风化壳	602.95	[36]
夏威夷	28.5	18°54'—28°15'N, 154°41'—178°75'W	耕地	280.00	[38]
海南岛	23.8	18°10'—20°10'N, 108°37'—111°03'E	农田	353.89	[27]
海南岛	—	18°10'—20°10'N, 108°37'—111°03'E	玄武岩	322.11	[37]
安徽省	15.5	29°41'—34°38'N, 114°54'—119°37'E	耕地	594.50	[37]
闽江河口鳝鱼滩	19.3	26°00'—26°3'N, 119°34'—119°41'E	湿地土壤	204.00	本文

4 结论

(1) 闽江河口湿地各植被带土壤全硅年平均含量大致呈现由陆向海逐渐上升的趋势,表现为短叶茳茳湿地(197.67 mg/g) < 交错带湿地(201.21 mg/g) < 互花米草湿地(210.33 mg/g),三者之间存在显著性差异($P < 0.01$),说明不同类型湿地植被生长对湿地土壤全硅的分布有重要的影响。

(2) 闽江河口湿地各植被带土壤全硅含量整体上有秋冬季高于春夏季的趋势,不同土层土壤全硅含量和储量均表现为上部土层(0—30cm)高于下部土层(30—60cm)。

(3) 闽江河口湿地土壤全硅含量受有机质、含水率和 pH 的共同影响。湿地土壤全硅含量与有机质显著负相关,与含水率和 pH 有极显著正相关关系。研究闽江河口湿地不同植被带土壤全硅含量的影响因素及其分布特征,可揭示湿地土壤全硅水平在不同类型湿地植被生长影响下的变化过程。

参考文献 (References):

- [1] Struyf E, Conley D J. Silica: an essential nutrient in wetland biogeochemistry. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2009, 7(2): 88-94.
- [2] Mitani N, Ma J F. Uptake system of silicon in different plant species. *Journal of Experimental Botany*, 2005, 56(414): 1255-1261.
- [3] Jones L H P, Handreck K A. Silica in soils, plants, and animals. *Advances in Agronomy*, 1967, 19: 107-149.
- [4] Song Z L, Wang H L, Strong P J, Guo F S. Phytolith carbon sequestration in China's croplands. *European Journal of Agronomy*, 2014, 53: 10-15.
- [5] Derry L A, Kurtz A C, Ziegler K, Chadwick O A. Biological control of terrestrial silica cycling and export fluxes to watersheds. *Nature*, 2005, 433(7027): 728-731.
- [6] Moulton K L, West J, Berner R A. Solute flux and mineral mass balance approaches to the quantification of plant effects on silicate weathering. *American Journal of Science*, 2000, 300(7): 539-570.
- [7] Minasny B, Hong S Y, Hartemink A E, Kim Y H, Kang S S. Soil pH increase under paddy in South Korea between 2000 and 2012. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2016, 221: 205-213.

- [8] Landré A, Saby N P A, Barthès B G, Ratié C, Guerin A, Etayo A, Minasny B, Bardy M, Meunier J D, Cornu S. Prediction of total silicon concentrations in French soils using pedotransfer functions from mid-infrared spectrum and pedological attributes. *Geoderma*, 2018, 331: 70-80.
- [9] 熊毅, 李庆逵. 中国土壤(第二版). 北京: 科学出版社, 1987.
- [10] 全国土壤普查办公室. 中国土壤. 北京: 中国农业出版社, 1998.
- [11] Struyf E, Smis A, Van Damme S, Meire P, Conley D J. The global biogeochemical silicon cycle. *Silicon*, 2009, 1(4): 207-213.
- [12] Struyf E, Temmerman S, Meire P. Biogenic silica sequestration in freshwater tidal marshes: relation with marsh developmental stage//Struyf E. *The Role of Freshwater Marshes in Estuarine Silica Cycling (Scheldt Estuary)*. Antwerpen: Universiteit Antwerpen, 2005: 99-122.
- [13] Struyf E, Temmerman S, Meire P. Dynamics of biogenic Si in freshwater tidal marshes: Si regeneration and retention in marsh sediments (Scheldt estuary). *Biogeochemistry*, 2007, 82(1): 41-53.
- [14] 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. *生态学报*, 2016, 36(21): 6766-6776.
- [15] 侯贯云, 翟水晶, 乐晓青, 全川. 潮汐对闽江口感潮湿地孔隙水及土壤中硅、氮浓度的影响. *应用生态学报*, 2017, 28(1): 337-344.
- [16] 高会, 李家兵, 何涛, 孙志高, 范爱连, 祝贺, 任鹏, 翟水晶. 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. *水土保持学报*, 2017, 31(1): 279-285.
- [17] 高会, 翟水晶, 何涛, 田莉萍, 胡星云. 互花米草入侵影响下闽江河口湿地土壤有效硅的时空变化特征. *生态学报*, 2018, 38(17): 6136-6142.
- [18] 刘剑秋. 闽江河口湿地研究. 北京: 科学出版社, 2006.
- [19] 杨雅杰. 用镍坩埚碱溶消化测定水稻植株硅的方法. *生物技术*, 1995, 5(3): 42-44.
- [20] 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: 48-269.
- [21] 刘雪梅, 黄元仿. 应用激光粒度仪分析土壤机械组成的实验研究. *土壤通报*, 2005(04): 116-119.
- [22] 袁可能. 植物营养元素的土壤化学. 北京: 科学出版社, 1983: 578-608.
- [23] 李家书, 谢振翅, 胡定金, 吕忠贵, 王富华, 杨维举. 湖北省土壤有效硅含量分布. *热带亚热带土壤科学*, 1997, 6(3): 176-181.
- [24] 向万胜, 何电源. 湖南省土壤中硅的形态与土壤性质的关系. *土壤*, 1993, 25(3): 146-151.
- [25] 高会. 闽江河口湿地植物—土壤系统硅素的分配特征研究[D]. 福州: 福建师范大学, 2018.
- [26] Singh J, Salaria A, Kaul A. Impact of soil compaction on soil physical properties and root growth: a review. *International Journal of Food, Agriculture and Veterinary Sciences*, 2015, 5(1): 23-32.
- [27] 郑路. 安徽省耕地土壤有效硅含量分布. *土壤通报*, 1998, 29(3): 126-128.
- [28] 张冬明, 肖彤斌, 符传良, 张文, 吴宇佳, 谢良商. 海南农田土壤中硅的含量及其空间分布. *贵州农业科学*, 2017, 45(3): 139-143.
- [29] 张兴梅, 张之一. 土壤有效硅含量及其与土壤理化性状的相关研究. *黑龙江八一农垦大学学报*, 1996, 8(4): 42-45.
- [30] Haynes R J, Belyaeva O N, Kingston G. Evaluation of industrial wastes as sources of fertilizer silicon using chemical extractions and plant uptake. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2013, 176(2): 238-248.
- [31] 布乃顺, 胡悦, 杨骁, 张雪, 王俭, 李博, 方长明, 宋有涛. 互花米草入侵对长江河口湿地土壤理化性质的影响. *长江流域资源与环境*, 2017, 26(1): 100-109.
- [32] Zhou C F, An S Q, Deng Z F, Yin D Q, Zhi Y B, Sun Z Y, Zhao H, Zhou L X, Fang C, Qian C. Sulfur storage changed by exotic *Spartina alterniflora* in coastal saltmarshes of China. *Ecological Engineering*, 2009, 35(4): 536-543.
- [33] 张章新. 闽江流域水文特性分析. *水文*, 2000, 20(6): 55-58.
- [34] Yang J L, Zhang G L. Si cycling and isotope fractionation: Implications on weathering and soil formation processes in a typical subtropical area. *Geoderma*, 2019, 337: 479-490.
- [35] Ma J F, Yamaji N. Silicon uptake and accumulation in higher plants. *Trends in Plant Science*, 2006, 11(8): 392-397.
- [36] 张晓东. 中国东部森林土壤中植硅体积累和硅形态分布研究[D]. 杭州: 浙江农林大学, 2016.
- [37] 何跃, 张甘霖. 热带地区玄武岩发育土壤中的生物硅及其发生学意义. *土壤学报*, 2010, 47(3): 385-392.
- [38] Fox R L, Silva J A, Younge O R, Plucknett D L, Sherman G D. Soil and plant silicon and silicate response by sugar cane. *Soil Science Society of America Journal*, 1967, 31(6): 775-779.
- [39] 赵焯, 李天杰. 南极乔治王岛菲尔德斯半岛土壤矿物化学风化特征分析. *南极研究(中文版)*, 1995, 7(2): 18-24.