

# 三种提取态硅在典型滨海湿地中的分布特征及影响因素分析

季晓晖<sup>1</sup>, 赵庆庆<sup>2\*</sup>, 展海银<sup>3</sup>, 王加宁<sup>2</sup>, 张闻<sup>2</sup>, 黄玉杰<sup>2</sup>, 宋繁永<sup>2</sup>, 魏小兵<sup>4\*</sup>

(1. 贵阳中节能水务有限公司, 贵州 贵阳 550001; 2. 齐鲁工业大学(山东省科学院) 山东省科学院生态研究所 山东省应用微生物重点实验室, 山东 济南 250103; 3. 南开大学 环境科学与工程学院 南开大学碳中和交叉科学中心, 天津 300350; 4. 重庆蓝洁环境技术有限公司, 重庆 402465)

**摘要:**硅是地壳中含量第二的元素,在土壤生物地球化学过程中发挥着重要作用,其中可提取态硅对植物具有较高的营养意义,但可提取态硅在滨海湿地土壤中的分布还有待揭示。以典型滨海湿地(非淹水芦苇湿地、潮汐芦苇湿地、淡水芦苇湿地和盐地碱蓬湿地)为研究样地,采集0~20 cm深度土壤并测定草酸提取态硅、连二硫酸钠-柠檬酸钠提取态硅和焦磷酸盐提取态硅及土壤理化性质,探究3种可提取态硅在不同芦苇湿地土壤中的分布特征及其影响因素。结果表明,4种湿地0~20 cm深度土壤中连二硫酸钠-柠檬酸钠提取态硅和焦磷酸钠提取态硅之间无显著性差异( $p>0.05$ ),但草酸提取态硅在非淹水芦苇湿地和潮汐芦苇湿地之间具有显著性差异( $p<0.05$ )。从剖面分布来说,10~20 cm土层3种提取态硅的质量分数低于0~<10 cm土层。相关分析表明,土壤有机质、总氮、容重、pH、粉砂粒、砂粒和含水率是影响3种提取态硅质量分数的重要因素。研究结果为丰富滨海湿地硅元素的分布信息提供有力支撑。

**关键词:**草酸提取态硅;连二硫酸钠-柠檬酸钠提取态硅;焦磷酸钠提取态硅;地球化学特征;滨海湿地

中图分类号:P41 文献标志码:A 文章编号:1002-4026(2024)05-0095-08

开放科学(资源服务)标志码(OSID):



## Distribution patterns and influencing factors of three types of soil extractable silicon in typical coastal wetlands

Ji Xiaohui<sup>1</sup>, ZHAO Qingqing<sup>2\*</sup>, ZHAN Haiyin<sup>3</sup>, WANG Jianing<sup>2</sup>, ZHANG Wen<sup>2</sup>, HUANG Yujie<sup>2</sup>, SONG Fanyong<sup>2</sup>, WEI Xiaobing<sup>4\*</sup>

(1. Guiyang CECEP Water Co., Ltd., Guiyang 550001, China; 2. Shandong Provincial Key Laboratory of Applied Microbiology, Ecology Institute, Qilu University of Technology (Shandong Academy of Sciences), Jinan, 250103, China; 3. Carbon Neutrality Interdisciplinary Science Centre, College of Environmental Science and Engineering, Nankai University, Tianjin 300350, China; 4. Chongqing Lanjie Environmental Technology Co., Ltd., Chongqing 402465, China)

收稿日期:2024-04-03

基金项目:山东省重点研发计划(重大科技创新工程)(2021CXGC011201);国家重点研发计划(2023YFC3709004-03);山东省自然科学基金(ZR2022MD116);济南市“高校20条”资助项目(2020GXRC059)

作者简介:季晓晖(1980—),男,工程师,一级建造师,研究方向为污水、再生水运营与技术管理及湿地生态工程。E-mail: 312386311@qq.com

\*通信作者:赵庆庆,助理研究员,研究方向为湿地土壤碳过程、湿地生态修复、湿地土壤污染风险评估。E-mail: qingqingzhao@qlu.edu.cn

魏小兵,高级工程师,研究方向为水污染控制及湿地生态工程。E-mail: wei2809@126.com

**Abstract** : As the second most abundant element on earth, silicon plays an important role in soil biogeochemical processes. However, the geochemical characteristics of soil silicon in different forms in coastal wetlands still need further investigation. In this study, we selected four typical coastal wetlands ( nonflooding *Phragmites australis*, tidal *P. australis*, freshwater *P. australis*, and tidal *Suaeda salsa* wetlands) as sampling sites and collected soils from 0 to 20 cm depth. Furthermore, we determined oxalate-extractable silicon, dithionite-citrate-extractable silicon, pyrophosphate-extractable silicon and analyzed their soil physical and chemical properties, distribution patterns, and influencing factors in typical coastal wetlands. Results showed that dithionite-citrate-extractable silicon and pyrophosphate-extractable silicon showed no significant differences among four wetlands ( $p > 0.05$ ), while oxalate-extractable silicon in nonflooding *P. australis* wetlands was significantly lower than tidal *P. australis* wetlands ( $p < 0.05$ ). As for the profile distribution, the three types of extractable silicon in soils from 0 to 10 cm were generally higher than in soils from 10 cm to 20 cm. Additionally, the correlation analysis revealed that soil organic matter, total nitrogen, bulk density, pH, silt and moisture were important factors influencing these three types of extractable silicon.

**Key words** : oxalate-extractable silicon; dithionite-citrate-extractable silicon; pyrophosphate-extractable silicon; geochemical properties; coastal wetlands

硅是土壤和岩石的基本成分,是地球上含量居第二位的元素,在全球生物地球化学循环和缓解全球气候变化方面发挥着重要作用<sup>[1]</sup>。硅可以提高植物光合作用的效率、改变营养元素的化学计量比、提高植物对害虫和病原体的抵抗力、增强植物对干旱和重金属的耐受能力,进而提高农作物的质量和产量<sup>[2-3]</sup>。硅循环和碳循环之间的交互作用可以调节大气中 CO<sub>2</sub> 的浓度,而通过河口输送至滨海水体中的可溶性硅的量影响滨海区域富营养化问题,因此硅的迁移转化过程对于维持地球化学循环过程具有重要意义<sup>[1,4]</sup>。海洋沉积物中的生物硅可以指示海洋古生产力的变化,硅藻控制的生物泵过程对大气 CO<sub>2</sub> 有净吸收效应并影响大气中 CO<sub>2</sub> 浓度<sup>[5]</sup>。植物生长过程中吸收硅元素可以形成植硅体,植硅体形成过程中封闭的那部分有机碳可以在环境中滞留上千年,是重要的稳定性碳库<sup>[6]</sup>。湿地富含生物固定的无定形氧化硅,对全球硅循环具有重要影响<sup>[7]</sup>。一项对湿地植物封存植硅体碳能力的评估表明,全球约  $5.7 \times 10^8$  hm<sup>2</sup> 的湿地植物每年能固定大气中 CO<sub>2</sub> 的量高达  $4.39 \times 10^7$  t<sup>[8]</sup>。滨海盐沼湿地可以有效捕集生物硅,具有较高的溶解性硅循环能力,因此相比于其他滨海水体具有较高的硅富集能力,而滨海潮间带被认为是滨海河口区域重要的硅汇和硅处理区<sup>[7]</sup>。尽管滨海盐沼湿地在硅的转化、迁移和储藏方面发挥着重要作用,但盐沼湿地硅的循环和储存还有待进一步了解。此外,了解硅元素在不同滨海湿地土壤中的分布特征及其影响因素对于深入了解滨海湿地碳汇功能具有重要意义。

土壤硅循环包含矿物风化过程、生物吸收、矿物相硅的吸附/解吸,因此土壤硅可以划分为不同的硅库<sup>[9]</sup>。土壤中的硅分为有机硅和无机硅,无机硅可以分为晶态硅(硅酸盐矿物、结晶二氧化硅)和可提取态硅(水溶态硅、交换态硅、胶体态硅和无定形硅),其中可提取态硅对植物的营养意义高于晶体硅<sup>[10]</sup>。由于不同植物对硅的需求不同,而且植物从土壤生物硅库吸收的硅量远超过从岩石风化释放吸收的硅量,无硅源补充的情况下,土壤中可提取态硅会因植被吸收和淋溶作用而逐渐损失<sup>[1,10]</sup>。在流域水平上,硅的物质质量平衡受到易溶性硅的强烈影响<sup>[4]</sup>,草酸提取态硅的量对土壤可利用硅具有正向影响<sup>[11]</sup>。

草酸提取态硅可以表征弱结晶硅、弱序性倍半氧化物中的硅和封闭于弱结晶铁氧化物中的硅,与弱结晶铁氧化物结合的硅在铁氧化物溶解时可以变成植物可利用性硅<sup>[4,12]</sup>。由溶解性硅酸和结合在矿物表面的硅组成的植物可利用性硅被认为是活性最高的硅组分<sup>[13]</sup>。连二硫酸钠-柠檬酸钠可以提取与结晶态次生铁氧化物结合的硅,焦磷酸钠可以提取与无定形铁铝氧化物结合的硅<sup>[9]</sup>。本研究选择非淹水芦苇湿地、潮汐芦苇湿地、淡水芦苇湿地和盐地碱蓬湿地作为研究样地,探究草酸提取态硅、连二硫酸钠-柠檬酸钠提取态硅和焦磷酸钠提取态硅在 4 种湿地中的含量变化及分布特征,研究结果可为丰富滨海湿地硅元素的分布信息提供有力支撑。

## 1 材料与方法

### 1.1 样品采集及测试分析

本研究的研究区位于山东省东营市的黄河三角洲自然保护区。黄河三角洲位于暖温带半湿润大陆性季风气候区,气候特征为四季分明、温差明显、雨热同期。年平均降雨量约为 594 mm,主要集中在 6~9 月,年平均蒸发量为 2 049 mm,年平均气温为 11.7 °C~12.6 °C<sup>[14]</sup>。

在研究区内选择淡水芦苇湿地、潮汐芦苇湿地、非淹水芦苇湿地和盐地碱蓬湿地作为研究样地,于 2018 年 10 月采集 0~20 cm 深度土壤并按 0~<5、5~<10 和 10~20 cm 间隔分割土壤,每种湿地设置 3 个样点重复,每种湿地共计采集 9 个土样。将土样装入自封袋内带回实验室,剔除肉眼可见的石块、植物残体,室温条件下自然风干土样,经研钵研磨后,一部分土样过 20 目筛,用于测定土壤电导率和 pH;另一部分过 100 目筛,用于测定草酸提取硅、连二硫酸钠-柠檬酸钠提取硅、焦磷酸钠提取硅、土壤有机质、总氮质量分数以及其他土壤指标。不同提取态硅元素的处理和测定方法如下:(1)草酸提取硅的测定。称取 0.3 g 过 100 目筛的土壤于三角瓶中,加入 30 mL 0.2 mol/L 的草酸-草酸铵混合溶液,调节 pH=3 以后,在暗处振荡 4 h。(2)连二硫酸钠-柠檬酸钠提取硅质量分数。称取 2 g 研磨过 100 目筛的土壤于三角瓶中,加入 1 g 连二亚硫酸钠和 50 mL 0.3 mol/L 的柠檬酸钠溶液后,振荡 16 h。(3)焦磷酸钠提取硅质量分数。称取 0.3 g 研磨过 100 目筛的土壤于三角瓶中,加入 30 mL 0.1 mol/L 的焦磷酸钠,并调节 pH 至 10.5。以上提取过程结束后,加入 0.2 mL 0.5 mol/L 的 MgCl<sub>2</sub> 溶液,在 1 000 r/min 转速下离心 15 min,然后将上清液过 0.45 μm 滤膜,用 ICP-OES 测定滤液中硅的质量分数。土壤有机质质量分数、总氮质量分数、容重、电导率、pH、粉砂粒、砂粒和含水率的测定参照赵海晓等<sup>[15]</sup>的研究。

### 1.2 数据分析

采用单因素方差分析(one-way-ANOVA)对不同样地土壤草酸提取态硅、连二硫酸钠-柠檬酸钠提取态硅、焦磷酸钠提取态硅和土壤理化性质进行显著性差异分析,当  $p < 0.05$  时,认为具有显著性差异。在单因素方差分析中,当方差齐性时,采用 Turkey 检验;在方差非齐性时,采用 Welch 检验(校正的  $F$  检验)。皮尔森相关分析判定影响三种提取态硅的潜在控制因素。ANOVA 和皮尔森相关分析采用 SPSS 22.0 软件包来实现,土壤 DOC 含量变化图采用 OriginPro 2021 软件绘制。

## 2 研究结果

### 2.1 四种湿地土壤中 3 种易溶态硅和土壤理化性质的对比

四种湿地 0~20 cm 土壤中硅元素和土壤理化性质(取 0~<5、5~<10 和 10~20 cm 土壤的均值)之间的对比如表 1 所示。非淹水芦苇湿地土壤的草酸提取态硅质量分数的平均值为 0.16 g/kg,显著低于潮汐芦苇湿地(0.28 g/kg,  $p < 0.05$ ),但和淡水芦苇湿地、盐地碱蓬湿地土壤草酸提取态硅质量分数之间无显著性差异( $p > 0.05$ )。连二硫酸钠-柠檬酸钠提取态硅和焦磷酸钠提取态硅在 4 种湿地之间均无显著性差异( $p > 0.05$ ),仅从数值上来看,两种硅质量分数的最小值均出现在非淹水芦苇湿地,分别为 0.55 和 0.27 g/kg。潮汐芦苇湿地土壤连二硫酸钠-柠檬酸钠提取态硅质量分数的平均值在 4 种湿地中最高(0.76 g/kg),而焦磷酸钠提取态硅质量分数平均值的最高值出现在盐地碱蓬湿地(0.34 g/kg)。

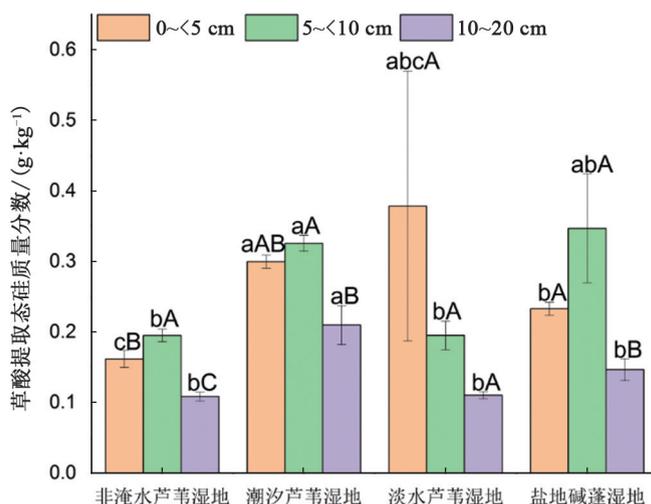
表1 四种湿地0~20 cm土壤中硅和土壤理化性质的差异(平均值±标准差,  $n=36$ )Table 1 Differences between silicon and soil physical and chemical properties of soils from 0 to 20 cm in four wetlands (mean±standard deviation,  $n=36$ )

理化参数	非淹水芦苇湿地	潮汐芦苇湿地	淡水芦苇湿地	盐地碱蓬湿地
草酸提取硅质量分数/( $g \cdot kg^{-1}$ )	0.16±0.04b	0.28±0.05a	0.23±0.15ab	0.24±0.10ab
连二硫酸钠-柠檬酸钠提取硅质量分数/( $g \cdot kg^{-1}$ )	0.55±0.21a	0.76±0.24a	0.58±0.26a	0.73±0.28a
焦磷酸钠提取硅质量分数/( $g \cdot kg^{-1}$ )	0.27±0.08a	0.33±0.10a	0.31±0.13a	0.34±0.10a
有机质质量分数/%	4.03±0.83b	7.70±1.26a	6.27±4.01ab	5.98±1.69a
总氮质量分数/( $g \cdot kg^{-1}$ )	0.27±0.03b	0.46±0.04a	0.42±0.26ab	0.36±0.09ab
容重/( $g \cdot cm^{-3}$ )	1.56±0.02a	1.38±0.09c	1.52±0.03b	1.57±0.08ab
电导率/( $mS \cdot cm^{-1}$ )	3.18±0.91b	2.76±0.60b	0.52±0.09c	15.51±6.64a
pH	9.09±0.46a	8.39±0.18c	8.65±0.12b	8.56±0.11bc
粉砂粒质量分数/%	5.59±5.22b	22.67±2.94a	15.00±9.17ab	23.75±13.78a
砂粒质量分数/%	94.41±5.22a	77.18±3.14b	84.87±9.30ab	74.28±17.23b
含水质量分数/%	22.06±0.67c	22.96±0.56b	28.31±4.88a	22.84±2.51bc

注:表中不同字母表征硅元素和土壤理化性质在四种湿地之间的显著性差异,显著性水平为  $p<0.05$ 。

## 2.2 草酸提取态硅在各湿地不同土壤层次的分布特征

草酸提取态硅在4种湿地0~20 cm土壤中的剖面分布如图1所示。沿0~20 cm土壤剖面,草酸提取态硅在非淹水芦苇湿地呈现先上升后下降的趋势( $p<0.05$ ),最高值出现在5~10 cm (0.20 g/kg),最低值均出现在10~20 cm土壤层(0.11 g/kg)。潮汐芦苇湿地和盐地碱蓬湿地0~5和5~10 cm土壤草酸提取态硅质量分数之间无显著性差异( $p>0.05$ ),但均显著高于10~20 cm土壤草酸提取态硅含量( $p<0.05$ ),这两种湿地土壤草酸提取态硅沿0~20 cm土壤剖面总体呈现下降趋势。淡水芦苇湿地0~5、5~10和10~20 cm土壤的草酸提取态硅之间无显著性差异( $p>0.05$ ),仅就数值来说,该湿地草酸提取态硅含量沿剖面呈逐渐下降趋势。



注:不同小写英文字母表征同一土层土壤草酸提取态硅在不同湿地之间的显著性差异,不同大写英文字母表征同一湿地中草酸提取态硅在不同土层之间的显著性差异,显著性水平为  $p<0.05$ 。

图1 不同湿地土壤中草酸提取态硅的分布

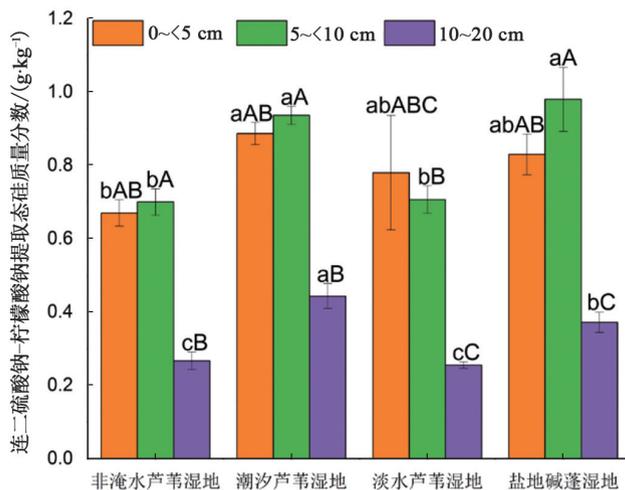
Fig.1 Distribution of amorphous silicon in four wetlands

从不同土壤层来看,非淹水芦苇湿地0~5 cm深度土壤的草酸提取态硅质量分数(0.16 g/kg)显著低于潮汐芦苇湿地(0.30 g/kg)和盐地碱蓬湿地(0.23 g/kg,  $p<0.05$ ),而淡水芦苇湿地0~5 cm土壤草酸提取态硅质量分数(0.38 g/kg)与其他三种湿地之间均无显著性差异( $p>0.05$ )。就5~10 cm土壤层来看,非淹水

芦苇湿地土壤草酸提取态硅质量分数显著低于潮汐芦苇湿地 ( $0.33 \text{ g/kg}$ ,  $p < 0.05$ ),但这两类湿地与淡水芦苇湿地 ( $0.20 \text{ g/kg}$ ) 和盐地碱蓬湿地 ( $0.35 \text{ g/kg}$ ) 土壤草酸提取态硅质量分数之间均无显著性差异 ( $p > 0.05$ )。10~20 cm 土壤层草酸提取态硅质量分数最高值出现在潮汐芦苇湿地 ( $0.21 \text{ g/kg}$ ),显著高于非淹水芦苇湿地、淡水芦苇湿地 ( $0.11 \text{ g/kg}$ ) 和盐地碱蓬湿地 ( $0.15 \text{ g/kg}$ ) 土壤草酸提取态硅质量分数 ( $p > 0.05$ )。

### 2.3 连二硫酸钠-柠檬酸钠提取态硅在各湿地不同土壤层次的分布特征

连二硫酸钠-柠檬酸钠提取态硅质量分数在4种湿地0~20 cm土壤中的剖面分布如图2所示。非淹水芦苇湿地、潮汐芦苇湿地和淡水芦苇湿地10~20 cm土壤层连二硫酸钠-柠檬酸钠提取态硅均显著低于5~<10 cm土壤层 ( $p < 0.05$ ),但0~<5 cm与5~<10 cm、10~<20 cm土壤连二硫酸钠-柠檬酸钠提取态硅的质量分数之间均无显著性差异 ( $p > 0.05$ ),这三种湿地土壤连二硫酸钠-柠檬酸钠提取态硅质量分数沿0~20 cm剖面总体呈现下降趋势。淡水芦苇湿地0~<5 cm土壤连二硫酸钠-柠檬酸钠提取态硅质量分数与5~<10 cm土壤连二硫酸钠-柠檬酸钠提取态硅质量分数之间均无显著性差异 ( $p > 0.05$ ),但均显著高于10~20 cm土壤连二硫酸钠-柠檬酸钠提取态硅质量分数 ( $p < 0.05$ )。



注:不同小写英文字母表征同一土层土壤连二硫酸钠-柠檬酸钠提取态硅在不同湿地之间的显著性差异,不同大写英文字母表征同一湿地中连二硫酸钠-柠檬酸钠提取态硅在不同土层之间的显著性差异,显著性水平为  $p < 0.05$ 。

图2 不同湿地土壤中连二硫酸钠-柠檬酸钠提取态硅的分布

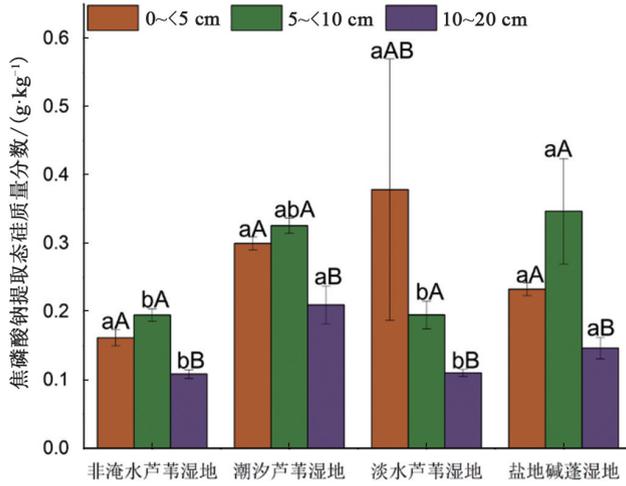
Fig.2 Distribution of free silicon in four wetlands

非淹水芦苇湿地0~<5 cm土壤连二硫酸钠-柠檬酸钠提取态硅质量分数 ( $0.67 \text{ g/kg}$ ) 显著低于潮汐芦苇湿地 ( $0.87 \text{ g/kg}$ ,  $p < 0.05$ ),但这两种湿地0~5 cm土壤连二硫酸钠-柠檬酸钠提取态硅与淡水芦苇湿地 ( $0.78 \text{ g/kg}$ ) 和盐地碱蓬湿地土壤连二硫酸钠-柠檬酸钠提取态硅 ( $0.83 \text{ g/kg}$ ) 质量分数之间均无显著性差异 ( $p > 0.05$ )。非淹水芦苇湿地和淡水芦苇湿地5~<10 cm土壤连二硫酸钠-柠檬酸钠提取态硅的质量分数显著低于潮汐芦苇湿地和盐地碱蓬湿地 ( $p < 0.05$ ),但非淹水芦苇湿地和淡水芦苇湿地土壤连二硫酸钠-柠檬酸钠提取态硅质量分数之间、潮汐芦苇湿地和盐地碱蓬湿地土壤连二硫酸钠-柠檬酸钠提取态硅之间均无显著性差异 ( $p > 0.05$ )。10~20 cm土壤连二硫酸钠-柠檬酸钠提取态硅的最高值出现在潮汐芦苇湿地 ( $0.94 \text{ g/kg}$ ),显著高于其他三种湿地 ( $p < 0.05$ );最低值出现在非淹水芦苇湿地和淡水芦苇湿地,而且这两种湿地土壤连二硫酸钠-柠檬酸钠提取态硅质量分数显著低于盐地碱蓬湿地 ( $p < 0.05$ )。

### 2.4 焦磷酸钠提取态硅在各湿地不同土壤层次的分布特征

焦磷酸钠提取态硅在4种湿地0~20 cm土壤中的剖面分布如图3所示。非淹水芦苇湿地、潮汐芦苇湿地、盐地碱蓬湿地0~<5 cm和5~<10 cm土壤焦磷酸钠提取态硅质量分数之间无显著性差异 ( $p > 0.05$ ),但均显著高于10~20 cm土壤焦磷酸钠提取态硅质量分数 ( $p > 0.05$ )。这3种湿地土壤焦磷酸钠提取态硅质量分数沿0~20 cm土壤剖面呈下降趋势。淡水芦苇湿地0~<5 cm土壤焦磷酸钠提取态硅质量分数与5~<10 cm、

10~20 cm 土壤焦磷酸钠提取态硅质量分数之间均无显著性差异( $p < 0.05$ ),但 5~<10 cm 土壤焦磷酸钠提取态硅质量分数显著高于 10~20 cm 土壤( $p > 0.05$ )。



注:不同小写英文字母表征同一土层土壤焦磷酸钠提取态硅在不同湿地之间的显著性差异,不同大写英文字母表征同一湿地中焦磷酸钠提取态硅在不同土层之间的显著性差异,显著性水平为 $p < 0.05$ 。

图3 不同湿地土壤中焦磷酸钠提取态硅的分布

Fig.3 Distribution of complex silicon in four wetlands

如图3所示,4种湿地0~<5 cm 土壤焦磷酸钠提取态硅质量分数之间无显著性差异( $p > 0.05$ )。非淹水芦苇湿地和淡水芦苇湿地5~<10 cm 土壤焦磷酸钠提取态硅质量分数显著低于和盐地碱蓬湿地( $p < 0.05$ ),这3种湿地0~<5 cm 土壤焦磷酸钠提取态硅质量分数与潮汐芦苇湿地之间均无显著性差异( $p > 0.05$ )。在10~20 cm 土壤层,非淹水芦苇湿地和淡水芦苇湿地焦磷酸钠提取态硅质量分数显著低于潮汐芦苇湿地和盐地碱蓬湿地( $p < 0.05$ ),而非淹水芦苇湿地和淡水芦苇湿地焦磷酸钠提取态硅质量分数之间、潮汐芦苇湿地和盐地碱蓬湿地焦磷酸钠提取态硅质量分数之间均无显著性差异( $p > 0.05$ )。

## 2.5 环境因子对不同形态硅的影响分析

草酸提取态硅、连二硫酸钠-柠檬酸钠提取态硅和焦磷酸钠提取态硅质量分数与土壤理化性质之间的相关关系如表2所示。草酸提取态硅质量分数与土壤有机质、总氮、粉砂粒质量分数和含水率呈显著正相关关系( $p < 0.01$ ),与容重、pH 和砂粒呈显著负相关关系( $p < 0.01$ )。连二硫酸钠-柠檬酸钠提取态硅质量分数与土壤有机质、总氮和粉砂粒质量分数之间具有显著正相关关系( $p < 0.05$ ),与容重、pH 和砂粒质量分数之间具有显著负相关关系( $p < 0.01$ )。焦磷酸钠提取态硅质量分数与土壤有机质、总氮、粉砂粒质量分数和含水率之间具有显著正相关关系( $p < 0.05$ ),与pH 和砂粒质量分数之间具有显著负相关关系( $p < 0.01$ )。

表2 不同形态硅质量分数与土壤理化性质之间的相关性分析

Table 2 Analysis of correlations between soil physical and chemical properties of different types of silicon

分析项目	草酸提取态硅质量分数	连二硫酸钠-柠檬酸钠提取态硅质量分数	焦磷酸钠提取态硅质量分数
有机质质量分数	0.860 **	0.602 **	0.722 **
总氮质量分数	0.898 **	0.517 **	0.643 **
容重	-0.337 *	-0.337 *	-0.236
电导率	0.017	0.196	0.159
pH	-0.484 **	-0.562 **	-0.501 **
粉砂粒质量分数	0.652 **	0.614 **	0.535 **
砂粒质量分数	-0.646 **	-0.605 **	-0.527 **
含水率	0.495 **	0.203	0.401 *

注:\*\*表示在0.01水平显著相关,\*表示在0.05水平显著相关。

## 3 讨论

### 3.1 植被类型和水文条件的影响

湿地沉积物中的硅主要来自于淹水输入的硅、底栖原生沼泽硅藻产生的硅和植物腐败后埋入土壤中的植硅体。湿地系统内硅的生物地球化学循环过程是由可以富集硅元素的植物周转促成的<sup>[16]</sup>。因此,植物类型是影响湿地硅循环的重要因素<sup>[4]</sup>。芦苇因具有较高的生产力、密集无性繁殖系生长能力和干枯植物体留存时间长等特点,被认为是潜在的营养库,而且芦苇湿地的土壤生物硅质量分数高于凤仙花湿地、柳树湿地和柳树叶湿地<sup>[7]</sup>。此外,湿地水文条件(淹水频率和淹水停留时间等)在硅的转化过程也发挥着控制作用。淹水可以输入大量含有植硅体和草酸提取态硅的悬浮颗粒物,频繁的淹水还可以促进植硅体的溶解,而植硅体的溶解是湿地土壤中重要的硅源<sup>[16]</sup>。Li等<sup>[8]</sup>认为水位也是影响土壤硅组分的重要因素,水位管理可以通过促进有机质和植硅体的累积、提高土壤-植物之间的硅循环来提高土壤硅的生物有效性<sup>[8]</sup>。淹水造成的还原环境使得与硅结合的铁被还原从而释放出更多的硅。本研究中,就平均值来说,盐地碱蓬湿地0~20 cm土壤3种提取态硅质量分数与水文条件不同的芦苇湿地之间并无显著性差异,而且在部分土层盐地碱蓬湿地土壤3种提取态硅质量分数高于非淹水芦苇湿地,这表明除植被类型以外的因素如潮汐淹水和其他因素也会影响土壤硅质量分数。

### 3.2 土壤理化性质的影响

土壤理化性质是影响土壤硅组分的重要因素<sup>[7,18]</sup>。土壤有机质不仅可以为单硅酸提供吸附位点,其分解过程可以产生有机酸和还原性环境从而促进结合于铁锰氧化物中硅的释放<sup>[18]</sup>。因此,本研究中草酸提取硅、连二硫酸钠-柠檬酸钠提取硅和焦磷酸钠提取硅均与土壤有机碳呈显著正相关关系,表明土壤有机碳质量分数对土壤3种易溶态硅具有正向的促进作用。邱思婷等<sup>[17]</sup>对闽江口湿地的研究发现,有效硅质量分数与土壤容重呈显著负相关关系。本研究中草酸提取态硅和连二硫酸钠-柠檬酸钠提取态硅均与土壤容重呈显著负相关关系。这可能是因为较高的土壤容重会导致土壤硬度增加从而增加根系生长阻力、降低地下生物量进而导致硅的累积量减少<sup>[17]</sup>。土壤pH是影响土壤硅的重要因素,一般认为在碱性土壤中,pH与土壤硅质量分数呈显著负相关关系<sup>[19]</sup>。本研究中3种提取态硅均与pH呈显著负相关关系,可能是因为4种湿地pH介于8.14和9.73之间。草酸提取态硅和焦磷酸钠提取态硅均与土壤含水率呈显著正相关关系,这可能是因为较高的土壤含水率有利于水溶性硅在土壤中的持留,而可提取态硅组分之间可以相互转化<sup>[20]</sup>。因此,相比于潮汐芦苇湿地,非淹水芦苇湿地土壤中较低的土壤有机质、总氮、含水率和粉砂粒以及较高的容重和pH也是造成该湿地草酸提取态硅低于潮汐芦苇湿地的原因。

### 3.3 剖面分布趋势的影响因素

与本研究结果相似,Struyf等<sup>[7]</sup>发现芦苇湿地土壤在不同深度的剖面上,其土壤生物硅质量分数呈梯度下降的趋势,0~<10 cm土壤生物硅质量分数高于10~20 cm。这可能与植硅体主要聚集在湿地土壤表层并随土壤深度增加而逐渐下降有关<sup>[13]</sup>。此外,风化作用、枯落物返还、地表径流和潮汐作用的影响对湿地下层土壤的影响弱于表层土壤,这也是决定3种提取态硅剖面分布趋势的重要原因<sup>[17]</sup>。

## 4 结论

研究表明,盐地碱蓬湿地和3种芦苇湿地土壤草酸提取态硅、连二硫酸钠-柠檬酸钠提取态硅和焦磷酸钠提取态硅之间无差异,说明植被类型对3种提取态硅的影响较小。非淹水芦苇湿地土壤3种提取态硅显著低于潮汐芦苇湿地,但与淡水芦苇湿地和盐地碱蓬湿地之间无差异,说明就水文条件差异是影响3种提取态硅含量和分布的因素之一。除植被类型和水文条件下,有机质、容重、pH、钠离子、氯离子、粉砂粒、砂粒和含水率是影响3种提取态硅的重要环境因子。

## 参考文献:

- [1] 刘丽君, 黄张婷, 孟赐福, 等. 中国不同生态系统土壤硅的研究进展[J]. 土壤学报, 2021, 58(1): 31-41. DOI: 10.11766/trxb202005310409.
- [2] SCHALLER J, TURNER B L, WEISSFLOG A, et al. Silicon in tropical forests: Large variation across soils and leaves suggests ecological significance[J]. Biogeochemistry, 2018, 140(2): 161-174. DOI: 10.1007/s10533-018-0483-5.
- [3] YANAI J, NOGUCHI N, MIYAMARU N, et al. Evaluation of available silicate content and its determining factors in the soils of sugarcane fields in Okinawa, Japan[J]. Japanese Journal of Soil Science and Plant Nutrition, 2019, 90(1): 13-21. DOI: 10.20710/dojo.90.1\_13.
- [4] CORNELIS J T, TITEUX H, RANGER J, et al. Identification and distribution of the readily soluble silicon pool in a temperate forest soil below three distinct tree species[J]. Plant and Soil, 2011, 342(1): 369-378. DOI: 10.1007/s11104-010-0702-x.
- [5] 杨功旭, 姚政权, 冯晗, 等. 北极东西伯利亚陆架表层沉积物生物硅分布特征及环境意义[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2023, 42(4): 717-727. DOI: 10.19658/j.issn.1007-2802.2023.42.105.
- [6] WANG L J, SHENG M Y. Phytolith occluded organic carbon in *Fagopyrum* (Polygonaceae) plants: Insights on the carbon sink potential of cultivated buckwheat planting[J]. Frontiers in Plant Science, 2022, 13: 1014980. DOI: 10.3389/fpls.2022.1014980.
- [7] STRUYF E, VAN DAMME S, GRIBSHOLT B, et al. Biogenic silica in tidal freshwater marsh sediments and vegetation (Schelde estuary, Belgium)[J]. Marine Ecology Progress Series, 2005, 303: 51-60. DOI: 10.3354/meps303051.
- [8] LI B L, SONG Z L, WANG H L, et al. Phytolith carbon sequestration in bamboos of different ecotypes: A case study in China[J]. Chinese Science Bulletin, 2014, 59(34): 4816-4822. DOI: 10.1007/s11434-014-0474-4.
- [9] SHEPARD C, SAPP B, RAMSEY R C. Silicon fractionation of fragipan and non-fragipan horizons in the Central United States[J]. Biogeochemistry, 2023, 162(3): 409-426. DOI: 10.1007/s10533-023-01013-2.
- [10] 赵送来, 宋照亮, 姜培坤, 等. 西天目集约经营雷竹林土壤硅存在形态与植物有效性研究[J]. 土壤学报, 2012, 49(2): 331-338.
- [11] MAKABE S, KAKUDA K I, SASAKI Y, et al. Relationship between mineral composition or soil texture and available silicon in alluvial paddy soils on the Shounai Plain, Japan[J]. Soil Science and Plant Nutrition, 2009, 55(2): 300-308. DOI: 10.1111/j.1747-0765.2008.00352.x.
- [12] KLOTZBÜCHER T, LEUTHER F, MARXEN A, et al. Forms and fluxes of potential plant-available silicon in irrigated lowland rice production (Laguna, the Philippines)[J]. Plant and Soil, 2015, 393(1): 177-191. DOI: 10.1007/s11104-015-2480-y.
- [13] KLOTZBÜCHER T, MARXEN A, JAHN R, et al. Silicon cycle in rice paddy fields: Insights provided by relations between silicon forms in topsoils and plant silicon uptake[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2016, 105(2): 157-168. DOI: 10.1007/s10705-016-9782-1.
- [14] 杜书栋, 白军红, 贾佳, 等. 黄河三角洲芦苇湿地土壤有机碳储量沿盐分梯度的变化特征[J]. 环境科学学报, 2022, 42(1): 80-87. DOI: 10.13671/j.hjkxxb.2021.0520.
- [15] 赵海晓, 高永超, 赵庆庆, 等. 不同水文条件下黄河三角洲湿地土壤溶解性有机碳的分布特征[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2021, 57(1): 51-58. DOI: 10.12202/j.0476-0301.2020431.
- [16] STRUYF E, CONLEY D J. Silica: An essential nutrient in wetland biogeochemistry[J]. Frontiers in Ecology and the Environment, 2009, 7(2): 88-94. DOI: 10.1890/070126.
- [17] 邱思婷, 米慧珊, 高会, 等. 闽江河口湿地不同植被带土壤全硅的含量及分布特征[J]. 生态学报, 2020, 40(22): 8306-8314. DOI: 10.5846/stxb201911272578.
- [18] ZHAO X W, ZHANG X D, LI Z M, et al. Silicon fractionations at the margin of a coastal wetland and its response to sea level rise[J]. Geoderma, 2023, 437: 116602. DOI: 10.1016/j.geoderma.2023.116602.
- [19] 李家书, 谢振翅, 胡定金, 等. 湖北省土壤有效硅含量分布[J]. 热带亚热带土壤科学, 1997, 6(3): 176-181. DOI: 10.16258/j.cnki.1674-5906.1997.03.005.
- [20] 何冬梅, 陈逸飞, 苏仪, 等. 郭岩山不同海拔天然栲树林土壤硅形态特征[J]. 林业科学研究, 2023, 36(2): 153-160. DOI: 10.12403/j.1001-1498.20220460.