

doi: 10.12029/gc20220404

周攀,叶思源,王锦,于长斌,袁红明,裴理鑫,丁喜桂,杨娟,HANS Brix. 2022. 环渤海湿地沉积物球囊霉素相关土壤蛋白分布特征及其对湿地土壤风化的影响[J]. 中国地质, 49(4): 1075–1087.

Zhou Pan, Ye Siyuan, Wang Jing, Yu Changbin, Yuan Hongming, Pei Lixin, Ding Xigui, Yang Juan, Hans Brix. 2022. Glomalin-related soil protein distribution and its relation to mineral weathering in the wetlands along the Bohai Sea, China[J]. Geology in China, 49(4): 1075–1087(in Chinese with English abstract).

环渤海湿地沉积物球囊霉素相关土壤蛋白分布特征及其对湿地土壤风化的影响

周攀^{1,2,3}, 叶思源^{2,3}, 王锦^{2,3}, 于长斌⁴, 袁红明^{2,3},
裴理鑫^{2,3,5}, 丁喜桂^{2,3}, 杨娟¹, HANS Brix⁶

(1. 中国地质大学(北京), 北京 100083; 2. 中国地质调查局滨海湿地生物地质重点实验室, 山东 青岛 266071; 3. 青岛海洋地质研究所, 山东 青岛 266071; 4. 盘锦市湿地科学研究所, 辽宁 盘锦 124000; 5. 中国地质大学(武汉), 湖北 武汉 430074; 6. 奥胡斯大学, 丹麦 奥胡斯 8000)

摘要:【研究目的】球囊霉素作为丛枝菌根真菌(AMF)分泌的一种难降解土壤蛋白,广泛分布于陆地生态系统中,是长期碳贮的重要组成部分。当前鲜有研究涉及其在滨海湿地中的分布。基于此,本文对中国环渤海主要滨海湿地表层沉积物中球囊霉素相关土壤蛋白(GRSP)的空间分布进行表征,探讨不同湿地生境下 GRSP 分布及其对沉积物风化的指示意义。【研究方法】本文选取辽河三角洲、北大港和黄河三角洲湿地作为研究区,对 166 个表层样(0~5 cm)和 4 个柱状样(0~35 cm)的 GRSP、粒度以及常量元素进行测定,并计算化学蚀变系数(CIA)。【研究结果】研究区 GRSP 在空间上的动态变化受植被类型影响显著,范围在 0.06~11.31 mg/g,均值为(2.35±0.16) mg/g;沉积物以粉砂质砂和砂为主,CIA 值分布范围为 44.79~69.59,部分区域达到中等化学风化;CIA 与 GRSP 呈显著相关($R=-0.49, p<0.01$),总体上 CIA 随 GRSP 的增加呈现先增加后减少的趋势。【结论】GRSP 在滨海湿地沉积物中的分布受到生境差异性的影响,其与 CIA 的相关性表征 AMF 及其代谢产物在地质体风化过程中发挥了潜在的生态功能。

关键词:球囊霉素土壤相关蛋白;化学风化;环渤海湿地;环境地质调查工程

创新点:揭示了球囊霉素相关土壤蛋白与地质过程的互馈作用;阐明了丛枝菌根真菌潜在的生态功能。

中图分类号:S153 文献标志码:A 文章编号:1000-3657(2022)04-1075-13

Glomalin-related soil protein distribution and its relation to mineral weathering in the wetlands along the Bohai Sea, China

ZHOU Pan^{1,2,3}, YE Siyuan^{2,3}, WANG Jin^{2,3}, YU Changbin⁴, YUAN Hongming^{2,3}, PEI Lixin^{2,3,5},
DING Xigui^{2,3}, YANG Juan¹, HANS Brix⁶

收稿日期:2020-02-22;改回日期:2020-05-20

基金项目:青岛海洋科学与技术试点国家实验室山东省专项经费(2022QNLMO40003-3)、国家重点研发计划中美政府间科技创新重点专项(2016YFE0109600)、中国地质调查局项目(DD20189503, DD20160144, GZH201200503)、国土资源部公益性行业基金(201111023)以及国家自然科学基金(41240022, 40872167)联合资助。

作者简介:周攀,男,1994生,博士生,主要从事生物地球化学方面的研究工作;E-mail: 541646172@qq.com。

通讯作者:叶思源,女,1963生,研究员,博士生导师,主要从事生物地球化学方面的研究工作;E-mail: siyuanye@hotmail.com。

(1. China University of Geosciences(Beijing), Beijing 100083, China; 2. Key Laboratory of Coastal Wetland Biogeosciences, China Geological Survey, Qingdao 266071, Shandong, China; 3. Qingdao Institute of Marine Geology, Qingdao 266071, Shandong, China; 4. Panjin Institute of Wetland Science, Panjin 124000, Liaoning, China; 5. China University of Geosciences(Wuhan), Wuhan 430074, Hubei, China;6. Aarhus University, Aarhus 8000, Denmark)

Abstract: This paper is the result of environmental geological survey engineering.

[Objective] As a refractory soil protein secreted by arbuscular mycorrhizal fungi (AMF), glomalin-related soil protein (GRSP) is an important component of long-term carbon storage and widely distributed in sediment of terrestrial ecosystem. The distribution of GRSP in coastal wetlands is still not well documented. In this study, the spatial distribution of GRSP in the sediments of the typical wetlands along the Bohai Sea coasts in China were characterized, and the distribution of GRSP in different wetland habitats and its relation to sediment weathering in wetlands were discussed. **[Methods]** Particle size, major elements and GRSPs of 166 surface samples (0–5 cm) and 4 sediment cores (~35 cm long) in the wetlands of the Liaohe delta (LHD), Beidagang Lake (BDG) and Yellow River delta (YRD) were tested, and the corresponding chemical index of alteration (CIA) was calculated. **[Results]** The GRSP in surface sediments were significantly affected by the vegetation types, ranged from 0.06 to 11.31 mg/g, with an average of (2.35 ± 0.16) mg/g; The sediments in the three study areas were mainly silty sand and sand, the distribution range of CIA values were 44.79–69.59, some areas reached moderate chemical weathering; The concentrations of GRSP were significantly correlated with CIAs ($R = -0.49$, $p < 0.01$). In general, CIA increased first with increasing GRSP until the GRSP concentrations reached a certain critical level. **[Conclusions]** The distribution of GRSP concentrations in coastal wetland sediments was affected by habitat differences, and its correlation with CIA indicated that AMF and its metabolites play potential ecological functions during the processes of geological weathering.

Key words: glomalin-related soil protein; chemical weathering; Bohai rim wetland; environmental geological survey engineering

Highlights: The interactions between glomalin-related soil protein and geological processes were revealed; The potential ecological functions of arbuscular mycorrhizal fungi were elucidated.

About the first author: ZHOU Pan, male, born in 1994, doctor candidate, engaged in biogeochemistry; E-mail: 541646172@qq.com.

About the corresponding author: YE Siyuan, female, born in 1963, researcher, engaged in biogeochemistry; E-mail: siyuanye@hotmail.com.

Fund support: Supported by the Marine S & T Fund of Shandong Province for the Pilot National Laboratory for Marine Science and Technology (Qingdao) (No.2022QNL040003–3), the National Key R & D Program of China (No.2016YFE0109600), the project of China Geological Survey (No.DD20189503, No.DD20160144, No.GZH201200503), Ministry of Land and Resources program: (No.201111023) and National Natural Science Foundation of China (No.41240022, No.40872167).

1 引 言

滨海湿地作为一个动态的生态系统,常被称为生物地球化学的“反应器”。通过陆地、海洋、大气三者之间的相互作用,陆源物质在该区域发生着循环转化(USGCRP, 2018)。而丛枝菌根真菌(AMF)在岩石矿物的风化和营养物质的生物地球化学循环中起着不可或缺的作用(朱永官等, 2014;李通通等, 2019)。研究表明AMF同超过80%的陆生维管植物存在共生关系,然而近年来通过对湿地植物根部的显微观察和特定DNA引物的基因分析发现,AMF与各类湿地植物也存在着广泛的共生关系(Wright et al., 1996; Caravaca et al., 2005; Xu et al., 2016)。

研究指出AMF可通过其特有的代谢产物球囊霉素来对土壤起到调节作用,其中包括增强土壤团聚体的稳定性(Xie et al., 2015)、保持土壤的肥力(Singh et al., 2016)和加强土壤的碳捕获能力(Rillig, 2004; Wang et al., 2018)。球囊霉素会随着AMF的衰老以及微生物的分解而被释放到土壤中(Wright et al., 1998; Driver et al., 2005)。但由于当前球囊霉素的化学结构尚未被定义,因此常用球囊霉素相关土壤蛋白(GRSP)来对其进行量化(Rillig, 2004)。GRSP是由球囊霉素、腐殖质、脂质和无机物组成的混合物,已被广泛应用于探究AMF在世界各地不同生态系统中的作用(Lovelock et al., 2004; He et al., 2010; Spohn et al., 2010)。在自然厌氧环境中,

GRSP有着较长的周转周期(40~100 a)和较低的降解速率(Rillig et al., 2003; López-Merino et al., 2015)。因此,GRSP可以作为度量滨海湿地沉积物中AMF变化的指标。此外一些研究表明GRSP可通过与土壤颗粒结合在水中运输(Harner et al., 2004; Adame et al., 2010; Singh et al., 2017),再联系到滨海湿地特有的氧化还原特征以及AMF与湿地植物的广泛共生关系(Ye et al., 2015),推测GRSP在湿地沉积物中广泛分布,并且其规模可能非常大。

矿物风化是最重要的表生地球化学过程之一(Barker et al., 1998; 曹万杰, 2012; 张连凯, 2021)。然而在全球范围内,目前仅有少数研究关注了AMF对于矿物风化的贡献。AMF对矿物的风化作用主要存在直接参与和间接参与两种形式。与外生菌根不同(EMF),AMF通常被认为不直接参与矿物风化,仅有少数研究探究了其对应风化蚀变指数CIA的直接影响(Johansen et al., 1993; Arocena et al., 2012; Koele et al., 2014)。一些研究表明AMF可以通过菌丝释放有机酸和吸收矿物中氮、磷等营养元素来直接影响矿物风化。同时这种释放和吸收反过来又会改变土壤的pH值和养分含量,进而间接地对矿物风化产生影响(Johansen et al., 1993; Bago et al., 1996)。此外AMF间接参与矿物风化也可通过其分泌物球囊霉素来实现。一方面,球囊霉素可通过增加土壤团聚体的数量,或者通过刺激与土壤颗粒有关的生物和化学过程来影响矿物的风化作用(Wilson et al., 2009)。另一方面,球囊霉素可以覆盖在矿物颗粒的表面,减少风化的表面积,并形成阻碍水与矿物相互作用的薄膜,进而影响岩石矿物的风化作用(Kleber et al., 2007)。由此通过分析GRSP与CIA的相关性,可以探讨AMF及其代谢产物对矿物风化的综合影响。

在本文中,笔者对辽河三角洲湿地、北大港湿地和黄河三角洲湿地不同生境沉积物中GRSP的空间分布进行了表征,揭示了GRSP的分布规律。并且,由此讨论了AMF及其代谢产物球囊霉素对地质体风化的潜在作用。

2 材料和方法

2.1 研究区概况与样品采集

本文以环渤海地区的辽河三角洲(40°20'~41°

25'N,121°10'~122°30'E,A区)、天津北大港(38°36'~38°57'N,117°11'~117°37'E,B区)以及黄河三角洲(38°36'~38°57'N,119°00'~119°80'E,C区)滨海湿地为研究对象(图1)。3个研究区均处在暖温带半湿润大陆性季风气候区,四季分明,雨热同期。其中辽河三角洲湿地为距今约7 ka以来伴随着三角洲进积过程形成的湿地(He et al., 2018),年均气温8.4℃,年平均降水量628 mm;北大港湿地分布于黄河古河道地貌,是公元11年前黄河经流此地形成的(He et al., 2019),该湿地年均气温12.0℃,年平均降水量550 mm;黄河三角洲湿地是1855年黄河由苏北北迁至东营后形成的湿地(Ye et al., 2015),立地时间相对短,其年均气温12.9℃,年平均降水量595 mm。

2012年7—8月间在3个滨海湿地共采集表层沉积物(0~5 cm)166个,其中A区翅碱蓬湿地24个、芦苇湿地33个、水稻田56个以及玉米地20个;B区翅碱蓬湿地6个和芦苇湿地14个;C区翅碱蓬湿地4个、芦苇湿地5个以及柳林4个。此外,在黄河三角洲的芦苇和翅碱蓬生境分别采集了两个长35 cm的柱状样(同一生境的柱状样坐标相近,在图1中仅显示出2处标识)。表层样品采集时,先用不锈钢等无玷污工具,刮去表层植物残余和石块,采集地表至5 cm深度的土层,随后用锡纸包裹放入自封袋中,低温-20℃冷冻保存直至分析。柱状样采集时,采用直径为10 cm的PVC管垂直插入沉积物中,采集后用管帽封口,冷藏运输至实验室,于室内以间隔2 cm为标准进行分样,随后低温-20℃冷冻保存直至分析。

2.2 测试方法

2.2.1 粒度分析

为排除沉积物样品中的碳酸盐和有机质的干扰,用双氧水和稀盐酸对样品进行预处理,然后加入六偏磷酸钠溶液并用超声波进行分散。粒度测试使用Mastersizer-2000型激光粒度仪(测量的范围0.02~2000.00 μm,粒级的分辨率0.01 Φ,重复测试的误差<3%),实验在自然资源部海洋地质实验检测中心完成。

2.2.2 沉积物理化性质分析

将沉积物样品置于烘箱内120℃烘干,然后称取4.0 g烘干样品,采用粉末压片X荧光光谱法测定

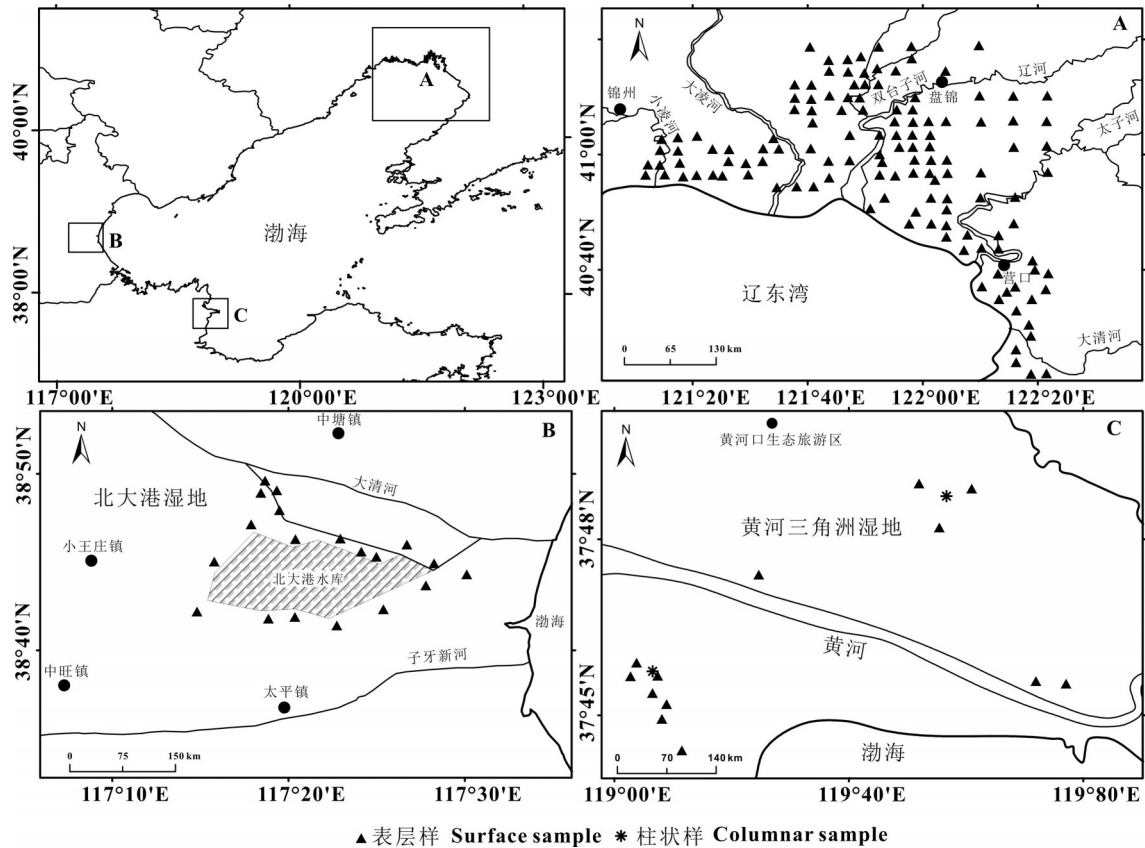


图1 研究区域和取样点位

Fig.1 Location of the study area and sampling sites

SiO₂、Al₂O₃、CaO、Na₂O、K₂O、MgO、Fe₂O₃ 常量组分的质量分数。另取0.20 g新鲜样品,置于瓷舟之中(事先于1000 °C中灼烧60 min),先后经过2%稀磷酸和5%稀磷酸处理,每次处理过后均置于烘箱中80 °C烘干,经多次处理排干其中气泡后,利用非水容量法测定样品总有机碳含量(TOC)。另取35 g新鲜样品烘干得到其损失重量,进而测定土壤含水量。实验在中化地质矿山总局中心实验室完成,常量元素的测量结果相对误差 < 5%。

2.2.3 球囊霉素相关土壤蛋白(GRSP)分析

先在离心管中添加1 g经冷冻干燥后的沉积物样品,再添加100 mmol/L的焦磷酸钠浸提液8 mL,于涡旋仪上充分震荡30 s以混匀。随后置于温度为121 °C高压蒸汽灭菌锅中60 min,处理后以10000×g的转速离心10 min,移走上清液,重复上述操作,连续进行提取,直至上清液呈现淡黄色为止(Wright et al., 1996)。提取完成后向提取液中加入浓度为1 mol/L的盐酸调节溶液pH至2.1,冰浴1 h后,产生

絮状沉淀,再以10000×g的转速离心20 min后,移除上清液。随后加入适量0.1 mol/L氢氧化钠溶液确保沉淀物完全溶解。随后将溶液装入透析袋(DW=8000~14000 Da)中,并用塑料夹夹紧,放入超纯水中透析60 h(超纯水每12 h更换一次)。透析完成后装入离心管以10000×g的转速离心20 min,去除其中残留的颗粒。

吸取0.05 mL样品至2 mL的离心管中,加入考马斯亮蓝试剂(Coomassie Plus (Bradford) Assay Reagent, Thermo Scientific) 1.5 mL,然后震荡混匀,并采用DS-1 FX分光光度计以Bradford法测定蛋白质浓度,实验以牛血清蛋白(BSA)作为标准物建立标准曲线(Bradford, 1976)。实验在中国地质调查局滨海湿地生物地质重点实验室完成。

2.3 化学蚀变指数CIA计算

Nesbitt et al. (1980)提出的化学蚀变指数(CIA)可以有效反映样品中长石风化到黏土矿物的程度。其计算公式为:

$$CIA = \frac{n(Al_2O_3)}{[n(Al_2O_3) + n(Na_2O) + n(K_2O) + n(CaO^*)]} \times 100$$

上式中 n 为氧化物分子摩尔数,其中 CaO^* 指存在于硅酸盐矿物中的 CaO 。为消除由于碳酸钙存在造成的偏差,对 CaO 值矫正,即: $n(CaO^*) = n(CaO) - 10 \times n(P_2O_5) / 3$,若 $n(CaO^*) < n(Na_2O)$,则 $n(CaO^*) = n(CaO^*)$;若 $n(CaO^*) > n(Na_2O)$,则 $n(CaO^*) = n(Na_2O)$ (McLennan, 1993)。

3 结果

3.1 粒度特征

3个研究区表层沉积物的粒度数据见表1。辽河三角洲湿地、北大港湿地以及黄河三角洲湿地的平均粒径(M_z)依次为 5.843Φ 、 6.091Φ 和 5.624Φ 。依据粒度分级三角图(图2),可以发现3个研究区的黏土含量差异不大,即所有的样品均靠三角图右侧分布,而砂和粉砂含量比例的差异使表层沉积物类型多样化。3个研究区表层沉积物粒度的分布主要集中在砂质粉砂(sZ)和粉砂(Z)两个类型,其中辽河三角洲湿地表层沉积物可分为3类:粉砂质砂(Z_s)、砂质粉砂(sZ)和粉砂(Z);北大港湿地和黄河三角洲湿地表层沉积物分为2类:砂质粉砂(sZ)和粉砂(Z)。

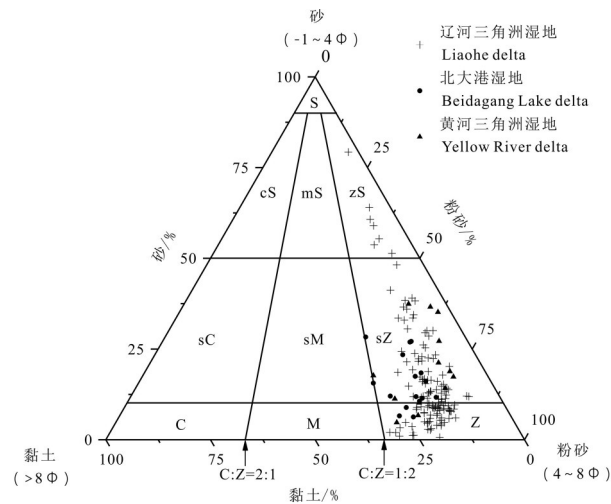


图2 表层沉积物 Folk 分类图

S—砂; zS—粉砂质砂; mS—泥质砂; cS—黏土质砂; sZ—砂质粉砂; sM—砂质泥; sC—砂质黏土; Z—粉砂; M—泥; C—黏土

Fig.2 Surface sediments types according to Folk's classification
S—Sand; zS—Silty sand; mS—Muddy sand; cS—Clay sand; sZ—Sandy silt; sM—Sandy mud; sC—Sandy clay; Z—Silt; M—Mud; C—Clay

3.2 常量元素特征

表层沉积物常量元素含量如表1所示,主要由 SiO_2 、 Na_2O 、 K_2O 、 Fe_2O_3 、 MgO 、 CaO 和 Al_2O_3 组成,其中 SiO_2 和 Al_2O_3 是陆源碎屑物的主要成分。辽河三角洲湿地、北大港湿地和黄河三角洲湿地的表层沉积物 SiO_2 、 Al_2O_3 和 Fe_2O_3 的平均含量之和依次可达 82.16%、74.15% 和 75.01%。对比发现,辽河三角洲湿地沉积物 SiO_2 的平均含量明显高于北大港湿地和黄河三角洲湿地,而 CaO 呈现出相反的特点。北大港湿地和黄河三角洲湿地的 TOC 平均含量相差不大,但高于辽河三角洲湿地。

3.3 GRSP 空间分布特征

3.3.1 GRSP 含量平面分布特征

由表1可知,辽河三角洲湿地、北大港湿地以及黄河三角洲湿地的 GRSP 含量在3个区域的总体变化范围在 $0.06 \sim 11.31 \text{ mg/g}$,其中辽河三角洲湿地、北大港湿地以及黄河三角洲湿地沉积物 GRSP 含量均值依次为 2.299 mg/g 、 2.067 mg/g 、 3.324 mg/g 。依据植被类型,统计相应表层沉积物样中 GRSP 含量发现,不同植被覆盖下,GRSP 含量变化明显,其均值变化范围在 $(1.027 \pm 0.141) \sim (4.917 \pm 0.997) \text{ mg/g}$,由低到高依次为:翅碱蓬 < 玉米 < 水稻 < 芦苇 < 柳林(图3)。

由图3可看出,GRSP 含量在空间分布上差异明显,在辽河三角洲湿地,大辽河和双台子河区域沉积物中 GRSP 的含量较高,其对应的植被类型为芦苇和水稻,而玉米种植区和翅碱蓬生长区 GRSP 含量较低。在北大港湿地,北大港水库南部 GRSP 含量较高,其植被类型为芦苇,而在北部翅碱蓬分布区,GRSP 含量较低。在黄河三角洲湿地,黄河西南部芦苇和柳林生长区分布有较高含量的 GRSP,而在翅碱蓬分布区 GRSP 含量较低。

3.3.2 沉积物 GRSP 含量垂向分布特征

通过对在黄河三角洲芦苇湿地和翅碱蓬湿地中采集的柱状样进行分析,发现芦苇生境的表层沉积物 GRSP 含量 ($> 2 \text{ mg/g}$) 显著高于翅碱蓬生境 ($< 0.4 \text{ mg/g}$) (图4)。在垂向上,无论是芦苇生境还是翅碱蓬生境,GRSP 含量均随深度的增加呈现下降趋势。

3.4 GRSP 与化学风化

研究区表层沉积物的化学风化蚀变指数(CIA)见表1。辽河三角洲湿地 CIA 值在 $44.79 \sim 69.59$,均

表1 表层沉积物常量元素含量及相关变量统计

Table1 Statistics on the content of macroelements and related variables in surface sediments

区域	参数	Si	Na	Fe	Mg	Ca	K	Al	TOC	GRSP	CIA	含水量	砂	粉砂	黏土	粒度
		mg/g										%			Φ	
LHD	平均值	298.34	16.08	32.30	11.20	12.30	24.00	72.10	9.40	2.30	59.57	28.90	15.83	68.17	15.30	5.84
	最大值	351.40	42.66	54.74	18.42	40.50	31.37	93.12	29.90	11.31	69.59	88.09	79.26	80.74	31.12	7.34
	最小值	259.61	9.42	13.51	3.66	5.43	20.16	53.15	1.70	0.11	44.79	4.95	0.69	18.30	2.44	3.44
	标准偏差	15.18	5.59	7.85	2.41	3.87	1.49	6.78	4.75	1.91	5.42	11.90	13.31	11.25	5.28	0.64
	变异系数	0.05	0.35	0.24	0.22	0.32	0.06	0.09	0.51	0.83	0.09	41.16	0.84	0.16	0.35	0.11
BDG	平均值	262.60	13.09	35.50	16.30	45.60	22.30	67.80	11.50	2.07	59.50	19.60	15.79	64.28	19.92	9.14
	最大值	299.23	16.81	43.90	23.38	65.88	24.98	77.29	29.40	5.15	66.60	31.45	28.31	73.05	28.29	10.16
	最小值	234.87	9.15	25.63	12.29	32.01	18.40	57.49	3.50	0.50	54.15	10.71	6.27	47.92	13.51	8.01
	标准偏差	19.14	2.45	5.08	2.28	8.44	1.76	5.29	8.38	1.58	3.95	6.32	7.03	6.32	4.66	0.66
	变异系数	0.07	0.19	0.14	0.14	0.19	0.08	0.08	0.73	0.77	0.07	32.23	0.45	0.10	0.23	0.07
YRD	平均值	278.09	15.42	28.40	13.60	45.90	18.40	60.10	11.30	3.32	55.31	28.76	25.35	62.04	11.77	8.44
	最大值	315.84	22.80	41.53	18.82	67.24	21.62	74.70	33.10	10.29	69.21	44.85	37.77	74.37	27.26	10.48
	最小值	206.78	7.27	22.27	9.76	35.10	16.45	52.09	1.30	0.06	46.74	23.00	10.18	48.34	3.09	6.54
	标准偏差	32.91	4.59	6.11	2.65	9.50	1.58	6.73	10.11	3.16	7.12	6.10	10.01	8.26	7.62	1.35
	变异系数	0.12	0.30	0.22	0.20	0.21	0.09	0.11	0.90	0.95	0.13	21.21	0.39	0.13	0.65	0.16

注:LHD代表辽河三角洲,BDG代表北大港,YRD代表黄河三角洲。

值为59.57;北大港湿地CIA值在54.15~66.60,均值为59.50;黄河三角洲湿地CIA值在46.74~69.21,均值为55.31。Nesbitt et al.(1996)提出用CIA值作为划分化学风化程度的标准,CIA值在40~50为未受化学风化,50~65为初等化学风化,65~85为中等化学风化,85~100为强烈化学风化(冯连君等,2003)。3个研究区的CIA值变化较大,化学风化强度从未遭受风化到中等化学风化程度均有分布。

在黄河三角洲湿地,芦苇和翅碱蓬两种生境的CIA值在沉积物中的垂向变化特征如图4,其中芦苇生境的CIA值在51.54~65.41,翅碱蓬生境的CIA值在50.89~56.63,除了芦苇生境柱状样中的最大CIA值属于中等化学风化,其他均属于初等化学风化,随深度的增加,两种生境的CIA值变化表现为先增加后减少趋势。据图5,GRSP含量与CIA值具有显著的相关关系($R=-0.49, p<0.01$),随着GRSP含量的增加,CIA值呈现增加的趋势。但在GRSP含量增加到一定值后CIA值有下降的趋势。

4 讨论

4.1 粒度特征分析及元素的粒度控制效应

物源、地形和水动力等条件均会影响沉积物的粒度变化,而沉积物颗粒的粗细特征可通过其平均

粒径(M_z)来表征。沉积物的粒度特征反映了研究区的水动力格局,进而可推测沉积物的运移方向和沉积环境的变化(李国刚等,2012; Gao et al., 2020)。据图2可知:北大港湿地和黄河三角洲湿地分选性较好,主要分布有砂质粉砂和粉砂。其中黄河三角洲湿地主要分布于黄河河口附近,水动力条件较强,相应粒度较粗。而北大港湿地主要分布于水库的泛洪区附近,水动力条件较弱,相应粒度较细。辽河三角洲与其他两个研究区相比,湿地沉积物分选性相对较差,砂和粉砂比例变化较大,除了砂质粉砂和粉砂外,粉砂质砂也有所分布。这反映了由五条河流冲积而成辽河三角洲,沉积环境相对复杂,既包含水动力条件较弱的泛滥平原区域,也包含了水动力条件较强的河口区域。

3个研究区表层沉积物的平均粒径和元素含量的相关关系如表2所示,沉积物的平均粒径变化与元素种类有一定联系:一方面, M_z 与 SiO_2 呈显著的负相关,说明粗粒沉积物富集Si。因为粗粒沉积物物质成分以石英和长石类矿物为主。另一方面, M_z 与 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 和MgO呈显著的正相关,说明细粒沉积物富集Al、Fe和Mg。因为黏土矿物主要构成元素包含Al、Mg也是海洋黏土矿物的主要构成元素,而Fe元素一般易形成同黏土矿物一同沉淀的氢

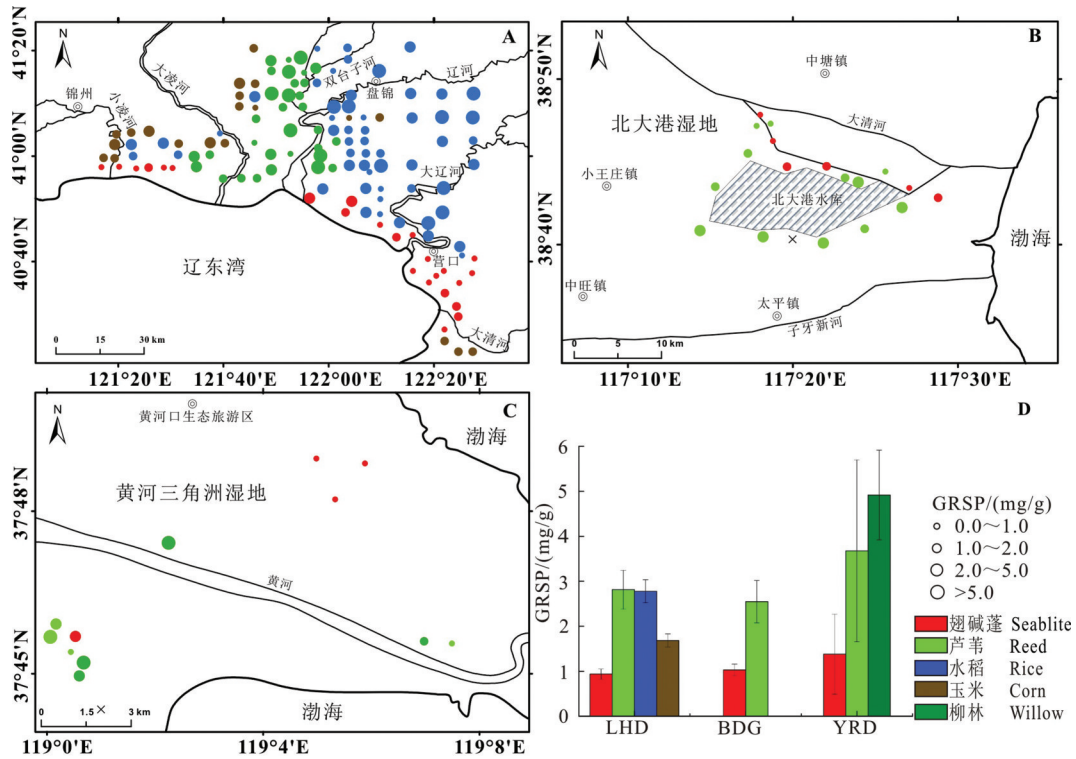


图3 表层沉积物GRSP含量的平面分布及不同生境下的GRSP含量
Fig.3 Distribution of GRSP content in surface sediments and various habitats

表2 主要常量元素与平均粒径的相关性
Table 2 Correlation between major macroelements and average particle size

X	Y	研究区	方程	R ²	P
SiO ₂	Mz	LHD	y = -37.337x + 857.61	0.5386	<0.01
		BDG	y = -36.662x + 783.58	0.1455	
		YRD	y = -70.993x + 967.39	0.5776	
	CaO	LHD	y = 28.637x + 104.369	0.4957	
		BDG	y = 34.634x + 44.374	0.5436	
		YRD	y = 100.398x + 71.389	0.7303	
Fe ₂ O ₃	Mz	LHD	y = 27.039x - 65.774	0.5829	
		BDG	y = 23.227x - 39.534	0.4703	
		YRD	y = 19.153x - 20.530	0.7004	
	K ₂ O	LHD	y = 4.651x - 8.738	0.5726	
		BDG	y = 4.546x - 0.429	0.2397	
		YRD	y = 4.545x - 1.405	0.6164	
Na ₂ O	Mz	LHD	y = -0.109x + 17.854	0.0002	
		BDG	y = -2.893x + 81.171	0.0101	
		YRD	y = 15.130x - 16.380	0.7413	
	CaO	LHD	y = -6.187x + 79.446	0.0683	
		BDG	y = -1.576x + 44.643	0.0109	
		YRD	y = -9.734x + 92.423	0.3669	
MgO	Mz	LHD	y = 0.078x + 57.116	0.0002	
		BDG	y = 6.738x + 12.331	0.4300	
		YRD	y = 4.474x + 19.999	0.7858	

氧化物胶体。CaO、Na₂O和K₂O随Mz的变化在三个区表现得并不一致。在辽河三角洲湿地，Mz与CaO、Na₂O和K₂O相关性不明显；在北大港湿地，Mz与CaO和Na₂O相关性不明显，而与K₂O呈显著的正相关；在黄河三角洲湿地，Mz与CaO和K₂O呈显著的正相关，与Na₂O呈显著的负相关。这说明，在研究沉积物中元素的粒度控制效应时，还需考虑不同研究区域和环境的影响。总体来说，3个研究区平均粒径与元素含量的关系基本符合元素的粒度控制效应。

4.2 环境因素对GRSP的影响

在本研究中，不同生境的湿地沉积物GRSP含量变化，主要受控于环境因素对GRSP产生和保存两方面的影响。由图3可知，翅碱蓬湿地的GRSP含量最低。主要存在三方面原因：(1)翅碱蓬湿地生物量较少，而GRSP的产量同植物的初级生产力呈正相关关系(Treseder et al., 2007)；(2)翅碱蓬湿地表层沉积物的高盐度不利于AMF的生存。例如，Guo et al.(2014)的研究表明于翅碱蓬定殖的AMF

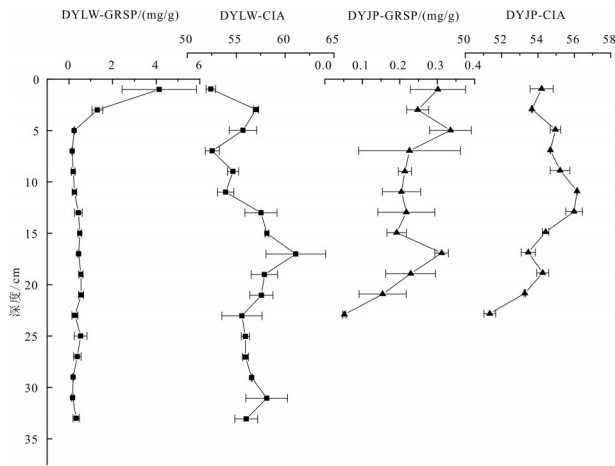


图4 黄河三角洲湿地柱状样GRSP含量垂向分布
Fig.4 Vertical distribution of GRSP content in the columns of the Yellow River Delta wetland

类型只有一种,但芦苇及其他多种植物至少有2种以上;(3)翅碱蓬湿地受潮汐作用的影响,沉积物中的GRSP会被淋滤到海水中(Adame et al., 2010; Wang et al., 2018)。研究中芦苇湿地和水稻田中GRSP的含量相对较高,笔者主要从三个方面来解释:(1)芦苇湿地和水稻田长期处于水淹状态,形成了一种利于GRSP保存和积累的厌氧环境(López-Merino et al., 2015);(2)芦苇和水稻作为典型的水生维管植物,能够通过其通气组织将氧气运送到植物根部。而AMF作为一种内生菌根,则可以通过其定殖在植物根系中的根内菌丝来摄取氧气(Xu et

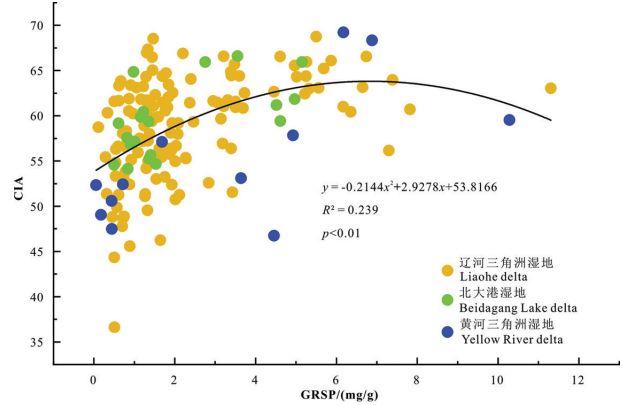


图5 化学风化指数与GRSP的相关性
Fig.5 Correlation coefficients of chemical weathering indexes and GRSP

al., 2016);(3)AMF存在应激机制,会在含水量较高的芦苇湿地和水稻田环境中分泌更多的蛋白质,从而有助于土壤团聚体的形成,进而改善土壤的水汽通透性,促进AMF和植物的生长(刘瑾等, 2017)。最后,玉米地中GRSP含量也相对较低,这主要是由于农田耕种造成的,每年的翻耕使得表层沉积物长期处于曝氧环境,不利于GRSP的保存(Spohn et al., 2010)。另外,玉米地中化肥和杀虫剂的使用也不利于AMF的生长,进而阻碍GRSP的积累(Wilson et al., 2009)。

由于不同区域湿地沉积物物理性质和化学指标的不同,在同一生境中GRSP的含量也具有差异

表3 GRSP与常量元素关系及相关参数变量的相关性统计
Table 3 Correlation statistics between GRSP and macroelements and related variables

	GRSP	Si	Al	Fe	Mg	Ca	Na	K	TOC	含水量	砂	粉砂	黏土
GRSP	1	-0.3**	0.28**	0.36**	0.15*	0.06	-0.37**	-0.13	0.65**	0.53**	-0.17*	0.14	0.19*
Si		1	-0.34**	-0.67**	-0.85**	-0.62**	0.25**	0.18*	-0.55**	-0.11	0.39**	-0.14	-0.63**
Al			1	0.86**	0.28**	-0.35**	-0.47**	0.42**	0.36**	0.33**	-0.6**	0.39**	0.55**
Fe				1	0.63**	0.05	-0.49**	0.13	0.5**	0.35**	-0.63**	0.38**	0.7**
Mg					1	0.55**	-0.21**	-0.18*	0.32**	0.03	-0.49**	0.26**	0.65**
Ca						1	-0.18*	-0.58**	0.15*	-0.2**	0.09	-0.16*	0.14
Na							1	0.08	-0.5**	-0.32**	0.25**	-0.2*	-0.24**
K								1	-0.04	-0.07	0.01	-0.18*	0.17*
TOC									1	0.49**	-0.2*	0.11	0.26**
含水量										1	-0.39**	0.38**	0.32**
砂											1	-0.89**	-0.7**
粉砂												1	0.38**
黏土													1

注:**表示在0.01水平(双侧)上显著相关;*表示在0.05水平(双侧)上显著相关。

性(图3)。本研究中GRSP含量与砂含量呈显著的负相关关系,与黏土含量呈显著的正相关关系(表3)。这与Wang et al.(2018)在红树林的研究结果一致。笔者分析沉积物中较高的黏土有助于GRSP的保护,延缓了GRSP的降解。然而,祝飞等(2010)发现,海南岛地区不同土地利用方式的土壤中GRSP含量与砂含量呈显著正相关,与黏土含量呈显著负相关。他们认为透气性更好的砂质土壤更适合根系和AMF的生长,因而GRSP含量与砂含量存在正相关关系。在本研究区,考虑到滨海湿地植物具有优良的通气组织,砂含量较低导致的沉积物渗透性不足对AMF活性影响有限,反而在GRSP的积累过程中起到保护作用。因此本研究中GRSP含量与砂含量呈显著负相关关系,与黏土含量呈显著的正相关关系。

本文沉积物中Na含量与GRSP含量呈显著负相关关系,这一结果同梁正伟等人在松嫩平原的相关研究结果一致(Zhang et al., 2017)。滨海地区经常受到海水影响,致使沉积物中盐度较高,高盐度环境不利于GRSP的产生和累积。一方面由于钠和氯相比铵盐和磷酸盐的离子半径更小,会被AMF的寄主植物优先吸收,植物生长所需营养元素吸收受限,阻碍植被生长,AMF定殖减少,不利于GRSP的产生。Guo et al.(2014)的研究对此已进行证实,随着盐度的增加,滨海湿地沉积物种AMF孢子的定殖率和种类显著降低。另一方面, SO_4^{2-} 作为海水中的主要阴离子之一,滨海沉积物中盐度的增加通常伴随着 SO_4^{2-} 含量的增加。在缺氧条件下, SO_4^{2-} 可作为电子受体被微生物利用,从而加速GRSP的分解(Weston et al., 2011)。

在众多金属元素中,Fe元素对于GRSP的影响最为特殊。虽然GRSP的分子结构尚未被准确定义,但早期的研究指出GRSP与Fe联系紧密。Fe占GRSP质量的0.04%~8.80%,因此被认为是GRSP中最丰富的金属元素(Wright et al., 1998),这也解释了GRSP的碱性溶液呈红棕色的原因(Wang et al., 2015)。此外,GRSP热稳定和抗分解的特性也得益于Fe在其中的作用(Nichols et al., 2005)。Kemper et al.(1966)发现土壤团聚体的形成受土壤有机质含量、黏土颗粒含量和游离氧化铁含量三者的共同影响。铁的氢氧化物能够在有机物与黏土矿物之间

建立联系,促进有机-矿物结合体的形成,从而降低了有机物的降解速率。因此,沉积物样品中GRSP和Fe之间的显著正相关关系反映了它们之间的内在联系。

4.3 化学风化与GRSP关系分析

化学风化趋势和风化过程中主要成分及相关矿物的变化均可在A-CN-K,即 $\text{Al}_2\text{O}_3-(\text{CaO}^*+\text{Na}_2\text{O}-\text{K}_2\text{O})$ 三角图中反映(陈昉等, 2001;谭元隆等, 2013;应立朝等, 2013)。化学风化过程被划分为3个阶段:脱Na和Ca的初期阶段,脱K的中期阶段和脱Si的晚期阶段(李冠华等, 2013;张威等, 2013; Villa et al., 2017)。将沉积物样品数据按不同研究区和不同GRSP含量分别投到A-CN-K图上,如图6。通过图6a可看出,相对于上陆壳(UCC)的平均组成含量,3个研究区的Ca和Na都发生了部分迁移淋失,近似平行于A-CN边的化学风化趋势指向,表明富含Ca和Na的斜长石已经产生了一定程度的风化分解。且3个研究区的数据点都靠近A-CN一侧, K_2O 的含量较低并保持稳定。虽然在化学风化进行的过程中,Ca和Na元素持续下降,Al元素含量慢慢上升,但整个过程仍处于初期风化阶段。风化趋势指向Sm-IL线,这表明蒙脱石和伊利石等黏土矿物随着风化程度的增强而逐渐形成。辽河三角洲湿地数据投点分布较为均匀,但都处于初级风化阶段。北大港湿地数据投点较为集中,且整体的风化程度相对较高。黄河三角洲湿地部分数据投点更接近A-K连线,表明其局部风化程度相对较高。分析图6b可看出,GRSP含量大于3 mg/g的样品大部分均位于PI-Ks线的上方,且含量越高越趋向Sm-IL线,表明高GRSP含量的沉积物处于脱Na和Ca的初期阶段末期,风化程度相对较高。

通过利用GRSP含量来表征沉积物中AMF的活动强度,可以探究AMF对矿物风化的影响。图5显示GRSP与CIA显著的相关关系($R^2=0.239, p<0.01$),这可从三方面来解释:(1)沉积物中GRSP含量同地表植被的初级生产力呈正相关(Treseder et al., 2007),GRSP含量高表明该区域植物生长相对茂盛,植物根系发育对矿物颗粒有较强的物理破碎作用(Berner, 1997),此外植物生长对于矿物元素的吸收也会加速沉积物的化学风化,提高CIA值;(2)高含量的GRSP表明该区域AMF代谢活跃。AMF被

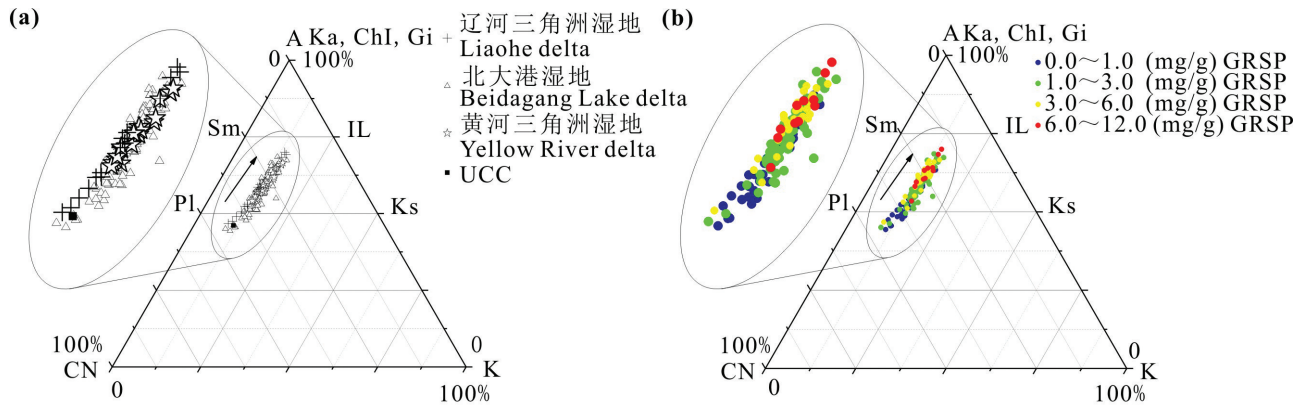


图6 A-CN-K 化学风化趋势三角图

A=Al₂O₃, CN=CaO*+Na₂O, K=K₂O. 主要元素均为物质的量比. Ka=高岭石; Chl=绿泥石; Gi=三水铝石; Sm=蒙脱石; IL=伊利石; Pl=斜长石; Ks=钾长石

Fig.6 A-CN-K chemical weathering trend triangle

A=Al₂O₃, CN=CaO*+Na₂O, K=K₂O. All the major elements are molar ratios. Ka=Kaolinite; Chl=Chlorite; Gi=Gibbsite; Sm=Smectite; IL=Illite; Pl=Plagioclase; Ks=K-feldspar

认为有类似于外生菌根(EMF)的功能,能分泌有机酸直接作用于矿物风化(Jongmans et al., 1997; Koele et al., 2014);(3)高含量的GRSP表征AMF在沉积物中分泌的球囊霉素含量较高,球囊霉素可通过增加沉积物中的土壤团聚体数量和增强矿物颗粒间生物和化学过程来加速矿物风化。此外如图5所示,虽然GRSP与CIA具有相关性,但由于矿物风化还受气候条件、沉积物搬运过程等环境条件的影响(Mo et al., 2010),因而GRSP在低含量时存在大量的散点。但当GRSP处于中高含量时,数据分布更加集中,GRSP与CIA的关系更加确定,此时的矿物风化作用主要受控于AMF活动等生物过程。

最后,笔者发现当沉积物GRSP含量达到一定含量后,CIA值随GRSP含量的增加有减小的趋势(图5)。笔者推测当GRSP超过一定含量后,球囊霉素作为一种蛋白质,对于矿物颗粒附着保护的作用开始显现,阻碍水分与矿物相互作用的隔水薄膜逐渐形成,减少了矿物颗粒参与风化的表面积,进而阻碍了矿物颗粒的风化(Kleber et al., 2007)。此外GRSP在黄河三角洲湿地的柱状样中呈现出随深度的增加逐渐减少的趋势。而CIA值呈现为随深度的增加先增加再减少趋势(图4)。由于沉积物表层的GRSP含量较高,球囊霉素阻碍了矿物的风化作用,因而CIA呈现较低值。然而随着深度的增加,GRSP含量下降,矿物颗粒表面的糖蛋白附着减少,风化作用增强,CIA值增加。随着深度的进一步增

加,GRSP含量下降至0值附近,表征湿地沉积物中AMF活动强度下降,AMF对矿物风化的促进作用减弱,CIA值降低。然而目前由GRSP表征的球囊霉素对化学风化的抑制作用出现的临界范围还需要更多的相关研究进行探索。

5 结论

(1)3个研究区的沉积物类型以砂质粉砂(sZ)和粉砂(Z)为主。辽河三角洲湿地、北大港湿地和黄河三角洲湿地上层沉积物的平均粒径(Mz)依次为5.843 Φ、6.091 Φ和5.624 Φ。其中辽河三角洲湿地虽然出现较多的粗粒(粉砂质砂),但整体的平均粒径相比黄河三角洲湿地较细。

(2)对比发现,辽河三角洲湿地的SiO₂的平均含量显著高于其他两个研究区,而CaO的平均含量显著低于其他两个研究区。表层沉积物不同元素与粒度之间存在不同的粒度效应:Mz与SiO₂呈负相关,表明粗粒沉积物富集Si;Mz与Al₂O₃、Fe₂O₃、MgO呈正相关,表明细粒沉积物富集Al、Fe和Mg;Mz与Na₂O、CaO和K₂O的关系具有区域性差异,在不同研究区表现不一致。

(3)生境的差异性对GRSP含量在滨海湿地沉积物中的分布有着巨大的影响,特别体现在翅碱蓬生境同水稻和芦苇生境之间。GRSP在水稻和芦苇生境的表层沉积物中的含量显著高于翅碱蓬和玉米生境,这是植物群落和湿地沉积物的理化性质共

同作用的结果。翅碱蓬生境较低的生物量、盐度的胁迫和潮汐的作用共同导致了GRSP的低含量。

(4)GRSP含量与CIA值之间的显著相关关系表明AMF及其代谢产物在地质体风化过程中发挥的潜在生态功能。在一定范围内,GRSP含量的增加代表着湿地沉积物中矿物风化作用的增强;超过一定含量后,球囊霉素对于矿物颗粒的附着保护作用开始显现,矿物风化作用随GRSP含量的增加有下降的趋势,但GRSP含量与CIA值关系改变的临界范围有待进一步研究。

References

- Adame M F, Neil D, Wright S F, Lovelock C E. 2010. Sedimentation within and among mangrove forests along a gradient of geomorphological settings[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 86(1): 21–30.
- Arocena J M, Velde B, Robertson S J. 2012. Weathering of biotite in the presence of arbuscular mycorrhizae in selected agricultural crops[J]. *Applied Clay Science*, 64: 12–17.
- Bago B, Vierheilig H, PichÉ Y, Azcón-Aguilar C. 1996. Nitrate depletion and pH changes induced by the extraradical mycelium of the arbuscular mycorrhizal fungus *Glomus intraradices* grown in monoxenic culture[J]. *New Phytologist*, 133(2): 273–280.
- Barker W W, Welch S A, Chu S, Banfield J F. 1998. Experimental observations of the effects of bacteria on aluminosilicate weathering[J]. *American Mineralogist*, 83(11/12 Part 2): 1551–1563.
- Berner R A. 1997. The rise of plants and their effect on weathering and atmospheric CO₂ [J]. *Science*, 276(8): 506–511.
- Bradford M M. 1976. A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein–dye binding [J]. *Analytical Biochemistry*, 72(s 1/2): 248–254.
- Caravaca F, Alguacil M d M, Torres P, Roldán A. 2005. Microbial activities and arbuscular mycorrhizal fungi colonization in the rhizosphere of the salt marsh plant *Inula crithmoides* L. along a spatial salinity gradient[J]. *Wetlands*, 25(2): 350–355.
- Cao Wanjie, Ji Hongbing, Zhu Xianfang, Zhao Xinyuan, Qiao Minmin. 2012. Contrast of geochemical features of the typical weathered profiles in Guizhou Plateau[J]. *Carsologica Sinica*, 31(2): 131–138(in Chinese with English abstract).
- Chen Yang, Chen Jun, Liu Lianwen. 2001. Chemical composition and characterization of chemical weathering of late tertiary red clay in Xifeng, Gansu Province[J]. *Journal of Geomechanics*, 7(2): 167–175(in Chinese with English abstract).
- Driver J D, Holben W E, Rillig M C. 2005. Characterization of glomalin as a hyphal wall component of arbuscular mycorrhizal fungi[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 37(1): 101–106.
- Gao M, Hou G, Dang X, Huang X. 2020. Sediment distribution characteristics and environment evolution within 100 years in western Laizhou Bay, Bohai Sea, China[J]. *China Geology*, 3(3): 445–454.
- Guo X, Gong J. 2014. Differential effects of abiotic factors and host plant traits on diversity and community composition of root–colonizing arbuscular mycorrhizal fungi in a salt–stressed ecosystem[J]. *Mycorrhiza*, 24(2): 79.
- Harner M J, Ramsey P W, Rillig M C. 2004. Protein accumulation and distribution in floodplain soils and river foam[J]. *Ecology Letters*, 7(9): 829–836.
- He L, Xue C, Ye S, Laws E A, Yuan H, Yang S, Du X. 2018. Holocene evolution of the Liaohe Delta, a tide–dominated delta formed by multiple rivers in Northeast China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 152: 52–68.
- He L, Xue C, Ye S, Amorosi A, Yuan H, Yang S, Laws E A. 2019. New evidence on the spatial–temporal distribution of superlobes in the Yellow River Delta Complex[J]. *Quaternary Science Reviews*, 214: 117–138.
- He X, Li Y, Zhao L. 2010. Dynamics of arbuscular mycorrhizal fungi and glomalin in the rhizosphere of *Artemisia ordosica* Krasch. in Mu Us sandland, China[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 42(8): 1313–1319.
- Johansen A, Jakobsen I, Jensen E S. 1993. Hyphal transport by a vesicular–arbuscular mycorrhizal fungus of N applied to the soil as ammonium or nitrate[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 16(1): 66–70.
- Jongmans A G, van Breemen N, Lundström U, van Hees P A W, Finlay R D, Srinivasan M, Unestam T, Giesler R, Melkerud P A, Olsson M. 1997. Rock–eating fungi[J]. *Nature*, 389: 682.
- Kemper W D, Koch E J. 1966. Aggregate stability of soils from western United States and Canada. Measurement Procedure, correlation with soil constituents[M]. U.S.: Government Printing Office,.
- Kleber M, Sollins P, Sutton R. 2007. A conceptual model of organo–mineral interactions in soils: Self–assembly of organic molecular fragments into zonal structures on mineral surfaces[J]. *Biogeochemistry*, 85(1): 9–24.
- Koele N, Dickie I A, Blum J D, Gleason J D, de Graaf L. 2014. Ecological significance of mineral weathering in ectomycorrhizal and arbuscular mycorrhizal ecosystems from a field–based comparison[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 69: 63–70.
- Li Gonggang, Hu Bangqi, Li Jun, Bu Ruyuan, Yang Ming, Dou Yanguang. 2012. Geochemistry of major elements in the surface sediments of the offshore area of Shandong peninsula and its geological implications [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, (3): 45–54(in Chinese with English abstract).
- Li Guanhua, Xia Dunsheng, Liu Jiabo, Wen Yanglei, Zhao Shuang, Jia

- Jia. 2013. Characteristics of major geochemical elements of taicheng loess deposits in xinjiang and its paleoenvironmental implications[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 33(4): 183–191(in Chinese with English abstract).
- Li Tongtong, Ye Siyuan, Han Zongzhu, Yuan Hongming, Pei Lixin. 2019. Weathering characteristics of the surface sediments and their indications for biological process in the Liaohe Delta wetlands [J]. *Geological Review*, 65(1): 40–51(in Chinese with English abstract).
- Liu Jin, Ye Siyuan, Wang Jiasheng. 2017. Organic carbon distribution, function and its burial processes in the coastal wetlands of the Liaohe Delta, Northeast of China[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 38(b11): 83–86(in Chinese with English abstract).
- López-Merino L, Serrano O, Adame M F, Mateo M Á, Martínez Cortizas A. 2015. Glomalin accumulated in seagrass sediments reveals past alterations in soil quality due to land-use change[J]. *Global and Planetary Change*, 133: 87–95.
- Lovelock C E, Wright S F, Clark D A, Ruess R W. 2004. Soil stocks of glomalin produced by arbuscular mycorrhizal fungi across a tropical rain forest landscape[J]. *Journal of Ecology*, 92(2): 278–287.
- McLennan S M. 1993. Weathering and Global Denudation[J]. *Journal of Geology*, 101(2): 295–303.
- Mo B, Lian B. 2010. Study on feldspar weathering and analysis of relevant impact factors[J]. *Earth Science Frontiers*, 17(3): 281–289.
- Nesbitt H W, Markovics G, Price R C. 1980. Chemical processes affecting alkalis and alkaline earths during continental weathering[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 44(11): 1659–1666.
- Nesbitt H W, Young G M, McLennan S M, Keays R R. 1996. Effects of chemical weathering and sorting on the petrogenesis of siliciclastic sediments, with implications for provenance studies[J]. *Journal of Geology*, 104(5): 525–542.
- Nichols, K A, Wright, S F. 2005. Comparison of glomalin and humic acid in eight native U.S. soils[J]. *Soil Science*, 170(170): 985–997.
- Rillig M C. 2004. Arbuscular mycorrhizae, glomalin, and soil aggregation[J]. *Canadian Journal of Soil Science*, 84(4): 355–363.
- Rillig M C, Ramsey P W, Morris S, Paul E A. 2003. Glomalin, an arbuscular-mycorrhizal fungal soil protein, responds to land-use change[J]. *Plant & Soil*, 253(2): 293–299.
- Singh A K, Rai A, Pandey V, Singh N. 2017. Contribution of glomalin to dissolve organic carbon under different land uses and seasonality in dry tropics[J]. *J. Environ. Manage.*, 192: 142–149.
- Singh A K, Rai A, Singh N. 2016. Effect of long term land use systems on fractions of glomalin and soil organic carbon in the Indo-Gangetic plain[J]. *Geoderma*, 277: 41–50.
- Spohn M, Giani L. 2010. Water-stable aggregates, glomalin-related soil protein, and carbohydrates in a chronosequence of sandy hydromorphic soils[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 42(9): 1505–1511.
- Treseder K K, Turner K M. 2007. Glomalin in Ecosystems[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 71(4): 1257–1266.
- Tan Yuanlong, Qiao Yansong, Zhao Zhizhong, Wang Yan. 2013. Chemical weathering characteristics and paleoclimatic significance of the eolian deposits in Chengdu plain[J]. *Journal of Geomechanics*, 19(1): 26–34(in Chinese with English abstract).
- Villa J A, Bernal B. 2018. Carbon sequestration in wetlands, from science to practice: An overview of the biogeochemical process, measurement methods, and policy framework[J]. *Ecological Engineering*, 114: 115–128.
- Wang Q, Li J, Chen J, Hong H, Lu H, Liu J, Dong Y, Yan C. 2018. Glomalin-related soil protein deposition and carbon sequestration in the Old Yellow River delta[J]. *Science of The Total Environment*, 625: 619–626.
- Wang Q, Lu H, Chen J, Hong H, Liu J, Li J, Yan C. 2018. Spatial distribution of glomalin-related soil protein and its relationship with sediment carbon sequestration across a mangrove forest[J]. *Science of the Total Environment*, 613–614: 548–556.
- Wang Q, Wang W, He X, Zhang W, Song K, Han S. 2015. Role and variation of the amount and composition of glomalin in soil properties in farmland and adjacent plantations with reference to a primary forest in North-Eastern China[J]. *PLoS One*, 10(10): e0139623.
- Weston N B, Neubauer S C, Velinsky D J. 2011. Accelerated microbial organic matter mineralization following salt-water intrusion into tidal freshwater marsh soils[J]. *Biogeochemistry*, 102(1/3): 135–151.
- Wilson G W T, Rice C W, Rillig M C, Springer A, Hartnett D C. 2009. Soil aggregation and carbon sequestration are tightly correlated with the abundance of arbuscular mycorrhizal fungi: Results from long-term field experiments[J]. *Ecology Letters*, 12(5): 452–461.
- Wright S F, Franke-Snyder M, Morton J B, Upadhyaya A. 1996. Time-course study and partial characterization of a protein on hyphae of arbuscular mycorrhizal fungi during active colonization of roots[J]. *Plant and Soil*, 181(2): 193–203.
- Wright S F, Upadhyaya A. 1996. Extraction of an abundant and unusual protein from soil and comparison with hyphal protein of arbuscular mycorrhizal fungi[J]. *Soil Science*, 161(9): 575–586.
- Wright S F, Upadhyaya A. 1998. A survey of soils for aggregate stability and glomalin, a glycoprotein produced by hyphae of arbuscular mycorrhizal fungi[J]. *Plant and Soil*, 198(1): 97–107.
- Xie H, Li J, Zhang B, Wang L, Wang J, He H, Zhang X. 2015. Long-term manure amendments reduced soil aggregate stability via redistribution of the glomalin-related soil protein in macroaggregates[J]. *Scientific Reports*, 5: 14687.
- Xu Z, Ban Y, Jiang Y, Zhang X, Liu X. 2016. Arbuscular mycorrhizal fungi in wetland habitats and their application in constructed wetland: A review[J]. *Pedosphere*, 26(5): 592–617.
- Ying Lichao, Liang Bin, Wang Quanwei, Zhu Bing, Hao Xuefeng, Liu

- Liang, Wen Long, Yan Zhonglin, Fu Xiaofang. 2013. Geochemical characteristics of Chengdu clay and their implications for provenance and weathering intensity [J]. *Geology in China*, 40(5): 1666–1674(in Chinese with English abstract).
- Ye S, Laws E A, Yuknis N, Ding X, Yuan H, Zhao G, Wang J, Yu X, Pei S, DeLaune R D. 2015. Carbon sequestration and soil accretion in coastal wetland communities of the Yellow River Delta and Liaohai Delta, China[J]. *Estuaries and Coasts*, 38(6): 1885–1897.
- Zhang Z, Wang Q, Wang H, Nie S, Liang Z. 2017. Effects of soil salinity on the content, composition, and ion binding capacity of glomalin-related soil protein (GRSP) [J]. *Science of the Total Environment*, 581: 657–665.
- Zhu Fei. 2010. Relationships among glomalin related soil protein, SOC and soil texture under different land use types [J]. *Journal of Anhui Agri*, 38(23): 12499–12502(in Chinese with English abstract).
- Zhang Liankai, Ji Hongbing, Liu Xiuming, Wei Xiao, Luo Gang, Wang Shijie, Nguyen Dai Trung, Nguyen Quoc Dinh. 2021. Genetic mechanism and elemental evolution of weathering laterite crust overlying carbonate rocks in tropical areas[J]. *Geology in China*, 48(2):651–660(in Chinese with English abstract).
- Zhang Wei, Dong Yingwei, Yu Yang, Liu Beibei, Li Yonghua, Li Yuanyuan, Wang Meixia. 2013. Chemical weathering of the loess in the south of Liaoning province and its implications for environmental change[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 33(5): 163–171(in Chinese with English abstract).
- Zhu Yongguan, Duan Guilin, Chen Baodong, Peng Xinhua, Chen Zheng, Sun Guoxin. 2014. Mineral weathering and element cycling in soil-microbe-plant systems[J]. *Science China: Earth Sciences*, 1(6): 1107–1116(in Chinese with English abstract).
- 138.
- 陈旸, 陈骏, 刘连文. 2001. 甘肃西峰晚第三纪红粘土的化学组成及化学风化特征[J]. *地质力学学报*, 7(2): 167–175.
- 李国刚, 胡邦琦, 李军, 布如源, 杨敏, 窦衍光. 2012. 山东半岛沿岸海域表层沉积物的常量元素及其地质意义[J]. *海洋地质与第四纪地质*, (3): 45–54.
- 李冠华, 夏敦胜, 柳加波, 温仰磊, 赵爽, 贾佳. 2013. 新疆塔城黄土沉积常量地球化学元素特征及其环境意义[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 33(4): 183–191.
- 李通通, 叶思源, 韩宗珠, 袁红明, 裴理鑫. 2019. 辽河三角洲湿地表层沉积物的风化特征及其对生物作用的指示意义[J]. *地质论评*, 65(1): 40–51.
- 刘瑾, 叶思源, 王家生. 2017. 辽河三角洲滨海湿地有机碳的时空演变、环境功能及其埋藏机制[J]. *地球学报*, 38(b11): 83–86.
- 谭元隆, 乔彦松, 赵志中, 王燕. 2013. 成都平原风尘堆积的化学风化特征及其古气候意义[J]. *地质力学学报*, 19(1): 26–34.
- 应立朝, 梁斌, 王全伟, 朱兵, 郝雪峰, 刘亮, 文龙, 燕钟林, 付小方. 2013. 成都粘土地球化学特征及其对物源和风化强度的指示[J]. *中国地质*, 40(5): 1666–1674.
- 祝飞. 不同土地利用方式下球囊霉素相关土壤蛋白与有机碳及土壤质地的关系[J]. *安徽农业科学*, (23): 12499–12502.
- 张连凯, 季宏兵, 刘秀明, 魏晓, 罗刚, 王世杰, NGUYEN Dai Trung, NGUYEN Quoc Dinh. 2021. 热带地区碳酸盐岩上覆红色风化壳的成因机理及元素演化[J]. *中国地质*, 48(2): 651–660.
- 张威, 董应巍, 于洋, 刘蓓蓓, 李永化, 李媛媛, 王美霞. 2013. 辽南黄土化学风化特点及其环境意义[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 33(5): 163–171.
- 朱永官, 段桂兰, 陈保冬, 彭新华, 陈正, 孙国新. 2014. 土壤-微生物-植物系统中矿物风化与元素循环[J]. *中国科学:地球科学*, 1(6): 1107–1116.

附中文参考文献

曹万杰, 季宏兵, 朱先芳, 赵兴媛, 乔敏敏. 2012. 贵州高原地区典型风化剖面地球化学特征及其对比研究[J]. *中国岩溶*, 31(2): 131–