

城市红树林湿地沉积物的矿物组成特征及影响因素

王茜 沈小雪 曹烨 李瑞利[†]

北京大学深圳研究生院环境与能源学院, 深圳 518055; [†] 通信作者, E-mail: lirui@pkusz.edu.cn

摘要 以深圳城市红树林湿地沉积物为研究对象, 分析其矿物组分和理化性质, 探究其矿物组成特征及影响因素。结果表明: 1) 深圳市红树林湿地表层沉积物的矿物组成以黏土矿物(16.5%~73.5%)和石英(22.0%~81.2%)为主, 随着深度增加, 不同样地的沉积物中钾长石、黄铁矿和石盐等矿物含量存在差异; 2) 表层沉积物中, 黏土矿物主要为伊蒙混层矿物(44%~76%)、高岭石(0%~40%)、绿泥石(0%~24%)和伊利石(2%~21%), 以伊蒙混层矿物为主; 3) 不同深度的沉积物中黏土矿物组成与表层沉积物基本上一致, 与沿海区域没有植被的珠江口和大亚湾等地的沉积物存在显著差异。相关性分析结果表明, 深圳市红树林湿地沉积物的矿物组成主要受盐度、总硫(TS)和总有机碳(TOC)影响, 其黏土矿物组成则主要受pH值、盐度、TOC和沉积物粒径影响。

关键词 深圳; 红树林; 沉积物; 矿物组分; 黏土矿物

Characteristics and Influencing Factors of Mineral Composition of Urban Mangrove Sediments

WANG Qian, SHEN Xiaoxue, CAO Ye, LI Ruili[†]

School of Environment and Energy, Peking University Shenzhen Graduate School, Shenzhen 518055;

[†] Corresponding author, E-mail: lirui@pkusz.edu.cn

Abstract Taking the sediments of Shenzhen urban mangrove wetland as the research object, the mineral composition and physical and chemical properties of the sediments are analyzed, and the characteristics of mineral composition and influencing factors are explored. The main results show that the whole rock mineral composition in surface sediment is given priority to clay minerals (16.5%–73.5%) and quartz (22.0%–81.2%), and there are differences in the contents of potash feldspar, pyrite, and rock salt in different samples at different depths. The main types of clay minerals in surface sediments are imonite (44%–76%), kaolinite (0%–40%), chlorite (0%–24%), and illite (2%–21%), and are dominated by imonite. The distribution characteristics of clay minerals at different depths are basically the same as those in surface sediments. There are significant differences in the composition of clay minerals in the sediments of the Pearl River Estuary and Daya Bay without vegetation. Correlation analysis shows that the composition of whole rock minerals is mainly affected by salinity, TS and TOC, while the composition of clay minerals is mainly affected by pH, salinity, TOC, and sediment particle size.

Key words Shenzhen; mangrove; sediments; mineral composition; clay minerals

红树林湿地是分布于热带和亚热带海岸潮间带的生态系统, 生产力极高, 具有防浪护堤、保护生物多样性以及净化环境等多种重要的生态功能^[1-3]。因位于陆地-河口-海洋交界处这一特殊的地理位置, 红树林生态系统受到温度、盐度、降雨量、潮

汐流、沉积速率和营养物质等多种环境因素影响^[4-6]。作为生态系统的基本组成部分, 红树林湿地沉积物中矿物(尤其是黏土矿物)组成受气候变化、潮汐流扰动^[7]、外来沉积物汇入以及盐度、有机质含量、生物多样性等土壤环境因素影响^[8-9]。

深圳市科技创新委员会自然科学基金重点项目(JCYJ20200109140605948)资助

收稿日期: 2021-03-07; 修回日期: 2021-05-21

深圳市位于我国南部沿海区域,经济发达,人口稠密,污染物排放量大^[10]。21世纪以来,随着城市化进程的加快,港口数量增加,城市扩张^[11],每年有大量污染废水排放入海^[12],对红树林湿地沉积物的矿物组成有重要影响。

红树林林湿沉积物主要由粉砂和黏土组成,主要为石英和高岭石,也有蒙脱石、伊利石、黄铁矿、长石和钠长石等^[9,13-14]。巴西亚马逊泥滩红树林湿地沉积物的矿物组成主要为石英,也有高岭石和伊利石,含少量赤铁矿和针铁矿^[9]。巴西圣保罗州沿海平原分布的11种红树林湿地沉积物中,主要含石英、长石、菱铁矿、高岭石、伊利石和高岭石等矿物组分^[13]。日本石垣岛红树林湿地表层粉砂质沉积物中,石英含量约为70%,同时含少量长石,在黏土中发现高岭石和伊利石^[14]。沉积物被红树定植后,发生添加、迁移和转化的成土过程^[15]。在此过程中,会出现从高岭石到铁伊利石的矿物转化^[16]、生成黄铁矿并分解为针铁矿^[17]、对重金属的吸收^[18]等一系列变化。

上述研究均针对野外红树林样地,对城市红树林湿地沉积物的研究较少,其成土过程和矿物组成的影响因素尚不明了。本研究在高度城市化的深圳市选取4个不同的城市功能区,研究城市红树林湿地沉积物的矿物组成特征及影响因素,以期为制定大型城市中湿地保护措施提供科学依据。

1 研究区与研究方法

1.1 研究区概况

深圳市是一个发展速度快、人口密度大的南方城市^[19]。该地区属亚热带季风气候,年平均气温为22℃,年平均降雨量为1927 mm,半日潮平均潮差为1.9 m^[20]。本研究选择深圳市西乡、沙井、坝光和福田4个典型的红树林湿地作为采样点(图1),其中福田样地分为林地和光滩两个采样点。各采样点的气候和水文特征如表1所示。其中,坝光红树林

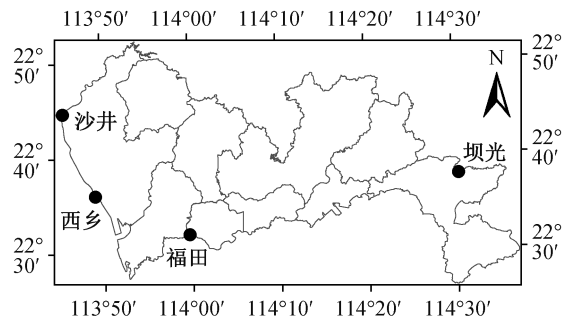


图1 研究样地

Fig. 1 Map of the study area

的年均气温最低,年均降水量最大;福田红树林的平均风速最低,年均寒冷日最少。

根据深圳城市功能区划,沙井红树林和西乡红树林位于工业区,福田红树林位于中央商业区,坝光红树林位于生态保护区。在深圳西部沿海地区,沙井红树林和西乡红树林受到传统工业区产业发展影响。在深圳南部海岸,自20世纪80年代福田自然保护区建立以来,福田红树林虽然是一个受限制的区域,但邻近地区高人口密度和繁忙的交通不可避免地对环境造成负面影响。在深圳东部海岸,坝光红树林所处地区工业开发少,生态环境良好,没有受到周边地区的显著影响^[19]。

1.2 沉积物样品采集及理化性质测定

在2016年5月至2017年8月,在沙井、西乡和坝光这3个取样点用内径为7.5 cm的酸洗PVC管采集表层0~30 cm的柱状沉积物样品,在福田取样点采集0~88 cm的柱状沉积物样品。采样步骤如下:1)在每个取样点随机设计3个5 m × 5 m的样地(两个相邻样地之间相距100 m),并在低潮位时每个样地随机采集4份沉积物;2)将沉积物中的垃圾和杂质清除后进行样品分割,沙井、西乡和坝光的样品按照5 cm的间隔进行分割,福田的样品按照8 cm的间隔进行分割;3)样品密封后,24小时内运回实验室,零下20℃冷冻保存。

表1 深圳红树林不同样地的气候和水文特征

Table 1 Climate and hydrological characteristics of different study areas in Shenzhen mangroves

取样点	年均温度/℃	年均降水量/mm	平均风速/(m·s ⁻¹)	年平均寒冷日/天	潮差/m	水流速度/(m·s ⁻¹)
沙井	24.0	1285.7	2.3	11.1	2.53	0.02~0.52
西乡	24.0	1285.7	2.3	11.1	2.53	0.01~0.52
坝光	23.3	1798.0	2.3	11.1	1.61	0.00~0.42
福田	24.0	1526.3	1.6	9.0	2.53	0.01~0.52

说明:数据来自《深圳市气候公报》和国家海洋信息中心。

按样品:水=1:5(质量/体积)的比例溶解后,用 pH 计(Sartorius PB-10, 德国)和电导率计(AZ86555, 中国)测定溶液的 pH 和盐度,用总有机碳(TOC)分析仪(multi N/C 3100 HT 1300, 德国)测定 TOC,用激光粒度分析仪(Master 2000, 美国)进行沉积物粒度分析。按照粒径,将沉积物分为黏土(0~4 μm)、淤泥(4~25 μm)和沙子(25~2000 μm)。

1.3 沉积物矿物组分测定及数据分析

依据《沉积岩中黏土矿物和常见非黏土矿物 X 射线衍射分析方法》(SY/T 5163—2010),用 X 射线衍射分析仪(Panalytical X'Pert PRO, 荷兰)对深圳主要红树林湿地沉积物的冻干粉末样品进行矿物组分定量分析和黏土矿物分析。矿物组分定量分析参数如下:40 kV 电压,40 mA 电流,X 射线靶为 Cu 靶,测量角度范围为 5°~70°。黏土矿物分析参数如下:40 kV 电压,40 mA 电流,X 射线靶为 Cu 靶,测量角度范围为 3°~30°。

获得 X 射线衍射谱图后,根据不同矿物的衍射峰、衍射角、参比强度和相对强度等,分析每个样品的矿物种类,并利用 X'Pert High Score Plus 软件计算其含量。矿物质量百分比计算公式为

$$X_i = \left(\frac{K_{i,n}}{I_{i,n}} \sum_{j=1}^m \frac{I_{j,n}}{K_{j,n}} \right)^{-1} \times 100\%$$

式中, X_i 为矿物 i 的质量百分比; $K_{i,n}$ 和 $K_{j,n}$ 分别为矿物 i 和 j 在衍射线 n 上的参照强度比值; $I_{i,n}$ 和 $I_{j,n}$ 分别为矿物 i 和 j 在衍射线 n 上的积分强度; m 为样品中矿物的种类数,误差为 ±5%^[21]。

数据测定的最终结果用 3 次重复后的平均值及标准误差(SD)表示,采用 SPSS 20.0 软件完成数据处理及统计分析,采用 Excel 2016 软件绘图,采用皮尔逊相关法分析红树林湿地沉积物理化性质与矿物组分间的关系($P < 0.05$)。

2 结果与讨论

2.1 沉积物基本理化特征

深圳红树林湿地沉积物普遍呈弱酸性, pH 值在 5.76~6.78 之间(表 2)。其中,沙井红树林湿地沉积物的酸性最强, pH 值为 5.67;西乡红树林湿地沉积物的酸性最弱, pH 值为 6.78。沉积物的盐度在 2.07‰~3.62‰之间,坝光红树林湿地沉积物的盐度(3.62‰)显著高于其他 3 个样地。沉积物的 TOC 在 2.13%~3.53%之间,福田红树林湿地沉积物的 TOC(3.53%)显著高于其他 3 个样地。沉积物的 TS 与 TOC 变化趋势一致,也是福田样地(1.63%)显著高于其他 3 个样地。坝光和福田红树林湿地沉积物的粒径较大,砂含量较大;西乡和沙井红树林湿地沉积物的粒径较小,黏土和粉砂含量较大。

2.2 沉积物矿物组成及分布特征

2.2.1 表层沉积物矿物组成特征

如表 3 所示,深圳红树林表层沉积物的矿物组成以黏土矿物和石英为主,其他依次为斜长石、钾长石、黄铁矿、石盐和石膏。4 个样地沉积物的矿物组成有较大的差异,坝光红树林以石英为主外,其余 3 个样地以黏土矿物为主,福田红树林黏土矿物占比最大。这一结果与对巴西北部帕拉州红树林泥滩的调查结果^[9]相似。钾长石、石盐和黄铁矿等的形成与红树林富含有机质以及特殊的沉积环境有关。在红树林的阻拦下,弱潮汐力和厌氧环境有助于 K^+ , Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 等离子充分沉积,形成各种矿物^[9]。

2.2.2 沉积物矿物纵向分布特征

如图 2 所示,深圳红树林湿地沉积物不同深度矿物组成存在差异。随深度增加,福田林地黏土矿物占比减小,石英占比增加,在 44 cm 左右深度出现钾长石并呈增加趋势,黄铁矿含量呈先增后减趋势。与福田林地不同,福田光滩黄铁矿随深度增加

表 2 深圳红树林湿地表层沉积物(0~25 cm)的理化特征
Table 2 Physicochemical properties of the surface sediment (0–25 cm) in Shenzhen mangroves

取样点	平均值±SD						
	pH	盐度/‰	总有机碳/%	总硫/%	黏土/%	粉砂/%	砂/%
坝光	6.42±0.26	3.62±1.13	2.30±1.14	0.71±0.16	4.26±1.37	39.22±8.66	56.52±9.87
福田	6.71±0.10	2.07±0.32	3.53±0.40	1.63±0.23	9.70±2.48	43.89±5.68	46.41±7.94
西乡	6.87±0.35	2.67±0.94	2.13±0.79	0.88±0.34	16.62±5.42	67.72±9.19	15.66±11.55
沙井	5.76±0.08	2.53±0.52	2.43±0.23	0.89±0.15	13.37±3.65	63.38±8.45	23.24±12.06

表 3 深圳红树林表层沉积物(0~25 cm)的矿物组成
Table 3 Compositions of minerals of the surface sediments (0~25 cm) from Shenzhen mangroves

样地	矿物含量/%						
	石英	钾长石	斜长石	石盐	黄铁矿	石膏	黏土矿物
福田林地	23.8	—	—	—	5.4	—	70.9
福田光滩	31.4	5.4	—	—	2.6	—	60.7
坝光	79.5	—	—	1.5	1.0	—	18.0
沙井	40.0	—	—	—	—	0.4	59.6
西乡	41.3	6.0	2.7	0.5	—	—	49.6
平均值	44.8	6.7	8.0	1.5	3.8	1.3	49.6
最小值	22.0	2.3	6.1	1.0	2.2	1.3	16.5
最大值	81.2	10.3	9.8	2.3	6.3	1.3	73.5

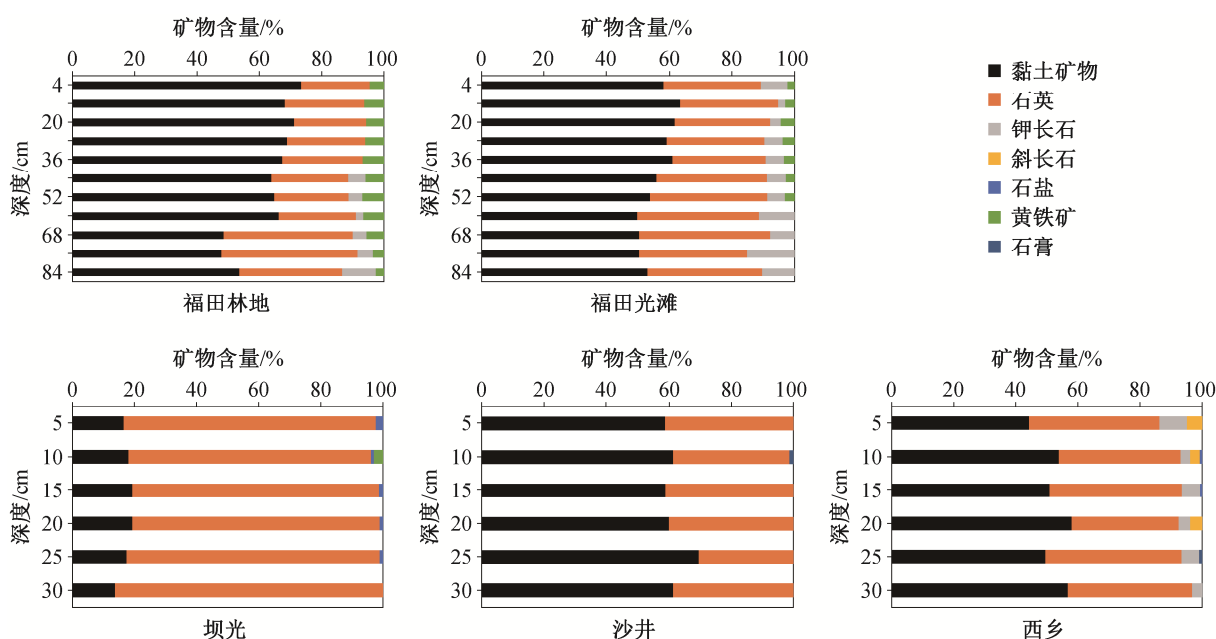


图 2 深圳红树林湿地沉积物矿物组成的纵向分布特征

Fig. 2 Vertical distribution characteristics of mineral composition of Shenzhen mangrove sediments

而减少, 在约 52 cm 以下深度未检出; 钾长石在不同深度均出现, 呈增加趋势。随深度增加, 坝光红树林石英比例增加, 存在石盐, 在 10 cm 左右深度出现黄铁矿。沙井红树林主要为黏土矿物和石英, 比例较稳定。仅在西乡红树林湿地沉积物中检出斜长石。

2.3 黏土矿物组成及分布特征

2.3.1 表层沉积物黏土矿物组成特征

黏土矿物是陆相沉积物的重要组成部分, 由于晶体结构和颗粒的特殊性, 导致其对地质环境的变化特别敏感, 黏土矿物组合类型与古气候、古环境、成岩作用和埋藏深度等有密切关系^[22]。黏土矿物也是洋底沉积物的主要成分, 形成于海洋环境

的黏土矿物完整地记录了各种地质信息, 在物源^[23]、沉积环境、全球气候变化、海平面升降和洋流演化等研究中有重要意义^[24-25]。

X 射线衍射分析结果表明, 深圳红树林湿地表层沉积物的黏土矿物种类主要有伊蒙混层矿物(61%)、高岭石(24%)、绿泥石(8%)和伊利石(7%), 以伊蒙混层矿物(44%~76%)为主(表 4)。伊蒙混层比在 5%~40% 之间, 平均值为 13%, 表明以有序混层为主。图 3 显示, 红树林湿地表层沉积物的黏土矿物组成与同区域非红树林湿地表层沉积物有较大的区别, 与该区温度高、海水流速快、生物多样性丰富以及沉积速率快的环境条件吻合。

伊蒙混层矿物是在高温条件下由蒙脱石转化而

表 4 深圳红树林表层沉积物(0~25 cm)黏土矿物组分特征
Table 4 Composition characteristics of clay minerals in the surface sediments (0~25 cm) of Shenzhen mangroves

样地	样品数	黏土矿物组分数/%					伊蒙混层比/%	数据来源	
		蒙脱石	伊蒙混层矿物	伊利石	高岭石	绿泥石			
福田	8	-	66	4	20	10	6	本文	
坝光	4	-	52	18	21	9	40		
沙井	4	-	60	5	31	5	7		
西乡	4	-	59	5	29	7	7		
平均值	20	-	61	7	24	8	13		
最小值	20	-	44	2	0	0	5		
最大值	20	-	76	21	40	24	40		
伶仃洋(ZJ-1)	1	17	-	26	28	29	-		
伶仃洋(ZJ-12)	1	3	-	23	46	28	-		[26]
伶仃洋(ZJ-17)	1	5	-	23	43	29	-		[26]
南海	-	16	-	26	33	25	-	[26]	
珠江口外大陆架	77	10	-	53	19	18	-	[27]	
珠江	-	5	-	31	46	18	-	[28]	
大亚湾	-	-	24	48	14	14	-	[29]	

来的产物,潮汐冲刷作用较弱的环境有利于其形成^[18,30]。伊蒙混层矿物的化学组成介于伊利石与蒙脱石之间,是这两个端元矿物之间的过渡矿物^[31]。伊蒙混层矿物间层比(简称伊蒙混层比,即蒙皂石晶层的百分含量)的递减代表着从蒙脱石→伊蒙无序间层→伊蒙有序间层→伊利石的矿物系列。在弱酸性介质作用下,伊利石发生弱水解作用,致使晶格中的K⁺淋失,并逐步转化为有序和无序伊蒙混层矿物。

深圳主要红树林湿地的表层沉积物中,西海岸的红树林黏土矿物组成较为一致,只有东海岸的坝光红树林伊利石占比较高,伊蒙混层比为40%(表4),即以有序混层为主。珠江沉积物的黏土矿物组成主要为高岭石(平均含量为46%),其次为绿泥石(25%)和伊利石(26%),几乎不含蒙脱石^[25]。图3显示,珠江流域和南海等沿海无植被光滩样地的沉积物中黏土矿物组成与位于同一纬度的沿海红树林湿地沉积物组成差距较大,说明红树林特殊的沉积环境对其沉积物矿物的组成有很大的影响。

2.3.2 黏土矿物纵向分布特征

图4显示,深圳主要红树林湿地不同深度沉积物黏土矿物组成与表层沉积物一致,矿物组份的比例略有波动,总体上呈现为伊蒙混层矿物>高岭石>绿泥石和伊利石。福田林地与福田光滩沉积物黏土矿物纵向分布略有差异,福田光滩沉积物中伊蒙混

层矿物含量随深度增加呈波动性减少趋势,而福田林地波动较大。坝光、沙井和西乡3个红树林样地的黏土矿物纵向分布模式与福田红树林相似,但伊蒙混层比均低于福田红树林。坝光红树林伊蒙混层矿物含量最高且纵向上保持稳定,高岭石和绿泥石含量纵向波动较大。上述现象与Andrade等^[32]的红树林调查结果不同。Andrade等^[32]发现,在巴西东北部半干旱海岸的沉积物样品中,高岭石占主导地位,含伊利石和蒙脱石,原因主要是半干旱气候形成的初期土壤包括蒙脱石、伊利石和高岭石。深圳的红树林处于亚热带季风气候,气候湿润,年均降雨量大,高温、弱酸和高无机质含量的沉积环境有利于物质的沉积和转化。

2.4 沉积物矿物组成与理化特征间的关系

不同矿物的含量与沉积物基本理化性质间的相关性存在差异(表5)。黄铁矿含量与黏土占比、粉砂占比和砂占比显著正相关,尤其与TS显著正相关($P<0.05$);黏土矿物和石英含量均与盐度、黏土占比和TS显著正相关($P<0.05$);钾长石含量与pH、盐度和TOC极显著正相关($P<0.01$);石盐含量与盐度显著正相关($P<0.05$);石膏含量与TOC显著正相关($P<0.05$);只有斜长石含量与理化性质间无显著相关性($P>0.05$)。

不同黏土矿物的含量与沉积物基本理化性质间的相关性也存在差异(表5)。伊蒙混层矿物含量与

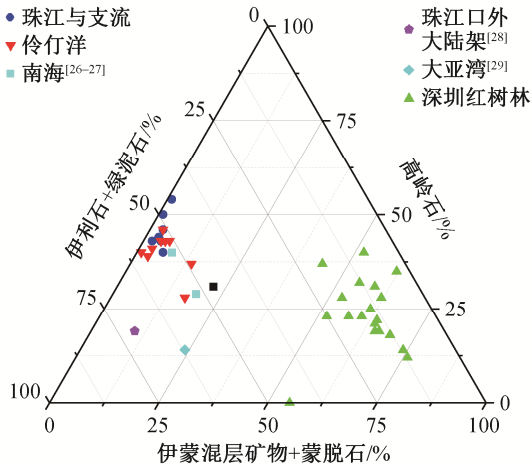


图 3 珠江流域和南海等沿海地区表层沉积物黏土矿物相对百分含量散点图

Fig. 3 Scatter plot of the relative percentage of clay minerals in the surface sediments of the coastal areas in Pearl River Basin and South China Sea

盐度、pH 和 TOC 显著正相关，伊蒙混层比与 pH、盐度、黏土含量和砂含量显著正相关 ($P < 0.05$)；伊利石含量与盐度、黏土含量和砂含量显著正相关；高岭石和绿泥石含量均与沉积物颗粒的粒径显著正相关，高岭石含量还与 pH 显著正相关 ($P < 0.05$)。

高盐度、高硫和高有机碳的沉积环境有利于黄铁矿、钾长石、石膏和黏土矿物形成；弱酸性环境下，高有机碳和高盐度的沉积环境有利于伊蒙混层矿物和伊利石的形成。位于东海岸开发程度低、生态环境较好的坝光红树林湿地沉积物的矿物组成和黏土矿物组成，与位于西海岸工业区的西乡红树林和沙井红树林以及位于东海岸金融、交通中心的福田红树林有较大差异。东海岸的坝光红树林湿地沉积物矿物组成中，石英占据主导地位，黏土矿物含量远低于西海岸的 3 个样地。在黏土矿物组成中，

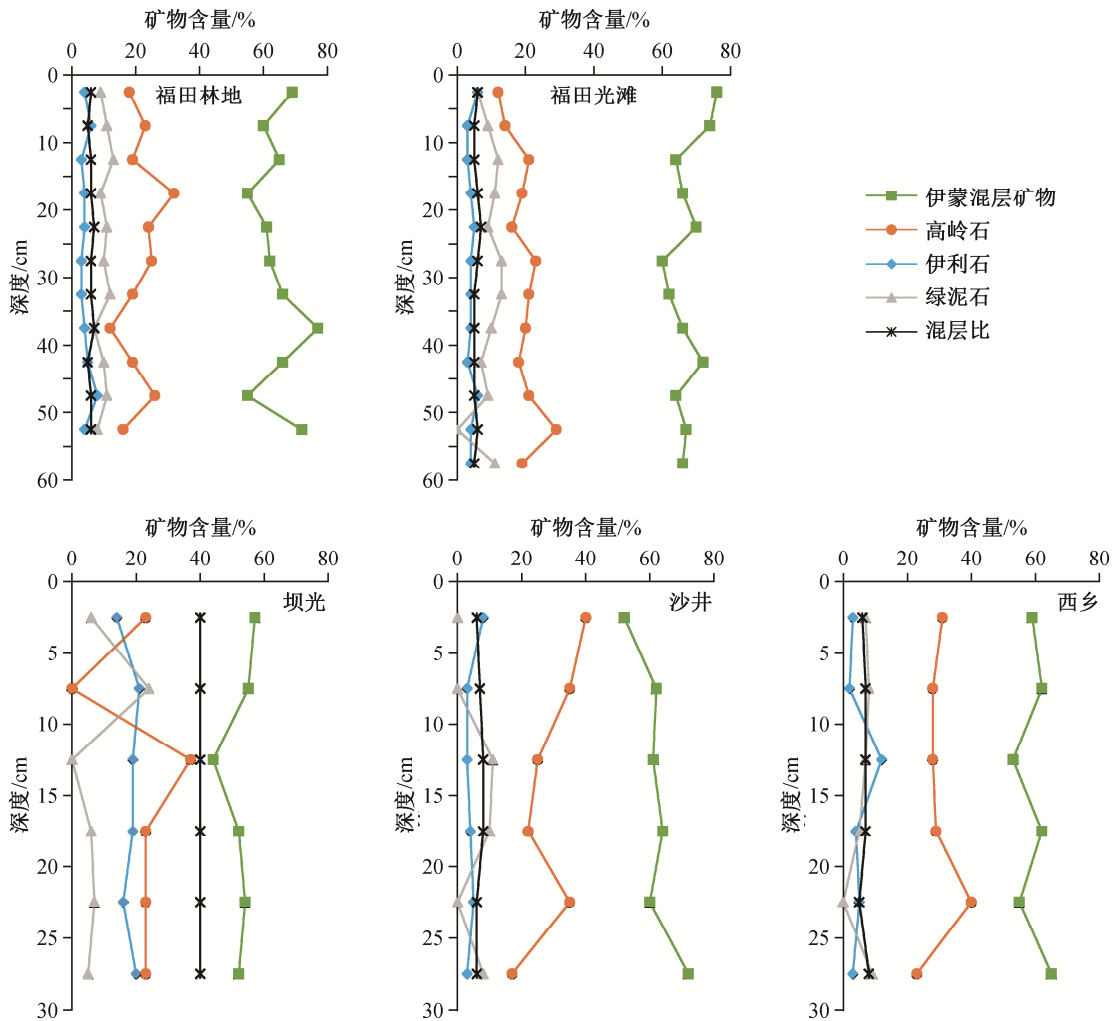


图 4 深圳主要红树林湿地沉积物黏土矿物纵向分布特征

Fig. 4 Vertical distribution characteristics of clay minerals in sediments of major mangroves in Shenzhen

表 5 深圳红树林湿地沉积物矿物组分与理化性质的关系
Table 5 Correlation between mineral components and physicochemical properties of Shenzhen mangrove sediments

变量	理化性质					黏土矿物含量					矿物含量								
	pH	盐度	黏土占比	粉砂占比	砂占比	TS	TOC	伊蒙混层矿物	伊利石	高岭石	绿泥石	伊蒙混层比	黏土矿物	石英	钾长石	斜长石	石盐	黄铁矿	石膏
pH	1.00																		
盐度	0.48**	1.00																	
黏土占比	0.26	0.02	1.00																
粉砂占比	0.33*	0.19	0.80***	1.00															
砂占比	0.33*	0.15	0.89***	0.99***	1.00														
TS	0.03	0.09	0.08	0.10	0.10	1.00													
TOC	0.45**	0.45**	0.01	0.16	0.13	0.51***	1.00												
伊蒙混层矿物	0.36*	0.47**	0.02	0.15	0.11	0.07	0.29*	1.00											
伊利石	0.26	0.42**	0.42**	0.25	0.31*	0.25	0.07	0.61***	1.00										
高岭石	0.31*	0.19	0.44**	0.47**	0.48**	0.06	0.18	0.61***	0.10	1.00									
绿泥石	0.29	0.09	0.37*	0.34*	0.37*	0.28	0.03	0.24	0.02	0.78***	1.00								
伊蒙混层比	0.33*	0.44**	0.46**	0.28	0.35*	0.24	0.10	0.53***	0.92***	0.13	0.03	1.00							
黏土矿物	0.09	0.30*	0.36*	0.19	0.24	0.43**	0.06	0.55***	0.83***	0.01	0.08	0.85***	1.00						
石英	0.26	0.40**	0.33*	0.13	0.19	0.42**	0.02	0.60***	0.87***	0.04	0.12	0.91***	0.96***	1.00					
钾长石	0.73***	0.50***	0.09	0.00	0.03	0.25	0.45**	0.30*	0.31*	0.05	0.04	0.40**	0.02	0.24	1.00				
斜长石	0.15	0.11	0.24	0.25	0.25	0.15	0.02	0.14	0.16	0.31*	0.17	0.09	0.15	0.02	0.15	1.00			
石盐	0.17	0.58***	0.24	0.05	0.11	0.11	0.25	0.42**	0.64***	0.03	0.01	0.70***	0.61***	0.66***	0.29**	0.10	1.00		
黄铁矿	0.23	0.11	0.31*	0.50***	0.46**	0.67***	0.07	0.33*	0.21	0.45**	0.54***	0.24	0.44**	0.48**	0.14	0.20	0.26	1.00	
石膏	0.06	0.12	0.01	0.06	0.04	0.11	0.31*	0.12	0.08	0.33*	0.33*	0.09	0.03	0.04	0.01	0.05	0.08	0.16	1.00

注: *, **和***分别表示在 0.05, 0.01 和 0.001 水平上相关性显著(双尾检验)。

东海岸的坝光红树林伊蒙混层矿物含量也低于西海岸的3个样地,坝光红树林伊利石含量很高。张娜^[31]的研究表明,在弱酸性介质中,伊利石容易发生弱水解作用,逐步转化为伊蒙混层矿物。在高有机质、高硫、咸水冲刷及厌氧环境的红树林中形成的酸性硫酸盐土壤为这一过程提供了条件^[33]。西海岸的3个红树林湿地沉积物中,有机质和硫含量高于东海岸的坝光红树林,东、西海岸沉积环境的不同使得其沉积物的矿物组成产生差异。此外,潮流扰动、风速和降雨等也会对沉积物的矿物组成产生影响。综上所述,城市红树林湿地沉积物的矿物组成主要受自然因素影响,城市化过程中的人为扰动对其影响较小。

3 结论

本文研究深圳市红树林湿地沉积物的矿物组成及影响因素,得到以下结论。

1) 深圳红树林湿地表层沉积物的矿物组成以黏土矿物和石英为主,其他依次为斜长石、钾长石、黄铁矿、石盐和石膏。不同深度矿物组成存在差异,随深度增加,福田林地黏土矿物占比减小,石英占比增加,福田光滩黄铁矿占比减少;坝光红树林石英占比增加;沙井红树林主要为黏土矿物和石英,比例较稳定;仅在西乡红树林湿地沉积物中检出斜长石。

2) 深圳红树林湿地表层沉积物中黏土矿物主要有伊蒙混层矿物、高岭石、绿泥石和伊利石,以伊蒙混层矿物为主(44%~76%)。不同深度沉积物的黏土矿物组成特征与表层沉积物一致,矿物组分比例略有波动,总体上呈现为伊蒙混层矿物>高岭石>绿泥石和伊利石。

3) 深圳红树林湿地沉积物的矿物组成主要受盐度、TS和TOC影响,黏土矿物组成则主要受pH、盐度、TOC和沉积物粒径影响。

参考文献

- [1] 于凌云,林绅辉,焦学尧,等. 粤港澳大湾区红树林湿地面临的生态问题与保护对策. 北京大学学报(自然科学版), 2019, 55(4): 782-790
- [2] Li R, Yu L, Chai M, et al. The distribution, characteristics and ecological risks of microplastics in the mangroves of Southern China. *Science of The Total Environment*, 2020, 708: 135025
- [3] 李瑞利,柴民伟,邱国玉,等. 近50年来深圳湾红

树林湿地Hg、Cu累积及其生态危害评价. *环境科学*, 2012, 33(12): 4276-4283

- [4] Ellison A M, Farnsworth E J, Merkt R E. Origins of mangrove ecosystems and the mangrove biodiversity anomaly. *Global Ecology and Biogeography*, 1999, 8 (2): 95-115
- [5] Ashton E C, Macintosh D J. Preliminary assessment of the plant diversity and community ecology of the Sematan mangrove forest, Sarawak, Malaysia. *Forest Ecology and Management*, 2002, 166(1): 111-129
- [6] Azman M S, Sharma S, Shaharudin M A M, et al. Stand structure, biomass and dynamics of naturally regenerated and restored mangroves in Malaysia. *Forest Ecology and Management*, 2021, 482: 118852
- [7] Anthony E J. Sediment dynamics and morphological stability of estuarine mangrove swamps in Sherbro Bay, West Africa. *Marine Geology*, 2004, 208: 207-224
- [8] Andrade G R P, Cuadros J, Partiti C S M, et al. Sequential mineral transformation from kaolinite to Fe-illite in two Brazilian mangrove soils. *Geoderma*, 2018, 309: 84-99
- [9] Vilhena M D P S, Costa M L D, Berrêdo J F. Continental and marine contributions to formation of mangrove sediments in an Eastern Amazonian mudplain: the case of the Marapanim Estuary. *Journal of South American Earth Sciences*, 2010, 29(2): 427-438
- [10] 窦勇,高金伟,时晓婷,等. 2000—2013年中国南部近海赤潮发生规律及影响因素研究. *水生态学杂志*, 2015, 36(3): 31-37
- [11] Moschetto F A, Ribeiro R B, de Freitas D M. Urban expansion, regeneration and socioenvironmental vulnerability in a mangrove ecosystem at the southeast coastal of São Paulo, Brazil. *Ocean & Coastal Management*, 2021, 200: 105418
- [12] 张善发,王茜,关淳雅,等. 2001—2017年中国近海水域赤潮发生规律及其影响因素. *北京大学学报(自然科学版)*, 2020, 56(6): 1129-1140
- [13] Souza-Júnior V S, Vidal-Torrado P, Garcia-González M T, et al. Soil mineralogy of mangrove forests from the State of São Paulo, Southeastern Brazil. *Soil Science Society of America Journal*, 2008, 72(3): 848-857
- [14] Kinjo K K U J, Tokashiki Y, Sato K, et al. Characteristics of surface sediments along a creek in a mangrove forest. *Soil Science and Plant Nutrition (Tok*

- yo), 2005, 51(6): 809–817
- [15] Ferreira T O, Vidal-Torrado P, Otero X L, et al. Are mangrove forest substrates sediments or soils? A case study in southeastern Brazil. *Catena* (Giessen), 2007, 70(1): 79–91
- [16] Andrade G R P, Cuadros J, Partiti C S M, et al. Sequential mineral transformation from kaolinite to Fe-illite in two Brazilian mangrove soils. *Geoderma*, 2018, 309: 84–99
- [17] Preda M, Cox M E. Temporal variations of mineral character of acid-producing pyritic coastal sediments, Southeast Queensland, Australia. *Science of the Total Environment*, 2004, 326(1): 257–269
- [18] 陈东平, 沈文杰, 罗松英, 等. 南三岛红树林沉积物汞累积与矿物特征及其关系分析. *生态环境学报*, 2020, 29(11): 2279–2287
- [19] Chai M, Li R, Ding H, et al. Occurrence and contamination of heavy metals in urban mangroves: a case study in Shenzhen, China. *Chemosphere*, 2019, 219: 165–173
- [20] Yang Q, Lei A P, Li F L, et al. Structure and function of soil microbial community in artificially planted *Sonneratia apetala* and *S. caseolaris* forests at different stand ages in Shenzhen Bay, China. *Marine Pollution Bulletin*, 2014, 85(2): 754–763
- [21] 赵晓东, 杨少春, 钟思瑛, 等. 注水开发油田粘土矿物变化及其对剩余油形成影响. *矿物学报*, 2014, 34(4): 591–598
- [22] 马素辉, 李卓仑, 王乃昂, 等. 地下水补给型湖泊表层沉积物矿物组成及其形成机制——以巴丹吉林沙漠湖泊群为例. *湖泊科学*, 2015, 27(4): 727–734
- [23] 徐勇航, 陈坚, 王爱军, 等. 台湾海峡表层沉积物中黏土矿物特征及物质来源. *沉积学报*, 2013, 31(1): 120–129
- [24] 王苗苗, 孙志高, 卢晓宁, 等. 调水调沙工程长期实施对黄河口近岸沉积物粒度分布与黏土矿物组成特征的影响. *环境科学*, 2015, 36(4): 1256–1262
- [25] 全秀云. 北部湾粘土矿物分布及其环境指示意义[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2010
- [26] 刘志飞, Colin C, 黄维, 等. 珠江流域盆地表层沉积物的黏土矿物及其对南海沉积物的贡献. *科学通报*, 2007, 52(4): 448–456
- [27] Liu Z F, Colin C, Huang W, et al. Climatic and tectonic controls on weathering in south China and Indochina Peninsula: clay mineralogical and geochemical investigations from the Pearl, Red, and Mekong drainage basins. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2007, 8(5): Q05005
- [28] 张晓飞, 陈坚, 徐勇航, 等. 南海北部西侧海域粘土矿物的含量分布特征及来源分析. *台湾海峡*, 2012, 31(2): 268–276
- [29] 宋晶, 汤连生, 王清, 等. 沿海地区典型吹填土物化特征的对比. *中山大学学报(自然科学版)*, 2014, 53(6): 106–111
- [30] 李佳昱, 梁婷, 朱小二, 等. 重庆涪陵二龙口剖面 P-T 界线附近黏土矿物特征及其古环境意义. *地质学报*, 2021, 95(3): 868–882
- [31] 张娜. 北部湾海底沉积物的矿物学特征及其对环境的响应[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2015
- [32] Andrade G R P, Azevedo A C, Cuadros J, et al. Transformation of kaolinite into smectite and iron-illite in Brazilian Mangrove Soils. *Soil Science Society of America Journal*, 2014, 78(2): 655–672
- [33] 黄巧义, 唐拴虎, 卢瑛, 等. 酸性硫酸盐土的形成、特性及其生态环境效应. *植物营养与肥料学报*, 2014, 20(6): 1534–1544