

孙清凡, 钱海燕, 陈莎莎, 等. 鄱阳湖泗洲头湿地土壤粒度组成及其对有机碳的影响[J]. 华中农业大学学报, 2023, 42(1): 197-204.  
DOI: 10.13300/j.cnki.hnlkxb.2023.01.024

## 鄱阳湖泗洲头湿地土壤粒度组成及其对有机碳的影响

孙清凡<sup>1</sup>, 钱海燕<sup>1</sup>, 陈莎莎<sup>1</sup>, 周杨明<sup>2</sup>, 谢冬明<sup>3</sup>, 王妮<sup>4</sup>

1. 东华理工大学地球科学学院, 南昌 330013; 2. 江西师范大学地理与环境学院, 南昌 330200;  
3. 江西科技师范大学旅游学院, 南昌 330038; 4. 江西省工程咨询中心有限公司, 南昌 330036

**摘要** 为探究土壤质地对天然湿地土壤有机碳含量的影响,以鄱阳湖泗洲头湿地为研究对象,利用激光粒度分析仪测定苔草(*Carex cinerascens*)、南荻(*Triarrhena lutarioriparia*)、芦苇(*Phragmites australis*)、荻(*Miscanthus sacchariflorus*)和狗牙根(*Cymodon dactylon*) 5种优势植被下的表层(0~20 cm)和下层(20~40 cm)土壤粒度组成,采用Folk-Ward公式计算土壤粒度参数,分析土壤粒度分布特征,利用结构方程模型(structural equation model, SEM)和Pearson相关性探讨土壤粒度组成与土壤有机碳的关系。结果表明,鄱阳湖泗洲头湿地土壤质地以粉黏土和砂壤土为主,分选性较差。粉黏土质地组成主要以粉粒(67.76%~79.28%)为主,平均粒径( $M_z$ )为6.91  $\Phi$ ,粒度频率曲线为双峰或三峰分布;砂壤土质地组成主要以细砂(32.90%~56.55%)为主, $M_z$ 为3.00  $\Phi$ ,粒度频率曲线为单峰分布。粉黏土土壤有机碳含量为(10.52 $\pm$ 3.86) g/kg,显著高于砂壤土土壤有机碳含量((1.67 $\pm$ 1.66) g/kg)。土壤质地对土壤有机碳含量具有直接影响,黏粒、粉粒和砂粒均是影响土壤有机碳含量的重要影响因子。研究区黏粒与粉粒对土壤有机碳的固持能力显著高于砂粒,因此,对鄱阳湖湿地进行保护时应重视土壤质地对固碳的影响。

**关键词** 鄱阳湖湿地; 土壤粒度; 土壤有机碳; 结构方程模型; 湿地生态保护; 土壤质地; 湿地固碳

**中图分类号** X171.1; S152.3 **文献标识码** A **文章编号** 1000-2421(2023)01-0197-08

土壤粒径分布特征是影响土壤吸附能力和土壤有机碳变化的重要因素,细小的矿物颗粒与有机质相结合能减缓有机质的分解,其吸附能力强弱直接对土壤有机碳含量产生影响<sup>[1]</sup>。研究土壤粒度与土壤有机碳的关系对于评估土壤固碳能力具有重要意义。

鄱阳湖是中国最大淡水湖泊,受到流域内五河来水与长江顶托的共同作用,年内水位变化幅度约8~22 m,其独特的水文节律形成了大片水陆交替的洲滩湿地<sup>[2]</sup>。近年来,受过度采砂和三峡大坝建成等因素的影响,鄱阳湖枯水期延长,水位降低导致洲滩植被开始向旱生植物演替,苔草等植被分布高程下移,水文干旱化趋势明显,可能会导致土壤粒度组成发生变化,继而影响鄱阳湖湿地土壤碳汇功能。研究表明,鄱阳湖湿地土壤粒度组成与土壤水分<sup>[3]</sup>、土壤养分含量<sup>[4]</sup>密切相关,砂粒含量会影响土壤微生物

群落结构组成<sup>[5]</sup>。然而这些研究未明确土壤粒度分布特征,也未阐明土壤粒度组成与土壤有机碳的直接影响。泗洲头是与鄱阳湖主湖直接相连的洲滩前缘,其水位变化与鄱阳湖水位变化直接相关:丰水期为水域,枯水期水位下降形成裸露洲滩。但是关于泗洲头湿地的研究相对较少,零星的研究主要集中于植被特征和土壤氮素研究等方面<sup>[6]</sup>。在此背景下,研究泗洲头湿地土壤质地,探讨土壤粒度组成对土壤有机碳的影响,有助于理解土壤成因和对区域环境变化的响应和反馈。

因此,本研究以鄱阳湖泗洲头湿地为研究对象,研究不同植被下的土壤粒度组成,揭示土壤粒度分布特征及其对土壤有机碳的影响,以期为泗洲头湿地固碳能力提升和湿地生态保护和修复提供科学依据。

收稿日期: 2022-09-30

基金项目:国家自然科学基金项目(41561105);江西省自然科学基金面上项目(20212BAB203002);江西省重点研发计划项目(20181BBG70037);东华理工大学博士科研启动基金项目(DHBK201909838)

孙清凡, E-mail: 15195221431@163.com

通信作者: 钱海燕, E-mail: hyqian@163.com

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究区泗洲头湿地位于以吴城为中心的鄱阳湖国家自然保护区,气候属亚热带季风气候,年降水量超过1 500 mm<sup>[6]</sup>。泗洲头湿地是直接和鄱阳湖主湖相连的洲滩区域,对水位变化的影响最为敏感,年内水位变化幅度超过10 m。泗洲头植被主要为草本植物,包括苔草(*Carex cinerascens*)、南荻(*Triarrhena lutarioriparia*)、芦苇(*Phragmites australis*)、荻(*Miscanthus sacchariflorus*)、狗牙根(*Cynodon dactylon*)、白茅(*Imperata koenigii*)、假俭草(*Eremochloa ophiuroides*)、萎蒿(*Artemisia selengensis*)、牛鞭草(*Hemarthria sibirica*)、水田碎米荠(*Cardamine lyrata*)、藨草(*Phalaris arundinacea*)等,从洲滩至湖心,植被分布呈规律的环带状,其中苔草的分布高程为11~14 m,南荻为13~15 m,芦苇为14~17 m,狗牙根为15~17 m<sup>[7]</sup>。泗洲头土壤类型主要为草甸土、沼泽土、湿潮土等,成土母质主要为第四纪沉积物母质。根据2021年1月的高分1号遥感影像,利用ArcMAP软件进行裁剪和勾绘,得到泗洲头滩涂面积为3 076.71 hm<sup>2</sup>。

### 1.2 样品采集和测定

选取鄱阳湖泗洲头湿地的5种典型优势植被:苔草、南荻、芦苇、荻和狗牙根。每种植物设置4个样方,每个样方范围约200 m<sup>2</sup>,使用五点采样法采集表层(0~20 cm)和下层(20~40 cm)土壤样本,共计40份。同时记录采样点高程,采样时间为2021年1月。

土壤样本预处理:根据土质称取一定量的土样,粉黏土取0.2 g,砂壤土取5 g;每份样本加入10 mL 10% H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>去除土壤有机质,直至反应至不产生气泡为止;随后加入10 mL 10%的盐酸,反应至不产生气泡以去除无机盐;反应结束后放入由纯水机制得的纯水对样品进行洗涤(清洗过程重复3次),并静置12 h;最后向每个放有样品的烧杯中加入10 mL 0.05 mol/L六偏磷酸钠溶液,摇匀后进行粒径测试。

土壤粒度测定和分级:土样预处理后,采用Mastersizer 2000激光粒度分析仪进行粒度分析,测量范围0.02~2 000 μm。每个样品重复测试3次,取其平均值作为结果,土壤粒径分级采用美国制土壤粒级标准<sup>[8]</sup>,将土壤颗粒组划分分为黏粒(0.02~2 μm)、粉粒(2~50 μm)、极细砂(50~100 μm)、细砂(100~250 μm)、中砂(250~500 μm)、粗砂(500~1 000 μm)和极粗砂(1 000~2 000 μm)。

土壤理化性质的分析测试参考文献<sup>[9]</sup>,测定土

壤有机碳(soil organic carbon, SOC)、pH、全氮(total nitrogen, TN)、全磷(total phosphorus, TP)、土壤阳离子交换量(cation exchange capacity, CEC)、盐分和电导率(electrical conductivity, EC)。其中,不同植被表层(0~20 cm)和下层(20~40 cm)土壤pH在4.38~5.75, TN在0.07~1.64 g/kg, TP在0.18~0.87 g/kg, CEC在1.09~18.01 cmol/kg, 盐分在0.01~0.17%, EC在5.95~98.70 μS/cm。

### 1.3 粒度参数计算

将粒度测量结果转换为等比制粒级 $\Phi$ ,  $\Phi$ 值计算公式为:

$$\Phi = -\log_2 D \quad (1)$$

式中: $D$ 为各土壤粒度累积体积分数对应的颗粒直径。

采用Folk-Ward公式<sup>[10]</sup>计算平均粒径( $M_z$ )、分选系数( $S_d$ )、偏度(SK)和峰度( $K_g$ )等粒度参数,其计算公式依次为:

$$M_z = \frac{\Phi_{84} + \Phi_{50} + \Phi_{16}}{3} \quad (2)$$

$$S_d = \frac{\Phi_{84} - \Phi_{16}}{4} + \frac{\Phi_{95} - \Phi_5}{6.6} \quad (3)$$

$$SK = \frac{\Phi_{84} + \Phi_{16} - 2\Phi_{50}}{2(\Phi_{84} - \Phi_{16})} + \frac{\Phi_{95} + \Phi_5 - 2\Phi_{50}}{2(\Phi_{95} - \Phi_5)} \quad (4)$$

$$K_g = \frac{\Phi_{95} - \Phi_5}{2.44(\Phi_{75} - \Phi_{25})} \quad (5)$$

式中: $\Phi_x$ 为粒度累积到 $x\%$ 所对应的粒径。

$M_z$ 是反映土壤粒度平均状况的参数, $M_z$ 越大则细物质越多; $S_d$ 反映土壤粒径分布的分散程度,分为7个分选级别,分选极好( $S_d \leq 0.35$ )、分选好( $0.35 < S_d \leq 0.50$ )、分选较好( $0.50 < S_d \leq 0.71$ )、分选中等( $0.71 < S_d \leq 1.00$ )、分选较差( $1.00 < S_d \leq 2.00$ )、分选差( $2.00 < S_d \leq 4.00$ )、分选极差( $4.00 < S_d$ );SK反映土壤粒度分布的对称性,分为5个等级,极负偏( $-1.00 \leq SK \leq -0.30$ )、负偏( $-0.30 < SK \leq -0.10$ )、近于对称( $-0.10 < SK \leq 0.10$ )、正偏( $0.10 < SK \leq 0.30$ )、极正偏( $0.30 < SK \leq 1.00$ ); $K_g$ 反映土壤粒度的集中程度,分为6个等级,很宽平( $K_g \leq 0.67$ )、宽平( $0.67 < K_g \leq 0.90$ )、中等( $0.90 < K_g \leq 1.11$ )、尖窄( $1.11 < K_g \leq 1.56$ )、很尖窄( $1.56 < K_g \leq 3.00$ )、极尖窄( $3.00 < K_g$ )<sup>[11]</sup>。

### 1.4 数据处理

采用Excel 2019、SPSS 26软件进行数据处理和统计分析,运用独立样本 $t$ 检验比较不同土壤质地之间土壤有机碳含量的差异,利用Pearson相关系数分

析土壤有机碳和土壤粒度之间的相关性。采用 Amos 26 软件建立结构方程模型(structural equation model, SEM)以明确土壤质地对土壤有机碳的影响。

## 2 结果与分析

### 2.1 泗洲头湿地土壤粒度组成

鄱阳湖泗洲头湿地土壤以砂壤土和粉黏土为主,其中苔草和南荻分布的土壤主要为粉黏土,芦苇、荻、狗牙根则倾向于在砂壤土中生长(表1、2)。苔草和南荻植被下的表层(0~20 cm)与下层(20~40 cm)土壤粒度组成一致,均以粉粒为主,其含量高达土壤颗粒的67.76%~79.28%,其次为黏粒和极细

砂,含量分别为12.10%~16.91%和1.18%~15.97%,细砂、中砂、粗砂含量比例较低(<2%)。

芦苇、荻、狗牙根植被下的表层(0~20 cm)与下层(20~40 cm)土壤粒度组成一致,均以砂壤土为主,其中,细砂含量所占比例最大,可达32.90%~56.55%,极细砂含量达12.46%~34.61%,中砂含量达3.04%~24.41%,最低的是黏粒、粗砂和极粗砂(<4%)。

方差分析结果显示,苔草和南荻植被下的土壤黏粒与粉粒含量显著高于芦苇、荻和狗牙根( $P<0.05$ ),而前者极细砂、细砂、中砂的含量显著低于后者( $P<0.05$ ),不同植被下土壤粗砂和极粗砂含量差异不显著( $P>0.05$ )。结果表明不同植被类型对土壤质地具有选择性和适应性。

表1 不同类型植被的表层(0~20 cm)土壤粒度分布

Table 1 Topsoil(0-20 cm) grain size distribution under different vegetation types

植被 Vegetation	黏粒 Clay	粉粒 Silt	极细砂 Very fine sand	细砂 Fine sand	中砂 Middle sand	粗砂 Coarse sand	极粗砂 Very coarse sand
苔草 <i>Carex cinerascens</i>	12.97±1.20a	78.03±3.00a	6.19±3.37b	0.86±0.46b	1.19±1.06b	0.77±0.68a	0.00±0.00a
南荻 <i>Triarrhena lutarioriparia</i>	13.58±1.45a	74.59±2.29a	10.30±2.42b	1.53±1.15b	0.00±0.00b	0.00±0.00a	0.00±0.00a
芦苇 <i>Phragmites australis</i>	1.61±0.98b	11.02±4.58b	19.27±4.92a	52.83±4.11a	14.94±6.49a	0.33±0.30a	0.02±0.04a
荻 <i>Miscanthus sacchariflorus</i>	1.09±0.29b	7.64±2.16b	19.09±4.04a	55.64±4.12a	14.97±5.08a	1.24±1.17a	0.35±0.49a
狗牙根 <i>Cynodon dactylon</i>	1.19±0.16b	9.01±2.10b	22.30±1.55a	54.68±4.90a	11.74±0.92a	0.88±0.87a	0.20±0.14a

注:不同小写字母表示粒度组成在不同植被之间差异显著( $P<0.05$ )。下同。Notes: Different lowercase letters indicate significant differences in grain size distribution under different vegetation( $P<0.05$ ). The same as below.

表2 不同类型植被的下层(20~40 cm)土壤粒度分布

Table 2 Subsoil(20-40 cm) grain size distribution under different vegetation types

植被 Vegetation	黏粒 Clay	粉粒 Silt	极细砂 Very fine sand	细砂 Fine sand	中砂 Middle sand	粗砂 Coarse sand	极粗砂 Very coarse sand
苔草 <i>Carex cinerascens</i>	14.69±0.68a	73.62±3.44a	8.59±1.79c	1.60±1.10c	0.88±0.90c	0.63±0.58ab	0.00±0.00b
南荻 <i>Triarrhena lutarioriparia</i>	14.32±2.43a	77.30±8.72a	6.98±7.89c	1.40±2.41c	0.00±0.00c	0.00±0.00b	0.00±0.00b
芦苇 <i>Phragmites australis</i>	1.93±0.99b	14.70±7.26b	30.57±4.46a	46.18±9.65b	5.65±2.92bc	0.80±0.28ab	0.18±0.13ab
荻 <i>Miscanthus sacchariflorus</i>	0.95±0.21b	7.02±1.45b	19.06±6.99b	55.49±1.14a	15.70±6.89a	1.58±1.17a	0.21±0.13a
狗牙根 <i>Cynodon dactylon</i>	1.42±0.25b	11.56±2.12b	24.95±6.51ab	47.75±1.16ab	12.49±8.05ab	1.75±0.86a	0.07±0.13ab

### 2.2 泗洲头湿地土壤粒度参数

土壤粒度参数表明(表3、表4),泗洲头粉黏土  $M_z$  为  $6.91 \Phi$ , 质地较细;分选系数( $S_d$ )平均为1.90,分选较差;偏度(SK)平均为-0.05,表现为近于对称;峰度( $K_g$ )平均为0.98,表现为中等。砂壤土  $M_z$  为  $3.00 \Phi$ , 质地较粗; $S_d$  平均为1.19,分选较差;SK平均为0.26,表现为正偏; $K_g$  为1.62,表现为很尖锐。其中,苔草和南荻下的土壤  $M_z$  分别为  $6.89 \Phi$ 、 $6.93 \Phi$ ,  $S_d$  平均值分别为1.94、1.86;芦苇、荻和狗牙根  $M_z$  分别为  $3.18 \Phi$ 、 $2.82 \Phi$  和  $3.01 \Phi$ ,  $S_d$  平均值分别为1.27、1.10、1.21。粉黏土和砂壤土的分选性都较差,表明

在土壤沉积过程中,水动力为主导因素。

Pearson 相关性分析显示,泗洲头土壤  $S_d$  和  $M_z$  呈显著正相关( $r=0.924$ ),其分选性随着  $M_z$  增大而变差;土壤 SK 和  $M_z$  呈显著负相关( $r=-0.866$ ),其 SK 随着  $M_z$  变小从极对称到极正偏;土壤  $K_g$  和  $M_z$  呈显著负相关( $r=-0.922$ ),其  $K_g$  随着  $M_z$  越小而越尖锐。

### 2.3 泗洲头湿地土壤粒度频率

泗洲头不同植被类型下的土壤粒度自然频率曲线表现为不一致的规律(图1)。其中,芦苇、荻、狗牙根植被下表层(0~20 cm)和下层(20~40 cm)的土壤粒度频率曲线均为单峰分布,峰值均在  $2\sim3 \Phi$ , 细尾

表3 不同类型植被下表层(0~20 cm)土壤粒度参数

Table 3 Topsoil(0-20 cm) grain size parameters under different types of vegetation in Sizhoutou

植被类型 Vegetation type	平均粒径/ $\Phi M_z$	分选系数 $S_d$	偏度 SK	峰度 $K_g$
苔草 <i>Carex cinerascens</i>	6.89±0.13a	1.87±0.12a	-0.03±0.03c	1.05±0.17b
南荻 <i>Triarrhena lutarioriparia</i>	6.76±0.23a	1.98±0.06a	-0.04±0.04c	0.89±0.08b
芦苇 <i>Phragmites australis</i>	3.00±0.35b	1.29±0.28b	0.33±0.09a	1.65±0.10a
荻 <i>Miscanthus sacchariflorus</i>	2.83±0.16b	1.13±0.16b	0.24±0.02b	1.62±0.12a
狗牙根 <i>Cynodon dactylon</i>	2.97±0.06b	1.16±0.11b	0.25±0.03ab	1.64±0.07a

表4 不同类型植被下下层(20~40 cm)土壤粒度参数

Table 4 Subsoil(20-40 cm) grain size parameters under different types of vegetation in Sizhoutou

植被类型 Vegetation type	平均粒径/ $\Phi M_z$	分选系数 $S_d$	偏度 SK	峰度 $K_g$
苔草 <i>Carex cinerascens</i>	6.90±0.19a	2.02±0.13a	-0.12±0.02d	1.05±0.17b
南荻 <i>Triarrhena lutarioriparia</i>	7.10±0.58a	1.75±0.35a	-0.02±0.03c	0.89±0.08b
芦苇 <i>Phragmites australis</i>	3.37±0.37b	1.25±0.22b	0.30±0.06a	1.65±0.10a
荻 <i>Miscanthus sacchariflorus</i>	2.80±0.24b	1.07±0.02b	0.22±0.05b	1.62±0.12a
狗牙根 <i>Cynodon dactylon</i>	3.06±0.27b	1.26±0.05b	0.26±0.02ab	1.64±0.07a

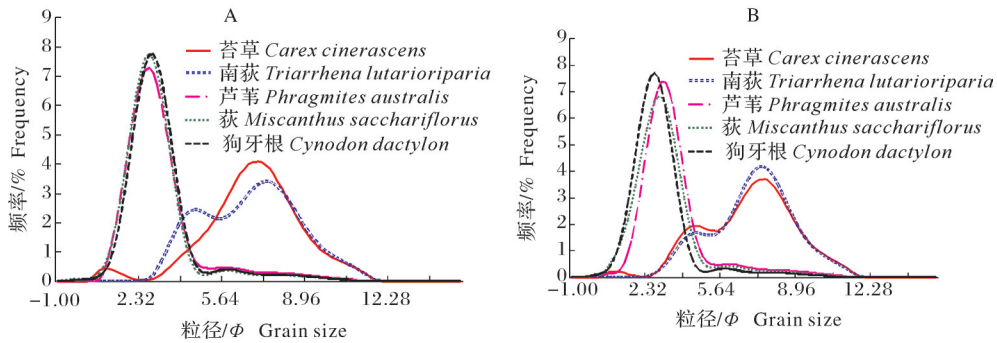


图1 不同植被类型的表层(A)和下层(B)土壤粒度频率曲线

Fig.1 Frequency curve of topsoil(A) and subsoil(B) grain size under different types of vegetation

长短接近,表明其沉积物细颗粒性质接近;南荻植被下不同深度的土壤粒度频率曲线均为不对称双峰分布,主次峰较明显,双峰分布的主峰和次峰均位于粉粒级;苔草植被下表层(0~20 cm)的土壤粒度频率曲线同样为双峰分布,但次峰很小且距离主峰较远,苔草植被下层(20~40 cm)的土壤粒度频率曲线则表现为三峰分布,主峰在7.5  $\Phi$ 附近,第1个次峰在4  $\Phi$ 附近,第2个次峰很小,在1  $\Phi$ 附近。

土壤粒度概率累积曲线表明(图2),芦苇、荻和狗牙根植被下表层和下层的土壤粒度跃移组分均较高且呈现两段式分布,悬移组分较高,跃移组分和悬移组分之间的截点  $\Phi$  值均出现在9附近,两段跃移组分之间的截点  $\Phi$  值均出现在4附近,跃移组分和蠕移组分之间的截点  $\Phi$  值出现在1附近;苔草和南荻植被下的土壤粒度跃移组分较低,表层和下层跃移组分和悬移组分之间的截点  $\Phi$  值均出现在11附近,跃移

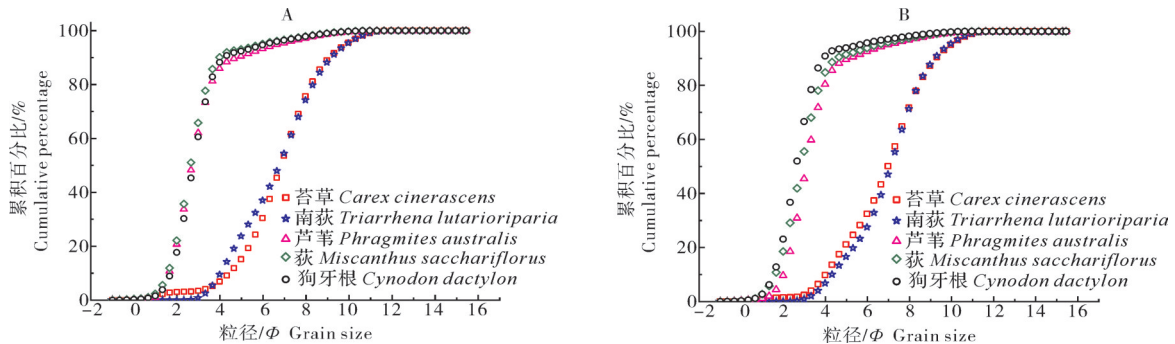


图2 不同植被类型的表层(A)和下层(B)土壤粒度概率累积曲线

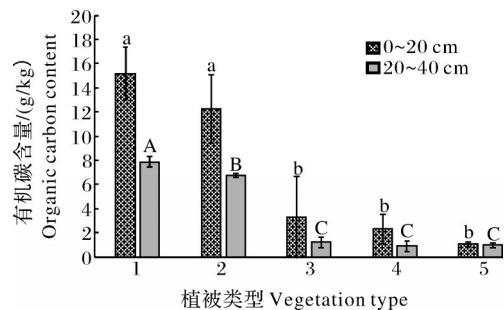
Fig.2 Probability cumulative curves of topsoil(A) and subsoil(B) grain size under different types of vegetation

组分和蠕移组分之间的截点 $\Phi$ 值均出现在4附近。苔草表层和下层土壤蠕移组分占比显著多于南荻,这是由于苔草的分布高程低于南荻,淹水时间长,受水动力影响更强烈。

## 2.4 泗洲头湿地土壤有机碳分布

不同植被类型的表层(0~20 cm)与下层(20~40 cm)土壤有机碳含量分别为0.82~17.53 g/kg和0.43~8.30 g/kg,随着土层的下降呈现下降趋势(图3)。其中,苔草、南荻表层(0~20 cm)的土壤有机碳含量分别为13.25~17.53、10.49~15.49 g/kg,平均值分别为(15.20±2.16)、(12.26±2.80) g/kg,变异系数(CV)分别为0.14和0.23;下层(20~40 cm)土壤有机碳含量分别为7.46~8.30、6.58~6.88 g/kg,平均值分别为(15.20±2.16)、(12.26±2.80) g/kg,CV分别为0.05、0.02。芦苇、荻和狗牙根下表层(0~20 cm)土壤有机碳含量分别为0.96~8.30、0.85~3.83和0.82~1.23 g/kg,平均值分别为(3.26±3.42)、(2.31±1.23)和(1.05±0.17) g/kg,变异系数(CV)分别为1.05、0.53和0.16;下层(20~40 cm)土壤有机碳含量分别为0.86~1.71、0.43~1.26和0.83~1.20 g/kg,平均值分别为(1.22±0.44)、(0.89±0.42)、(0.99±0.21) g/kg,CV分别为0.36、0.47、0.21;除芦苇在表层(0~20 cm)为强变异、苔草和南荻在下层(20~40 cm)为弱变异外,其余植被在2种土层的土壤有机碳含量均属于中等变异。

方差分析显示,苔草和南荻2种植被表层(0~20



1. 苔草 *Carex cinerascens*; 2. 南荻 *Triarrhenalutarioriparia*; 3. 芦苇 *Phragmites australis*; 4. 荻 *Miscanthus sacchariflorus*; 5. 狗牙根 *Cynodon dactylon*. 不同大写字母表示不同植被的下层土壤(20~40 cm)之间差异显著;不同小写字母表示不同植被的表层土壤(0~20 cm)之间差异显著。Different capital letters represent significant differences among subsoil (20-40 cm) under different vegetation ( $P < 0.05$ ); different lowercase letters represent significant differences among topsoil (0-20 cm) under different vegetation ( $P < 0.05$ ).

图3 泗洲头不同植被类型下土壤有机碳分布

Fig.3 Distribution of soil organic carbon content under different types of vegetation in Sizhoutou

cm)土壤有机碳含量无显著性差异( $P > 0.05$ ),下层(20~40 cm)土壤有机碳含量表现为苔草显著高于南荻( $P < 0.05$ ),芦苇、荻和狗牙根3种植被下土壤有机碳含量在2种土层中均无显著性差异( $P > 0.05$ )。苔草和南荻下的粉黏土2种土层土壤有机碳含量平均值为(10.52±3.86) g/kg,显著高于芦苇、荻和狗牙根下的砂壤土土壤有机碳含量( $P < 0.05$ ),砂壤土平均为(1.67±1.66) g/kg。

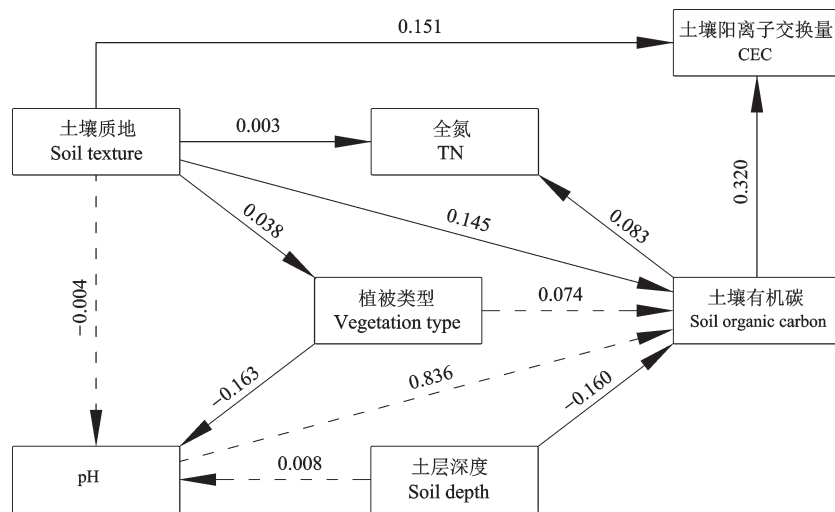
## 2.5 土壤粒度组成对土壤有机碳的影响

Pearson相关性分析显示,土壤有机碳含量与黏粒和粉粒呈极显著正相关,相关系数分别为0.833\*\*、0.866\*\*;土壤有机碳含量与砂粒呈极显著负相关,相关系数为-0.862\*\*。土壤有机碳含量与TN、TP、CEC、盐分、EC均呈显著正相关( $P < 0.05$ ),与pH呈显著负相关( $P < 0.05$ ),表明土壤有机碳含量与黏粒、粉粒及其他相关土壤因子具有密切联系。

结构方程模型(SEM)显示土壤质地、土层深度、TN、植被类型、pH、CEC、土壤有机碳之间拟合良好(图4),表明土壤质地和土层深度对土壤有机碳含量具有直接影响,pH和植被类型对土壤有机碳含量具有间接影响。研究也发现,土壤质地和土壤有机碳含量对TN、CEC具有直接影响;pH除了对土壤有机碳含量具有间接影响外,自身也受到植被类型的直接影响和土壤质地、土层深度的间接影响。

## 3 讨论

土壤粒度分布特征与其沉积环境有关。本研究中,苔草和南荻下的土壤质地为粉黏土,质地较细,沉积物分选性较差,土壤粒度分布曲线显示为双峰或三峰分布。生长苔草和南荻的土壤粒度累积曲线存在明显差异,苔草表层(0~20 cm)和下层(20~40 cm)土壤蠕移组高于南荻,表明其受水动力影响更显著;粉黏土粒度分布曲线存在多个峰尖则可能是由于粉黏土母质风化程度较高,黏粒和粉粒的粒径小、质量轻,在鄱阳湖枯水季洲滩出露后会被风力吹蚀搬运<sup>[12]</sup>。此外,生长芦苇、荻和狗牙根的土壤质地为砂壤土,质地较粗,沉积物分选性较差,不同植被下的砂壤土粒度自然频率曲线单峰分布的趋势基本一致,表层(0~20 cm)砂壤土峰值基本重合,下层(20~40 cm)峰值存在一定错位,但相距不远,表明这些植被的土壤沉积物在分选过程中的动力相似。与本研究结果相同,石唯康等<sup>[13]</sup>研究也表明植被覆盖类型对砂壤土沉积过程影响较小。通过萨胡判别公式对砂



$\chi^2=7.24, df=9, P=0.612, \chi^2/df=0.804, NFI=0.984, CFI=1.000, RMSEA=0.000$ 。实线表示直接影响,虚线表示间接影响。The solid lines indicate a direct influence, the dotted lines indicate an indirect influence.

图4 土壤质地、植被类型及其他土壤性质对土壤有机碳影响的结构方程模型

Fig.4 Structural equation model (SEM) on how soil texture, vegetation types and other soil properties affect the soil organic carbon

壤土的成因进行判别<sup>[14]</sup>,生长芦苇、荻和狗牙根下的土壤的临界值范围分别为 $-1.35\sim 2.93$ 、 $-2.18\sim 1.55$ 和 $-1.92\sim -0.21$ ,均大于萨胡判别公式的临界值 $-2.741$ ,证明泗洲头砂壤土成因主要为水成。研究区土壤分选性均较差,表明水动力在泗洲头土壤沉积过程中占主导因素。相关研究也表明鄱阳湖4 500 a以来河湖相交替发展使湖滨到湖心沉积物粒度呈由砾石 $\rightarrow$ 粗砂 $\rightarrow$ 细砂 $\rightarrow$ 粉砂 $\rightarrow$ 黏土逐渐变细的土壤粒度分布特征<sup>[15]</sup>。

结构方程模型表明,土层深度和土壤质地对土壤有机碳含量具有直接影响,植被类型和pH具有间接影响。在同一粒径下,随着土层深度增加,土壤有机碳含量呈下降趋势,有机碳含量垂直分布特征主要受植被净初级生产力以及枯落物分解速率的影响。土壤质地对土壤有机碳具有直接影响是因为更细的土壤粒度组分能结合更多有机碳,土壤有机碳的稳定性指数随着土壤颗粒增大而降低<sup>[16]</sup>。砂粒颗粒大,相对比表面积小,透水性强,砂粒中的有机碳很容易被微生物分解或流失;与砂粒相比,粉粒和黏粒具有较大的比表面积,其晶格更容易吸附有机碳<sup>[17]</sup>,这在结构方程模型中表现为土壤阳离子交换量(CEC)增加。有机碳与黏粒和粉粒结合形成有机-无机复合体后更难降解或流失,因此,粉粒和黏粒对土壤有机碳具有固持和保护作用<sup>[18]</sup>。曹昀等<sup>[19]</sup>研究表明,在鄱阳湖湖滨地区土壤层重度、中度和轻度砂化区碳蓄积量分别为0.59、0.90、1.30 t/

hm<sup>2</sup>,砂化越严重则土壤有机碳含量越低,与本研究结果一致。此外,泗洲头粉黏土分布高程低于砂壤土,较高的淹水频率也更有利于土壤有机碳的固存<sup>[20]</sup>。近年来,鄱阳湖湿地干旱化加剧,湖滨地区砂壤土分布面积扩大,水位下降使湿地部分地区的土壤由厌氧环境转化为好氧环境,狗牙根等固碳能力弱的中性植被分布面积扩大,这些因素的综合作用将使湿地土壤碳库储量下降<sup>[21]</sup>。相关性分析表明,土壤有机碳含量与TN、TP、盐分、EC呈显著正相关( $P<0.05$ ),与pH值呈显著负相关( $P<0.05$ )。其中氮和磷是湿地生态系统重要的营养元素,对芦苇、南荻等植被的生长具有促进作用,通过根系作用和枯落物分解等方式影响土壤有机碳含量;pH值越小,土壤有机碳含量就越高,可能是酸性环境抑制了微生物的活性,从而减少了有机碳的分解<sup>[22]</sup>。

综上,粉黏土和砂壤土是鄱阳湖泗洲头湿地主要土壤质地类型,土壤粒度组成分别以粉粒(67.76%~79.28%)和细砂(32.90%~56.55%)为主,土壤有机碳含量分别为 $(10.52\pm 3.86)$ 、 $(1.67\pm 1.66)$  g/kg,受水动力影响沉积物分选性较差。增加黏粒和粉粒2种粒级的含量有利于土壤有机碳固存,未来泗洲头湿地保护的过程中应注重改善土壤质地。本研究对土壤粒度及其对土壤有机碳的影响进行了分析,对湿地生态保护和修复具有一定的指导意义,但季节变化、人为因素对泗洲头湿地土壤有机碳的影响仍需进一步探讨。

## 参考文献References

- [1] 刘锐,马腾,邱文凯,等. 江汉平原黏土沉积物粒径与有机碳分布特征[J]. 环境科学与技术, 2019, 42(4): 194-201. LIU R, MA T, QIU W K, et al. Distribution characteristics of particle size and organic carbon in clay sediments in Jianghan Plain [J]. Environmental science & technology, 2019, 42(4): 194-201 (in Chinese with English abstract).
- [2] 宋炎炎,张奇,姜三元,等. 鄱阳湖湿地地下水埋深及其与典型植被群落分布的关系[J]. 应用生态学报, 2021, 32(1): 123-133. SONG Y Y, ZHANG Q, JIANG S Y, et al. Groundwater depth and its relation with typical vegetation distribution in the Poyang Lake wetland, China [J]. Chinese journal of applied ecology, 2021, 32(1): 123-133 (in Chinese with English abstract).
- [3] 李云良,许秀丽,赵贵章,等. 鄱阳湖典型洲滩湿地土壤质地与水分特征参数研究[J]. 长江流域资源与环境, 2016, 25(8): 1200-1208. LI Y L, XU X L, ZHAO G Z, et al. Research on soil texture and soil-water characteristic parameters in a typical wetland of Poyang Lake [J]. Resources and environment in the Yangtze Basin, 2016, 25(8): 1200-1208 (in Chinese with English abstract).
- [4] 崔乾,苗雨青,周光,等. 鄱阳湖湿地典型植被群落土壤养分有效性特征[J]. 安徽师范大学学报(自然科学版), 2020, 43(1): 80-85. CUI Q, MIAO Y Q, ZHOU G, et al. The characteristics of soil available nutrients under typical plant communities in Poyang Lake wetland [J]. Journal of Anhui Normal University (natural science), 2020, 43(1): 80-85 (in Chinese with English abstract).
- [5] 张广帅,于秀波,张全军,等. 鄱阳湖湿地土壤微生物群落结构沿地下水水位梯度分异特征[J]. 生态学报, 2018, 38(11): 3825-3837. ZHANG G S, YU X B, ZHANG Q J, et al. Variation in the distribution of soil microbial community structure along ground water level gradients in the Poyang Lake Wetland [J]. Acta ecologica sinica, 2018, 38(11): 3825-3837 (in Chinese with English abstract).
- [6] 谢冬明,周国宏,陈亚云,等. 鄱阳湖湿地洲头洲滩浅层土壤氮素的时空特征[J]. 江西师范大学学报(自然科学版), 2017, 41(2): 160-167. XIE D M, ZHOU G H, CHEN Y Y, et al. The temporal-spatial characteristics for N in surface soil in sishoutou marshland of Poyang Lake wetlands [J]. Journal of Jiangxi Normal University (natural science edition), 2017, 41(2): 160-167 (in Chinese with English abstract).
- [7] 钱海燕,周杨明,谢冬明,等. 鄱阳湖季节性积水湿地表层土壤碳氮高程梯度分布特征及其影响因素[J]. 江西农业大学学报, 2021, 43(5): 1199-1210. QIAN H Y, ZHOU Y M, XIE D M, et al. Distribution characteristics of surface soil carbon and nitrogen along with the elevation gradient and their influencing factors in seasonal waterlogged wetlands of Poyang Lake [J]. Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis, 2021, 43(5): 1199-1210 (in Chinese with English abstract).
- [8] 赵鹏,朱淑娟,段晓峰,等. 民勤绿洲边缘阻沙带表层土壤粒度空间分布特征[J]. 干旱区研究, 2021, 38(5): 1335-1345. ZHAO P, ZHU S J, DUAN X F, et al. Spatial distribution characteristics of grain size of surface soil in the sand-resistant belt of Minqin Oasis marginal [J]. Arid zone research, 2021, 38(5): 1335-1345 (in Chinese with English abstract).
- [9] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000: 1-638. LU R K. Agricultural chemical analysis method of soil [M]. Beijing: China Agriculture Sciencetech Press, 2000: 1-638 (in Chinese).
- [10] FOLK R L, WARD W C. Brazos River bar; a study in the significance of grain size parameters [J]. Journal of sedimentary research, 1957, 27(1): 3-26.
- [11] 崔健,党晓宏,汪季,等. 不同规格可降解沙障铺设5年后土壤粒度及有机质特征[J]. 水土保持研究, 2022, 29(2): 92-98. CUI J, DANG X H, WANG J, et al. Characteristics of soil particle size and organic matter after five years of laying different specifications of degradable sand barriers [J]. Research of soil and water conservation, 2022, 29(2): 92-98 (in Chinese with English abstract).
- [12] 陈红霞,包翔,刘果厚,等. 荒漠草原药用植物生境土壤养分与土壤粒径分析[J]. 北方农业学报, 2020, 48(6): 62-67. CHEN H X, BAO X, LIU G H, et al. Analysis of soil nutrients and soil particle size characteristics of medicinal plants habitat in desert steppe [J]. Journal of northern agriculture, 2020, 48(6): 62-67 (in Chinese with English abstract).
- [13] 石唯康,董治宝,梁爱民,等. 锁阳城镇东南部雅丹沉积物粒度特征及环境意义[J]. 干旱区资源与环境, 2021, 35(10): 141-148. SHI W K, DONG Z B, LIANG A M, et al. Grain-size characteristics and environmental significance of long ridge shaped Yardangs in the southeast Suoyang town, China [J]. Journal of arid land resources and environment, 2021, 35(10): 141-148 (in Chinese with English abstract).
- [14] 安庆,安萍,徐汝汝,等. 青藏高原不同地区沉积物的粒度特征与沉积环境判别公式适用性对比研究[J]. 聊城大学学报(自然科学版), 2017, 30(4): 37-47. AN Q, AN P, XU R R, et al. Comparative study on grain size characteristics of sediments in different regions of the Tibetan Plateau and the applicability of sedimentary environment discriminant formulas [J]. Journal of Liaocheng University (natural science edition), 2017, 30(4): 37-47 (in Chinese with English abstract).
- [15] 董延钰,金芳,黄俊华. 鄱阳湖沉积物粒度特征及其对形成演变过程的示踪意义[J]. 地质科技情报, 2011, 30(2): 57-62. DONG Y Y, JIN F, HUANG J H. Poyang lake sediments grain size characteristics and its tracing implication for formation and evolution processes [J]. Geological science and technology information, 2011, 30(2): 57-62 (in Chinese with English abstract).
- [16] FU Z H, HU W, BEARE M, et al. Land use effects on soil hydraulic properties and the contribution of soil organic carbon [J/OL]. Journal of hydrology, 2021, 602: 126741 [2022-09-30]. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126741>.
- [17] 安芳娇,苏永中,牛子儒,等. 干旱区流动沙地建植梭梭(*Haloxylon ammodendron*)林后细颗粒物输入对土壤碳氮积累的影响[J]. 中国沙漠, 2021, 41(5): 147-156. AN F J, SU Y Z, NIU Z R, et al. Effects of fine particulate matter input on soil carbon and nitrogen accumulation after establishment of *Haloxylon ammodendron* plantations on shifting sand dunes in arid area [J]. Journal of desert research, 2021, 41(5): 147-156 (in Chinese with English abstract).
- [18] JI H, HAN J G, XUE J M, et al. Soil organic carbon pool and chemical composition under different types of land use in wetland: implication for carbon sequestration in wetlands [J]. Science

- of the total environment, 2020, 716: 136996 [2022-09-30]. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.136996>.
- [19] 曹昉, 杨杰, 朱悦, 等. 鄱阳湖沙化土地湿地松人工林碳蓄积量研究[J]. 生态环境学报, 2016, 25(1): 15-21. CAO Y, YANG J, ZHU Y, et al. Study on carbon storage of *Pinus elliottii* artificially forests in sandy desertification of Poyang Lake [J]. Ecology and environmental sciences, 2016, 25(1): 15-21 (in Chinese with English abstract).
- [20] YIN S, BAI J H, WANG W, et al. Effects of soil moisture on carbon mineralization in floodplain wetlands with different flooding frequencies[J]. Journal of hydrology, 2019, 574: 1074-1084.
- [21] 金奇, 吴琴, 钟欣孜, 等. 鄱阳湖湿地水位梯度下不同植物群落类型土壤有机碳组分特征[J]. 生态学杂志, 2017, 36(5): 1180-1187. JIN Q, WU Q, ZHONG X Z, et al. Soil organic carbon and its components under different plant communities along a water table gradient in the Poyang Lake wetland [J]. Chinese journal of ecology, 2017, 36(5): 1180-1187 (in Chinese with English abstract).
- [22] 陈良帅, 黄新亚, 薛丹, 等. 川西高原泥炭沼泽土壤有机碳分布特征及其影响因素[J]. 应用与环境生物学报, 2022, 28(2): 267-275. CHEN L S, HUANG X Y, XUE D, et al. Distribution characteristics of soil organic carbon and its influencing factors in the peatlands of Western Sichuan Plateau, China [J]. Chinese journal of applied and environmental biology, 2022, 28(2): 267-275 (in Chinese with English abstract).

## Composition of soil grain size and its effect on organic carbon in Sizhoutou wetland of Poyang Lake

SUN Qingfan<sup>1</sup>, QIAN Haiyan<sup>1</sup>, CHEN Shasha<sup>1</sup>, ZHOU Yangming<sup>2</sup>, XIE Dongming<sup>3</sup>, WANG Wei<sup>4</sup>

1. School of Earth Sciences, East China University of Technology, Nanchang 330013, China;

2. School of Geography and Environment, Jiangxi Normal University, Nanchang 330200, China;

3. School of Tourism, Jiangxi Science & Technology Normal University, Nanchang 330038, China;

4. Jiangxi Engineering Consulting Center, Nanchang 330036, China

**Abstract** The topsoil (0-20 cm) and subsoil (20-40 cm) under five typical vegetations including *Carex cinerascens*, *Triarrhena lutarioriparia*, *Phragmites australis*, *Miscanthus sacchariflorus*, and *Cynodon dactylon* was collected in Sizhoutou wetland of Poyang Lake to study the effect of soil texture on the content of soil organic carbon (SOC). The distribution of soil particle size was identified with laser particle size analyzer. The parameters of soil grain size were calculated with the Folk-Ward formula. The characteristics of soil grain size distribution were discussed. The relationship between composition of soil grain size and SOC was analyzed with structural equation model (SEM) and Pearson correlation. The results showed that the soil texture of Sizhoutou wetland was mainly silty clay and sandy loam, and the soil sorting was poor. The texture of silty clay was mainly composed of silt (67.76%-79.28%), with mean value of main grain size of 6.91  $\Phi$ . The frequency curves of grain size presented a distribution with bimodal or three peaks. The texture of sandy loam was mainly composed of fine sand (32.90%-56.55%), with mean value of main grain size of 3.00  $\Phi$ . The frequency curves of grain size presented a unimodal distribution. The content of SOC in silty clay ((10.52±3.86) g/kg) was significantly higher than that in sandy loam ((1.67±1.66) g/kg,  $P<0.05$ ). The texture of soil had a direct impact on the content of SOC. Clay, silt and sand were important factors affecting the content of SOC. The retention capacity of clay and silt to soil organic carbon in the area studied was significantly higher than that of sand. It is indicated that the impact of the texture of soil on the sequestration of carbon should be emphasized in protecting the wetland of Poyang Lake.

**Keywords** wetland of Poyang Lake; grain size of soil; soil organic carbon (SOC); structural equation model; wetland ecological protection; soil texture; carbon sequestration of wetland

(责任编辑:赵琳琳)