土 壤 学 报

Acta Pedologica Sinica

DOI: 10.11766/trxb202604070167 **CSTR: 32215.14.trxb202604070167**

钱海燕，夏秀倩，周杨明，陈莎莎，杜芊静，孙清凡，邹霞. 鄱阳湖碟形湖湿地土壤粒度分布特征及其环境指示意义[J]. 土壤学报，2026，

QIAN Haiyan, XIA Xiuqian, ZHOU Yangming, CHEN Shasha, DU Qianjing, SUN Qingfan, ZOU Xia. Characteristics of Soil Particle Size Distribution and Their Environmental Implications in the Dish-shaped Lake Wetlands of Poyang Lake[J]. Acta Pedologica Sinica, 2026,

鄱阳湖碟形湖湿地土壤粒度分布特征及其环境指示意义 *

钱海燕[1]，夏秀倩[1]，周杨明[2†]，陈莎莎[3]，杜芊静[1]，孙清凡[1]，邹　霞[1]

（1. 东华理工大学地球与行星科学学院，南昌 330013；2. 江西师范大学地理与环境学院，南昌 330200；3. 江西显维生态科技有限公司，南昌 330096）

摘　要：探究鄱阳湖碟形湖湿地土壤粒度空间分异及其沉积环境指示意义，对于理解湿地土壤形成演化与沉积环境判别具有重要价值。以鄱阳湖国家级自然保护区具有不同水文特征的碟形湖—常湖池（控湖）、蚌湖（半控湖）和泗洲头（开放水域）湿地为研究对象，采用激光粒度仪、Folk-Ward 公式及粒度频率曲线，分析苔草（*Carex cinerascens*）、南荻（*Triarrhena lutarioriparia*）和芦苇（*Phragmites australis*）群落下表层（0~20 cm）和亚表层（20~40 cm）土壤粒度组成、粒度参数及频率分布特征；结合方差分解分析、结构方程模型（SEM）和 Pearson 相关性分析，量化植被、水文和土壤性质对土壤粒度的影响。结果表明，从常湖池、蚌湖至泗洲头，土壤质地逐渐粗化；其中大部分样地以粉粒为主（平均含量 78.99%），质地类型为粉壤土和粉土，呈现典型的湖相沉积特征；而泗洲头芦苇群落样地以砂粒为主（平均含量 87.58%），质地类型为砂土，表现出“湖相基底、风沙改造”的复合沉积特征。土壤粒度空间分异主要受植被-土壤交互作用、土壤单独作用和水文-植被-土壤交互作用共同调控。黏粒和粉粒与土壤有机碳、全氮、全磷、阳离子交换量及盐分呈显著正相关，砂粒则呈显著负相关。SEM 进一步揭示，黏粒受阳离子交换量和水文直接影响，粉粒和砂粒受全钾、土壤碳氮比、全磷等因子调控。鄱阳湖碟形湖湿地土壤粒度分布是植被、土壤和水文协同作用的结果，研究结果可为湿地土壤发生与分类及生态保护与修复提供科学依据。

关键词：土壤粒度；沉积环境；植被-水文-土壤交互作用；碟形湖湿地；鄱阳湖

中图分类号：S154.1　　**文献标志码：**A

Characteristics of Soil Particle Size Distribution and Their Environmental

* 江西省自然科学基金项目（20262BAC240004，20212BAB203002）和国家自然科学基金项目（41561105，42330108）共同资助

Supported by Jiangxi Provincial Natural Science Foundation (Nos. 20262BAC240004, 20212BAB203002) and the National Natural Science Foundation of China (Nos. 41561105, 42330108)

† 通讯作者 Corresponding author，E-mail：zhouym@jxnu.edu.cn

作者简介：钱海燕（1977—），女，江苏南通人，博士，副教授，研究方向为土壤碳循环与生态修复。E-mail：hyqian@163.com

收稿日期：2026－04－07；收到修改稿日期：2026－10－20；网络首发日期（www.cnki.net）：202 － －

土 壤 学 报

Acta Pedologica Sinica

Implications in the Dish-shaped Lake Wetlands of Poyang Lake

QIAN Haiyan[1], XIA Xiuqian[1], ZHOU Yangming[2†], CHEN Shasha[3], DU Qianjing[1], SUN Qingfan[1], ZOU Xia[1]

(1. *School of Earth and Planetary Sciences, East China University of Technology, Nanchang* 330013, *China*; 2. *School of Geography and Environment, Jiangxi Normal University, Nanchang* 330200, *China*; 3. *Jiangxi Xianwei Ecological Technology Co., Ltd, Nanchang* 330096, *China*)

Abstract: 【Objective】Revealing the spatial variation of soil particle size in the dish-shaped lake wetlands of Poyang Lake and its implications for sedimentary environments is of great value for understanding wetland soil formation and evolution as well as sedimentary environment identification. 【Method】Taking the dish-shaped lakes with different hydrological characteristics within the Poyang Lake National Nature Reserve—Changhuchi (controlled lake), Banghu (semi-controlled lake), and Sizhoutou (open water)—as the research objects, we employed laser particle size analysis, the Folk-Ward formula, and particle size frequency curves to examine the soil particle size composition, parameters, and frequency distribution characteristics in the surface (0-20 cm) and subsurface (20-40 cm) layers under *Carex cinerascens*, *Triarrhena lutarioriparia* and *Phragmites australis* communities. Combined with variation partitioning analysis (VPA), structural equation modeling (SEM), and Pearson correlation analysis, we quantified the influences of vegetation, hydrology, and soil properties on soil particle size. 【Result】A gradual coarsening trend was observed in soil texture from Changhuchi and Banghu to Sizhoutou. Most plots were dominated by silt (average content: 78.99%), with textural classes of silty loam and silt, reflecting typical lacustrine sedimentary characteristics. In contrast, the *Phragmites australis* community plot in Sizhoutou was dominated by sand (average content: 87.58%), exhibiting a sandy texture and a composite sedimentary pattern of a lacustrine basement overprinted by aeolian modification. The variation in soil particle size was primarily governed by the interactions between vegetation and soil, the independent influence of soil characteristics, and the interactions among hydrology, vegetation, and soil. Pearson correlation analysis revealed that clay and silt particles were significantly positively correlated with soil organic carbon, total nitrogen, total phosphorus, cation exchange capacity, and salinity, whereas sand particles showed significant negative correlations with these parameters. SEM further demonstrated that clay content was directly influenced by cation exchange capacity and hydrological characteristics, while silt and sand contents were regulated by factors such as total potassium, soil carbon to nitrogen ratio, and total phosphorus. 【Conclusion】The distribution of soil particle size in the dish-shaped lake wetlands of Poyang Lake resulted from the synergistic effects of vegetation, soil, and hydrology. These findings provide a scientific basis for understanding wetland soil genesis and classification, as well as for ecological conservation and restoration in the Poyang Lake wetland.

Key words: Soil particle size; Sedimentary environment; Vegetation-hydrology-soil interactions; Dish-shaped lake wetlands; Poyang Lake

土壤质地是土壤最基本的物理参数，可反映土壤结构、性质及水肥状况，是土壤分布与分类的基础[1]，也是生物地球化学、气候变化和水文模型的重要输入参数[2-3]。土壤粒度分布是对土壤质地的定量描述，受地形、成土母质、气候、植被及人类活动等多因素驱动[4-5]，呈现明显的空间变异性[6]。粒度特征不仅决定土壤保水保肥能力与碳汇潜力，如细颗粒促进土壤有机碳（SOC）积累[7]，也是判别沉积环境的重要依据。土壤粒度参数（平均粒径、分选系数等）能有效刻画沉积物搬运方式、沉积动力及物源信息[8-9]，基于此建立的风沙与湖相沉积物判别公式[10-11]为定量区分沉积环境提供了有效手段。然而，在受季节性淹水、风沙活动及人为调控等多重因素影响的复杂沉积环境中，单一判别公式的适用性尚需进一步验证。

鄱阳湖是中国最大淡水湖泊和国际重要湿地，具有丰水期和枯水期交替出现的独特水文节律[12]。其典型洲滩广泛分布砂土、粉壤土和黏土，粗颗粒多分布于高位滩地，细颗粒集中于近水面低洼处[13]。碟形湖作为枯水季显露的季节性子湖泊，对水位变化响应极为敏感，是研究湿地土壤沉积过程的理想地貌单元[14]。近年来，鄱阳湖水文节律显著调整，干旱化加剧[15]，导致砂壤土面积扩大。土壤质地的改变深刻影响着植被分布与土壤水分运动状况，进而调控 SOC 分布和含量[16-17]；尤其是砂粒中的有机碳极易被微生物分解流失，对湿地土壤碳库稳定性构成潜在威胁。

目前关于鄱阳湖土壤质地的定量观测较少，现有粒度研究多集中于周边古沉积环境（沙山、第四纪风成沉积）的特定剖面，且对沉积环境成因（风成、水成及风成-水成交互作用）尚存分歧[18-20]。作者前期虽探讨了泗洲头湿地土壤粒度对固碳的调控[21]，但未涉及水文调控差异及多因子协同机制。鉴于单一变量难以解释粒度空间变异[22]，本研究在泗洲头基础上，增加受人为控制的常湖池（控湖）和蚌湖（半控湖），分析控湖、半控湖与开放水域的土壤粒度特征及其沉积环境指示意义，拟解决以下关键科学问题：（1）3 种水文调控方式下土壤粒度特征如何分异？（2）植被、水文和土壤如何协同调控粒度空间分布？以期为理解鄱阳湖湿地土壤成因、发生分类及生态保护修复提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于江西鄱阳湖国家级自然保护区（29°02′—29°19′N，115°54′—116°12′E），属亚热带湿润气候区，年均温约 17 ℃，冬季盛行偏北风。受水位波动影响，流域丰水期（4—10 月）与枯水期（11 月至次年 4 月）交替，形成“丰水成湖，枯水成洲”的独特水文景观。枯水期洲滩出露，植被呈块状或条带状分布，以水田碎米荠（*Cardamine lyrata*，<11 m）、苔草（*Carex cinerascens*，11~14 m）、南荻（*Triarrhena lutarioriparia*，14~15 m）、芦苇（*Phragmites australis*，15~16 m）、狗牙根（*Cynodon dactylon*，>16 m）等为主。依据《中国土壤分类与代码》（GB/T 17296-2009），土壤类型以草甸沼泽土（沼泽土的亚类）为主，伴生草甸土。

选取常湖池、蚌湖和泗洲头 3 处水文调控差异明显的湿地，以苔草、南荻和芦苇 3 种典型植被群落下的土壤为研究对象。常湖池为半开放碟形湖，枯水期人工调控水位，年最低水位与湖底高程均大于 12 m（吴淞高程），洲滩面积 396.71 hm^2；蚌湖为内湖碟形湖，枯水期实行半人工水位调控，年最低水位>12 m，湖底高程>9.5 m，洲滩面积 6 432.69 hm^2；泗洲头位于外湖洲滩前缘，无人工水位干预，水文节律受主湖水位自然波动控制，洲滩面积 3 076.71 hm^2。

1.2 样品采集与测定

于 2022 年 1 月采集研究区土壤样品（图 1）。采样期间，星子水文站水位为 7.86 m（低于多年同期均值 8.50 m），属典型枯水期。在各湿地选择苔草、南荻和芦苇 3 种优势植被，分别设置 3 条平行样带（GPS 定位打桩）。每条样带内，沿垂直于岸线方向间隔>600 m 设置 4 个采样地，每个采样地约 200 m^2。在各采样地采用梅花形布点法设 5 个 1 m × 1 m 的样方，用不锈钢取土器分别采集表层（0~20 cm）和亚表层（20~40 cm）的土壤，同层土样等量混合后密封带回。样品自然风干，挑除植物残体，过 2 mm 筛备用。同时，采用样方法采集植被地上及地下样品。

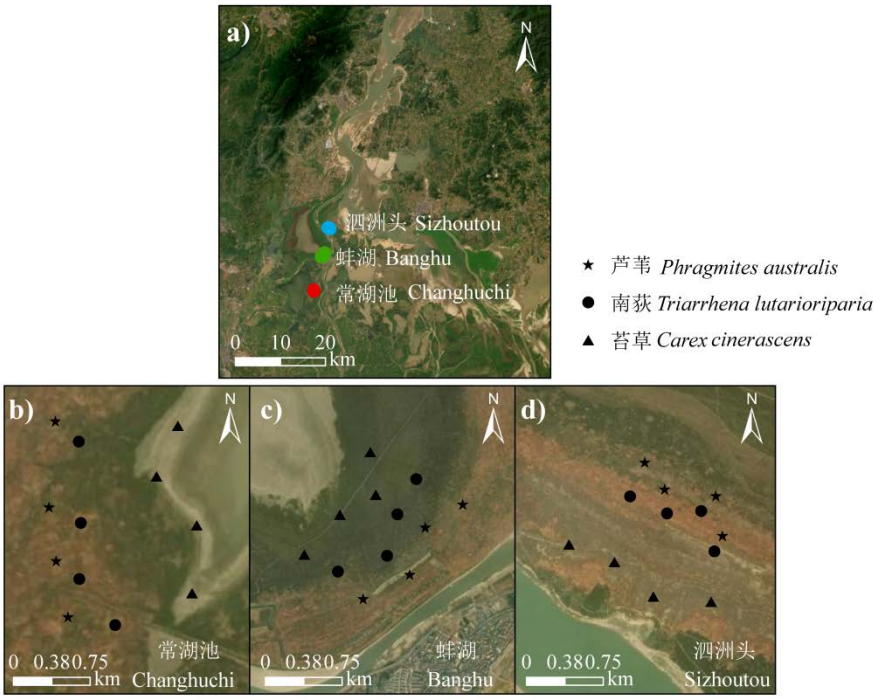


图 1　研究样地与采样点分布示意图

Fig. 1 Distribution of sampling plots and sites in the study area

通过测定植被地上与地下部分的生物量、全碳及全氮含量，计算植被生物量、全碳、全氮含量和碳氮比（表 1）。土壤粒度测量采用 Mastersizer 2000 激光粒度分析仪（体积分数），测量范围为 0.02~2 000 μm，测定方法参照孙清凡等[21]。土壤理化性质测定中，pH 采用电位法（水土比 2.5∶1）；SOC 和全氮（TN）分别采用重铬酸钾氧化—外加热法和凯氏定氮法；全磷（TP）和全钾（TK）分别采用钼锑抗比色法和火焰光度法；阳离子交换量（CEC）采用乙酸铵交换法；盐分（Salt）和电导率（EC）采用电导率仪。测定结果见表 2。

表 1　研究样地植被特征

Table 1 Vegetation characteristics of the study sites

编号 Code	植被类型 Vegetation type	植被总生物量 Vegetation biomass/（g·m^{-2}）	植被全碳 Vegetation TC/（g·kg^{-1}）	植被全氮 Vegetation TN/（g·kg^{-1}）	植被碳氮比 Vegetation C/N
CT	*C. cinerascens*	47.74±6.37	354.05±2.85	10.63±1.56	33.97±5.42
CN	*T. lutarioriparia*	47.54±10.81	379.97±6.14	7.19±0.09	52.85±1.43
CL	*P. australis*	57.92±7.23	339.88±6.36	5.68±1.20	61.89±11.80
BT	*C. cinerascens*	34.16±9.53	377.89±11.43	15.00±1.03	25.30±2.08
BN	*T. lutarioriparia*	53.55±9.87	389.28±8.00	7.44±0.48	52.52±3.24
BL	*P. australis*	31.25±8.45	382.53±3.60	14.99±1.28	25.68±2.18
ST	*C. cinerascens*	41.93±6.43	346.17±7.85	14.93±1.34	23.32±1.81
SN	*T. lutarioriparia*	59.29±7.95	376.69±4.08	6.12±0.54	62.01±6.41
SL	*P. australis*	62.79±6.52	372.09±5.04	5.43±1.74	75.54±25.18

注：CT、CN、CL 分别代表常湖池的苔草、南荻和芦苇群落；BT、BN、BL 分别代表蚌湖的苔草、南荻和芦苇群落；ST、SN、SL 分别代表泗洲头的苔草、南荻和芦苇群落。表中数据为平均值±标准差。下同。Note: CT, CN, and CL represent the *Carex cinerascens*, *Triarrhena lutarioriparia*, and *Phragmites australis* communities in Changhuchi, respectively; BT, BN, and BL represent those in Banghu; ST, SN, and SL represent those in Sizhoutou. Data are presented as mean±standard deviation. The same below.

表 2　研究样地表层（0~20 cm）和亚表层（20~40 cm）土壤理化性质

Table 2 Physicochemical properties of surface (0-20 cm) and subsurface (20-40 cm) soils in the study sites

编号 Code	pH	土壤有机碳 SOC/（g·kg^{-1}）	全氮 TN/（g·kg^{-1}）	土壤碳氮比 C/N	全磷 TP/（g·kg^{-1}）	全钾 TK/（g·kg^{-1}）	阳离子交换量 CEC/（cmol·kg^{-1}）	盐分 Salt/%	电导率 EC/（μS·cm^{-1}）
CT	5.35±0.19	11.10±8.05	1.19±0.78	8.75±1.22	0.38±0.12	19.47±3.51	12.29±7.03	0.19±0.09	27.68±15.60
CN	5.49±0.55	17.12±8.49	1.84±0.77	8.96±1.08	0.47±0.11	20.42±1.49	14.64±3.95	0.18±0.06	55.70±29.36
CL	5.26±0.18	15.94±8.33	1.72±0.87	9.25±0.57	0.48±0.13	19.29±1.91	15.09±5.21	0.17±0.08	47.42±20.71
BT	5.44±0.20	7.42±2.20	0.95±0.26	7.76±0.68	0.56±0.15	24.34±1.08	13.35±2.94	0.17±0.04	26.58±6.62
BN	5.31±0.17	8.50±2.97	1.05±0.27	7.97±0.83	0.41±0.04	24.00±0.89	10.87±0.55	0.14±0.03	28.85±5.85
BL	5.33±0.15	6.96±0.92	0.89±0.08	7.82±0.62	0.47±0.06	23.66±0.84	10.90±1.38	0.14±0.04	24.81±8.22
ST	4.75±0.17	11.66±4.12	1.17±0.37	10.06±0.74	0.64±0.12	24.25±0.58	14.02±4.58	0.13±0.04	39.39±26.79
SN	4.58±0.15	9.49±3.33	1.03±0.31	9.15±0.88	0.49±0.05	24.29±1.09	15.24±2.14	0.06±0.02	59.94±19.71
SL	5.01±0.12	1.31±0.60	0.15±0.07	8.90±1.65	0.21±0.02	25.05±1.66	1.86±0.43	0.02±0.01	17.19±11.18

1.3 土壤粒度分布三角图绘制及粒度参数计算

采用美国制土壤质地分类标准划分黏粒（<2 μm）、粉粒（2~50 μm）和砂粒（50~2 000 μm）；依据 Shepard 沉积物三角分类法[23]，利用 CorelDRAW 2020 绘制土壤粒度三角图。

将粒度测量结果转换为等比制粒级Φ，并根据 Folk-Ward 公式计算平均粒径（Mz）、分选系数（Sd）、偏度（Sk）和峰态（Kg）[8,21]。其中，分选系数小于 0.50 代表分选极好至好，0.50~2.00 为较好至较差，大于 2.00 则为差至极差；偏度在-0.10~0.10 之间指示近对称，小于 -0.10 为负偏，大于 0.10 为正偏；峰态小于 0.90 呈很宽平至宽平，0.90~1.11 为中等，大于 1.11 则呈尖窄至极尖窄。

1.4 沉积环境特征判别

为综合评估研究区土壤沉积环境，采用两种基于不同区域样本建立的判别公式进行对比分析。

采用张娅璐等[10]提出的风沙与湖相沉积物判别模型：

$$y_1 = 1.163Mz - 6.549Sd - 1.633Sk + 12.056Kg - 6.576 \quad (1)$$

$$y_2 = 3.045Mz - 6.560Sd - 2.446Sk + 12.707Kg - 14.044 \quad (2)$$

当 $y_1 > y_2$ 时，为风沙沉积物；当 $y_1 < y_2$ 时，为湖相沉积物。

同时，采用张平等[11]提出的稳定湖相与风成沉积物的判别公式进行验证：

$$F = 20.363Mz - 53.371Sd - 67.922Sk + 23.516Kg - 55.626 \quad (3)$$

若 $F > 0$，为稳定湖相沉积物；若 $F < 0$，为风成沉积物。

1.5 数据处理与统计分析

采用 SPSS 20.0 软件进行单/双因素方差分析及最小显著差异法（LSD）多重比较（n = 4，α = 0.05），检验同一土层内不同湿地及植被类型对土壤粒度的影响；采用 Pearson 相关性分析检验各指标间相关关系。

采用基于典范对应分析（CCA）和基于 CCA 的方差分解分析（VPA），定量解析环境因子对土壤粒度的单独影响及交互作用。选取湿地水文（控湖、半控湖、开放水域）、植被（植被类型、植被生物量、植被 C/N）和土壤（剖面、理化性质）特征作为环境因子输入 CCA 模型。土壤理化性质初始选择 pH、SOC、TN、TP、TK、CEC、盐分和 EC。利用“Vegan”

统计包在 R 4.4.1 软件中进行 CCA 分析，以方差膨胀因子（VIF）大于 20 为阈值剔除共线性变量。SOC 和 TN 的 VIF 因存在共线性被剔除。补充土壤 C/N 后所有因子 VIF 均小于 20，最终筛选出的关键因子进入后续 VPA 分析。

基于结构方程模型（SEM），探究环境因子对不同粒径组分的直接与间接影响路径。模型变量先在 SPSS 20.0 中进行共线性诊断与正态性检验。随后，基于标准化数据，使用 AMOS Graphics 26.0 软件构建并评估模型。模型拟合优度参照 Kline[24]的 SEM 方法学标准评价，主要指标及参考阈值为：$\chi^2/df < 3$，RMSEA < 0.08，CFI 与 GFI > 0.90，且 $P > 0.05$。上述指标同时满足时认为模型适配良好，可用于后续路径解析。

数据统计图表采用 Origin 2024 绘制，方差分解图与结构方程模型图采用 PowerPoint 绘制。

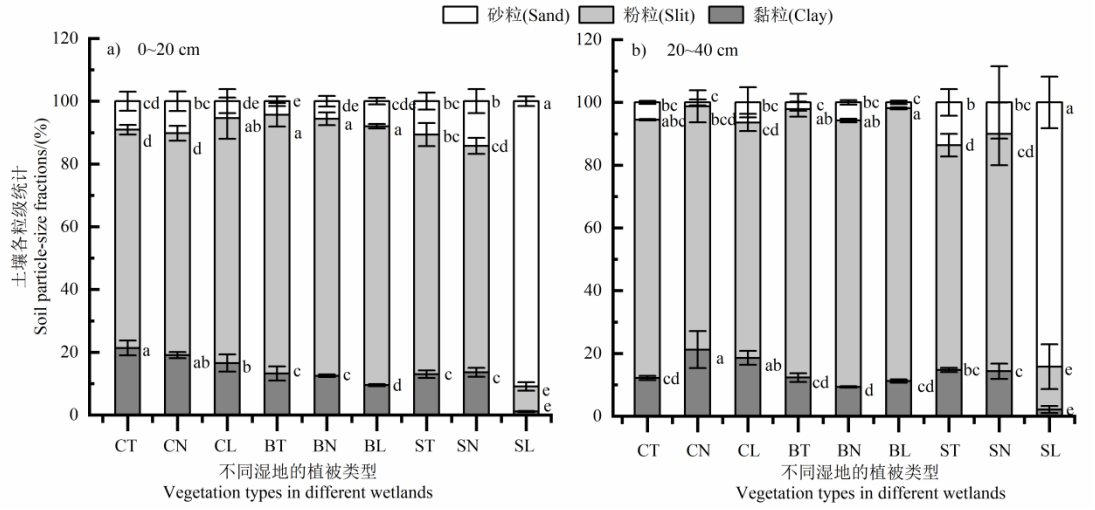
2 结 果

2.1 土壤粒度组成及分布特征

研究区除泗洲头芦苇（SL）表层和亚表层土壤以砂粒（87.58%±6.43%）为主外，其余样地均以粉粒为主（78.99%±6.37%），黏粒（14.23%±3.98%）和砂粒（6.78%±5.00%）含量较低（图 2）。从常湖池、蚌湖至泗洲头，黏粒和粉粒含量逐渐减少，砂粒含量逐渐增加，土壤质地呈粗化趋势。

苔草与南荻植被下的土壤粒度组成无显著差异（$P > 0.05$），相似性较高（图 2a）。与同区域芦苇相比，泗洲头苔草（ST）和南荻（SN）土壤黏粒和粉粒含量显著偏高，砂粒含量偏低（$P < 0.05$）；常湖池苔草（CT）和南荻（CN）土壤黏粒和砂粒含量显著偏高、粉粒含量偏低（$P < 0.05$）；蚌湖苔草（BT）和南荻（BN）土壤黏粒含量显著偏高（$P < 0.05$），粉粒和砂粒无显著差异（$P > 0.05$）。

与表层相比，亚表层各粒级含量变化因植被和区域而异（图 2b）。ST 和 CL 黏粒与砂粒增加、粉粒减少；SN 和 SL、CN 和 BL 黏粒与粉粒增加、砂粒减少；CT 和 BT 黏粒与砂粒减少、粉粒增加；BN 黏粒减少、粉粒与砂粒增加。



注：图中误差线为标准差。同一土层内，不同小写字母表示不同处理组间差异显著（$P < 0.05$），下同。Note: Error bars in the figure represent standard deviation. Within the same soil layer, different lowercase letters indicate significant differences among different treatment groups ($P < 0.05$). The same below.

图 2 典型植被下表层（a）和亚表层（b）土壤粒度组成

Fig. 2 Soil particle size composition in surface (a) and subsurface (b) layers under typical vegetation

土壤粒度三角图显示（图 3），常湖池和蚌湖各植被群落及泗洲头苔草、南荻土壤质地均以粉壤土和粉土为主，SL 为砂土和壤砂土。

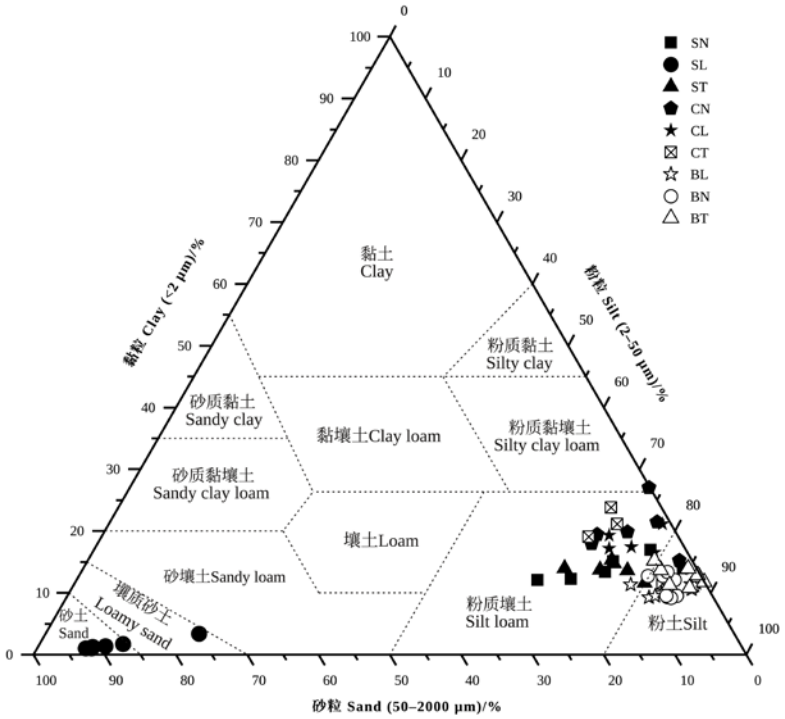


图 3　典型植被下表层土壤粒度三角图

Fig. 3 Triangular diagram of surface (0-20 cm) soil particle size under typical vegetation

2.2 土壤粒度参数及频率曲线分布特征

2.2.1 土壤粒度参数　研究区土壤平均粒径（Mz）从常湖池、蚌湖至泗洲头呈递减趋势（图 4a）；除 SL 为细砂外，其余样地 Mz 整体偏细。苔草、南荻和芦苇群落土壤 Mz 无显著差异（$P > 0.05$）。分选系数（Sd）整体较高，分选性较差（图 4b）。

土壤偏度（Sk）和峰态（Kg）呈现明显的区域分异（图 4c，图 4d）。常湖池 Sk 呈负偏至正偏，Kg 呈宽平至尖窄；蚌湖 Sk 以近于对称和正偏，Kg 以中等为主；泗洲头 Sk 涵盖负偏至极正偏，Kg 从宽平至很尖窄。苔草和南荻群落 Sk 呈负偏至正偏，Kg 呈宽平至尖窄；芦苇 Sk 呈近于对称至正偏，Kg 呈中等到很尖窄。其中，SL 土壤 Sk 呈正偏至极正偏，Kg 呈尖窄至很尖窄，粒度特征与其他样地明显不同。

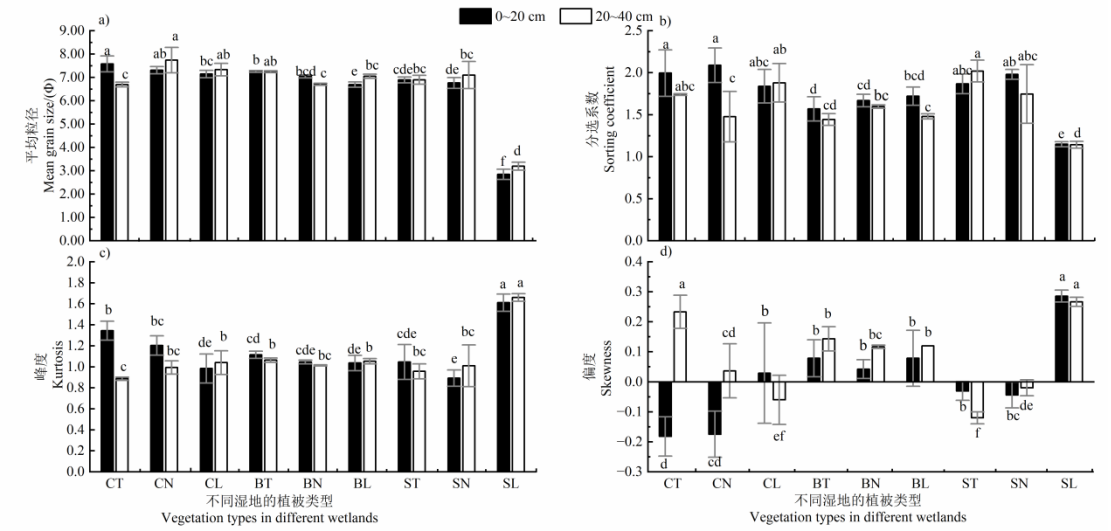


图 4　典型植被下表层和亚表层土壤粒度参数（a. 平均粒径，b. 分选系数，c. 峰态，d. 偏度）

Fig. 4 Soil particle size parameters (a. mean grain size, b. sorting coefficient, c. kurtosis, d. skewness) in surface and subsurface layers under typical vegetation

2.2.2 土壤粒度频率曲线与累积曲线　研究区土壤粒度频率曲线呈现明显的分布差异（图 5a-图 5c）。苔草和南荻群落表层频率曲线呈不对称双峰分布，主峰位于粉粒级（6~8.5 Φ），次峰在 1 Φ左右（SN 除外，其次峰出现在 4 Φ左右）。芦苇群落表层均为单峰分布，CL 和 BL 峰值位于 6~8 Φ，SL 则位于 2.5 Φ左右。亚表层频率曲线更为复杂（图 5d-图 5f）。常湖池和蚌湖以单峰为主，峰值集中在 4.5~8 Φ（CL 除外，为不对称双峰分布，次峰在 1 Φ）。泗洲头类型多样，ST 为三峰、SN 为双峰、SL 为单峰；ST 和 SN 主次峰值基本一致。

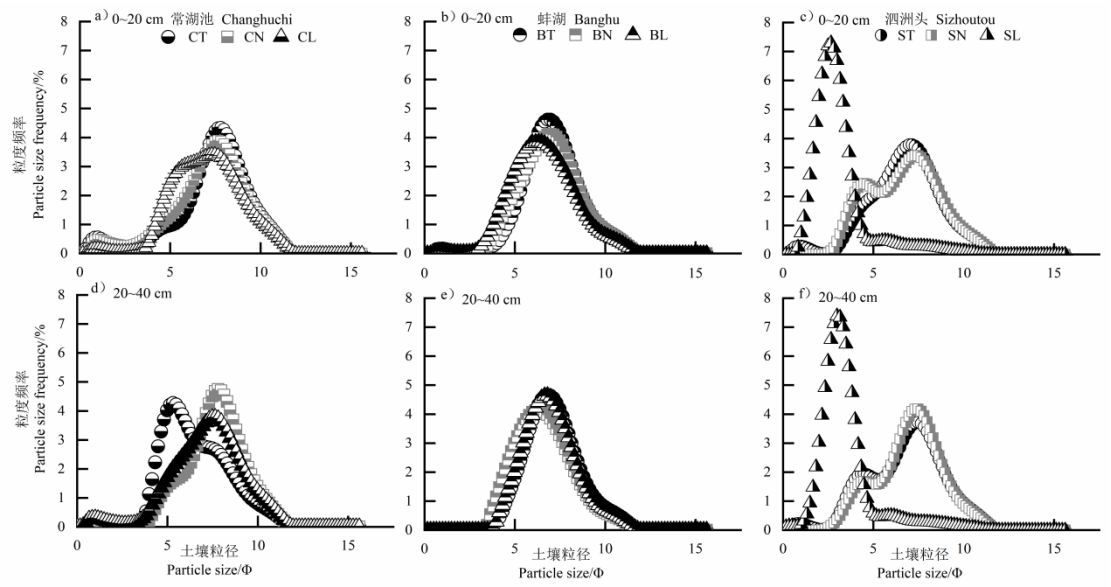


图 5　典型植被下表层和亚表层土壤粒度频率曲线

Fig. 5 Soil particle size frequency curves in surface and subsurface layers under typical vegetation

除 SL 外，各植被累积曲线的蠕移和跃移组分呈多段式分布，悬移组分呈单段式（图 6）。常湖池和蚌湖各植被的蠕移与跃移组截点大多位于 4 Φ左右，跃移与悬移组分截点位于 11 Φ左右，两段蠕移组截点均位于 1 Φ左右。ST 和 SN 各组分与常湖池、蚌湖基本一致，但 SN 蠕移组为单段式；SL 的蠕移、跃移和悬移组分均显著高于其他植被，跃移与蠕移组截点位于 4 Φ左右，悬移组截点位于 9.5 Φ左右。SL 分布范围最大且坡度平缓；其余样地分布

范围较小且坡度较陡。

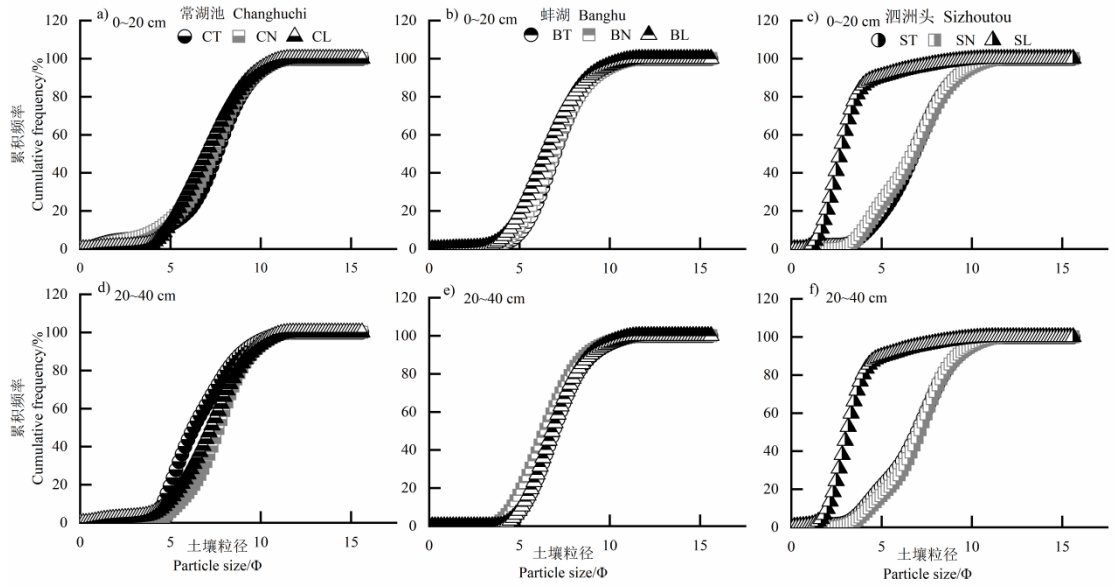


图 6　典型植被下表层和亚表层土壤粒度累积曲线

Fig. 6 Soil particle size cumulative curves in surface and subsurface layers under typical vegetation

2.2.3 沉积环境特征判别　两种沉积环境判别公式的结果一致显示，SL 判为风沙沉积，其余样地（常湖池、蚌湖各植被及泗洲头苔草、南荻）均判为湖相沉积（表 3）。

表 3　基于两种判别公式的沉积环境判别

Table 3 Depositional environment discrimination based on two discriminant formulas

编号 Code	风沙-湖相沉积物判别 Discrimination of aeolian-lacustrine sediments				稳定湖相与风成沉积物判别 Discrimination of stable lacustrine and aeolian sediments	
	y_1	y_2	y_1-y_2	判别结果①	F	判别结果①
CT	2.90±3.48	9.53±4.78	-6.64±1.33		8.93±26.38	
CN	3.85±2.09	11.28±2.80	-7.43±0.71		27.50±20.39	
CL	1.91±1.09	8.70±1.48	-6.80±0.49		11.78±9.54	
BT	4.62±0.91	11.23±1.13	-6.61±0.03	湖相沉积②	22.62±5.85	稳定湖相沉积④
BN	2.94±0.36	8.96±0.73	-6.02±0.41		10.57±5.59	
BL	3.32±1.31	9.32±1.76	-6.01±0.45		11.47±11.13	
ST	0.92±2.38	7.10±2.65	-6.19±0.33		3.80±10.91	
SN	0.79±3.92	6.98±4.82	-6.19±0.92		4.86±25.96	
SL	8.33±1.15	7.65±1.37	0.68±0.73	风沙沉积③	-44.63±13.13	风成沉积⑤

①Discrimination result, ②Lacustrine sediment, ③Aeolian sediment, ④Stable lacustrine sediment, ⑤Aeolian sediment

2.3 环境影响因子对土壤粒度组成的影响

VPA 结果显示（图 7），植被-土壤交互作用对土壤粒度变异的贡献最高（25.93%），其次为土壤单独作用（19.00%）和水文-植被-土壤交互作用（18.67%）。水文-土壤交互作用贡献为 10.00%，水文和植被单独作用分别为 7.02%和 7.38%，水文-植被交互作用贡献最小（0.16%）。进一步拆解各因子组内贡献，植被特征中植被类型的解释度最高（4.38%），高于生物量（2.75%）和 C/N（0.13%）；土壤特征中理化性质解释度（18.60%）明显高于土壤剖面（1.25%）。

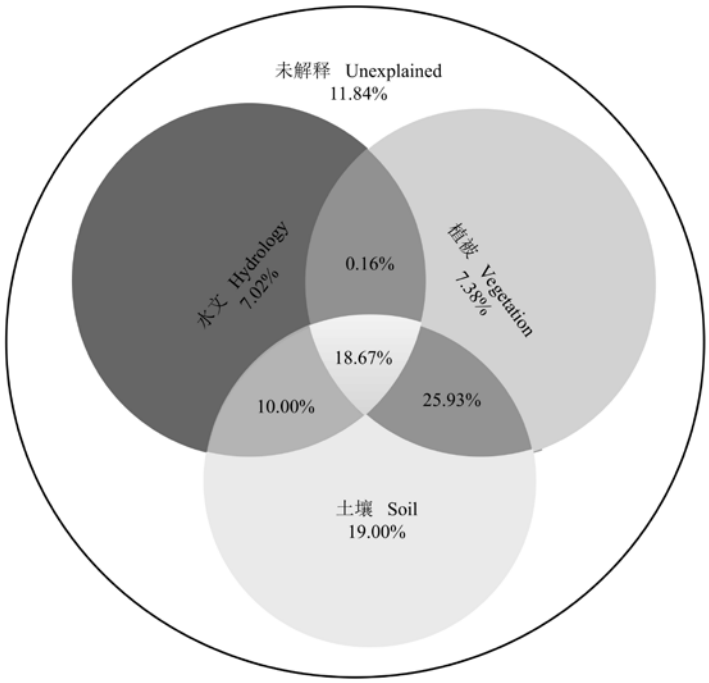


图 7　水文、植被及土壤对土壤粒度贡献的方差分解分析（VPA）

Fig. 7 Variation partitioning analysis (VPA) of the contributions of hydrology, vegetation, and soil to soil particle size

Pearson 相关性分析显示（表 4），黏粒含量与 SOC、TN、TP、CEC、盐分和 EC 呈显著正相关（$P < 0.05$）；粉粒含量与植被生物量、植被 C/N、土壤 C/N 呈显著负相关（$P < 0.05$），与土壤 pH、SOC、TN、TP、CEC 和盐分呈显著正相关（$P < 0.05$）；砂粒含量与植被生物量、植被 C/N、土壤 C/N 呈显著正相关，与土壤 pH、SOC、TN、TP、CEC、盐分和 EC 显著负相关（$P < 0.05$）。

表 4　土壤粒度与植被及土壤理化性质的 Pearson 相关性

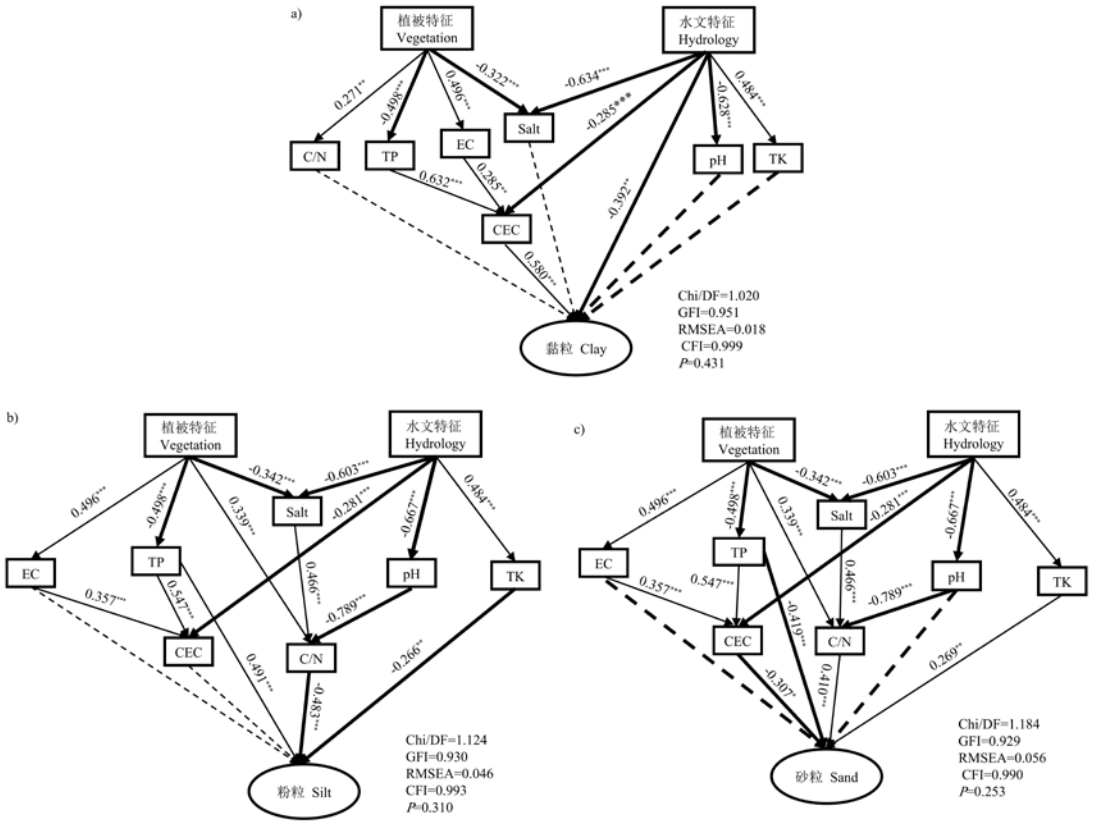
Table 4 Pearson correlation between soil particle size, vegetation and soil physicochemical properties

土壤粒度 Soil particle size	植被 Vegetation		土壤 Soil								
	生物量 Biomass	C/N	pH	SOC	TN	C/N	TP	TK	CEC	盐分 Salt	EC
黏粒 Clay	-0.148	-0.260*	0.107	0.677**	0.711**	0.150	0.464**	-0.272*	0.773**	0.584**	0.467**
粉粒 Silt	-0.435**	-0.616**	0.306*	0.291*	0.370**	-0.335**	0.528**	-0.086	0.580**	0.515**	0.198
砂粒 Sand	0.407**	0.588**	-0.287*	-0.396**	-0.473**	0.257*	-0.555**	0.133	-0.667**	-0.570**	-0.271*

*，$P < 0.05$, **，$P < 0.01$.

采用 SEM 分析环境因子对土壤粒度的直接与间接影响路径（图 8），模型拟合度良好。结果表明，土壤黏粒含量直接受土壤 CEC 的正向影响（0.580***）和水文特征的负向影响（-0.392**）；粉粒含量直接受 TP 正向影响（0.491***），受土壤 C/N（-0.483***）和 TK（-0.266**）负向影响；砂粒含量直接受土壤 C/N（0.410***）和 TK（0.269**）正向影响，受 CEC（-0.307*）和 TP（-0.419***）负向影响。从间接影响路径来看，水文特征通过负向调控 CEC（-0.285***）间接影响黏粒含量；通过正向调控 TK（0.484***）、负向调控 pH（-0.667***）和盐分（-0.603***）影响土壤 C/N，进而间接影响粉粒和砂粒含量；同时通过负向调控 CEC（-0.281***）间接影响砂粒含量。植被主要通过负向调控 TP（-0.498***）、正向调控 EC（0.496***）影响 CEC，进而间接影响黏粒含量；通过负向调控 TP（-0.498***）和盐分（-0.342***）、正向调控 C/N

（0.339***）间接影响粉粒和砂粒含量。



注：箭头代表变量间的作用关系。实线表示路径显著，虚线表示路径不显著；细箭头为正向效应，粗箭头为负向效应。箭头上的数字表示标准化路径系数，*表示 $P < 0.05$；**表示 $P < 0.01$；***表示 $P < 0.001$）。
Note: Arrows indicate the relationships between variables. Solid and dashed arrows represent significant and insignificant paths, respectively; thin and thick arrows indicate positive and negative effects, respectively. Numbers on the arrows denote standardized path coefficients. *, $P < 0.05$; **, $P < 0.01$; ***, $P < 0.001$.

图 8　环境因子对土壤黏粒（a）、粉粒（b）和砂粒（c）的结构方程模型

Fig. 8 Structural equation models of environmental factors on soil clay (a), silt (b), and sand (c)

3 讨 论

3.1 鄱阳湖碟形湖湿地土壤粒度沉积环境特征

湿地土壤颗粒组成是揭示沉积环境演变的重要参数，其空间分布受水动力条件、物源供给及泥沙输运过程的综合影响，在湖泊沉积环境识别中具有重要指示意义[20,25]。本研究中，鄱阳湖碟形湖湿地土壤粒度呈现明显的空间分异规律（图 2，图 3），自常湖池（控湖）、蚌湖（半控湖）至泗洲头（开放水域），黏粒和粉粒含量逐渐减少，砂粒增加，土壤质地呈粗化趋势。这与李云良等[13]的研究结果一致，表明水文调控是驱动该分异的主导因素。丰水期粗颗粒在高位滩地沉积，细颗粒在静水区沉降；枯水期洲滩出露后受风沙改造，形成“湖相基底、风沙改造”的复合沉积特征。与本研究以粉粒为主不同，刘亚军等[26]发现入湖口湿地土壤以砂粒为主，其主要源于入湖口水动力强，粗颗粒快速沉积；而碟形湖位于洲滩内部，水动力较弱，利于细颗粒沉降。这表明，湿地土壤粒度对区域水动力条件高度敏感，不同地貌单元沉积过程存在显著分异。

研究区土壤分选系数（图 4b）远高于典型风成砂[27]，反映水动力条件复杂多变。粒度频率曲线显示（图 5），常湖池和蚌湖呈单峰（集中于粉粒级），指示湖相静水沉积；泗洲头芦苇（SL）峰值位于砂粒级，进入风成砂范围；累积曲线（图 6）分布范围大且坡度平缓，蠕移、跃移和悬移组分显著偏高，表明其受风力搬运作用显著。泗洲头苔草（ST）和南荻（SN）虽呈双峰或三峰分布，但峰值仍集中于粉粒级。SL 以砂粒为主，可能与芦苇直立茎秆增加地表粗糙度、滞留风沙有关[28]；而苔草和南荻冬季倒伏，受风沙改造较弱。

两种沉积环境判别公式相互印证（表 3），SL 受风沙改造作用显著，其余以湖相沉积为主，呈现“湖相基底、风沙改造”的复合沉积格局。张娅璐等[10]的公式对风沙改造信号敏感；张平等[11]的公式更能反映长期湖相基底；孙清凡等[21]采用的萨胡公式虽判为水成沉积，但其主要适用于砂质沉积物[29]，对本区适用性有限。三种结果共同揭示了泗洲头湿地“湖相基底、风沙改造”的复合沉积特征。

这一认识与鄱阳湖周边沙山的风力-水力交互作用背景高度吻合[30-31]。传统观点认为，周边沙山（星子、湖口、彭泽）是末次冰期风成堆积产物[32]；但近年研究揭示其为风力搬运和水下沉积长期交互作用的复合产物（如多宝沙山），且沙山内部普遍存在水成沉积构造与古湖相夹层[19,31]。本研究区 SL 的风沙改造信号表明，现代枯水期冬季风对洲滩表层的改造作用仍在持续，这与区域风沙-水成交互作用的地质背景相契合。

3.2 植被-水文-土壤对土壤粒度分布的协同调控作用

VPA 结果显示（图 7），土壤粒度变异主要由植被-土壤交互作用、土壤单独作用和水文-植被-土壤交互作用共同调控，水文与植被单独作用贡献率较低。植被与土壤交互贡献率最高，源于二者长期协同适应。植物根系穿插与分泌物可改良土壤结构、促进黏粒形成，土壤质地反过来制约植被分布，形成双向反馈。

在鄱阳湖碟形湖湿地，水文沉积过程决定了不同高程的土壤质地，低洼静水区以粉粒和黏粒为主，高位滩地以砂粒为主。植被在长期演化中形成了与之匹配的分布格局，苔草和南荻多分布于低洼区，芦苇适应高位滩地，这种相互适应使植被与土壤交互作用成为主导因素。尽管有研究认为海拔升高会导致土壤质地变黏重[4]，但本研究发现随高程增加土壤质地变粗，这与鄱阳湖水位消长及长期沉积过程有关[13]。SEM 显示（图 8），水文特征对黏粒含量具有直接负向影响，即水动力越强（如开放水域），越不利于黏粒的沉降与保存；而控湖与半控湖的静水环境则利于细颗粒积累。对于粉粒和砂粒，水文主要通过调控理化性质（CEC、pH、TK、盐分）间接发挥作用。植被则主要通过适应土壤条件形成分布格局，而非主动改造土壤质地[21]。这表明，该区土壤粒度空间分异是“水文奠定格局、植被长期适应、土壤本底控制”三者协同作用的结果。

近年来，鄱阳湖干旱化加剧，枯水期延长导致湿生植被下移，中生植物向低位扩张，湿地草甸化特征日益显著[33]。这为风沙改造提供了条件，在泗洲头（开放水域）尤为突出，该地芦苇群落已适应砂质土壤，水文-植被-土壤的协同变化塑造了其独特粒度特征。若该趋势持续，可能加速湿地草甸化进程并削弱碳汇功能。未来仍需重点关注干旱化对湿地土壤-植被系统的长期影响。

3.3 土壤性质对土壤粒度分布的直接调控作用

土壤粒度与土壤理化性质紧密关联[22]。本研究发现，土壤性质不仅直接调控土壤粒度分布，还通过影响养分循环间接塑造其空间格局，且该调控主要由细颗粒组分实现（图 8）。粉黏粒可通过吸附为 SOC 提供物理保护并抑制微生物分解，是决定其最大积累量的关键因素[7,34-35]。本研究中 SOC 和 TN 因共线性被剔除（CCA 分析），也印证了二者与粒度特征具有紧密的内在耦合关联。

VPA 分析显示，土壤单独作用对粒度变异的贡献远高于植被（图 7），表明成土母质与理化性质是主导因素[4]。类似地，Wang 等[5]的研究也印证了粒度与理化性质间的强耦合关

系。相关性分析（表 4）进一步体现了这种关联，SOC、TN、TP、CEC 和盐分均与黏粒和粉粒呈显著正相关，与砂粒呈显著负相关。

SEM（图 8）显示，土壤 CEC 与黏粒含量呈显著的正向直接关联。这主要是因为黏粒中的腐殖质比表面积大、负电荷多，是 CEC 的重要物质来源[36]，从而在模型上表现出显著的直接效应。土壤 EC 与黏粒正相关，归因于腐殖质吸附大量水合阳离子参与导电[37]。相比之下，砂粒结构分散、保水保肥能力差，其养分指标普遍较低；而盐分随粉黏粒富集，主要与黏粒中毛管水上升高度大，易于盐化有关[38]。

此外，土壤 pH 也与质地特征表现出显著的相关性，与粉粒含量正相关，与砂粒含量负相关，即质地越粗酸性越强（表 4）。这可能是粗颗粒透水性强，加速了有机物质流失与碱性阳离子淋失所致[39]。SEM 显示，土壤 pH 通过负向驱动土壤 C/N 对粉粒和砂粒造成间接影响。与本结论相反，有研究认为细颗粒（粉黏粒）增加会降低土壤 pH[26,37]。这种不一致可能源于本研究土壤主要处于鄱阳湖枯水季节的好氧环境，该条件加速了有机质分解与阳离子流失。未来需结合土壤微生物群落、酶活性及同位素示踪等手段，进一步深化对湿地土壤性质与粒度作用机理的认识。

4 结 论

基于粒度参数、方差分解分析与结构方程模型的分析结果，鄱阳湖碟形湖湿地土壤整体以粉粒为主，具备典型湖相沉积特征；泗洲头湿地不同植被群落间粒度差异明显，芦苇群落土壤受冬季风沙改造，呈现“湖相基底、风沙改造”的复合沉积特征，同区域苔草与南荻群落仍以粉粒占优。土壤粒度的空间分异主要由植被、水文通过调控土壤理化性质间接驱动；黏粒、粉粒等细颗粒组分与 SOC、TN、TP、CEC 及盐分呈显著正相关，对土壤养分具有良好的保持作用。综上，研究区粒度空间格局是“水文奠定格局、植被长期适应、土壤本底控制”共同作用的结果。控湖与半控湖区域沉积环境相对稳定，开放水域叠加风沙作用后沉积过程更为复杂。该结果可为碟形湖湿地的差异化保护与生态修复提供科学参考。

参考文献（References）

[1] Wu K N, Zhao R. Soil texture classification and its application in China[J]. Acta Pedologica Sinica, 2019, 56(1): 227-241. [吴克宁, 赵瑞. 土壤质地分类及其在我国应用探讨[J]. 土壤学报, 2019, 56(1): 227-241.]

[2] Xiang D F, Wang G S, Tian J, et al. Global patterns and edaphic-climatic controls of soil carbon decomposition kinetics predicted from incubation experiments[J]. Nature Communications, 2023, 14: 2171.

[3] Oloruntoba B, Kollet S, Montzka C, et al. High-resolution land surface modelling over Africa: The role of uncertain soil properties in combination with forcing temporal resolution[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2025, 29(6): 1659-1683.

[4] Klöffel T, Barron J, Nemes A, et al. Soil, climate, time and site factors as drivers of soil structure evolution in agricultural soils from a temperate-boreal region[J]. Geoderma, 2024, 442: 116772.

[5] Wang P P, Su X M, Zhou Z C, et al. Differential effects of soil texture and root traits on the spatial variability of soil infiltrability under natural revegetation in the Loess Plateau of China[J]. Catena, 2023, 220: 106693.

[6] He Y J, Peng B R, Dai L, et al. The spatial variation of soil structure fractal derived from particle size distributions at the basin scale[J]. Fractal and Fractional, 2024, 8(10): 570.

[7] Angst G, Pokorný J, Mueller C W, et al. Soil texture affects the coupling of litter decomposition and soil organic matter formation[J]. Soil Biology & Biochemistry, 2021, 159: 108302.

[8] 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.

[9] He Z J, Ma L, Jilili A, et al. Grain-size characteristics of lacustrine sediments in Balkhash Lake, Kazakhstan and its response to regional environmental changes[J]. Arid Land Geography, 2021, 44(5): 1317-1327. [贺振杰, 马龙, 吉力力·阿不都外力, 等. 哈萨克斯坦巴尔喀什湖沉积物粒度特征及其对区域环境变化的响应[J]. 干旱区地理, 2021, 44(5): 1317-1327.]

[10] Zhang Y L, Chun X, Zhou H J, et al. Grain size discriminant method for eolian and lacustrine sediments of deserts and it's environmental indication[J]. Journal of Desert Research, 2020, 40(5): 1-9. [张娅璐, 春喜, 周海军, 等. 沙漠沙地风沙与湖相沉积物粒度判别方法及环境指示意义[J]. 中国沙漠, 2020, 40(5): 1-9.]

[11] Zhang P, Song C H, Yang Y B, et al. The significance and establishment of discriminant function with grain size of stable lacustrine sediment and eolian loess[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2008, 26(3): 501-507. [张平, 宋春晖, 杨用彪, 等. 稳定湖相沉积物和风成黄土粒度判别函数的建立及其意义[J]. 沉积学报, 2008, 26(3): 501-507.]

[12] Dai X Z, Hu Z P. Research on Poyang Lake resources and environment[M]. Beijing: Science Press, 2019. [戴星照, 胡振鹏. 鄱阳湖资源与环境研究[M]. 北京: 科学出版社, 2019.]

[13] Li Y L, Xu X L, Zhao G Z, et al. Research of soil textures 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. [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.]

[14] Chen J, Li Y L, Zhou J F, et al. Assessing surface water-groundwater interactions in the seasonal lake-wetland system of Lake Poyang[J]. Journal of Lake Sciences, 2021, 33(3): 842-853. [陈静, 李云良, 周俊锋, 等. 鄱阳湖洪泛区碟形湖湿地系统地表地下水交互作用[J]. 湖泊科学, 2021, 33(3): 842-853.]

[15] Zhang Q, Xue C Y, Xia J. Impacts, contributing factors and countermeasures of extreme droughts in Poyang Lake[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2023, 38(12): 1894-1902. [张奇, 薛晨阳, 夏军. 鄱阳湖极端干旱的影响、成因与对策[J]. 中国科学院院刊, 2023, 38(12): 1894-1902.]

[16] He J, Xie J J, Su D R, et al. Organic carbon storage and its influencing factors under climate warming of sediments in steppe wetland, China[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2020, 27(16): 19703-19713.

[17] Li H C, van den Bulcke J, Mendoza O, et al. Soil texture controls added organic matter mineralization by regulating soil moisture—Evidence from a field experiment in a maritime climate[J]. Geoderma, 2022, 410: 115690.

[18] Xu C Q, Jia Y L, Liu Q, et al. Grain-size characteristics of Quaternary sediments and its implication in the Poyang Lake region, northern Jiangxi[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2016, 30(9): 104-108. [徐传奇, 贾玉连, 刘倩, 等. 赣北鄱阳湖地区第四纪黄土的粒度特征及环境意义[J]. 干旱区资源与环境, 2016, 30(9): 104-108.]

[19] Li Q W, Gong Z J, Luo M, et al. Grain size analysis of two sand layers with parallel bedding in the sand hills around Poyang Lake and its implication for the sedimentary environment[J]. Journal of Desert Research, 2023, 43(3): 152-159. [李琦炜, 龚志军, 罗明, 等. 鄱阳湖沙山两处具有平行层理砂层的粒度分析及其对沉积环境的指示意义[J]. 中国沙漠, 2023, 43(3): 152-159.]

[20] Hu F G, Xiao X, Fan Q B, et al. Grain size and shape analysis of recent and paleo sediments along Poyang Lake with insight into its environmental significance[J]. Catena, 2025, 248: 108588.

[21] Sun Q F, Qian H Y, Chen S S, et al. Composition of soil grain size and its effect on organic carbon in Sizhoutou wetland of Poyang Lake[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2023, 42(1): 197-204. [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.]

[22] Diao E L, Cao G C, Cao S K, et al. Soil particle size and fractal characteristics at different scales[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(5): 212-220. [刁二龙, 曹广超, 曹生奎, 等. 不同尺度下土壤粒径及分形特征[J]. 水土保持研究, 2024, 31(5): 212-220.]

[23] Shepard F P. Nomenclature based on sand-silt-clay ratios[J]. Journal of Sedimentary Research, 1954, 24(3): 151-158.

[24] Kline R B. Principles and practice of structural equation modeling[M]. 4th ed. New York: The Guilford Press, 2016.

[25] Ran F W, Nie X D, Wang S L, et al. Evolutionary patterns of the sedimentary environment signified by grain size characteristics in Lake Dongting during the last century[J]. Journal of Lake Sciences, 2023, 35(3): 1111-1125. [冉凤维, 聂小东, 王诗兰, 等. 近百年来洞庭湖粒度指示的沉积环境演变特征[J]. 湖泊科学, 2023, 35(3): 1111-1125.]

[26] Liu Y J, Guo Y T, Duan Y P, et al. Effects of soil particle size composition on bacterial community and function in wetland[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2025, 34(3): 573-584. [刘亚军, 郭雨婷, 段亦鹏, 等. 湿地土壤粒度组成对细菌群落及其功能的影响[J]. 长江流域资源与环境, 2025, 34(3): 573-584.]

[27] Chen X, Gong Z J, Luo M, et al. Grain size analysis and optical dating for a red sand layer at the top of Shaling sand hill in Xingzi Town, Jiangxi Province[J]. Journal of Earth Environment, 2024, 15(1): 92-105. [陈旭, 龚志军, 罗明, 等. 江西星子镇沙岭沙山顶部一处红色砂层的粒度分析及释光年代研究[J]. 地球环境学报, 2024, 15(1): 92-105.]

[28] Ding L S, Cheng J J, Chen B Y, et al. Field test and numerical simulation of windbreak and sand-resisting on high-parallel reed sand-barriers along railway[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2019, 39(3): 156-162. [丁录胜, 程建军, 陈柏羽, 等. 铁路高立式芦苇沙障防风阻沙的现场测试与流场模拟计算[J]. 水土保持通报, 2019, 39(3): 156-162.]

[29] Sahu B K. Depositional mechanisms from the size analysis of clastic sediments[J]. Journal of Sedimentary Research, 1964, 34(1): 73-83.

[30] Xu J J, Chen S, Liu G N, et al. Genetic mechanism of Duobao Desert on shore of Poyang Lake[J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2024, 54(4): 1383-1395. [徐俊杰, 陈松, 刘广宁, 等. 鄱阳湖湖滨多宝沙山成因机制[J]. 吉林大学学报（地球科学版）, 2024, 54(4): 1383-1395.]

[31] Zhong W, Gong Z J, Luo M, et al. The bleaching of OSL signals and the chronology for a sand layer with parallel bedding within a sand hill at north of Poyang Lake[J]. Journal of Earth Environment, 2024, 15(1): 78-91. [钟文, 龚志军, 罗明, 等. 鄱阳湖北部沙山一处平行层理砂层的释光信号回零分析及年代学研究[J]. 地球环境学报, 2024, 15(1): 78-91.]

[32] Wang Z G, Li Z W, Li W B. Overview and prospect of research on the late quaternary aeolian deposits around Poyang Lake[J]. Journal of Inner Mongolia Normal University: Natural Science Edition, 2017, 46(6): 845-852. [王志刚, 李志文, 黎武标. 鄱阳湖地区晚第四纪风沙沉积的研究现状和展望[J]. 内蒙古师范大学学报（自然科学汉文版）, 2017, 46(6): 845-852.]

[33] Lin Y L, Li X H, Tan Z Q, et al. Dynamic characteristics of vegetation communities in the floodplain wetland of Lake Poyang based on spatio-temporal fusion of remote sensing data[J]. Journal of Lake Sciences, 2023, 35(4): 1408-1423. [蔺亚玲, 李相虎, 谭志强, 等. 基于遥感时空融合的鄱阳湖洪泛湿地植物群落动态变化特征[J]. 湖泊科学, 2023, 35(4): 1408-1423.]

[34] Matus F J. Fine silt and clay content is the main factor defining maximal C and N accumulations in soils: A meta-analysis[J]. Scientific Reports, 2021, 11(1): 6438.

[35] Tiller M, Reading L, Dawes L, et al. Effects of particle size fractions and clay content for determination of soil organic carbon and soil organic matter[J]. Soil & Tillage Research, 2025, 252: 106568.

[36] Huang C Y. Soil science[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2000. [黄昌勇. 土壤学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.]

[37] Duan C, Xie S, Fan H, et al. Study on soil water stability aggregates and nutrient difference in farmland based on soil texture[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2024, 52(22): 258-264. [段淳, 谢珊, 樊洪, 等. 基于土壤质地农田土壤水稳性团聚体及养分差异研究[J]. 江苏农业科学, 2024, 52(22): 258-264.]

[38] Wen D, Wang J J, Ding J L, et al. Distribution characteristics and relationship between soil salinity and soil particle size in Ebinur Lake wetland, Xinjiang[J]. Land, 2025, 14(2): 297.

[39] Rakhsh F, Golchin A, Beheshti Al Agha A, et al. Mineralization of organic carbon and formation of microbial biomass in soil: Effects of clay content and composition and the mechanisms involved[J]. Soil Biology & Biochemistry, 2020, 151: 108036.

（**责任编辑：**卢 萍）