

# 长江下游江心洲土壤颗粒特征及分形规律<sup>\*</sup>

余 健<sup>1,2,3\*\*</sup> 廖媛媛<sup>1</sup> 张平究<sup>1</sup> 高 超<sup>2</sup>

(<sup>1</sup>安徽师范大学国土资源与旅游学院, 安徽芜湖 241003; <sup>2</sup>安徽师范大学安徽自然灾害过程与防控研究省级重点实验室, 安徽芜湖 241003; <sup>3</sup>中国矿业大学环境与测绘学院, 江苏徐州 221116)

**摘 要** 研究了长江下游马鞍山段成长型江心洲洲头、洲中央和洲尾 3 个部位 100 cm 深度范围内的土壤颗粒特征及分形规律。结果表明: 江心洲土壤颗粒总体偏砂性, 主要由粉粒、极细砂和细砂组成, 颗粒最大粒径为 350  $\mu\text{m}$ ; 在剖面上, 3 类颗粒的比例洲中央部位变化较小, 洲头和洲尾变化较大; 颗粒随深度的增加逐渐变粗; 粉粒平均含量表现为洲中央>洲头>洲尾, 分别为 75.42%、43.58% 和 22.13%; 土壤颗粒分形维数表现为洲中央>洲头>洲尾, 分别为 2.28、2.17 和 2.05, 小于安徽省耕作表层土壤的分形维数平均值, 与单位体积比表面积呈极显著正相关, 与粘粒、粉粒含量极显著正相关, 与极细砂、细砂极显著负相关。江心洲不同部位的土壤颗粒特征与江心洲的发育演变之间存在对应关系。

**关键词** 长江; 江心洲; 土壤颗粒; 冲积土壤; 分形维数

**中图分类号** S155 **文献标识码** A **文章编号** 1000-4890(2012)3-0626-06

**Characteristics of soil particle size distribution and fractal dimension in a channel island in lower reach of Yangtze River.** YU Jian<sup>1,2,3\*\*</sup>, LIAO Yuan-yuan<sup>1</sup>, ZHANG Ping-jiu<sup>1</sup>, GAO Chao<sup>2</sup> (<sup>1</sup>College of Territorial Resources and Tourism, Anhui Normal University, Wuhu 241003, Anhui, China; <sup>2</sup>Key Laboratory of Natural Disaster Process and Prevention Research of Anhui Province, Anhui Normal University, Wuhu 241003, Anhui, China; <sup>3</sup>College of Environmental Science and Spatial Informatics, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, Jiangsu, China). *Chinese Journal of Ecology*, 2012, **31**(3): 626–631.

**Abstract:** This paper studied the soil particle composition and fractal dimension in different zones (head, central, and end) of a channel island in the lower reach of Yangtze River. Overall, the soil texture in the island is sandy, mainly composed of silt, very fine sand, and silver sand, and with the maximum particle diameter being 350  $\mu\text{m}$ . The percentages of the three types of soil particles in soil profiles had smaller changes in the central zone but greater changes in the head and end zones, with the particles of greater sizes increased with soil depth. The average percentage of silt particle in the three zones was in the order of the central > the head > the end, being 75.42%, 43.58%, and 22.13%, respectively. The soil particle fractal dimension was also in the order of the central > the head > the end, being 2.28, 2.17, and 2.05, respectively, smaller than the mean soil particle fractal dimension of the arable soils in Anhui Province. The soil particle fractal dimensions in the three zones were significantly positively correlated with the specific surface area per unit volume and the clay and silt contents, but significantly negatively correlated with the very fine sand and silver sand contents. The characteristics of soil particle size distribution in different zones of the channel island indicated the evolution of the channel island.

**Key words:** Yangtze River; channel island; soil particle; fluvio-genic soil; fractal dimension.

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金项目(41101529, 41001369)、湖泊与环境国家重点实验室开放课题(2010SKL015)、安徽师范大学自然地理重点学科建设项目(Asdgl102)、安徽师范大学科研培育基金项目(2010xmpy015)和安徽自然灾害过程与防控研究省级重点实验室资助。

<sup>\*\*</sup> 通讯作者 E-mail: yujian2033@126.com

收稿日期: 2011-09-05 接受日期: 2011-11-30

江心洲在全球普遍存在。中国是全球河流分布较多的国家之一,长江下游是江心洲发育的重要地域,尤其在江西荆江以下江段发育频度极高。近300年来,由于中上游人类活动影响,水土流失加剧,江心洲形成和发育速度加快,许多江心洲已经形成一定规模,并被逐渐开发利用。以往的研究(白静和李一兵,2009;吕丽君等,2009)多偏重江心洲的成因、分布、发展、演变,近年来部分学者(刘佳雪等,2010;雷宏,2010)开始关注江心洲旅游生态环境及开发,然而在江心洲土壤性质方面研究较少。江心洲土壤母质为河流冲积物,土壤发育历史较短,其理化性质较多继承了母质的特征。江心洲的成因具有一致性(张昌民,1992),决定江心洲土壤的物理性质具有较大的相似性,尤其是土壤颗粒特征。土壤颗粒组成影响土壤结构、结持性及保水保肥性,同时影响江心洲的稳定和发育。由于流水对土壤颗粒具有分选作用,江心洲不同部位的土壤颗粒特征具有较大差异。因此,本文选取长江下游典型成长型江心洲(安徽省马鞍山段江心洲)作为研究对象,分析江心洲不同部位一定深度内土壤颗粒的组成及分形特征,为江心洲的开发利用提供科学依据。

## 1 研究地区与研究方法

### 1.1 马鞍山段江心洲概况

长江马鞍山段江心洲位于安徽省马鞍山市当涂县西北部长江主航道东侧,元朝末年形成沙洲,19世纪初期开始筑堤围垦。由南向北依次分布彭兴洲、江心洲、何家洲,并将长江水道分成东西两汉,出口处泥沙冲积形成小黄洲。整段江心洲自形成以来主要演变方向为东向扩展,彭兴洲虽然偶尔出现崩岸现象,但仍表现与江心洲(洲头)并接的趋势,部分地区已经在人为干扰下并接在一起(白静和李一兵,2009)。江水对江心洲西岸及尾部侵蚀较强,近年来已在该部位逐步建设护坡工程。目前受人类居住影响较大的是彭兴洲、江心洲和何家洲,南北总长约14 km,东西最宽处为5 km,行政隶属当涂县江心乡,江心洲总面积约89 km<sup>2</sup>(图1)。

### 1.2 研究方法

**1.2.1 采样及颗粒分析** 根据研究目的,分别在江心洲洲头(31°31.533'N, 118°23.362'E)、洲中央(31°36.194'N, 118°25.559'E)、洲尾(31°40.258'N, 118°25.514'E)选取典型采样区。其中,洲头和洲尾离江边的距离一致,约60 m,土壤颗粒沉积时间大

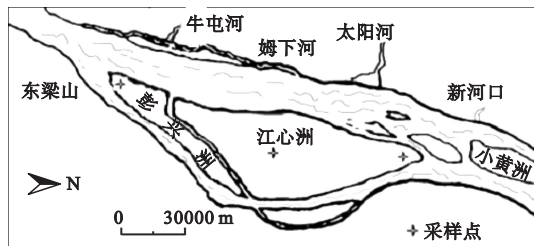


图1 长江马鞍山段江心洲地形特征及采样布局示意图

Fig.1 Topography and sample point of channel island at Ma'anshan reach of Yangtze River

致相同;洲中央土壤颗粒沉积时间远早于洲头和洲尾,上层土壤受地下水和江水影响较少,主要受气候、生物和人类活动影响,土壤发育具有一定历史。采样区设计100 m×100 m,在样区内随机布设4个样点,挖掘100 cm深度的土壤剖面,由于0~20 cm可能受到人类活动干扰,因此在0~20 cm仅采集一个土壤样品供比较。考虑到江心洲的冲积发育特点,20 cm以下,按2~3 cm划分层次采集土壤样品,各采样区的取得的各层样品按四分法取得混合样。土壤样品在室内风干研磨并采用H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>-HCl-(NaPO<sub>3</sub>)<sub>6</sub>法预处理后(张瑞虎等,2011)使用美国贝克曼库尔特公司(Beckman Coulter)生产的LS230激光粒度仪测定样品的粒度分布,为保证数据准确性,所有样品均重复3次,仪器测定时设定连续测定2次。

### 1.2.2 数据处理

1) 统计学指标:运用LS230自带软件计算样品统计学指标,包括最大粒径、中值粒径、平均粒径、单位体积比表面积、峰度、偏度等。运用SPSS 11.0分析颗粒组成特征与统计学特征之间的相关性。

2) 分形维数:分形理论最早由Mandelbort (1967)提出来,目前已经成为描述自然界复杂和不规则几何形体的一种有效工具(程先富等,2003)。Aray和Paris(1981)首先研究了土壤颗粒的分形现象及其分形维数的计算。Turcotte(1986)提出了多孔介质材料的粒径分布与分维关系。Kravchenko和Zhang(1998)采用积分法推导出土壤颗粒粒级质量、粒径与土粒表面分维的关系。

本研究借鉴程先富等(2003,2009)、张保华等(2004)颗粒分形维数计算方法计算各样品土壤颗粒的分形分维数。公式如下:

$$D = 3 - \lg[M(\delta < \bar{d}_i)/M_0]/\lg(\bar{d}_i/\bar{d}_{\max})$$

式中: $D$ 为分形维数; $M(\delta < \bar{d}_i)$ 为小于 $\bar{d}_i$ 的累积土粒

重量; $M_0$  为土壤各级粒级重量的总和; $\bar{d}_{max}$  为最大粒级土粒的最大粒径。

2 结果与分析

2.1 江心洲不同部位土壤颗粒组成分布特征

按美国土壤粒级分类标准,将江心洲土壤颗粒划分为粘粒级( $<0.002\text{ mm}$ )、粉粒级( $0.002\sim0.05\text{ mm}$ )、极细砂级( $0.05\sim0.10\text{ mm}$ )、细砂级( $0.1\sim0.25\text{ mm}$ )、中砂级( $0.25\sim0.50\text{ mm}$ )、粗砂级( $0.50\sim1.0\text{ mm}$ )和极粗砂级( $1.00\sim2.00\text{ mm}$ )。由图 2 可以看出,江心洲土壤颗粒主要以粉粒、极细砂和细砂为主,江心洲洲头、洲中央和洲尾的土壤剖面各层次颗粒组成有较大差异。在 100 cm 的土壤剖面内,洲中央土壤颗粒以粉粒为主,含量为  $75.42\%\pm3.82\%$ ,其次是粘粒,平均含量为  $11.47\%$ ,极细砂平均占  $9.67\%$ ,3 类颗粒的比例在研究剖面上变化较小;洲头 0~50 cm 也以粉粒为主,平均含量为  $71.80\%$ ,往下逐渐减少,极细砂和细砂含量逐渐增加,全剖面粉粒含量为  $43.58\%\pm27.51\%$ ;洲尾土壤颗粒细砂含量最大,平均达到  $43.62\%$ ,其次是极细砂,平均含量为  $30.62\%$ ,粉粒含量仅为  $22.13\%$ 。

颗粒粗细组成和分布特征可以反映当时的流水动力大小(张保华等,2004),流水对泥沙颗粒具有分选作用(赵辉等,2010;周斌等,2010),流水动力越大,对泥砂的分选越明显,泥砂颗粒越粗。在研究

深度范围类,由江心洲沉积的土壤颗粒特征,可推测流水动力的影响表现为洲尾>洲头>洲中央,长江江水对江心洲周边地势较低部位土壤影响最大,对洲中央土壤的影响逐渐减弱。洲中央土壤颗粒组成主要受突发性洪水和地下水的影响。

2.2 江心洲不同部位土壤颗粒的统计学特征

江心洲不同部位土壤剖面各层次颗粒最大粒径均 $<350\text{ }\mu\text{m}$ ,洲头、洲中央和洲尾的土壤剖面颗粒最大粒径层次之间和区域之间均没有差异。土壤平均粒径、中值粒径表现为洲尾>洲头>洲中央。土壤剖面各层次颗粒平均粒径,洲中央基本保持在  $20\sim40\text{ }\mu\text{m}$ ,而洲头土壤剖面各层次颗粒平均粒径在  $0\sim40\text{ }\mu\text{m}$  剖面范围内为  $20\sim40\text{ }\mu\text{m}$ ,40 cm 以下平均粒径逐渐增大,最大达到  $149.02\text{ }\mu\text{m}$ ,深度 81 cm 以下平均粒径开始下降,90 cm 以下平均粒径降到  $60.84\text{ }\mu\text{m}$ ;洲尾土壤颗粒平均粒径在深度 60 cm 范围内均表现为大于洲头和洲中央,60 cm 以下,平均粒径小于洲头同深度土壤,在整个剖面上表现出二元结构特点。土壤颗粒粒径中值变化规律大体与平均粒径一致,从数值上来看,各层次的平均粒径基本都大于中值粒径,相应层次土壤颗粒分布的峰度值和偏度值基本都大于零,表现为右偏和粒度分布分散的特点。各区域土壤颗粒的单位体积比表面积表现为洲中央>洲头 $\geq$ 洲尾,分别为  $(12950.84\pm1012.02)$ 、 $(7818.43\pm3486.02)$ 、 $(2933.96\pm1126.66)\text{ cm}^2\cdot\text{mL}^{-1}$ ;

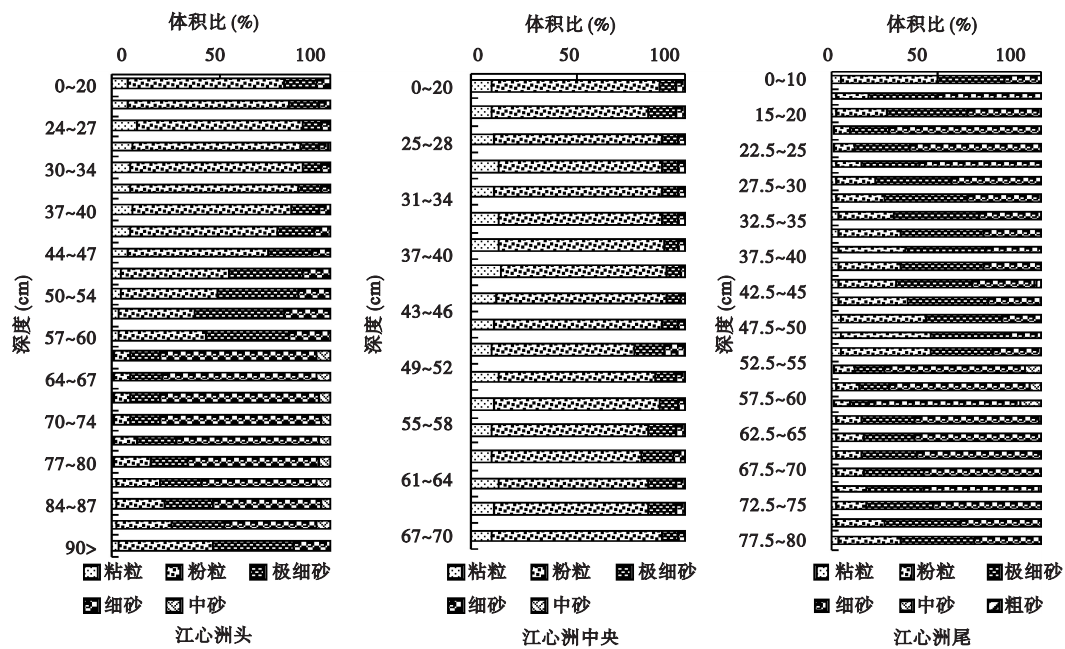


图 2 江心洲不同部位土壤颗粒分布特征  
Fig. 2 Distribution features of soil particles in different parts of the channel island

随着土壤剖面深度的增加,土壤颗粒平均粒径、中值粒径及单位体积比表面积在洲中央变化较小,而在洲头和洲尾均表现大小波浪状变化规律(图3)。

据资料显示,马鞍山段江心洲的发育演变表现为左汉裁穿取直,右汉逐渐变窄。洲头受水流的冲刷作用减弱,主要表现为泥沙淤积,土壤颗粒尤其是上层土壤颗粒细粒增加。江心洲尾受江水的侵蚀作

用较强,一是直接受到上游江水的冲刷,二是受小黄河顶冲江水形成的旋涡水流冲刷,水流的分选作用强,土壤中细粒被搬运流失,大颗粒比例增加。据1953—2008年大通水文站年总输沙量资料,50年来长江下游段年总输沙量减少(图4)。因此,洲头和洲尾上层土壤颗粒中细颗粒的比重相对增加也与江水含沙量减少,搬运的泥沙颗粒粒径减小有较大关系。

2.3 江心洲不同部位土壤颗粒分形特征

图5表明,洲尾土壤颗粒的分形维数小于洲头和洲中央,其分维数为 $2.06 \pm 0.05$ 。洲头土壤颗粒分维数随剖面深度增加越来越小,最大分维数为 $2.42 \pm 0.11$ ,最小分维数为 $2.02$ ,平均分维数为 $2.15 \pm 0.11$ 。洲中央土壤颗粒的分形维数在1 m土壤剖面范围内在 $2.24 \sim 2.30$ 间波动,平均值为 $2.28 \pm 0.02$ 。分形维数的变化规律与土壤的比表面积变化规律基本一致。朱华等(2009)对安徽省耕作表层土壤颗粒研究表明,安徽省耕作表层土壤颗粒的分形维数平均值为 $2.76$ ,最小值为 $2.29$ 。可见,江心洲土壤颗粒分形维数均小于安徽省耕作表层土壤的分形维数平均值。江心洲洲岸土壤发育较浅,主

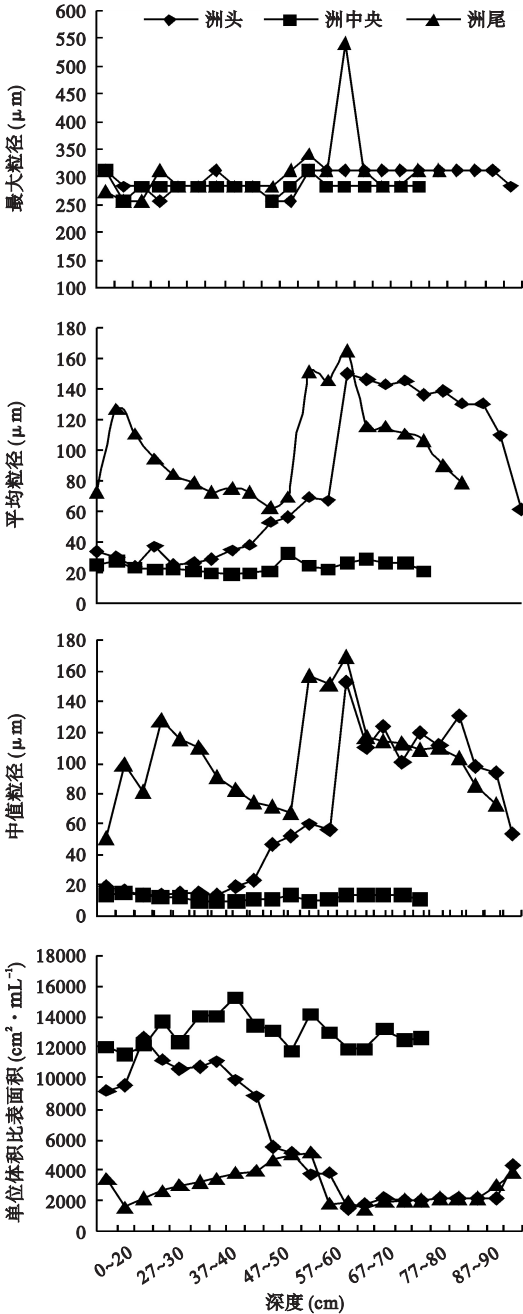


图3 江心洲各部位各层次土壤颗粒的最大粒径、平均粒径、中值粒径和比表面积  
Fig.3 Maximum, mean, median particle size distribution (PSD) and specific surface areas of soil particles at all levels in the channel island

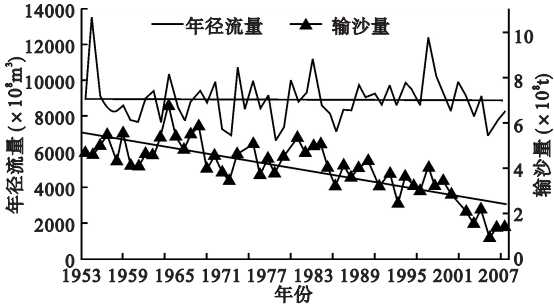


图4 大通水文站年径流量和输沙量  
Fig.4 Annual runoff and sediment of Datong hydrological station

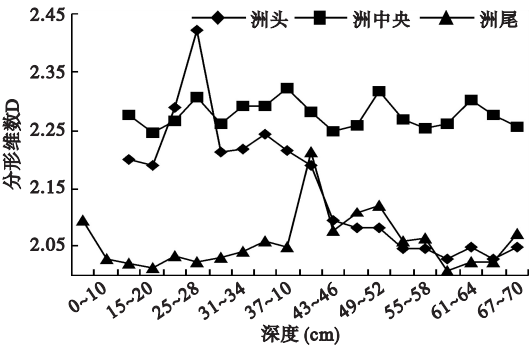


图5 江心洲不同部位 (cm) 土壤颗粒分形维数  
Fig.5 Fractal dimension of soil particles in different regions of the Channel Island



表 1 江心洲不同区域土壤颗粒组成特征相关性分析  
Table 1 Correlation analysis of composition features of soil particles in different regions of the channel island

	体积比表面积	分形维数	粘粒含量	粉粒含量	极细砂含量	细砂含量	中砂含量
比表面积	1	0.96 **	0.99 **	0.96 **	-0.75 **	-0.87 **	-0.40 *
分形维数	0.96 **	1	0.95 **	0.92 **	-0.76 **	-0.82 **	-0.33 *
平均粒径	-0.91 **	-0.83 **	-0.88 **	0.94 **	0.46 **	0.95 **	0.63 **
标准差	-0.62 **	-0.37 **	-0.62 **	-0.60 **	0.36 **	-0.57 **	0.42 **
偏度	0.83 **	0.922 **	0.81 **	0.84 **	-0.62 **	-0.77 **	-0.161
峰度	0.61 *	0.77 *	0.60 *	0.60 *	-0.53 *	-0.52 *	0.635 *

\*  $P<0.05$ , \*\*  $P<0.01$ 。

要是较新淤积的泥沙。洲中央土壤是淤积泥沙在成土因素的综合作用下进一步熟化的结果,表现向成熟耕作土壤方向发育的趋势。

2.4 江心洲土壤颗粒特征相关

土壤颗粒分形维数可以表征土壤质地、抗蚀性、结构性状等。土壤颗粒体积比表面积可以反映颗粒间相互作用,是反映土壤结持性和粘结性的重要指标,也是土壤颗粒吸附性能大小的依据。研究表明:江心洲土壤颗粒分形维数与单位体积比表面积显著正相关,且二者均与粘粒、粉粒、偏度极显著正相关,与极细砂、细砂、中砂极显著负相关;平均粒径与粘粒极显著负相关,与粉粒、极细砂、细砂、中砂等极显著负相关;斜偏与粘粒和粉粒含量极显著正相关(表 1)。

江心洲土壤体积比表面积和颗粒分维数的大小主要取决于粘粒含量和粉粒含量。江心洲土壤极细砂和粉粒含量比重较大,粘粒所占比重较小,是江心洲土壤颗粒比表面积及分维数总体偏小的主要原因,也是江心洲洲岸易发生冲损崩塌的重要原因。从江心洲的发育趋势与洲头、洲尾土壤颗粒组成特征的关系,可以发现:洲头向东江岸拼接的方向上洲岸崩塌的机率小,主要是泥沙的淤积,土壤颗粒分形维数和体积比表面积均较大;而洲尾受江水的侵蚀作用较强,土壤颗粒分形维数和体积比表面积较小,土壤抗蚀性、结持性及粘结性均较差,发生崩塌的机率较大,这种崩塌现象随着小黄洲东汉的变宽和小黄洲以南的滩涂与小黄洲、江心洲的并接而逐渐减弱,或随江心洲头以东汉河道的裁穿取直而逐渐减弱。

3 结 论

江心洲土壤总体表现偏砂性,主要为粉粒、极细

砂和细砂组成,但不同部位其土壤颗粒组成仍有较大差异。在 100 cm 研究深度范围内,洲中央土壤颗粒以粉粒为主,平均含量为  $75.42\% \pm 3.82\%$ ,其次是粘粒,平均含量为  $11.47\%$ ,极细砂平均占  $9.67\%$ ,3 类颗粒的比例在研究剖面上变化较小;洲头和洲尾的土壤颗粒粉粒和粘粒含量小,粉粒平均含量表现为洲头>洲尾,但颗粒组成比例在研究剖面上变化幅度较大。

江心洲土壤颗粒最大粒径在不同部位和层次间均没有差异,最大粒径为  $350\text{ }\mu\text{m}$ 。平均粒径、中值粒径表现为洲尾>洲头>洲中央。单位体积比表面积表现为洲中央>洲头 $\geq$ 洲尾,分别为  $12950.84\text{ cm}^2 \cdot \text{mL}^{-1} \pm 1012.02\text{ cm}^2 \cdot \text{mL}^{-1}$ 、 $7818.43\text{ cm}^2 \cdot \text{mL}^{-1} \pm 3486.02\text{ cm}^2 \cdot \text{mL}^{-1}$ 和  $2933.96\text{ cm}^2 \cdot \text{mL}^{-1} \pm 1126.66\text{ cm}^2 \cdot \text{mL}^{-1}$ 。随着挖掘深度的增加,土壤颗粒平均粒径、中值粒径及单位体积比表面积在洲中央变化较小,而在洲头和洲尾均表现大小波浪状变化规律。

江心洲土壤颗粒分形维数均小于安徽省耕作表土土壤颗粒分形维数平均值,与单位体积比表面积、粘粒、粉粒含量成极显著正相关,与极细砂、细砂极显著负相关。洲中央、洲头、洲尾土壤颗粒的分形维数平均值为  $2.28 \pm 0.02$ 、 $2.15 \pm 0.11$ 和  $2.06 \pm 0.05$ 。江心洲土壤颗粒分维数与比表面积大小均主要取决于粘粒含量和粉粒含量。

江心洲不同部位的土壤颗粒特征与江心洲的发育演变之间存在对应关系。在淤积方向上表现为土壤细颗粒、土壤分形维数和体积比表面积较大,而在崩塌部位其土壤颗粒特征正好相反。江心洲中央受江水和外来泥沙的影响小,土壤颗粒主要在成土作用下进行重分配,上层土壤颗粒表现一定成熟耕作土的特征。

参考文献

白 静,李一兵. 2009. 长江下游江心洲水道河床演变分析及趋势预测. 水道港口, **30**(5): 347-351.

程先富,史学正,王洪杰. 2003. 红壤丘陵区耕层土壤颗粒的分形特征. 地理科学, **23**(5): 617-621.

雷 宏. 2010. 马鞍山港江心洲港区开发策略分析. 中国港口, (9): 52-54.

刘佳雪,沙 润,周年兴. 2010. 南京江心洲旅游景观健康评价. 地理研究, **29**(4): 748-756.

吕丽君,李振青,刘小斌. 2009. 长江马鞍山河段河道演变及整治研究. 长江科学院院报, **26**(12): 13-16.

张保华,何毓蓉,徐 佩,等. 2004. 紫色丘陵区小流域侵蚀沉积断面构型及土壤颗粒分形特征. 水土保持学报, (6): 136-139.

张昌民. 1992. 现代荆江江心洲沉积. 沉积学报, **10**(4): 146-153.

张瑞虎,刘 韬,黎 兵. 2011. 不同前处理方法和测量时间对泥炭中无机矿物颗粒粒度的影响. 沉积学报, (2): 374-380.

赵 辉,郭索彦,解明曙,等. 2010. 湖南武水流域泥沙颗粒特性及分形规律研究. 水土保持学报, (3): 45-49.

周 斌,徐海量,熊黑钢. 2010. 河水漫溢对塔里木河下游土壤颗粒组成的影响. 水土保持学报, (4): 177-181.

朱 华,程先富,王世航,等. 2009. 基于 GIS 的安徽省表层土壤颗粒分形特征研究. 水土保持研究, **16**(4): 146-149.

Aray LM, Paris JF. 1981. A physicoempirical model to predict the soil moisture characteristic from particle-size distribution and bulk density data. *Soil Science Society of America Journal*, **45**: 1023-1030.

Kravchenko A, Zhang R. 1998. Estimating the soil water retention from particle-size distribution: A fractal approach. *Soil Science Society of America Journal*, **63**: 171-179.

Turcotte DL. 1986. Fractal and fragmentation. *Journal of Geophysical Research*, **91**: 1921-1926.

---

作者简介 余 健,男,1979 年生,讲师,博士研究生,主要从事资源环境与生态重建研究。E-mail: yujian2033@126.com

责任编辑 王 伟

---