

# 近江平原区土壤水力参数及相关理化性质空间分布与影响因素<sup>①</sup>

石常卿<sup>1,2</sup>, 张海林<sup>1,2</sup>, 韩雨蓉<sup>1,2</sup>, 陈羽<sup>1,2</sup>, 魏雅清<sup>1,2</sup>, 王平<sup>1,2</sup>, 谢璇<sup>1,2</sup>, 刘济<sup>1,2</sup>, 刘目兴<sup>1,2</sup>, 易军<sup>1,2\*</sup>

(1 地理过程分析与模拟湖北省重点实验室, 武汉 430079; 2 华中师范大学城市与环境科学学院, 武汉 430079)

**摘要:** 为研究土壤水力参数的空间分布特征, 并揭示相关影响因素, 以江汉平原典型近江农业区为研究单元, 采集不同类型农用地的浅层(0~40 cm)原状和扰动土样, 测定其水力参数和相关理化性质, 揭示各水力参数及相关理化性质的空间分布特征, 比较不同样地各参数和性质的差异, 并分析相关影响因素。结果表明: 研究区土壤各基本理化性质(土壤机械组成、有机质含量、容重、直径 >0.1 mm 和 >0.3 mm 大孔隙含量)和水力参数(饱和含水量( $\theta_s$ )、残余含水量( $\theta_r$ )、水分特征曲线拟合参数  $\alpha$  和  $n$ 、田间持水量( $\theta_f$ )、凋萎系数( $\theta_w$ )和最大有效水含量( $\theta_{AW}$ ))均具有明显的空间异质性; 近江区土壤机械组成、有机质含量、容重等部分理化性质与距江远近具有较强的空间相关性; 直径 >0.1 mm 和 >0.3 mm 大孔隙含量,  $\theta_s$  和  $\theta_r$ , 以及  $\theta_f$  和  $\theta_{AW}$  的空间分布特征相似。不同样地的有机质含量、容重和直径 >0.3 mm 大孔隙含量具有显著差异。土壤理化性质的差异显著影响了  $K_s$  和水分特征曲线参数(特别是  $\theta_s$  和  $n$ )。不同农用地土壤的水力性质也存在差异, 稻田和旱地的入渗性能较好, 表现为最高的中位  $K_s$ (18.7 cm/h), 其他样地的  $K_s$  差异较小(9.2~10.5 cm/h)。菜地的持水能力最强, 表现为较高的  $\theta_f$ (0.46 cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>)、 $\theta_w$ (0.07 cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>)和  $\theta_{AW}$ (0.39 cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>), 其他样地的土壤水力参数差异较小。河流冲积物的分布显著影响了研究区农用地的土壤机械组成, 对容重和有机质含量分布也有一些影响; 而人类耕作活动可以显著改变土壤的有机质含量、大孔隙含量和容重, 但对机械组成影响较小; 自然要素和人为活动的共同作用影响了各水力参数的分布特征。在近江农业区开展土壤调查和农业生产规划时, 需要考虑河流冲积物的分布特征。

**关键词:** 土壤理化性质; 饱和导水率; 水分特征曲线; 水分常数; 空间异质性; 农用地

中图分类号: S152 文献标志码: A

## Spatial Distribution and Influencing Factors of Soil Hydraulic Parameters and Related Physiochemical Properties in River-nearby Plain

SHI Changqing<sup>1,2</sup>, ZHANG Hailin<sup>1,2</sup>, HAN Yurong<sup>1,2</sup>, CHEN Yu<sup>1,2</sup>, WEI Yaqing<sup>1,2</sup>, WANG Ping<sup>1,2</sup>, XIE Xuan<sup>1,2</sup>, LIU Ji<sup>1,2</sup>, LIU Muxing<sup>1,2</sup>, YI Jun<sup>1,2\*</sup>

(1 Hubei Provincial Key Laboratory of Geographical Process Analysis and Simulation, Wuhan 430079, China; 2 School of Urban and Environmental Sciences, Central China Normal University, Wuhan 430079, China)

**Abstract:** To study the spatial distribution characteristics of soil hydraulic parameters and their influencing factors, the typical agricultural area near the Yangtze River in Jiangnan Plain was taken as the study unit, the undisturbed and disturbed soil samples were collected from shallow layers (0–40 cm) of different farmland types, and the hydraulic parameters and related physiochemical properties were determined, then the spatial distribution characteristics of hydraulic parameters and their relation with physiochemical properties were studied and compared. The results showed that the basic physicochemical properties of soil (soil mechanical composition, organic matter content, bulk density, diameter >0.1 mm and >0.3 mm large pore content) and hydraulic parameters (saturated water content ( $\theta_s$ ), residual water content ( $\theta_r$ ), water characteristic curve fitting parameters  $\alpha$  and  $n$ , field water holding capacity ( $\theta_f$ ), wilting soil water content ( $\theta_w$ ) and maximum effective water content ( $\theta_{AW}$ ) in the study area had apparent spatial heterogeneity. The physical and chemical properties of soil mechanical composition, organic matter content,

①基金项目: 国家自然科学基金区域创新发展联合基金项目(U21A2039)和中央高校基本科研业务费项目(CCNU22JC013)资助。

\* 通讯作者(yijun@mail.ccnu.edu.cn)

作者简介: 石常卿(2000—), 男, 吉林通化人, 本科生, 主要从事土壤水文研究。E-mail: eric1100@mails.ccnu.edu.cn

and bulk density were strongly correlated with the distance from the river. The spatial distribution characteristics of diameter  $> 0.1$  mm and  $> 0.3$  mm large pore content,  $\theta_s$  and  $\theta_r$ ,  $\theta_f$  and  $\theta_{AW}$  were similar. Organic matter content, bulk density and macroporosity with a diameter  $> 0.3$  mm significantly differed among the different land types. Differences in soil physiochemical properties significantly affected  $K_s$  and moisture profile parameters (especially  $\theta_s$  and  $n$ ). The paddy and dry fields had better infiltration performance with the highest median  $K_s$  (18.7 cm/h), and the  $K_s$  of other fields had little difference (9.2–10.5 cm/h). The vegetable field had the strongest water-holding capacity with higher  $\theta_f$  ( $0.46 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ ),  $\theta_w$  ( $0.07 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ ) and  $\theta_{AW}$  ( $0.39 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ ), and soil hydraulic parameters of other plots had little difference. The distribution of alluvial deposits significantly affected soil mechanical composition and had some influences on the distribution of bulk density and organic matter. Human farming activities significantly changed soil organic matter content, macropore porosity and bulk density, but little influenced soil mechanical composition. The distribution characteristics of hydraulic parameters were affected by the combination of natural factors and human activities. In conclusion, the distribution characteristics of alluvial deposits need to be considered for soil surveys and agricultural production planning in agricultural areas near the river.

**Key words:** Soil physiochemical properties; Saturated hydraulic conductivity; Water characteristic curve; Water constant; Spatial heterogeneity; Farmland

土壤水力性质主要包括透水性能(饱和导水率)和持水性能(水力参数和水分常数等), 它们对土壤水分运动、溶质迁移和植物根系吸水等过程有着重要影响。因此, 在开展水分和养分运动过程模拟、农田优化灌溉与施肥设计, 以及土壤质量评价等工作时都需要测定土壤水力性质<sup>[1-3]</sup>。土壤水力性质主要受土壤机械组成、容重、有机质含量和孔隙分布等理化性质影响, 而这些理化性质又与土壤发育过程有着深刻联系<sup>[4-6]</sup>。由于气候、生物、母质、地形等因素存在空间异质性, 导致自然土壤的理化和水力性质的空间分布存在异质性。而人类活动, 特别是耕作活动会对农田土壤的发育造成强烈影响, 进一步加剧了各土壤性质的空间异质性<sup>[7-8]</sup>。因此, 通过开展土壤性质空间分布特征研究, 不仅可以揭示土壤演变的机制, 还可为区域尺度陆地表层系统的水文模型构建提供基础数据, 为农业生产规划提供科学依据。

近年来, 学者们围绕土壤水力参数及其相关理化性质的空间分布特征开展了大量研究。Bai 等<sup>[9]</sup>发现该区域土壤水力参数具有明显的南北分异特征, 而土壤机械组成是重要影响因素。Li 等<sup>[10]</sup>发现中国南北方森林土壤水力性质存在巨大差异, 认为除气候外, 也受造林活动影响。Hou 等<sup>[11]</sup>通过粒度分形特征分析了黄土高原土壤理化性质的空间变异性, 发现与土壤机械组成的空间差异密切相关。高露等<sup>[12]</sup>发现内蒙古退化草场土壤的水力性质和相关理化性质均具有较强的空间异质性, 且其水力性质受到理化性质深刻影响。大量研究表明, 土壤水力参数空间分布特征不仅受气候等自然因素的影响, 人类活动对此也具有重要作用。由于各地区成土条件迥异, 导致不同区域的

土壤性质空间分布特征与主要影响因素均存在明显差异, 因此需要在不同地区开展相关研究工作, 以更深刻地理解自然要素和人为活动对土壤性质的影响程度和机制。平原区地势平坦, 一般认为其土壤性质在空间上相对较为均一。然而, 近江平原区的土壤母质受河流冲积过程影响深刻, 土壤性质可能与其他平原区有较大区别, 且高强度、多元化的农业生产模式可能对原有土壤性质造成深刻影响, 进而改变其原有的空间分布格局。尽管目前围绕农业区或农田土壤开展了大量研究, 但更多研究主要关注单一田块或不同类型农田土壤性质的对比; 虽也围绕河流冲积过程对河岸土壤机械组成以及土壤养分含量与迁移开展了一些研究, 但对于近江农业区土壤性质的空间分布研究还较少, 且尚未能明确自然河流冲积和人为耕作活动耦合作用对土壤性质的改变程度和机制<sup>[13-16]</sup>。

江汉平原地处湖北省中南部, 是典型的冲积平原。土地利用方式以农田为主, 种植模式多样, 是我国重要的商品粮基地。本研究以江汉平原近江农业区的土壤为研究对象, 揭示其水力参数和相关理化性质的空间分布特征, 尝试明确河流冲积的自然行为与人类耕作活动改造对各参数和性质的综合影响。研究结果可为揭示该地区土壤的发育过程与机制提供理论依据, 为区域尺度陆地表层系统的水文模型构建提供基础数据, 为农业种植模式的优化布局提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于江汉平原中南部( $29^{\circ} 54' 42'' \text{ N} \sim$

30° 4' 28" N, 112° 15' 24" E ~ 112° 25' 26" E), 属亚热带季风气候。年平均日照数为 2 000 h 以上, 年平均气温 16.1 °C, 年均降水量 1 100 ~ 1 300 mm, 气候温暖湿润。平均海拔 35 m 左右, 地势平坦; 土壤母质以河流冲积物和湖泊淤积物为主。主要农用地类型为稻田和旱地, 并有小面积的菜地和林地(果园和苗木林)。

## 1.2 样点布设与土样采集

通过实地调研和勘察, 在毗邻长江的农业区布设 30 个采样点(图 1); 在明确各样点的典型用地类型后,

再确定土样采集样地, 采样时间为 2021 年 3 月。本研究共选取 56 个样地, 其中稻田 18 个, 旱地 22 个, 菜地和林地各 8 个。考虑到植物根系分布和人类活动对土壤性质的影响主要表现在浅层土体, 在各样地挖掘土壤剖面后, 分别在 0 ~ 10、10 ~ 20、20 ~ 30 和 30 ~ 40 cm 深度土层采集土壤样品。在各深度分别采集 1 个原状土壤样品(100 cm<sup>3</sup> 环刀), 用于土壤容重、饱和导水率( $K_s$ )和水分特征曲线测定; 逐层采集 1 个扰动土壤样品, 在风干过筛后用于土壤有机质含量和机械组成的测定。

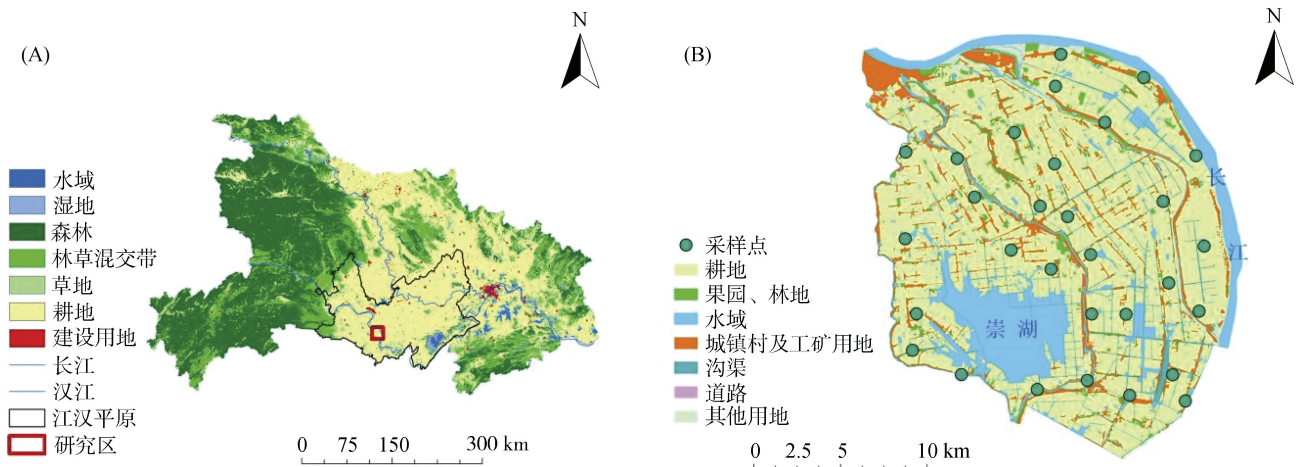


图 1 研究区位置、土地利用现状与采样点分布  
Fig. 1 Study area location, land use types and sampling sites

## 1.3 土壤性质分析

**1.3.1 土壤基本理化性质测定** 采用重铬酸钾氧化法测定有机质含量; 采用烘干法测定土壤容重(水分特征曲线测定后进行); 采用马尔文激光粒度分析仪测定土壤机械组成。

**1.3.2 土壤水力性质测定** 先用定水头法测定  $K_s$ , 然后用离心机法测定土壤水分特征曲线(分别测定 0.00、0.01、0.03、0.05、0.07、0.1、0.3、0.6、1 bar 吸力值下的土壤含水量), 最后借助 RETC 软件中的 Van-Genuchten 模型对土壤水分特征曲线进行参数拟合, 获取相关参数; 数学表达式如下:

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + (\alpha h)^n]^m} \quad (1)$$

式中:  $\theta$  为土壤体积含水量( $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ );  $h$  为吸力值(cm);  $\theta_s$ 、 $\theta_r$  分别为土壤饱和含水量和残余含水量( $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ );  $\alpha$  为与土壤进气值有关的参数( $\text{cm}^{-1}$ );  $n$  为曲线形状参数,  $m = 1 - 1/n$ 。

**1.3.3 土壤大孔隙度分析** 本研究主要对土壤非毛管大孔隙进行分析, 参考孙梅等<sup>[17]</sup>的大孔隙分类标准, 分别计算直径 >0.1 mm 和 >0.3 mm 的大孔隙

含量。依据测定的水分特征曲线参数, 借助茹林公式计算结果, 数学表达式如下:

$$D = 3/h \quad (2)$$

式中:  $D$  为当量孔径(mm);  $h$  为吸力值(cm)。

**1.3.4 土壤水分常数计算** 土壤水分常数是表征土壤持水和渗漏能力的重要指标, 主要包括饱和含水量、田间持水量、凋萎系数、最大有效水含量等。0、0.33 和 15 bar 吸力下的含水量分别为  $\theta_s$ 、田间持水量( $\theta_f$ )和凋萎系数( $\theta_w$ ),  $\theta_f$  与  $\theta_w$  之差为最大有效水含量( $\theta_{AW}$ )。

## 1.4 数据处理分析

采用 Excel 进行数据整理, 利用 ArcGIS 软件中的地统计方法对研究区各采样点的土壤性质进行克里格插值分析, 研究土壤性质的空间分布特征。借助 SPSS 软件进行各理化性质和水力参数的统计分析和相关分析。在统计分析中, 差异性检验采用单因素方差分析方法, 其中对 >0.1 mm 和 >0.3 mm 大孔隙含量、 $K_s$  的数值进行了对数转换, 以使其符合正态分布; 采用 Pearson 系数进行双变量相关分析。用 Origin 软件进行绘图。

## 2 结果

### 2.1 土壤各理化性质与水力参数的空间分布特征

研究区土壤各基本理化性质具有明显的空间异

质性(图 2)。采样点越靠近长江, 砂粒含量越高, 黏粒和粉粒含量越低; 采样点中, 砂粒、粉粒和黏粒的最高含量分别为 60.3%、57.2% 和 44.0%, 最低含量分别为 47.7%、40.1% 和 12.2%。直径 >0.1 mm 和 >0.3 mm

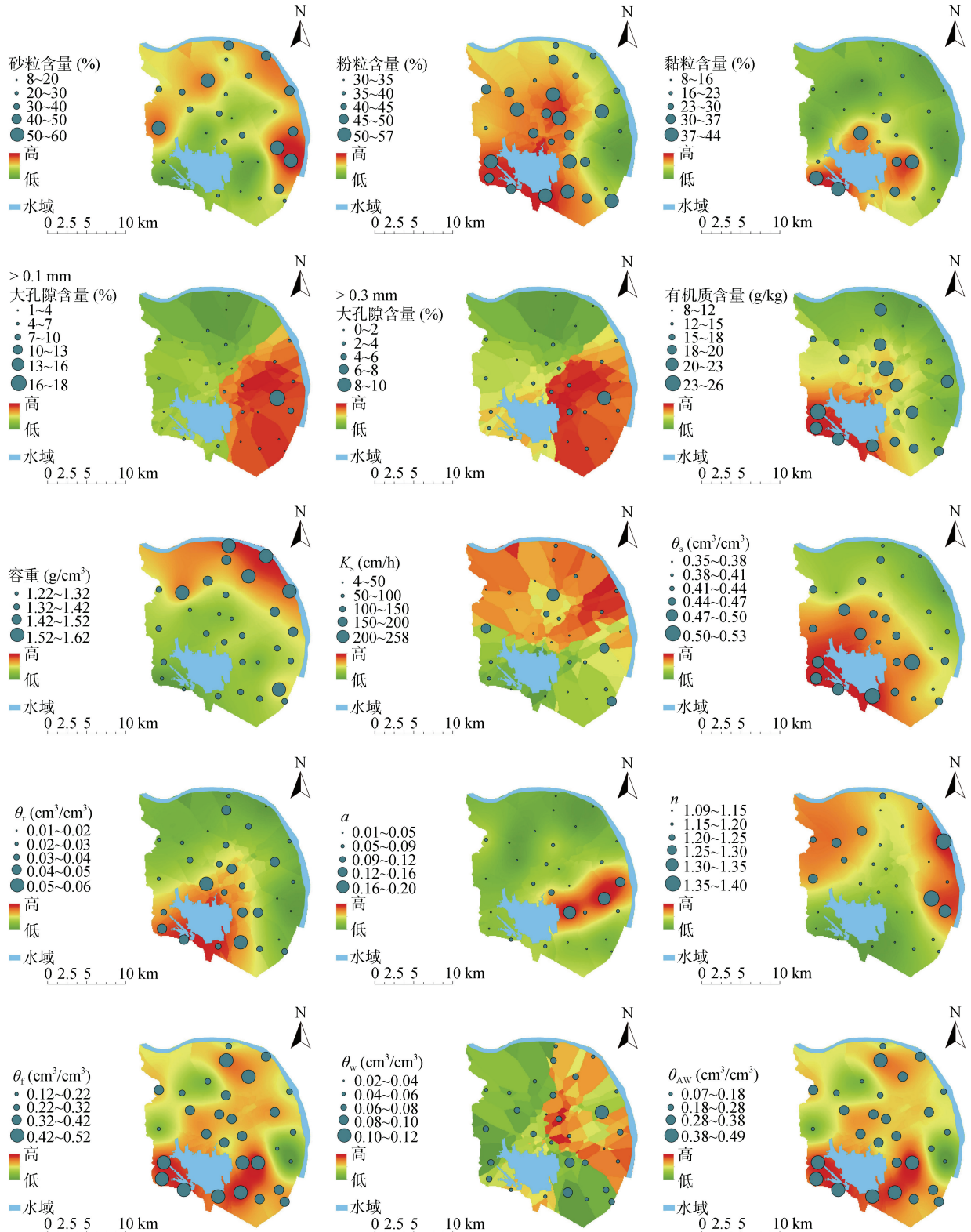


图 2 土壤各理化性质与水力参数空间分布特征

Fig. 2 Spatial distribution characteristics of soil physiochemical properties and hydraulic parameters

大孔隙含量空间分布特征相似,大致呈现东高西低的趋势。有机质含量呈现南多北少的趋势,最高和最低值分别为 26.2 和 8.9 g/kg。容重整体上呈北高南低、东高西低的趋势,最大和最小值分别为 1.62 和 1.22 g/cm<sup>3</sup>。

研究区土壤水力学性能存在较强的空间异质性,但各水力学参数的空间规律性不同。 $K_s$  在研究区呈北高南低的趋势,其最大和最小值分别为 258.2 和 4.3 cm/h,变化幅度较大;而  $\theta_s$  和  $\theta_r$  的分布特征则呈现相反的趋势。参数  $\alpha$  中间区域数值较高,其他区域数值较低,且差异较小,最大和最小值分别为 0.01 和 0.20;  $n$  则呈现中间低东西高的趋势,且南部数值较低。 $\theta_r$  和  $\theta_{AW}$  的分布特征相似,大致呈现中间高,东西两侧低的趋势,最大值分别为 0.52

和 0.49 cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>。 $\theta_w$  整体上呈现东高西低的趋势,其最大和最小值分别为 0.12 和 0.02 cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>。

## 2.2 不同类型样地的土壤基本理化性质

随着土壤深度的增加,不同类型农用地的土壤有机质含量均明显下降,但下降的幅度逐渐减小(表 1)。各样地和土层的有机质含量也存在较大差异;菜地各土层深度有机质含量均高于其他样地。在 0~10 cm 土层,有机质含量为 20.6~31.1 g/kg,其中菜地最高(31.1 g/kg),其次为稻田(28.2 g/kg)和旱地(26.1 g/kg),林地最低(20.6 g/kg)。对于 10~30 cm 土层,各深度的有机质含量均表现为菜地>稻田>林地>旱地。方差分析结果表明,菜地 0~10 cm 土层土壤有机质含量最高,旱地 30~40 cm 土层最低。

表 1 各类型农用地土壤基本理化性质  
Table 1 Soil basic physiochemical properties of various farmland types

用地类型	土层深度 (cm)	有机质含量 (g/kg)	土壤机械组成(%)			容重 (g/cm <sup>3</sup> )	大孔隙含量(%)	
			砂粒	粉粒	黏粒		>0.1 mm	>0.3 mm
稻田	0~10	28.2±9.2 ab	35.3±11.5 ab	48.0±7.4 ab	16.7±6.5 a	1.24±0.21 d	6.4±3.2 ab	3.6±2.3 abc
	10~20	20.6±10.0 bcde	33.0±13.9 ab	46.7±7.5 ab	20.3±9.8 a	1.42±0.20 abcd	3.3±2.2 bc	1.7±1.4 bcd
	20~30	13.6±8.1 def	32.7±12.5 ab	47.5±7.0 ab	19.8±9.8 a	1.53±0.14 a	1.9±1.2 c	1.0±1.0 d
	30~40	10.3±6.1 def	36.4±18.2 ab	44.2±12.4 ab	19.5±13.5 a	1.49±0.10 ab	4.1±5.1 abc	1.6±1.6 cd
旱地	0~10	26.1±6.6 abc	33.3±13.3 ab	45.0±9.9 ab	21.7±17.4 a	1.26±0.11 cd	5.5±2.7 abc	3.1±2.1 abcd
	10~20	18.4±5.4 bcdef	29.0±12.6 ab	49.3±7.5 ab	21.7±10.4 a	1.43±0.15 abcd	3.6±3.3 abc	2.1±2.3 abcd
	20~30	13.2±3.6 def	30.0±15.5 ab	46.2±8.3 ab	23.8±13.4 a	1.47±0.11 abc	3.3±2.8 bc	1.5±1.3 cd
	30~40	8.6±3.3 f	33.2±18.3 ab	45.1±10.8 ab	21.8±13.2 a	1.48±0.15 abcd	4.8±4.1 abc	2.3±2.3 abcd
菜地	0~10	31.1±8.82 a	27.7±8.5 ab	51.1±5.7 ab	21.2±7.5 a	1.27±0.13 cd	5.6±1.9 abc	4.0±1.7 ab
	10~20	26.1±19.2 abc	24.6±9.0 ab	52.1±4.9 ab	23.4±9.6 a	1.29±0.16 bcd	4.2±1.3 abc	2.3±0.5 abcd
	20~30	15.9±7.5 cdef	27.3±9.2 ab	51.2±5.2 ab	21.5±9.1 a	1.37±0.20 abcd	3.0±2.0 bc	2.1±1.6 abcd
	30~40	14.7±9.6 def	21.9±4.5 b	54.1±4.0 a	24.0±5.7 a	1.41±0.10 abcd	2.7±1.8 bc	1.6±1.2 cd
林地	0~10	20.6±5.1 bcde	39.4±16.4 a	44.7±10.1 ab	15.9±8.4 a	1.37±0.09 abcd	5.6±3.0 abc	2.7±1.6 abcd
	10~20	19.5±5.6 bcdef	40.2±22.7 a	39.9±10.5 b	19.9±16.5 a	1.36±0.09 abcd	6.8±7.2 ab	3.6±3.1 abc
	20~30	13.4±3.1 def	33.4±20.0 ab	42.0±9.2 ab	24.7±18.5 a	1.42±0.07 abcd	7.5±7.0 a	4.1±4.3 a
	30~40	9.4±3.3 ef	40.3±21.7 a	42.5±12.1 ab	17.2±13.0 a	1.45±0.14 abcd	6.6±7.7 ab	3.4±4.2 abc

注: 同列数据小写字母不同表示差异达  $P<0.05$  显著水平, 下同。

不同样地的土壤机械组成存在差异,且各样地和各土层深度的标准差较大(表 1)。总的来说,菜地的砂粒含量低于其他样地,而粉粒含量高于其他样地。对于砂粒平均含量,表现为林地(38.3%)>稻田(34.4%)>旱地(31.4%)>菜地(25.4%);粉粒平均含量表现为菜地最高(52.1%),稻田(46.6%)和旱地(46.4%)其次,林地最低(42.3%);而菜地的黏粒平均含量最高(24.0%),林地最小(17.2%)。方差分析结果表明,菜地 30~40 cm 土层砂粒含量最低,林地各土层均较高;菜地 30~40 cm 土层粉粒含量最高,林地 10~20 cm 土层最低;各土层黏粒含量均无显著差异。

各样地的土壤容重介于 1.24~1.53 g/cm<sup>3</sup>,且不同样地的土壤容重均表现为深层(10~40 cm)大于表层(0~10 cm)。各样地的土壤容重存在较大差异,稻田平均容重最大(1.43 g/cm<sup>3</sup>),其次为旱地(1.40 g/cm<sup>3</sup>)和林地(1.41 g/cm<sup>3</sup>),菜地平均容重最小(1.33 g/cm<sup>3</sup>)。方差分析结果表明,稻田 0~10 cm 土层容重最小,稻田 20~30 cm 土层最大。

各样地土壤整体直径 >0.1 mm 和 >0.3 mm 大孔隙含量变化范围分别为 1.9%~7.5% 和 1.0%~4.1%。稻田和旱地的土壤大孔隙含量均随着土层深度的增加呈现先减少后增加的趋势;菜地随深度的增加

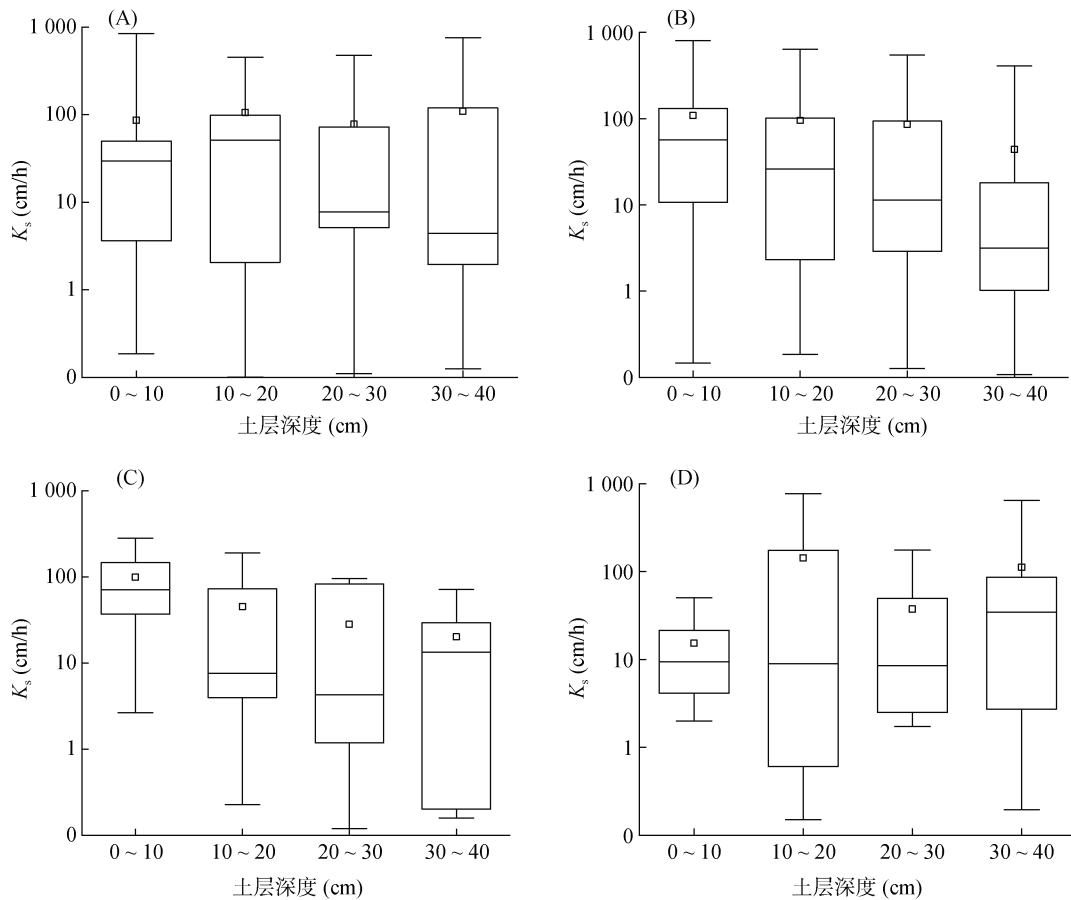


逐渐减小；而林地呈现先增加后减小的趋势。不同类型样地大孔隙含量也存在差异，林地大孔隙含量明显高于其他样地，而其他样地差异较小。方差分析结果表明，林地 20~30 cm 土层两种直径的大孔隙含量均最高，而稻田 20~30 cm 土层均为最低。

### 2.3 不同类型样地的土壤水力学性质

各样地土壤  $K_s$  具有极强的变异性(图 3)，其最大和最小值分别为 846.2 和 0.1 cm/h。随着土壤深度的增加，稻田和旱地的平均  $K_s$  变化较小，菜地的平均

$K_s$  呈现逐渐下降的趋势，而林地呈现波动变化的趋势。对于  $K_s$  的中位数值，稻田、旱地和菜地土壤均呈现波动降低的趋势，而林地表现为先不变后增加。不同样地的  $K_s$  也存在差异，对于平均  $K_s$ ，稻田表现为最高值(94.7 cm/h)，旱地(83.4 cm/h)和林地(76.9 cm/h)其次，菜地最低(48.2 cm/h)。对于  $K_s$  的中位数，总体表现为稻田和旱地(18.7 cm/h)>菜地(10.5 cm/h)>林地(9.2 cm/h)。而方差分析结果表明，各样地与各土层深度的  $K_s$  均无显著差异。



(A. 稻田; B. 旱地; C. 菜地; D. 林地。方框内横线为中位数; 小方格为算术平均值; 误差线的上下端分别为最大值和最小值)

图 3 各类型农用地不同土层的  $K_s$

Fig. 3 Soil  $K_s$  of different farmland types at various soil depths

土壤水分特征曲线测定结果表明(图 4)，不同类型农用地土壤的持水能力有较大差异。在测定的吸力值范围内，除 0~10 cm 外，菜地的持水能力均为最强。对于 0~10 cm 土层，旱地持水能力最强，林地、菜地和稻田较弱；对于 10~30 cm，持水能力表现为菜地>稻田>旱地>林地；在 30~40 cm 深度，菜地持水能力最强，稻田和林地其次，旱地最弱。

各样地部分水力参数存在差异(表 2)， $\theta_s$  和  $\alpha$  整体随土层深度加深呈下降趋势； $n$  在表层(0~10 cm)

和深层(30~40 cm)数值较大，10~30 cm 较小； $\theta_r$  随深度变化较小。不同样地之间的水力参数中， $n$  差异较大，表现为林地(1.24)>稻田和旱地(1.20)>菜地(1.13)；对于  $\theta_s$ ，菜地(0.46 cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>)最大，稻田和林地(0.45 cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>)其次，旱地最小(0.44 cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>)； $\alpha$  表现为林地(0.07)>旱地(0.06)>稻田和菜地(0.05)； $\theta_r$  差异最小，菜地(0.04 cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>)高于其他样地(0.03 cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>)。方差分析结果表明，菜地 10~20 cm 土壤  $\theta_s$  最大， $\theta_r$  和  $\alpha$  无显著差异；菜地 10~30 cm 土壤  $n$  最小，林地 30~

40 cm 土壤  $n$  最大。

对于各水分常数, 随着土层深度的增加, 田间持水能力和最大有效水含量总体呈现先增大后减小的趋

势(表 2)。不同类型农用地土壤水分常数存在较大差异, 菜地各水分常数均呈现最高值, 林地则最低。各类型农用地土壤, 菜地  $\theta_r(0.46 \text{ cm}^3/\text{cm}^3)$  远高于其他样

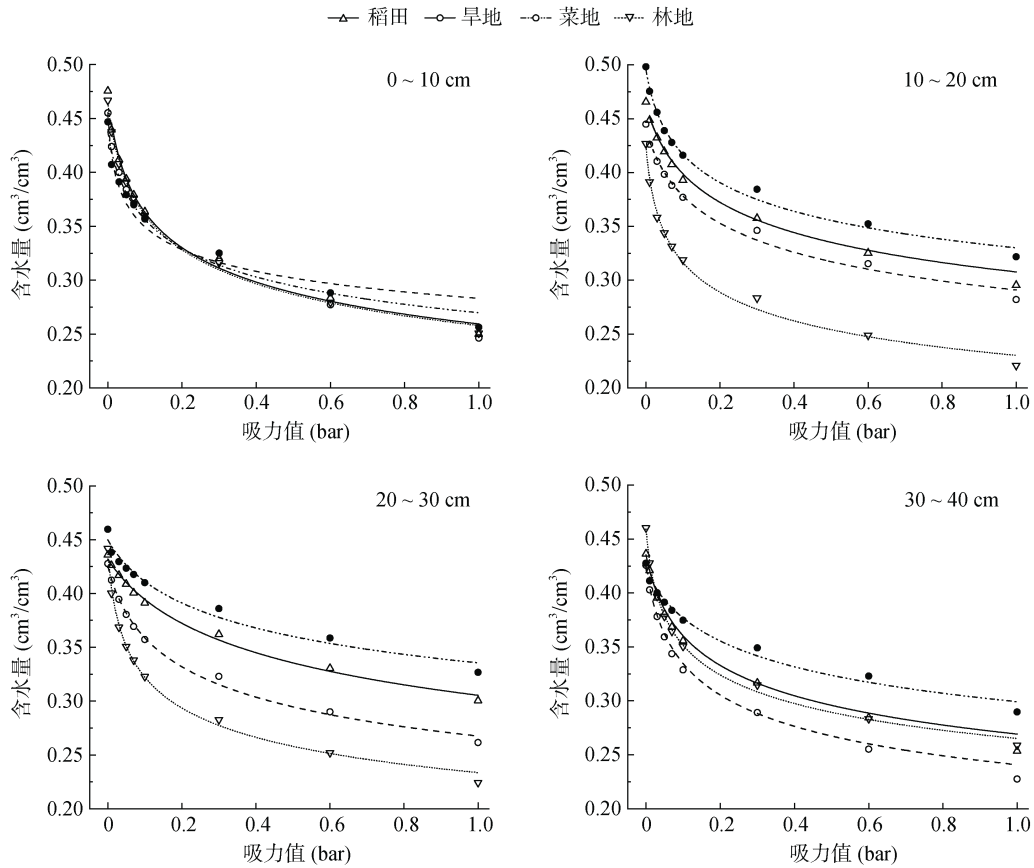


图 4 各类型农用地不同土层的土壤水分特征曲线

Fig. 4 Soil water characteristic curves of different farmland types at various soil depths

表 2 各类型农用地土壤水力学参数及水分常数

Table 2 Soil hydraulic parameters and water constants of different farmland types

用地类型	土层深度(cm)	$\theta_s(\text{cm}^3/\text{cm}^3)$	$\theta_r(\text{cm}^3/\text{cm}^3)$	$\alpha(-)$	$n(-)$	$\theta_r(\text{cm}^3/\text{cm}^3)$	$\theta_w(\text{cm}^3/\text{cm}^3)$	$\theta_{AW}(\text{cm}^3/\text{cm}^3)$
稻田	0~10	$0.48 \pm 0.07$ ab	$0.03 \pm 0.01$ a	$0.10 \pm 0.09$ a	$1.19 \pm 0.07$ ab	$0.31 \pm 0.10$ c	$0.06 \pm 0.02$ abc	$0.25 \pm 0.10$ bc
	10~20	$0.47 \pm 0.06$ ab	$0.03 \pm 0.01$ a	$0.03 \pm 0.04$ a	$1.17 \pm 0.05$ b	$0.41 \pm 0.11$ abc	$0.06 \pm 0.02$ abc	$0.35 \pm 0.11$ abc
	20~30	$0.44 \pm 0.06$ ab	$0.03 \pm 0.01$ a	$0.04 \pm 0.07$ a	$1.17 \pm 0.09$ b	$0.44 \pm 0.15$ abc	$0.06 \pm 0.02$ abc	$0.38 \pm 0.16$ abc
	30~40	$0.44 \pm 0.08$ ab	$0.03 \pm 0.02$ a	$0.03 \pm 0.03$ a	$1.27 \pm 0.17$ ab	$0.32 \pm 0.18$ bc	$0.06 \pm 0.02$ abc	$0.26 \pm 0.17$ bc
旱地	0~10	$0.46 \pm 0.03$ ab	$0.03 \pm 0.01$ a	$0.10 \pm 0.18$ a	$1.18 \pm 0.06$ ab	$0.33 \pm 0.10$ bc	$0.07 \pm 0.02$ abc	$0.26 \pm 0.09$ bc
	10~20	$0.44 \pm 0.06$ ab	$0.03 \pm 0.01$ a	$0.05 \pm 0.08$ a	$1.18 \pm 0.10$ ab	$0.40 \pm 0.13$ abc	$0.06 \pm 0.02$ abc	$0.34 \pm 0.13$ abc
	20~30	$0.43 \pm 0.05$ b	$0.03 \pm 0.01$ a	$0.03 \pm 0.03$ a	$1.19 \pm 0.07$ ab	$0.37 \pm 0.13$ bc	$0.06 \pm 0.02$ abc	$0.31 \pm 0.12$ bc
	30~40	$0.43 \pm 0.07$ b	$0.03 \pm 0.01$ a	$0.04 \pm 0.06$ a	$1.26 \pm 0.19$ ab	$0.31 \pm 0.13$ c	$0.06 \pm 0.03$ abc	$0.26 \pm 0.15$ bc
菜地	0~10	$0.45 \pm 0.03$ ab	$0.04 \pm 0.01$ a	$0.09 \pm 0.09$ a	$1.14 \pm 0.02$ b	$0.39 \pm 0.04$ abc	$0.08 \pm 0.03$ a	$0.31 \pm 0.05$ bc
	10~20	$0.50 \pm 0.04$ a	$0.04 \pm 0.01$ a	$0.05 \pm 0.02$ a	$1.12 \pm 0.02$ b	$0.46 \pm 0.06$ ab	$0.08 \pm 0.04$ a	$0.38 \pm 0.08$ abc
	20~30	$0.46 \pm 0.09$ ab	$0.04 \pm 0.01$ a	$0.04 \pm 0.03$ a	$1.12 \pm 0.04$ b	$0.52 \pm 0.06$ a	$0.06 \pm 0.03$ abc	$0.46 \pm 0.07$ a
	30~40	$0.43 \pm 0.04$ b	$0.04 \pm 0.01$ a	$0.03 \pm 0.03$ a	$1.14 \pm 0.06$ b	$0.46 \pm 0.11$ ab	$0.07 \pm 0.04$ abc	$0.40 \pm 0.11$ ab
林地	0~10	$0.47 \pm 0.03$ ab	$0.03 \pm 0.02$ a	$0.04 \pm 0.02$ a	$1.17 \pm 0.07$ b	$0.34 \pm 0.15$ bc	$0.05 \pm 0.02$ abc	$0.28 \pm 0.14$ bc
	10~20	$0.43 \pm 0.05$ b	$0.03 \pm 0.02$ a	$0.06 \pm 0.05$ a	$1.22 \pm 0.16$ ab	$0.31 \pm 0.18$ c	$0.07 \pm 0.04$ abc	$0.24 \pm 0.16$ c
	20~30	$0.44 \pm 0.03$ ab	$0.03 \pm 0.01$ a	$0.12 \pm 0.16$ a	$1.24 \pm 0.24$ ab	$0.31 \pm 0.19$ c	$0.08 \pm 0.02$ a	$0.27 \pm 0.18$ bc
	30~40	$0.46 \pm 0.08$ ab	$0.03 \pm 0.02$ a	$0.04 \pm 0.06$ a	$1.35 \pm 0.09$ a	$0.36 \pm 0.22$ bc	$0.04 \pm 0.02$ c	$0.32 \pm 0.20$ bc

地； $\theta_w$  总体表现为菜地( $0.07 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ )>旱地和稻田( $0.06 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ )>林地( $0.05 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ )；对于  $\theta_{AW}$ ，菜地呈现最高值( $0.39 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ )，稻田( $0.31 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ )其次，旱地( $0.29 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ )和林地( $0.27 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ )较低。方差分析结果显示，菜地 20 ~ 30 cm 土层的  $\theta_f$  最大；菜地 10 ~ 20 cm 土层的  $\theta_w$  最大，林地 30 ~ 40 cm 土层最小；菜地 20 ~ 30 cm 土层的  $\theta_{AW}$  最大，林地 10 ~ 20 cm 土层最小。

### 3 讨论

#### 3.1 土壤性质的空间分布特征分析

河流冲积物的分布特征对近江农业区土壤性质的空间差异造成了明显影响。结果显示(图 5)，土壤的机械组成、有机质含量、容重均与距江距离有良好的相关性，表现为砂粒含量和容重随距长江距离的增加而减少，而有机质含量、粉粒和黏粒含量呈现相反的趋势。Charles 等<sup>[18]</sup>对沿河洪积平原土壤的研究发

现，河流沿岸土壤部分性质具有较强的空间相关性，距河岸越远，土壤粒径越小，本研究的结果与此一致。在冲积平原形成过程中，水流的动能不断衰减，导致大颗粒较早沉积在近河区域，而细小颗粒可以随水流迁移至较远的地区再进行沉积，进而影响了土壤颗粒的部分特征<sup>[19-20]</sup>。尽管江汉平原的河流冲积发生在更新世以前<sup>[21]</sup>，且该地区有上百年农耕开发历史<sup>[22]</sup>，但人类活动对土壤颗粒整体分布的影响仍未能掩盖河流长期冲积过程对土壤颗粒分布的改变，这表明机械组成是较为稳定的土壤性质<sup>[23]</sup>。因此，在近江农业区开展农业种植模式规划时，必须考虑土壤机械组成的差异，如近江区砂质的土壤特性，更适合进行旱地作物而非水稻的种植。另外，在近江农业区开展农田优化灌溉设计、水文模型构建、耕地质量调查时，也需要考虑土壤机械组成的差异。尽管农业耕作时的翻耕与压实会影响土壤的容重，但本研究发现土壤机械组成对容重的影响更大；近江区砂粒含量高，导致

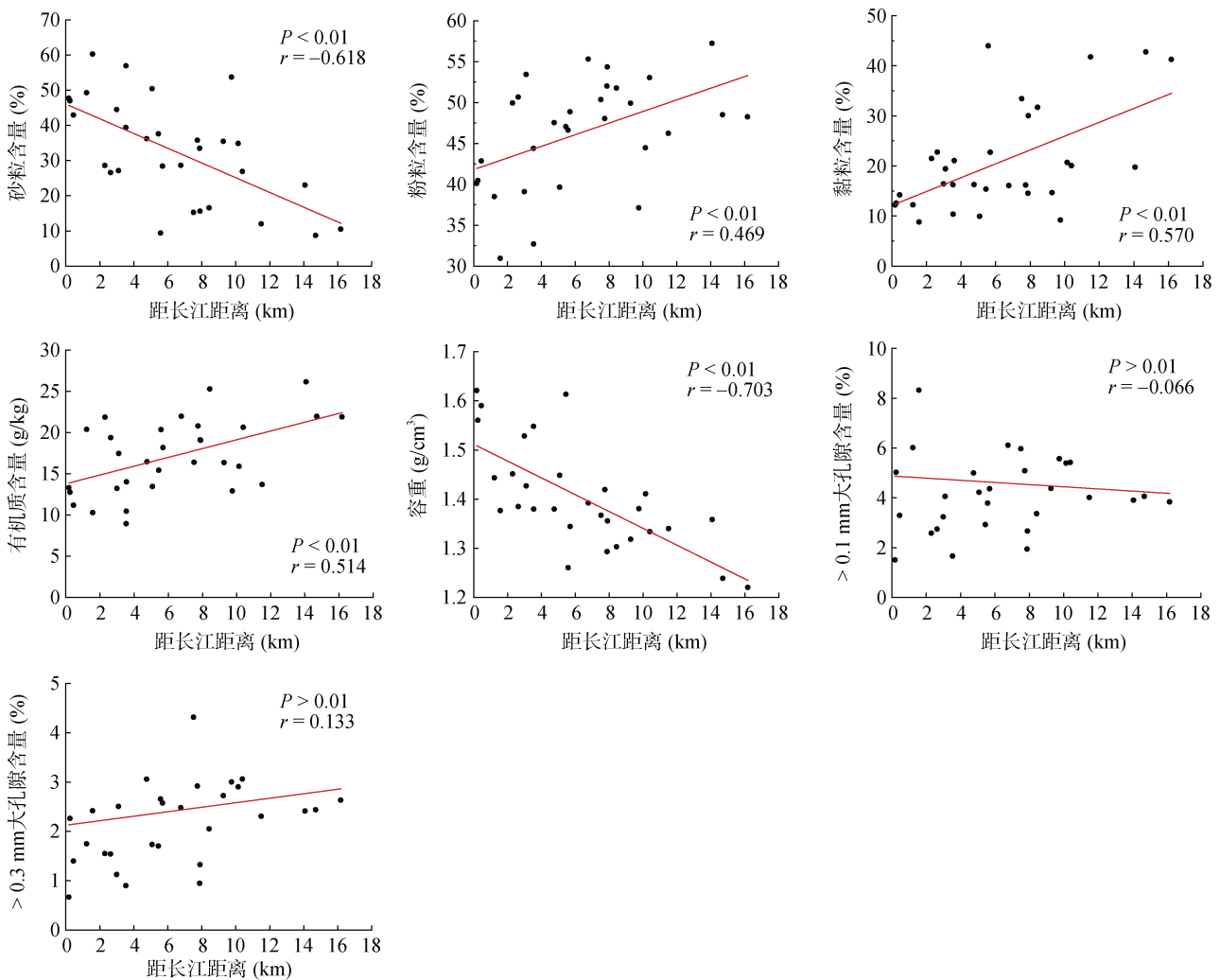


图 5 土壤部分理化性质与距长江距离的相关分析

Fig. 5 Correlation analysis between partial soil physiochemical properties and distance from Yangtze River



其容重也更大<sup>[24]</sup>。另外,土壤机械组成的差异也会影响有机质的积累,砂土的有机质积累速率比壤土和黏土慢得多,从而导致有机质含量与距江距离有较好的相关性,近江区的有机质含量远低于远处。Li 等<sup>[25]</sup>对比比利时农田土壤的研究也发现了土壤机械组成对有机质及其矿化程度的重要影响。另外,土壤机械组成的差异会影响土壤颗粒的吸附作用和孔隙特征,进而改变其渗透能力和持水能力<sup>[26]</sup>,最终影响土壤水力性质的空间分布特征。研究区北侧砂粒含量较大,导致容重较高,有机质的积累较少,研究区南侧则呈现相反的趋势,这使  $K_s$  在研究区呈现北高南低的分布特征。另外,砂粒含量高的土壤总孔隙小,土壤颗粒的吸水能力弱,导致  $\theta_s$  和  $\theta_r$  则呈现北低南高的分布特征。

与土壤机械组成相比,土壤大孔隙含量、容重、有机质含量等理化性质更易受到人类耕作活动的影响<sup>[27-28]</sup>。林地发达根系的穿透会增加土壤大孔隙<sup>[29]</sup>,而根系死亡后残留的根孔未被翻耕和压实破坏,共同导致其大孔隙含量最高;而稻田和旱地作物的根系较细,形成的根孔较小,加上翻耕和压实会破坏这些孔隙,导致大孔隙含量降低。王紫薇等<sup>[30]</sup>对比了林地、草地和农田的土壤理化性质也发现了类似现象。虽然土壤机械组成的分布影响了研究区的土壤容重和有机质含量分布,但研究发现耕作活动对其影响也很大,主要表现为稻田和旱地 20~30 cm 土层的容重远高于其他土层。表层土壤由于翻耕导致松散,而下方土壤长期受耕作器具压实,形成了较为致密的犁底层,这种现象在稻田最为明显。张君等<sup>[31]</sup>也发现耕作层容重随着水稻种植年限的增加而降低,而犁底层容重增加。由于农民在菜地有施用有机肥的习惯,因此菜地的有机质含量最高,而稻田和旱地在收割后其作物根系会全部残留在土体,加之近十年来推行的秸秆还田政策,有机质含量也逐渐积累。由于本研究的林地主要为苗木幼苗和果园,枯枝落叶输入量不大,导致其有机质含量并不高,这与山地林区的高有机质含量现象存在较大差异<sup>[29]</sup>。另外,耕作活动对土壤容重和有机质含量的影响也改变了土壤的水力学性质,主要表现为林地的  $\alpha$  和  $n$  最大、菜地均最小;而菜地各水分常数均最高、林地最低。菜地因长期施肥有机质含量高,土壤团聚体易形成,持水性能较强;而林地土壤有机质含量低,且土壤砂粒含量和大孔隙含量高,导致持水能力较弱。Hu 等<sup>[32]</sup>对比了牧场和旱作耕地的土壤也发现,牧场相比旱地具有更好的人渗能力,而旱地受耕作压实,深层土壤的持水性能参

数呈现高值。

### 3.2 土壤理化性质对水力参数和水分常数的影响

土壤理化性质的空间分布特征对土壤水力参数和水分常数分布造成了深刻影响。相关分析结果表明(表 3),土壤  $K_s$  与有机质和大孔隙含量呈显著正相关,而与容重和粉粒含量呈显著负相关。当土壤有机质含量较高时,土壤团粒结构更加蓬松,因此入渗能力较好;而大孔隙则为土壤入渗提供良好条件,因此大孔隙含量能够影响土壤的入渗性能。一般来说,容重能够反映土壤颗粒的紧实程度,容重大的土壤更紧实,水分难以入渗。姜淑兰等<sup>[33]</sup>对比了三峡山地不同类型植被和坡位的土壤也得到了类似的发现。土壤理化性质的差异也影响了各持水特征参数。相关分析发现,  $\theta_s$  与有机质含量、>0.3 mm 大孔隙含量、粉粒和黏粒含量正相关,与容重和砂粒含量负相关;  $\theta_r$  与粉粒和黏粒含量呈极显著正相关,与大孔隙含量和砂粒含量呈极显著负相关。有机质和大孔隙含量高的土壤入渗性能较强,水分更容易进入土壤体系;而土壤黏粒和粉粒含量较高的土壤颗粒较小,水分的吸附能力强,因此具有较强的持水能力,砂粒含量高的土壤持水能力则较差。因此,土壤的有机质含量、大孔隙含量、机械组成和容重对于土壤的持水特征具有重要影响,这与牛晓倩等<sup>[34]</sup>对于农田土壤水力参数的研究结果相符。此外,  $\alpha$  与有机质含量、大孔隙含量显著正相关,与容重极显著负相关;  $n$  与 >0.1 mm 大孔隙含量、砂粒含量和容重极显著正相关;与有机质含量、粉粒和黏粒含量呈极显著负相关。Bai 等<sup>[9]</sup>对黄土高原土壤进行水力参数预测时也得到了类似发现。土壤理化性质对土壤持水能力的影响也改变了土壤的水分常数。相关分析结果表明,  $\theta_f$ 、 $\theta_w$ 、 $\theta_{Aw}$  均表现为与粉粒和黏粒含量显著正相关,与大孔隙含量和砂粒含量显著负相关,这反映了土壤孔隙含量和机械组成对于土壤水分常数的影响。这些指标可以通过影响土壤的结构,控制土壤的入渗和持水能力,从而改变土壤的水分常数,这与 Patra 等<sup>[35]</sup>的研究结果一致。

由于土壤各水力参数和水分常数受土壤理化性质影响,导致其分布也呈现一定的相似性。如  $\theta_s$  和  $\theta_r$ , 以及  $\theta_f$  和  $\theta_{Aw}$  在空间分布上具有较高的相似性。尽管很多研究发现农田类型或土地利用方式的差异会对  $K_s$ 、 $\theta_s$ 、 $\theta_r$ 、 $\alpha$  等土壤性质(参数)造成显著影响,但本研究的方差分析统计结果很多时候差异并不显著。这主要是由于其他研究所选样地距离较近,母质差异较小;而本研究各农田类型均涵盖了不同机械组成的土壤,导致同一样地的变异系数较大。因此,在近江

表 3 土壤水力参数与理化性质相关性分析  
Table 3 Correlation analysis of soil hydraulic parameters and physiochemical properties

	$K_s$	$\theta_s$	$\theta_r$	$\alpha$	$n$	$\theta_f$	$\theta_w$	$\theta_{Aw}$
有机质含量	0.153*	0.349**	0.134	0.179*	-0.267**	0.161*	0.108	0.132
砂粒含量	0.119	-0.322**	-0.721**	0.023	0.540**	-0.653**	-0.308**	-0.622**
粉粒含量	-0.148*	0.316**	0.540**	-0.01	-0.451**	0.521**	0.275**	0.489**
黏粒含量	-0.036	0.175*	0.521**	-0.021	-0.352**	0.445**	0.180**	0.429**
容重	-0.161*	-0.689**	-0.123	-0.349**	0.254**	-0.093	-0.074	-0.081
>0.1 mm 大孔隙含量	0.185**	0.114	-0.320**	0.638**	0.266**	-0.501**	-0.154*	-0.471**
>0.3 mm 大孔隙含量	0.154*	0.189**	-0.194**	0.769**	0.094	-0.319**	-0.099	-0.290**

注: \* 表示相关性达  $P < 0.05$  显著水平, \*\* 表示相关性达  $P < 0.01$  显著水平。

平原区进行土壤调查和研究时,必须考虑河流冲积物的分布特征。尽管如此,部分指标还是呈现了一些显著性差异,如菜地 0~20 cm 土壤  $\theta_s$  最大,林地 20~30 cm 土壤  $\alpha$  最大,这表明这些指标对人类活动的干扰更为敏感,超过了土壤机械组成差异造成的影响,说明人类活动对土壤性质的影响也不容忽视。由于近江平原区各土壤性质存在较强的空间异质性,因此在进行农用地开发时,需要考虑河流冲积物的分布特征,并针对不同机械组成土壤设计优化的农业种植模式、耕作方式和灌溉设计,进而更为合理地利用与保护土壤。另外,在近江平原区开展水文过程模拟时,也需要高精度的土壤性质和参数空间分布数据,以保证模拟的精度。

#### 4 结论

1) 研究区土壤各基本理化性质和水利参数均具有明显的空间异质性,近江区土壤机械组成与距江远近具有空间相关性,直径 >0.1 mm 和 >0.3 mm 大孔隙含量、 $\alpha$ 、 $n$ 、田间持水量、凋萎系数和最大有效水含量呈现较大的东西差异,容重、 $K_s$ 、 $\theta_s$  和  $\theta_r$  南北差异较大。

2) 不同样地的有机质含量、容重和直径 >0.3 mm 大孔隙含量具有显著差异。土壤理化性质的差异显著影响了土壤饱和导水率和水分特征曲线参数,特别是  $\theta_s$  和  $n$ 。稻田和旱地的入渗性能较好,表现为最高的中位  $K_s$ (18.7 cm/h),其他样地的  $K_s$  差异较小(9.2 ~ 10.5 cm/h)。菜地的持水能力最强,表现为较高的  $\theta_f$ (0.46 cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>)、 $\theta_w$ (0.07 cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>) 和  $\theta_{Aw}$ (0.39 cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>),其他样地的土壤水力参数差异较小。

3) 河流冲积物的分布显著影响了研究区农用地的土壤机械组成,并对土壤容重和有机质含量造成了一些影响,而人类活动显著改变了土壤有机质含量、

大孔隙含量和容重,两者共同影响了研究区的水力学参数分布特征。在近江农业区开展土壤调查和农业生产规划时,必须考虑河流冲积物的分布特征。

#### 参考文献:

- [1] Lucas-Borja M, Zema D, Plaza-Álvarez P, et al. Effects of different land uses (abandoned farmland, intensive agriculture and forest) on soil hydrological properties in southern Spain[J]. *Water*, 2019, 11(3): 503.
- [2] Jones S L, Slattery M C, Ritter E C. Near-surface soil moisture dynamics in a prairie hillslope seep/headwater stream system in Texas, USA[J]. *Physical Geography*, 2022, 43(2): 192-212.
- [3] Guellouz L, Askri B, Jaffré J, et al. Estimation of the soil hydraulic properties from field data by solving an inverse problem[J]. *Scientific Reports*, 2020, 10: 9359.
- [4] 周润惠, 苏天成, 喻静, 等. 碧峰峡常绿阔叶林不同群落物种多样性和土壤理化性质[J]. *生态学杂志*, 2022, 41(1): 1-8.
- [5] Akinde B P, Olakayode A O, Oyedele D J, et al. Selected physical and chemical properties of soil under different agricultural land-use types in Ile-Ife, Nigeria[J]. *Heliyon*, 2020, 6(9): e05090.
- [6] 徐聪, 吴迪, 王磊, 等. 菌渣施用对黄河故道区低产田土壤理化性质、小麦根系生长和产量的影响[J]. *土壤*, 2021, 53(3): 491-498.
- [7] 张世熔, 黄元仿, 李保国, 等. 黄淮海冲积平原区土壤有机质时空变异特征[J]. *生态学报*, 2002, 22(12): 2041-2047.
- [8] 李珊, 杨越超, 姚媛媛, 等. 不同土地利用方式对山东滨海盐碱土理化性质的影响[J]. *土壤学报*, 2022, 59(4): 1012-1024.
- [9] Bai X, Shao M A, Jia X X, et al. Prediction of the van Genuchten model soil hydraulic parameters for the 5-m soil profile in China's Loess Plateau[J]. *CATENA*, 2022, 210: 105889.
- [10] Li Y, Piao S L, Li L Z X, et al. Divergent hydrological response to large-scale afforestation and vegetation greening in China[J]. *Science Advances*, 2018, 4(5): eaar4182.

- [11] Hou K, Qian H, Zhang Y T, et al. Relationship between fractal characteristics of grain-size and physical properties: Insights from a typical loess profile of the loess Plateau[J]. CATENA, 2021, 207: 105653.
- [12] 高露, 张圣微, 赵鸿彬, 等. 退化草原土壤理化性质空间异质性及其对土壤水分的影响[J]. 干旱区研究, 2020, 37(3): 607-617.
- [13] 杨燕, 易军, 刘目兴, 等. 不同水耕年限稻田土壤水分运动特征研究[J]. 长江流域资源与环境, 2017, 26(2): 257-263.
- [14] 张君, 刘目兴, 易军, 等. 不同植稻年限土壤剖面基本性质与水-氮分布的关系[J]. 土壤, 2019, 51(6): 1188-1195.
- [15] 刘天奇, 汪丙国, 张钧帅, 等. 江汉平原土壤饱和渗透系数变化规律及影响因素[J]. 地球科学, 2021, 46(2): 671-682.
- [16] 任圆圆, 张学雷, 李笑莹, 等. 河南省成土母质与土壤空间分布多样性的特征[J]. 土壤学报, 2019, 56(6): 1309-1320.
- [17] 孙梅, 黄运湘, 孙楠, 等. 农田土壤孔隙及其影响因素研究进展[J]. 土壤通报, 2015, 46(1): 233-238.
- [18] Ogg C M, Gully C D, Reed J M, et al. Soil property trends and classification of alluvial floodplains, South Carolina Coastal Plain[J]. Geoderma, 2017, 305: 122-135.
- [19] 孟晓刚, 倪晋仁. 固液两相流中颗粒受力及其对垂向分选的影响[J]. 水利学报, 2002, 33(9): 6-13.
- [20] Curtis W F, Meade R H, Nordin C F, et al. Non-uniform vertical distribution of fine sediment in the Amazon River[J]. Nature, 1979, 280(5721): 381-383.
- [21] 朱诚, 吴立, 李兰, 等. 长江流域全新世环境考古研究进展[J]. 地理学报, 2014, 69(9): 1268-1283.
- [22] 龚胜生. 江汉—洞庭湖平原湿地的历史变迁与可持续利用[J]. 长江流域资源与环境, 2002, 11(6): 569-574.
- [23] Li Y W, Zhao J X, Li C A, et al. Cadmium and clay mineral analysis of late Pliocene-Pleistocene deposits from Jiangnan Basin, central China: Implications for sedimentary provenance and evolution of the Yangtze River[J]. Quaternary International, 2021, 598: 1-14.
- [24] Zhu K, Ran Y G, Ma M H, et al. Ameliorating soil structure for the reservoir riparian: The influences of land use and dam-triggered flooding on soil aggregates[J]. Soil and Tillage Research, 2022, 216: 105263.
- [25] Li H C, Van den Bulcke J, Kibler P, et al. Soil textural control on moisture distribution at the microscale and its effect on added particulate organic matter mineralization[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2022, 172: 108777.
- [26] 曾锐, 张陶, 蒲俊兵, 等. 岩溶断陷盆地不同地貌部位土壤水时空分布规律及其影响因素[J]. 水土保持研究, 2021, 28(1): 50-57.
- [27] 刘畅, 张建军, 张海博, 等. 晋西黄土区退耕还林后土壤入渗特征及土壤质量评价[J]. 水土保持学报, 2021, 35(5): 101-107.
- [28] 李泽霞, 陈爱华, 董彦丽. 灌溉方式对半干旱区侧柏人工林土壤理化性质的影响[J]. 节水灌溉, 2022(3): 61-66, 74.
- [29] Sokołowska J, Józefowska A, Woźnica K, et al. Succession from meadow to mature forest: Impacts on soil biological, chemical and physical properties—Evidence from the Pieniny Mountains, Poland[J]. CATENA, 2020, 189: 104503.
- [30] 王紫薇, 邵明安, 黄来明, 等. 青海省东部不同土地利用方式下土壤饱和导水率分布及其影响因素[J]. 水土保持学报, 2021, 35(3): 150-155.
- [31] 张君, 易军, 刘目兴, 等. 不同水耕年限稻田土壤水分渗漏与保持特征[J]. 水土保持学报, 2016, 30(6): 90-95.
- [32] Hu W, Thomas S, Müller K, et al. Maize cropping degrades soil hydraulic properties relative to grazed pasture in two contrasting soils[J]. Geoderma, 2022, 421: 115912.
- [33] 娄淑兰, 刘目兴, 易军, 等. 三峡山地不同类型植被和坡位对土壤水文功能的影响[J]. 生态学报, 2019, 39(13): 4844-4854.
- [34] 牛晓倩, 贾小旭, 刘成功, 等. 关中平原农田土壤水力参数空间分异与模拟[J]. 水土保持学报, 2021, 35(1): 198-204.
- [35] Patra S, Kaushal R, Singh D, et al. Surface soil hydraulic conductivity and macro-pore characteristics as affected by four bamboo species in North-Western Himalaya, India[J]. Ecohydrology & Hydrobiology, 2022, 22(1): 188-196.