
鄱阳湖典型洲滩湿地 土壤质地与水分特征参数研究

李云良^{1,2*} 许秀丽¹ 赵贵章³ 姚静¹ 张奇^{1,4}

(1. 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 流域地理学重点实验室,

江苏 南京 210008;

2. 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210098;

3. 华北水利水电大学, 河南 郑州 450045;

4. 江西师范大学, 鄱阳湖湿地与流域研究教育部重点实验室,

江西 南昌 330022)

【摘要】 频繁干湿交替增强了鄱阳湖洲滩土壤水对湿地系统的动态调节作用。以鄱阳湖吴城国家自然保护区的一个典型洲滩湿地为研究区, 调查分析了土壤质地沿高程梯度的分布特征, 确定了不同土壤质地的水分特征参数, 并阐述了土壤质地与其水分特征参数的空间异质性。结果发现: 该洲滩湿地主要分布砂土、粉壤土和粘土三种类型。水平断面方向上, 粒径较粗的砂土和粉壤土主要分布在高位滩地, 而粒径相对较细的粘土主要分布在近湖区开阔水

收稿日期: 2015-12-09; **修回日期:** 2016-02-20

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(2012CB417003) [The National Basic Research Program of China (2012CB417003)]; 国家自然科学基金项目(41401031) [The National Natural Science Foundation of China (41401031)]; 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室开放研究基金(2014491611) [The Open Foundation of State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering(2014491611)]; 江西省重大生态安全问题监控协同创新中心项目(JXS-EW-00) [The Collaborative Innovation Center for Major Ecological Security Issues of Jiangxi Province and Monitoring Implementation (JXS-EW-00)]

作者简介: 李云良(1983~), 男, 助理研究员, 博士, 主要从事湖泊流域系统水文水动力过程模拟研究. E-mail: yunliangli@niglas.ac.cn

面的低位滩地；土壤剖面方向上，土壤质地呈现出固有分层特性。van Genuchten模型应用于鄱阳湖洲滩湿地土壤水分特征曲线拟合，证实了该模型在鄱阳湖洲滩湿地的适用性。模型结果表明土壤残余含水率 θ_r 变化约9%~19%，饱和含水率 θ_s 变化约42%~57%，土壤进气值的倒数 α 约0.01 cm⁻¹，水分特征曲线形状参数 n 介于1.11~4.65之间。土壤含水率变化对van Genuchten模型中参数 α 和 n 较为敏感，而对 θ_r 和 θ_s 的敏感性相对较弱。研究成果可为后续该区域以及全湖区湿地生态水文模型的构建和发展提供背景信息和参数资料。

【关键词】 土壤质地；van Genuchten模型；水分特征曲线；空间异质性；鄱阳湖湿地

【中图分类号】 P331.3

【文献标识码】 A

【文章编号】 1004-8227(2016)08-1200-09

DOI: 10.11870/cjlyzyyhj201608006

湿地是处于陆地生态系统和水生生态系统之间的过渡带，具有独特的水文特征，使得湿地在调蓄洪水、涵养水源、净化水质、调节区域气候、降解污染物以及维护生态系统平衡等多方面均有着不可替代的重要作用^[1]。湖泊湿地是我国南方湿润区分布最为广泛的湿地类型，具有季节性或常年积水、生长或栖息喜湿动植物等基本特征，其是自然界最富生物多样性的生态景观和人类最重要的生存环境之一^[2, 3]。由于湿地土壤特殊的水文物理性质，使土壤成为湿地系统最为敏感和最为重要的“天然蓄水库”，不但在湿地气候-植被-地表水-土壤水-地下水的界面迁移与转化过程中起着重要枢纽作用，同时也对湿地系统水循环过程起动态调节作用^[4, 4]。湿地土壤水的贮存与释放过程使得湿地呈现出干湿交替变化，影响了湿地土壤的氧化还原环境、不同微生物生活状况以及湿地生物地球化学元素循环的介质环境，这些均将间接影响植被的生长过程^[5, 6]。尽管水文条件是控制湿地生态系统演变、保证湿地生态系统健康的决定性因素^[7, 8]，但湿地土壤水文情势则制约着湿地土壤环境的生物、物理和化学特征，在湖泊湿地水循环过程中起着尤为重要的影响作用^[9, 10]。土壤水是湿地水循环组分中输入和输出通量最多的混合水体，影响了其与周围不同水源的水力联系^[11]。土壤质地及其结构特征是决定土壤蓄水能力的直接因素，致使土壤水分具有时空高度变异的分布特征^[12]。

鄱阳湖是我国乃至国际重要湿地，在涵养水源、调节气候、提供生物栖息地等方面发挥着重要作用。目前针对鄱阳湖湿地研究主要集中在如下几方面：(1)湿地植被-湖水位响应关系的定性描述^[13, 14]；(2)复合水情影响下湿地植被分布差异与成因分析^[15, 16]；(3)湿地主要物种与其生长状况的季节变化特征研究^[17, 18]；(4)湿地不同植被带土壤有机质、营养元素及微生物的变化趋势解析^[6, 19]；(5)湿地土壤水分-植被生境之间的响应机制阐释^[20, 21]。土壤水文过程一直是湿地研究中最为基础、最为关键的过程，但也是目前研究中最为薄弱的环节^[22]。关于鄱阳湖湿地水文过程的研究，已有学者采用基于物理机制的湿地模型来重点探讨水文-植被相互作用机制^[20, 21]，表明鄱阳湖湿地生态水文模型发展和土壤水文模拟研究获得了一定重视。虽然这些研究抓住了湖泊水位、降雨和蒸发等主要影响因素，但相关成果在内部过程与机制阐释方面尚显不足，由此带来的局限性和片面性主要体现在土壤水分传输过程的刻画。无论是基于野外原位观测的调查分析，还是以土壤水文过程为核心的湿地生态水文的模拟分析，因研究尺度所限往往忽视土壤质地及其参数的变异性，高度的概化不仅造成模型在系统关键组分刻画上的严重失真，也给土壤水分动态和土壤水量化研究带来很大不确定性^[22~24]。

基于土壤水在湿地系统中的特殊地位和贡献，本文拟解决以下两个主要问题或研究目标：(1)在区域研究的尺度上，鄱阳湖湿地土壤质地分布特征如何？是否存在显著差异性或呈现高度异质性？本文主要以鄱阳湖典型湿地断面为研究对象，通过野外原位采样与室内测试分析等常规手段来查明湿地土壤质地与其分布特征；(2)不同土壤质地的水分特征参数如何确定？土壤水分变化对哪些参数较为敏感？考虑到同一土壤质地的水分特征参数具有空间移植性，即典型断面的区域研究也具有大尺度研究的普适性，本文主要通过实验数据并采用非线性拟合来确定不同土壤质地的水分特征曲线，进而分析土壤水分变化对参数的敏感性。期望本文所开展的研究可为后续该区域乃至全湖区湿地生态水文模型构建和发展提供基础资料，最终来阐释湖泊湿地生态水文过程对水位生消变化的响应机制。

1 材料与方法

1.1 典型湿地断面与水情特征

鄱阳湖典型洲滩湿地位于江西省永修县吴城镇以北(N 29.24283, E 116.00303; 见图 1a), 属于自然生态系统。该断面地形由陆地向湖区逐渐倾斜, 整体走向与湖水退水方向一致, 断面长约 1.2 km(见图 1b)。湿地断面最高处毗邻赣江, 河水冲刷严重, 主要呈陡坎台地, 高程约为 18.4 m, 而近湖区地势变缓, 高程约为 11.2 m, 断面平均坡度由 2%逐渐过渡为 0.2%^[21]。依据该湿地气象—水文联合系统监测结果, 该断面年降水量约为 1746 mm, 年内降水主要集中在 3~5 月份, 占全年总降水量的 53%(由图 1b 微气象站观测所得)。年平均气温约为 17 °C, 平均湿度约 80%, 最低气温约为 -5 °C 且出现在 1 月份, 最高气温出现在 7 月份约为 36 °C(由微气象站观测所得)。枯水期洲滩出露, 植被大量发育, 丰水期水位上涨, 湿地断面有着明显的季节性干湿交替现象(图 1c 和图 1d)。因此, 该断面受鄱阳湖高度动态的水位生消变化影响显著(由图 1b 湖水水位观测所得), 导致不同植被带内表层土壤含水量(由图 1b 土壤水传感器观测所得)沿高程梯度的变化幅度约 10%~50%(图 2a)。洲滩地下水水位季节性差异显著(由图 1b 地下水水位观测所得), 地下水水位年内变化呈单峰型, 1 月份地下水最大埋深可达 9 m, 丰水期 7~9 月份地下水水位最高时可出露至地表以上约 1.5 m, 此时该湖泊湿地被上涨湖水淹没(图 2b)。从远离湖区的高位洲滩至近湖区低洼地带, 植被垂直性分带明显, 主要包括中生性草甸、挺水植被、湿生植被、沉水植被等主要植被类型, 五个典型植被样带依次为藜蒿样带(标识为 I)、芦苇样带(II)、灰化藁草样带(III)、藨草样带(IV号)和泥滩/水域(V)(见图 1b), 具有鄱阳湖典型的洲滩湿地植被分布特征^[21]。

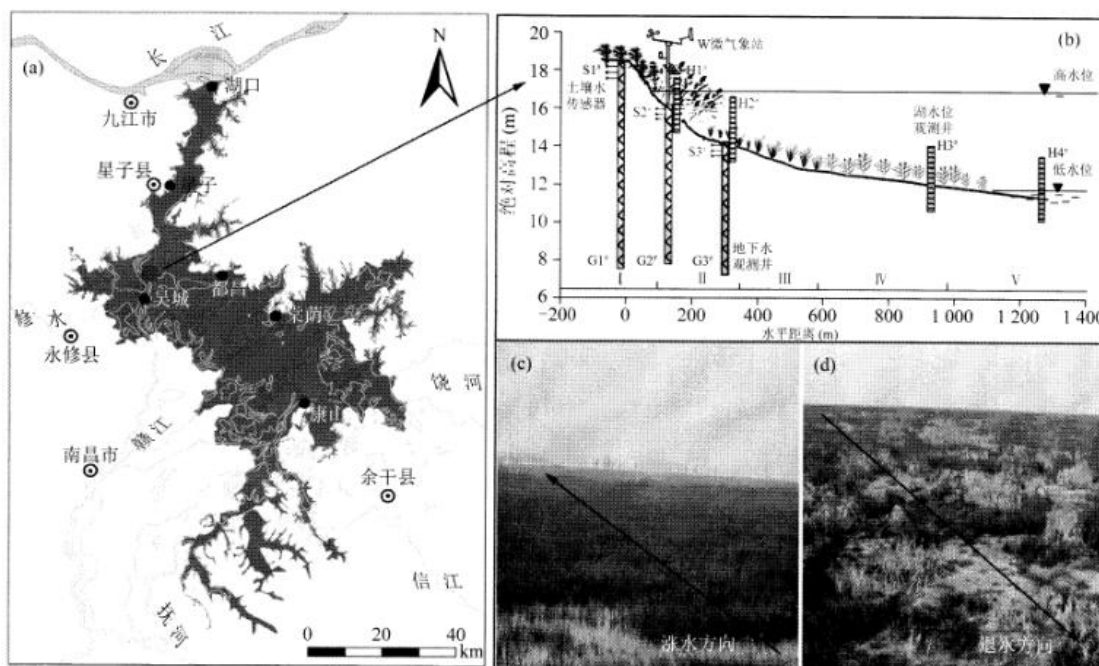


图 1 鄱阳湖典型洲滩湿地示意图(a-b)和洲滩湿地涨退水时段水情(c-d)

Fig.1 Schematic Diagram of Typical Wetland Section in Poyang Lake (a-b) and Hydrological Regime for the Rising and Falling Water Level Periods of the Wetland (c-d)

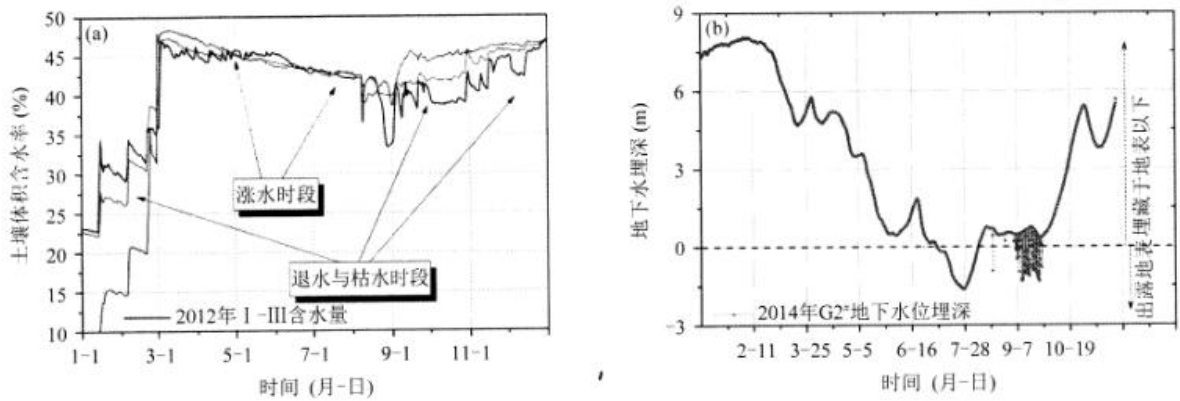


图2 鄱阳湖洲滩湿地典型样带土壤含水量(a)和地下水埋深变化图(b)

Fig.2 Time-series Variations in (a) Soil Water Content and (b) Groundwater Depth in the Typical Wetland of Poyang Lake

1.2 野外原位采样

土壤样品采集时间集中于2014年3月中旬。为使采集土壤样品能最大程度反应该区域的实际情况，进而调查土壤物理性状的空间变异特征，采用野外土钻法进行水平和垂直方向上的样品采集。

水平断面方向上，结合野外典型植被分布情况(见图1b)，每个典型植被带内设计两个采样点，依次为藜蒿样带(水平位置为0、60 m)、芦苇样带(130、210 m)、藎草样带(320、470 m)、藓草样带(700、870 m)和泥滩样带(1 000、1 150 m)。

垂直剖面方向上，为尽可能反应土壤质地的垂向结构与分层，土壤样品的采样间距约变化为10~30 cm，最大采样深度约4 m，主要根据土壤层厚度和地下水位埋深而定。所有土壤样品采用铝盒和环刀封装并取重复样，带回实验室进行前处理与测试分析。

1.3 参数测定与拟合方法

土壤粒径测定采用英国马尔文Mastersizer3 000激光衍射粒度分析仪，动态测量范围宽为0.01~3 500 μm，重复性误差≤±0.5%，准确性误差≤±1%；土壤水分特征曲线采用德国公司生产的Ku-pF非饱和和导水率测定系统(土壤水分脱湿过程)。该系统主要特点是连续记录张力计所在点位的水分运移，自动计算pF和Ku数值，可以同时测定非饱和和导水率及水分特征曲线。

常见的描述土壤水分特征曲线的经验公式主要有 Garden^[25]、Brooks-Corey^[26]、Campbell^[27]、vanGenuchten^[28]和 Garder-Russo^[29]等主要类型。本文采用被国内外广泛认可的 van Genuchten 模型，即：

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

其中： θ 为土壤体积含水率(cm^3/cm^3)； h 为负压水头(cm)； θ_s 为土壤饱和含水率(cm^3/cm^3)； θ_r 为土壤残余含水率(cm^3/cm^3)； α 为土壤进气值的倒数(cm^{-1})； n 、 m 为拟合参数($m=1-1/n$)。对于选取的 van Genuchten 模型，通常采用非线性最小二乘法来拟合含水率 θ - 负压 h 观测数据序列，并基于 MATLAB 软件平台来实现水分特征曲线的参数拟合^[30]。

2 结果分析

2.1 湿地断面土壤质地与分布特征

根据测试结果(依据我国土壤质地分类),整个湿地断面界定为三种主要的土壤质地(表 1),粒径由粗到细依次为砂土(干容重约 1.30 g/cm³)、粉壤土(干容重约 1.15 g/cm³)和粘土(干容重约 1.40g/cm³)。根据表 1 土壤质地测试结果,文中将湿地断面不同点位的土壤质地绘制于图 3,以此清晰展现研究区二维土壤质地剖面结构及其分布特征。从剖面垂直方向上来看,各个观测点的土壤分层较为明显,最多可以划分为三个层次,充分体现了土壤结构的垂向变异性。但部分观测点在采样深度范围内呈现一定的均质性,主要分布在藜蒿样带(60 m)、藎草样带(320 和 470 m)和藎草样带(870 m)。从水平断面方向上来看,沿高程梯度的土壤质地差异较为明显,这种水平方向的异质性很可能是由鄱阳湖水位的生消变化过程和长时期的沉积过程共同所致^[31]。由图 3 还可以发现,粒径相对较粗的砂土和粉壤土主要分布在高位滩地,而粒径较细的粘土主要分布在毗邻大湖面的地势低洼处(图 3),这也与先前的定性认识基本一致^[21]。

表 1 鄱阳湖典型洲滩湿地土壤质地测试结果

Tab.1 Testing Results of Soil Textures in Typical Wetland Section of Poyang Lake

采样点描述	水平位置(m)	采样深度(cm)	粒径(um)	土壤质地
藜蒿样带	0	0~20	110	砂土
		20~80	94.1~95.8	粉壤土
		80~370	107~220	砂土
藜蒿样带	60	0~200	102~272	砂土
		0~100	60.2~99	粉壤土
芦苇样带	130	100~120	118	砂土
		120~160	94.7~95.8	粉壤土
芦苇样带	210	0~20	77.1	粉壤土
		20~120	104~124	砂土
藎草样带	320	0~120	83.6~99.8	粉壤土
藎草样带	470	0~80	34.6~92.8	粉壤土
		0~40	10.9~27	粉壤土
藎草样带	700	40~80	103~120	砂土
		80~120	90.8~97.1	粉壤土
藎草样带	870	0~120	151~203	砂土
		0~80	48.1~64.9	粉壤土
泥滩样带	1 000	80~100	29.9	粘土
		0~20	46.5	粉壤土
泥滩样带	1 150	20~40	18.7	粘土
		40~120	38.3~68.3	粉壤土

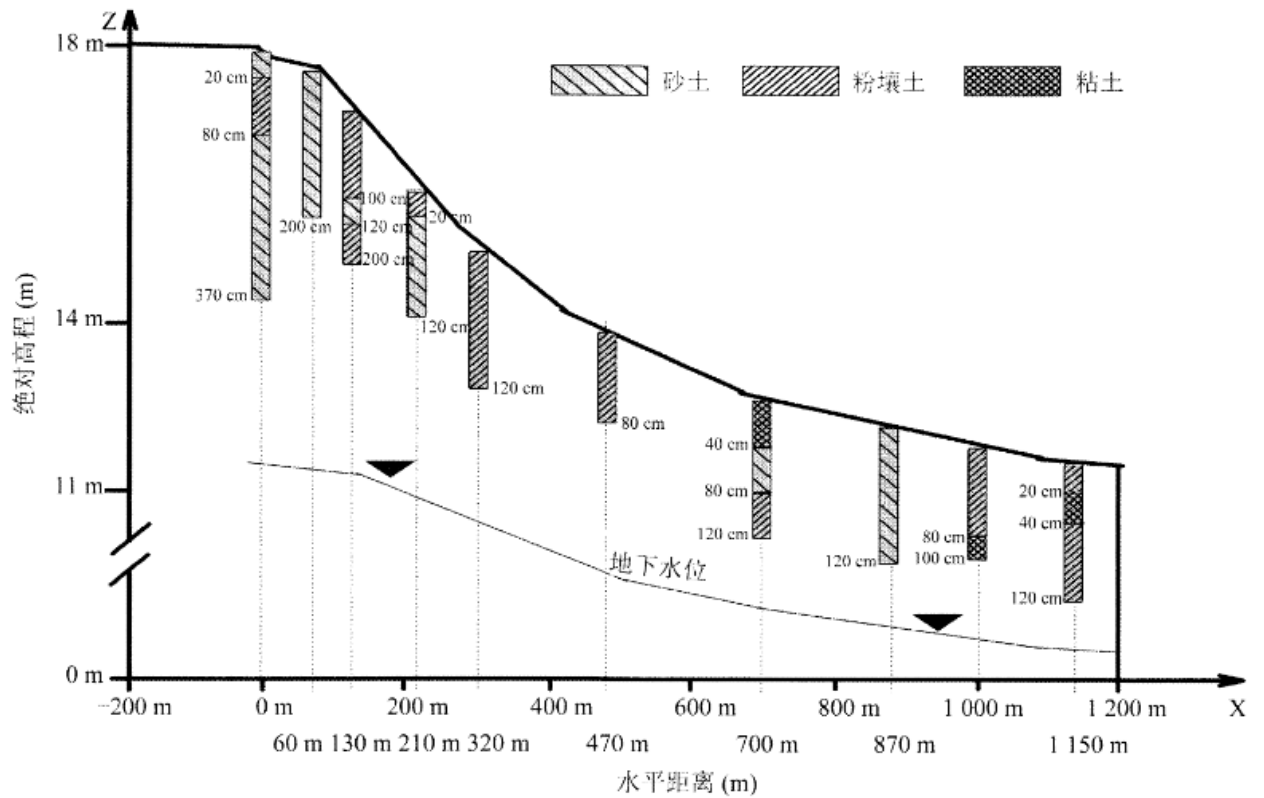


图3 鄱阳湖典型洲滩湿地土壤质地二维剖面结构图

Fig.3 Two-dimensional Profile of Soil Textures in the Typical Wetland Section of Poyang Lake

2.2 土壤水分特征曲线与拟合参数

通过上述分析可知，该典型洲滩湿地断面在空间尺度上大致可分为砂土、粉壤土和粘土三种主要土壤质地。尽管同一土壤质地存在于断面的不同水平位置和深度(见图3)，但考虑到区域尺度同一土壤质地的物理参数具有空间可移植性(或者说差别不大)，本文主要针对这三种土壤质地来分析研究其水分特征曲线的变化特征。因受实验条件和测试时间所限，本文的砂土样品取自藜蒿样带，粉壤土样品取自藜蒿和芦苇样带，且每种质地分别取两个重复样(砂土和粉壤土；见图4和表2)。因淤泥质土壤含水率较高难以获取原状样，本文实际上只获取了泥滩样带内一个扰动样的测试结果(见图4和表2)。从图4可以看出，van Genuchten模型能够很好拟合不同土壤质地的水分特征曲线，观测值与拟合值的相关系数可达0.99，可见拟合精度较高，满足应用需求。从曲线形态特征而言，三种土壤质地的水分特征曲线均存在明显的拐点，这也充分表明了van Genuchten模型可以成功应用于后续鄱阳湖湿地土壤水分运移研究。对比图4a和图4b，砂土的饱和含水率约为43%，残余含水率接近15%。对比图4c和图4d可知，粉壤土的饱和含水率可达50%，而残余含水率约10%。实验发现，粘土的饱和含水率高达48%，但粘土的室内土壤水分脱湿过程较为困难(水分难以排出)，实验手段仍难以获取其残余含水率(见图4e)，需进一步通过参数的非线性拟合来获取。表2汇总了三种土壤质地(五组样品)的水分特征曲线参数拟合结果，由此可见，鄱阳湖洲滩湿地土壤的残余含水量 θ_r 变化范围约9%~19%，饱和含水量 θ_s 变化范围约42%~57%，土壤进气的值倒数 α 变化幅度较小(平均值约0.01 cm⁻¹)，而水分特征曲线形状参数 n 变化于1.11-4.65之间。

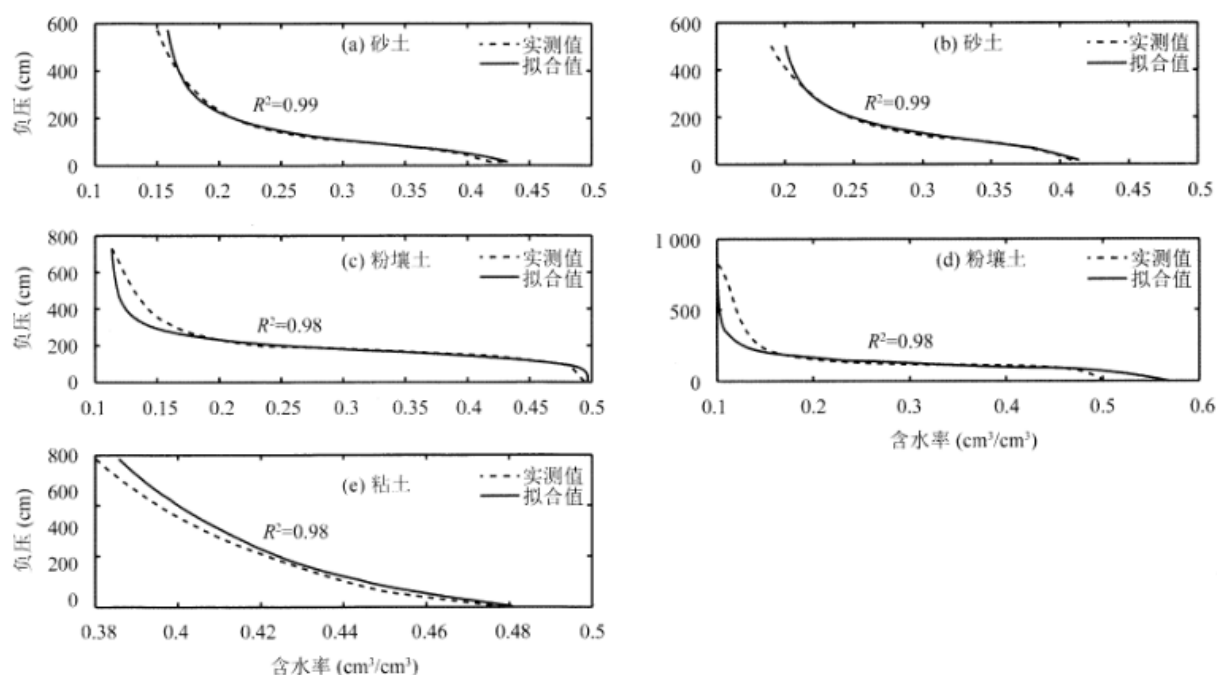


图 4 鄱阳湖典型洲滩湿地三种土壤质地的水分特征曲线拟合结果

Fig.4 Fitting Results of Water Retention Curves for the Three Soil Textures in Poyang Lake wetland

表 2 土壤水分特征曲线参数拟合表

Tab.2 Fitting Parameters of Water Retention Curves for Different Soil Textures

编号	采样点描述	拟合参数			
		$\theta_r(\text{cm}^3/\text{cm}^3)$	$\theta_s(\text{cm}^3/\text{cm}^3)$	$\alpha(\text{cm}^{-1})$	$n(-)$
砂土1	藜蒿样带: 0 m; 采样深度: 0~20 cm; 原状样	0.15	0.43	0.01	2.96
砂土2	藜蒿样带: 0 m; 采样深度: 0~20 cm; 原状样	0.19	0.42	0.01	2.99
粉壤土1	藜蒿样带: 0 m; 采样深度: 20~80 cm; 原状样	0.11	0.52	0.006	4.65
粉壤土2	芦苇样带: 130 m; 采样深度: 0~20 cm; 原状样	0.10	0.57	0.01	4.35
粘土	泥滩样带: 1150 m; 采样深度: 20~40 cm; 扰动样	0.09	0.48	0.012	1.11

容水度 $C(h)$ 是土壤水分特征曲线的导数, 即单位基质势的变化引起的土壤含水率的变化。根据 van Genuchten 模型表征的水分特征曲线, 并对该模型进行求导可推求土壤水的一个重要参数容水度 (参数意义同公式(1))。

$$C(h) = -d\theta/d|h| = \frac{(\theta_s - \theta_r) m n \alpha |\alpha h|^{n-1}}{[1 + |\alpha h|^n]^{m+1}} \quad (2)$$

根据图 4 和表 2 参数拟合结果, 由公式(2)便可推求相应三种土壤质地(五组样品)的容水度方程和变化曲线(见图 5)。由图 5 可以得出, 不同土壤的容水度随着负压值(吸力)的增加, 呈现出先增加后减小的变化趋势。也就是说, 不同土壤质地的容水度曲线均呈单峰型分布特征, 但粘土的容水度曲线变化更为平缓。从平均意义而言, 在负压值小于 150 cm 时, 不同土壤质地的容水度随着负压增加而迅速增加; 当负压值大于 150 cm 时, 容水度均随负压值增加而缓慢下降; 当负压值超过 500cm 时, 不同土壤质地的容水度均变化较小, 并趋于稳定。

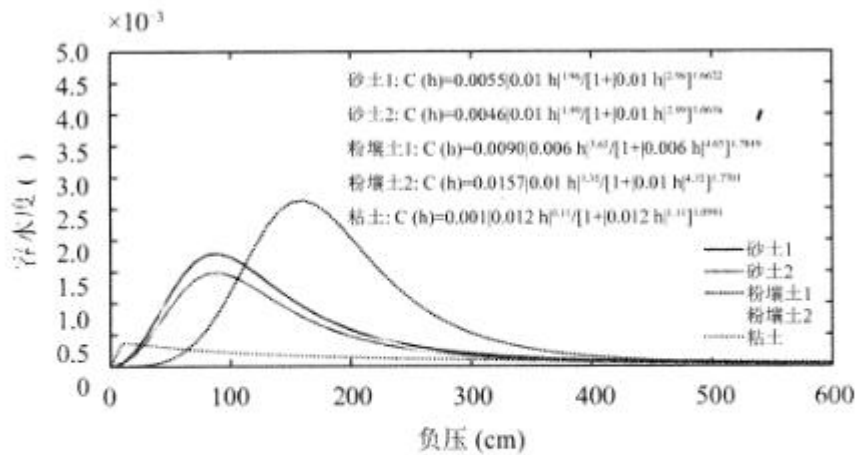


图 5 不同土壤质地的容水度曲线和方程

Fig.5 Water Capacity Curves and associated Fitting Equations for Different Soil Textures

2.3 参数敏感性分析

敏感性分析目的是为了对已经识别过的模型的不确定性进行量化。敏感性分析的典型做法是同一时间内只改变一个参数值，保持其它参数值不变，以观察所改变参数对结果的影响。针对上述不同土壤质地的水分特征曲线，本文将 vanGenuchten 模型中四个关键参数 (θ_r 、 θ_s 、 α 和 n) 进行敏感性分析，分别设定参数值变化幅度为 -10%，-5%，5% 和 10%。本文采用一个综合性敏感性评价指数^[32]，通过土壤含水率变化来评价参数的敏感性。

$$\text{Sensitivity}(\%) = \frac{1}{N_p} \sum_{P_i} \left(\frac{\text{Change In Output}(\%)}{\text{Change In Input}(\%)} \right) \times 100 \quad (3)$$

式中： N_p 代表敏感性测试组数目(本文共四种方案)， P_i 表示测试组1-4，通过计算土壤含水率的平均相对变化便可获取敏感性指数。

敏感性分析表明，土壤含水率变化对 vanGenuchten 模型中参数 α 最为敏感，其次是参数 n ，而其对土壤残余含水率 θ_r 和饱和含水率 θ_s 的敏感性则相对较弱(图 6)。

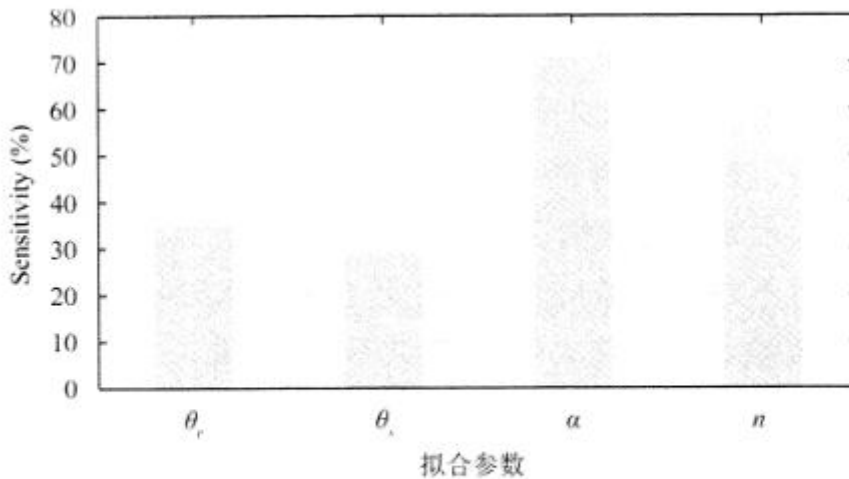


图 6 参数敏感性分析结果

Fig.6 Results of Parameter Sensitivity Analysis

3 结论与讨论

鄱阳湖高度动态的水位变化导致湿地系统呈现多因素综合作用的复合水情特征，而湿地土壤水分的迁移转化过程对湿地系统诸多方面有着动态调节作用，从而决定了土壤在湿地系统研究中的重要地位。本文主要定位于鄱阳湖典型洲滩湿地断面，以土壤质地和土壤水分特征参数为切入点，重点调查分析土壤质地的空间分布特征，确定不同土壤质地的水分特征曲线，获取土壤关键的水分特征参数，评价土壤水分对参数的敏感性，进而为鄱阳湖湿地生态水文模型的构建和发展提供基础背景资料和参数信息。

鄱阳湖典型洲滩湿地广泛分布砂土、粉壤土和粘土三种主要土壤质地类型。粒径相对较粗的砂土和粉壤土主要分布在高位滩地，而粒径较细的粘土主要分布在近水面地势低洼处。经典的vanGenuchten模型证实了其在鄱阳湖典型洲滩湿地的适用性。模拟结果表明，鄱阳湖洲滩湿地土壤残余含水率 θ_r 变化范围约9%~19%，饱和含水率 θ_s 变化约42%~57%，土壤进气值的倒数 α 变化幅度较小约为0.01 cm^{-1} ，水分特征曲线形状参数 n 变化范围介于1.11~4.65。敏感性分析表明，土壤含水率变化对van Genuchten模型中参数 α 和 n 非常敏感，而对 θ_r 和 θ_s 的敏感性相对较弱。不同土壤的容水度随着负压值的增加均呈先增加后减小的变化趋势。平均意义上，在负压值小于150 cm 时，容水度随着负压值增加而迅速增加；当负压值大于150 cm 时，容水度均随负压值增加而缓慢下降；当负压值超过500 cm 时，不同土壤质地的容水度均变化较小并趋于稳定。

在本文所采用的van Genuchten模型中，参数 θ_r 为土壤水分特征曲线导数等于0时的土壤含水率，即 $d\theta/dh=0$ 时的土壤含水率。在实际应用中，一般取凋萎点处的含水率，即用凋萎系数作为残余含水率。一般情况下 $0 < \theta_r < \theta_s$ ， θ_r 随着土壤质地不同而不同。参数 n 的大小决定了土壤水分特征曲线的坡度，当 n 较大时，曲线较为平缓；当 n 较小时，曲线坡度较陡。不同质地的土壤进气值 α 不同，一般重质粘性土壤进气值较大；轻质土壤或结构良好的土壤进气值较小，或没有明显的进气值，因此很难从曲线图上获得该参数值。参数 α 值上限一般为0.05，下限非常接近于0值。一般来说，粘性土中的水分不如砂性土的水分有效，即砂性土中的水分能有效地被植物根系吸收，而粘性土中则因其吸力过高导致水分不能被植被吸收，或者说土壤中的水分对植被是完全无效的。鄱阳湖典型洲滩的植被沿高程梯度呈带状分布，这种极具典型的分布特征可能与土壤质地的分布有密切关系。

土壤水分特征曲线是研究土壤水分运动和调节利用土壤水等方面的最重要和最基本的工具。本文首次开展了鄱阳湖洲滩湿地水分特征曲线及其参数研究，更重要的是，水分特征曲线及其所推求的容水度，是用数学物理方法定量分析水分运动必不可

少的重要参数。本文研究结果对于分析鄱阳湖湿地土壤中水分的保持和运动,对于分析洲滩植被根系的发育和生长具有重要科学参考价值。

参考文献:

- [1] 吕宪国. 中国湿地与湿地研究[M]. 石家庄: 河北科学技术出版社, 2008.
- [2] United Nations Environment Programme, Wetlands International-Asia Pacific. Wetlands and integrated river basin management: experiences in Asia and the pacific[M]. Kuala Lumpur, 1997.
- [3] 李扬帆, 刘青松. 湿地与湿地保护[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2003.
- [4] 李胜男, 王根绪, 邓 伟. 湿地景观格局与水文过程研究进展[J]. 生态学杂志, 2008, 27(6): 1012 - 1020.
- [5] EDWARDS A L, LEE D W, RICHARDS J H. Responses to a fluctuating environment: effects of water depth on growth and biomass allocation in *Eleocharis cellulosa* Torr. (Cyperaceae)[J]. Canadian Journal of Botany, 2003, 81(9): 964 - 975.
- [6] 王晓龙, 徐立刚, 姚 鑫, 等. 鄱阳湖典型湿地植物群落土壤微生物量特征[J]. 生态学报, 2010, 30(18): 5033 - 5042.
- [7] SEABLOOM E W, VAN DER VALK A G, MOLONEY K A. The role of water depth and soil temperature in determining initial composition of prairie wetland coenoclines[J]. Plant Ecology, 1998, 138(2): 203 - 216.
- [8] FRASER L H, KARNEZIS J P. A comparative assessment of seedling survival and biomass accumulation for fourteen wetland plant species grown under minor water-depth differences[J]. Wetlands, 2005, 25(3): 520 - 530.
- [9] WILCOX D A, NICHOLS S J. The effects of water-level fluctuations on vegetation in a Lake Huron wetland[J]. Wetlands, 2008, 28(2): 487 - 501.
- [10] FENG X Q, ZHANG G X, XU Y J. Simulation of hydrological processes in the Zhalong wetland within a river basin, Northeast China[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2013, 17(7): 2797 - 2807.
- [11] LEIBUNDGUT C, MALOSZEWSKI P, KÜLLS C. Tracer in hydrology[M]. Singapore: John Wiley & Sons Ltd, 2009.
- [12] RAZZAGHI F, PLAUBORG F, JACOBSEN S E, et al. Effect of nitrogen and water availability of three soil types on yield, radiation use efficiency and evapotranspiration in field-grown quinoa[J]. Agricultural Water Management, 2012, 109: 20 - 29.
- [13] 胡振鹏, 葛 刚, 刘成林, 等. 鄱阳湖湿地植物生态系统结构及湖水水位对其影响研究[J]. 长江流域资源与环境, 2010, 19(6): 597 - 605.
- [14] 吴建东, 刘观华, 金杰峰, 等. 鄱阳湖秋季洲滩植物种类结构分析[J]. 江西科学, 2010, 28(4): 549 - 554.

-
- [15] 余莉, 何隆华, 张奇, 等. 基于Landsat-TM影像的鄱阳湖典型湿地动态变化研究[J]. 遥感信息, 2010(6): 48 - 54.
- [16] 葛刚, 赵安娜, 钟义勇, 等. 鄱阳湖洲滩优势植物种群的分布格局[J]. 湿地科学, 2011, 9(1): 19 - 25.
- [17] 于旭光, 鲁顺保, 江玉梅, 等. 鄱阳湖南矶山湿地灰化苔草季节生长动态研究[J]. 井冈山大学学报(自然科学版), 2010, 31(5): 129 - 132.
- [18] 吴琴, 尧波, 朱丽丽, 等. 鄱阳湖典型苔草湿地生物量季节变化及固碳功能评价[J]. 长江流域资源与环境, 2012, 21(2): 215 - 219.
- [19] 张全军, 于秀波, 钱建鑫, 等. 鄱阳湖南矶湿地优势植物群落及土壤有机质和营养元素分布特征[J]. 生态学报, 2012, 32(12): 3656 - 3669.
- [20] 许加星. 鄱阳湖典型洲滩湿地植被群落特征及与水土因子的关系研究[D]. 南京: 中国科学院南京地理与湖泊研究所硕士学位论文, 2013.
- [21] 许秀丽, 张奇, 李云良, 等. 鄱阳湖典型洲滩湿地土壤含水量和地下水位年内变化特征[J]. 湖泊科学, 2014, 26(2): 260 - 268.
- [22] MITSCH W J, GOSSELINK J G. Wetlands[M]. New York: Van Nostrand Reinhold, 2000.
- [23] 邓伟, 潘响亮, 栾兆擎. 湿地水文学研究进展[J]. 水科学进展, 2003, 14(4): 521 - 527.
- [24] GILVEAR D J, MCINNES R J. Wetland hydrological vulnerability and the use of classification procedures: a Scottish case study[J]. Journal of Environmental Management, 1994, 42(4): 403 - 414.
- [25] GARDNER W R, HILLEL D, BENYAMINI Y. Post-irrigation movement of soil water: 2. Simultaneous redistribution and evaporation[J]. Water Resources Research, 1970, 6(4): 1148 - 1153.
- [26] BROOKS R H, COREY A T. Hydraulic properties of porous media[M]. Fort Collins, Colorado: Colorado State University, 1964.
- [27] CAMPBELL G S. A simple method for determining unsaturated conductivity from moisture retention data[J]. Soil Science, 1974, 117(6): 311 - 314.
- [28] VAN GENUCHTEN M T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils[J]. Soil Science Society of America Journal, 1980, 44(5): 892 - 898.
- [29] RUSSO D. Determining soil hydraulic properties by parameter estimation: on the selection of a model for the hydraulic properties[J]. Water Resources Research, 1988, 24(3): 453 - 459.
- [30] 李云良. 降雨条件下非饱和带水-气二相流模拟研究[D]. 西安: 长安大学硕士学位论文, 2010.

[31] 朱海虹, 张 本. 鄱阳湖——水文、生物、沉积、湿地、开发整治[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 1997.

[32] LEE J H W, HUANG Y, DICKMAN M, et al. Neural network modelling of coastal algal blooms[J]. *Ecological Modelling*, 2003, 159(2/3): 179 - 201.