

# 鄱阳湖湿地地下水埋深及其与典型植被群落分布的关系

宋炎炎<sup>1</sup> 张 奇<sup>1\*</sup> 姜三元<sup>1</sup> 郭玉银<sup>2</sup>

(<sup>1</sup>中国科学院南京地理与湖泊研究所, 中国科学院流域地理学重点实验室, 南京 210008; <sup>2</sup>江西省鄱阳湖水文局, 江西九江 332800)

**摘 要** 地下水位直接影响土壤含水量, 进而影响湿地植被生长、分布和演替。本研究以鄱阳湖湿地为研究区, 基于 2014—2018 年地下水位野外定点观测数据, 分析湿地地下水年内与年际动态变化特征, 构建鄱阳湖湿地地下水数值模型, 分析地下水流动空间特征以及地下水埋深分布, 结合高斯回归方法分析地下水埋深与典型植被分布之间的关系。结果表明: 年内洲滩湿地地下水位呈明显的动态变化, 且地下水位与湖水位变化高度一致。地下水埋深年内变化与降水量季节性分布之间存在 1 个月的滞后。年际洲滩湿地地下水位由上游向下游呈减小趋势, 且上游洲滩湿地地下水埋深变幅较小 (0.1~1.1 m), 下游洲滩湿地地下水埋深变幅较大 (0.1~5.6 m)。研究区地下水流动场由上游丘陵地区指向下游地势相对平坦的湖区, 其流向与地形高程变化一致。研究区平均地下水埋深为 2.07 m, 且由远湖区至近湖区, 地下水埋深不断减小。苔草、芦苇、茵陈蒿群落生长的最适地下水埋深分别为 1.1、3.7、5.7 m; 典型植被的分布对地下水埋深梯度的响应差异显著; 茵陈蒿群落的生态幅宽大于苔草和芦苇群落; 3 种植被群落在地下水埋深 1.1~5.7 m 范围内出现生态位重叠现象, 其中, 苔草植被分布指数迅速减小, 芦苇植被分布指数先增大后减小, 茵陈蒿植被分布指数持续增至最大值, 在地下水埋深达到 5.7 m 后开始减小。

**关键词** 鄱阳湖湿地; 地下水位变化; 地下水流动场模拟; 湿地植被分布

**Groundwater depth and its relation with typical vegetation distribution in the Poyang Lake wetland, China.** SONG Yan-yan<sup>1</sup>, ZHANG Qi<sup>1\*</sup>, JIANG San-yuan<sup>1</sup>, GUO Yu-yin<sup>2</sup> (<sup>1</sup>Key Laboratory of Watershed Geographic Science, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; <sup>2</sup>Hydrology Bureau of Poyang Lake in Jiangxi Province, Jiujiang 332800, Jiangxi, China).

**Abstract:** Groundwater level directly affects soil water content, which in turn impacts the growth, distribution, and succession of wetland vegetation. Based on the groundwater monitoring data during 2014 to 2018, we analyzed the inter- and intra-annual variations in groundwater level of the wetland in Poyang Lake. We set up a groundwater numerical model to investigate the spatial patterns of groundwater flow field and distribution of groundwater depth. The relationship between groundwater depth and distribution of typical vegetation was explored with Gaussian regression analysis. Results showed that groundwater level of the wetland showed inter-annual variation, with the trend highly consistent to the changes in lake water level. There was a lag of one month between the inter-annual change in groundwater depth and the seasonal distribution of precipitation. The annual groundwater level showed a decreasing trend from upstream to downstream. The range of groundwater depth in upstream area of the wetland was narrower (0.1–1.1 m) than that of the downstream area (0.1–5.6 m). The groundwater flow field was directed from the hilly upstream area to the relatively flat

本文由国家自然科学基金项目 (41877166, 41771037) 和江西省水利厅科技项目 (201820YBKT02) 资助 This work was supported by the National Key Natural Science Foundation of China (41877166, 41771037) and the Science and Technology Project of Jiangxi Provincial Department of Water Resources (201820YBKT02).

2020-08-09 Received, 2020-11-03 Accepted.

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: qzhang@niglas.ac.cn

downstream lake area, with the flow direction consistent with the change in elevation. The groundwater depth decreased with decreasing distance to the lake water body, with an average value of 2.07 m in the study area. The optimal groundwater depths for the growth of *Carex*, *Phragmites australis*, and *Artemisia capillaris* communities were 1.1, 3.7 and 5.7 m, respectively. The typical vegetation distribution showed different responses to groundwater depth. The ecological width of *A. capillaris* communities was larger than the *Carex* and *P. australis* communities. The three types of community were overlapped in ecological niche when the groundwater depth ranged 1.1–5.7 m. The vegetation distribution index of *Carex* decreased rapidly, that of *P. australis* increased firstly and then decreased, while that of *A. capillaris* increased continually to the maximum and began to decrease when the groundwater depth reached 5.7 m.

**Key words:** Poyang Lake wetland; change in groundwater level; simulation of groundwater flow field; distribution of wetland vegetation.

湿地是水-陆系统相互作用形成的独特生态系统,在蓄洪防旱、调节气候、降解环境污染和保护生物多样性等方面发挥着重要作用<sup>[1]</sup>。湿地植被的生长和分布与地下水密切相关<sup>[2]</sup>,地下水向上补给和土壤水分的深层渗漏过程改变湿地生态系统的水分动态,继而影响湿地植被的生长和分布所需的水分、养分及氧化还原条件,而湿地植被通过蒸腾作用影响土壤水分和地下水位<sup>[3–4]</sup>。两者之间的相互作用与反馈机制维持着湿地生态系统的平衡。对于季节性洪泛湿地,周期性的水位波动使湿地系统在淹没-出露水文过程间交替变化,其中,水分条件是影响湿地植被生长和分布的关键因素<sup>[5]</sup>,湿地植被的分布往往随水分条件的带状变化而呈现出相应的空间分异<sup>[6]</sup>。因此,研究湿地地下水位及其与植被分布的关系对深入认识湿地系统水文与植被相互作用机制有重要意义。

鄱阳湖是长江中下游典型的通江湖泊及国际重要湿地,受流域五河来水与长江径流的相互作用,年内水位变幅约 8~22 m,在这种独特的水文节律下形成大面积水陆交替的洲滩湿地。鄱阳湖湿地不同类型的植被对水分需求响应的差异是影响其分布的重要因子<sup>[7]</sup>。近年来,随着气候变化和水利工程等人为因素的影响,洪水和干旱极端水文事件频发,湖水位的异常波动通过影响地下水位以及洲滩出露时间的提前和推迟,从而影响植被的生长分布及物种多样性<sup>[8]</sup>。研究表明,21 世纪以来鄱阳湖正处于水文干旱期,使得湿地植被系统正面临着生态退化、演替速率加快、物种多样性减小等一系列威胁<sup>[9]</sup>。因此,亟需从空间角度量化湿地地下水流场分布特征,深入完善对湿地系统地下水埋深规律的认识,是揭示湿地地下水与典型植被分布关系的关键,能够为鄱阳湖湿地生态系统的保护提供科学参考。

目前,关于鄱阳湖湿地地下水的研究已开展了大量工作,主要集中在地下水与湖水的相互作用<sup>[10–11]</sup>、环鄱阳湖浅层地下水水化学特征及影响因素<sup>[12]</sup>以及典型洲滩湿地地下水位、土壤水与植被分布的互馈关系方面<sup>[13–14]</sup>。这些研究为认识鄱阳湖湿地地下水变化规律及影响奠定了基础,但并未从定量角度揭示地下水流场分布特征。目前,鄱阳湖湿地水文与植被关系的研究尚有不足,仅基于控制试验探究不同地下水位条件或淹水深度对湿地植被生长的影响<sup>[15–16]</sup>,或通过野外调查和定位观测探究湿地水文要素及其与植被群落特征的关系<sup>[17–18]</sup>。这些研究多集中于湿地植被分布对多个水文要素的响应,或者地下水埋深与某种植被分布的关系<sup>[19]</sup>。在水资源丰富的湿润地区,地下水系统和长期的监测较为困难,因此,关于湿地地下水与植被分布的定量研究相对缺乏,特别是季节性洪泛湖泊湿地地下水与植被分布的关系研究较少。地下水数值模拟是定量研究地下水动态变化和评价地下水资源量的重要方法之一<sup>[20]</sup>,可精细刻画地下水流场分布和动态变化。已有学者通过构建地下水模型分析鄱阳湖枢纽建成后赣江三角洲不同水文条件下地下水位的变化情况<sup>[21]</sup>,然而,该研究只考虑枢纽运行后对地下水运动影响的时空变化规律,对鄱阳湖湿地地下水埋深变化与典型植被分布的关系方面的研究相对缺乏。

本研究基于鄱阳湖湿地地下水野外定点观测数据,结合地下水数值模拟,针对鄱阳湖湿地 3 种典型植被群落——芦苇 (*Phragmites australis*)、苔草 (*Carex*) 与茵陈蒿 (*Artemisia capillaris*),主要目标为:1) 分析典型洲滩湿地地下水位的时空变化,进一步揭示地下水与湖水、降水之间的动态响应;2) 定量揭示枯水期鄱阳湖湿地地下水流场与埋深的空

间分布规律; 3) 探求鄱阳湖区典型植被空间分布与湿地地下水埋深的关系。以期为鄱阳湖湿地植被演替和恢复以及湿地生态系统健康发展提供理论参考, 并为今后进一步建立季节性干湿交替的洪泛湿地地下水模型奠定了基础。

## 1 研究地区与研究方法

### 1.1 研究区概况

鄱阳湖位于江西省北部, 长江中下游交界处南岸, 是我国最大的天然吞吐型、季节性淡水湖泊, 其汇纳赣江、抚河、信江、饶河、修水五大河来水, 最终经湖盆调蓄后于湖口注入长江(图1)。鄱阳湖水位和水体面积有着十分显著且高度动态的季节变化, 丰、枯水期面积约 1000~3000 km<sup>2</sup>, 呈现“洪水一片, 枯水一线”的独特洪泛特征<sup>[22]</sup>。鄱阳湖流域三面环山, 由相互独立的 5 个子流域组成, 集水域面积 16.2 万 km<sup>2</sup>, 约占长江流域总面积的 9%; 流域地属亚热带湿润季风气候, 年均气温 17~19 °C, 降水丰富, 年降水量 1500~2000 mm。

本研究区为鄱阳湖流域下游的未控区, 指流域五河七口水文观测站(万家埠站、虎山站、赣江外洲站、抚河李家渡站、信江梅港站、修河虬津站、饶河渡峰坑站)以下的集水域, 总面积为 24023.6 km<sup>2</sup>, 约占鄱阳湖流域总面积的 15%(图1)。研究区陆地范围随鄱阳湖丰枯季节变化而变化, 丰水期陆地面积占五河七口以下流域总面积的 75%, 而枯水期陆地面积占五河七口以下流域总面积的 95%。研究区地势呈南高北低趋势, 地貌类型以平原(94.7%)为主, 其次有丘陵(4.8%)、山地(0.5%)等。地带性土壤分为红壤(39.9%)、水稻土(39.6%)、潮土(17.1%)、黄壤(1.9%)及其他类型土壤(1.5%)。土地利用类型以耕地为主(44.6%), 其次是林地(29.9%)、水体(17.0%)、居民用地(4.9%)和草地(3.6%)(图2)。

### 1.2 野外观测与数据获取

湖水位的观测数据主要来源于江西省水文局和长江水利委员会, 观测点位主要为都昌和康山水文站(图1)。鄱阳湖湿地地势整体由上游丘陵地区向下游湖区倾斜, 分别为高漫滩(草滩)–低漫滩(过渡

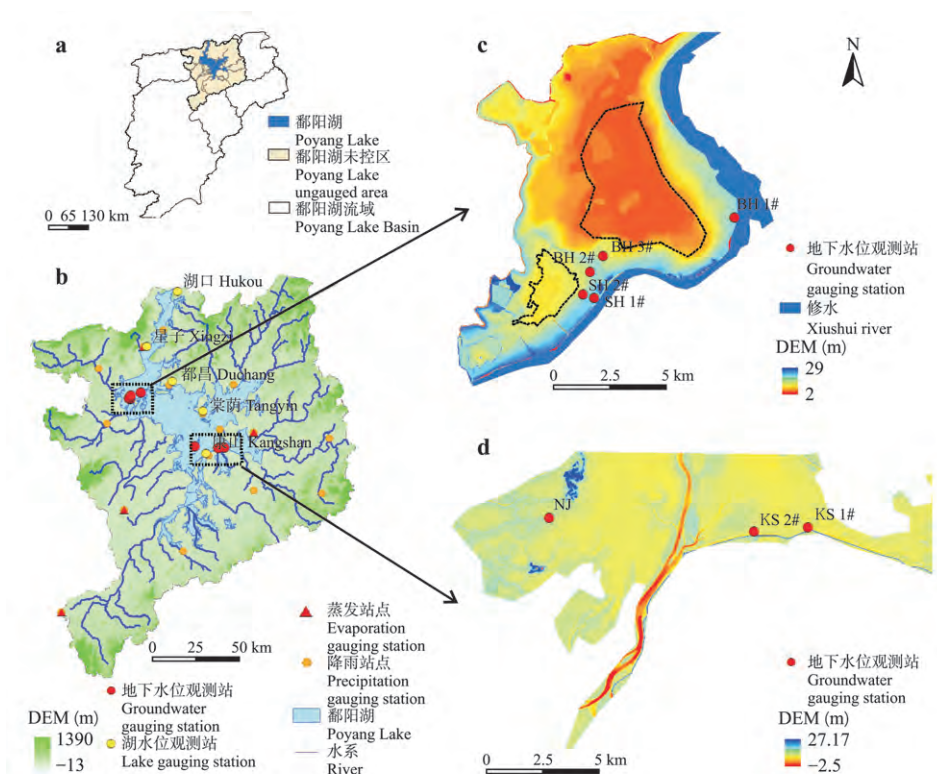


图1 研究区地理位置(a)、降雨、蒸发站点及湖水、地下水观测站点(b)、典型洲滩湿地地下水观测点(c、d)的空间分布

**Fig.1** Location of the study area (a), the spatial distribution of monitoring of precipitation, evaporation, lake water level, groundwater level observation points (b) and the observation points of groundwater within the typical Poyang Lake wetland (c, d).

SH 1#: 沙湖 1# Shahu lake 1#; SH 2#: 沙湖 2# Shahu lake 2#; BH 1#: 蚌湖 1# Banghu lake 1#; BH 2#: 蚌湖 2# Banghu lake 2#; BH 3#: 蚌湖 3# Banghu lake 3#; NJ: 南矶 Nanji; KS 1#: 康山 1# Kangshan 1#; KS 2#: 康山 2# Kangshan 2#. 下同 The same below. DEM: 数字高程模型 Digital elevation model.

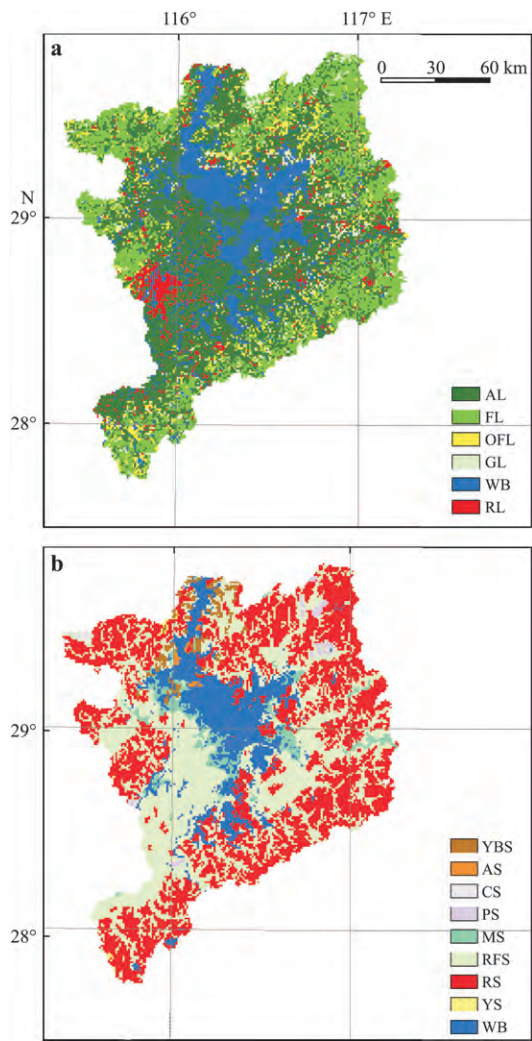


图 2 研究区土地利用类型 (a) 和土壤类型 (b) 的空间分布  
Fig.2 Spatial distribution of land use type (a) and soil type (b) in the study area.

AL: 耕地 Agricultural land; FL: 有林地 Forest land; OFL: 疏林地 Open forest land; GL: 草地 Grassland; WB: 水体 Water; RL: 居民用地 Residential land; YBS: 黄棕壤 Yellow brown soil; AS: 冲积土 Alluvial soil; CS: 石灰土 Calcareous soil; PS: 紫色土 Purple soil; MS: 潮土 Meadow soil; RFS: 水稻土 Raddy field soil; RS: 红壤 Red soil; YS: 黄壤 Yellow soil.

稀疏草滩和泥滩) -积水洼地等重要单元<sup>[23]</sup>。研究区内地下水埋深整体较浅,主要供水源为松散岩类孔隙水,地下水类型为潜水,含水层富水性能良好。本研究依据鄱阳湖湿地高程变化,选择上游南矶、康山及下游沙湖、蚌湖典型洲滩湿地布置 8 个地下水观测井(表 1)。于 2014—2018 年连续观测地下水位,采用加拿大生产的 Solinst Levellogger 水位仪自动观测,设定每隔 1 h 自动采集一个地下水位数据。

气象数据包括 2010—2018 年日降水量和蒸发量观测数据,降水量数据源于研究区内 10 个国家气象站逐日资料。蒸发量数据源于 3 个国家气象站逐

表 1 鄱阳湖典型洲滩湿地地下水观测井布置  
Table 1 Locations and simplified geological setting of monitoring points within the Poyang Lake floodplain wetland

| 观测井点<br>Observation well | 位置<br>Location         | 井深<br>Depth of well ( m ) | 优势种<br>Dominant species |
|--------------------------|------------------------|---------------------------|-------------------------|
| 沙湖 1#<br>Shahu lake 1#   | 29.17° N、<br>115.95° E | 11                        | 芦苇、苔草、茵陈蒿、狗牙根、蔺草        |
| 沙湖 2#<br>Shahu lake 2#   | 29.18° N、<br>115.94° E | 10                        | 芦苇、苔草、茵陈蒿               |
| 蚌湖 1#<br>Banghu lake 1#  | 29.21° N、<br>116.01° E | 14                        | 芦苇、苔草、茵陈蒿               |
| 蚌湖 2#<br>Banghu lake 2#  | 29.19° N、<br>115.95° E | 11                        | 芦苇、苔草、茵陈蒿               |
| 蚌湖 3#<br>Banghu lake 3#  | 29.19° N、<br>115.95° E | 3                         | 芦苇、苔草、茵陈蒿               |
| 南矶<br>Nanji              | 28.93° N、<br>116.34° E | 14                        | 芦苇、苔草、茵陈蒿、菰草、蔺草         |
| 康山 1#<br>Kangshan 1#     | 28.92° N、<br>116.51° E | 13                        | 芦苇、苔草、茵陈蒿、藜蒿、蔺草         |
| 康山 2#<br>Kangshan 2#     | 28.92° N、<br>116.47° E | 13                        | 芦苇、苔草、茵陈蒿、藜蒿、蔺草         |

日资料,星子站蒸发数据由中国科学院鄱阳湖湖泊湿地观测研究站 20 cm 口径器皿蒸发资料提供。所有数据均通过 95%置信度均一性检验。

下垫面数据包括研究区和湖区地形高程 (DEM)、土地利用、土壤类型数据及植被空间分布数据。研究区 DEM、土地利用数据源于中国科学院资源环境科学数据中心,分辨率为 1 km。湖区 DEM 来源于江西省水文局,分辨率为 5 m。土壤类型数据来源于江西省土壤调查,分辨率为 1 km;植被空间分布数据由 2013 年 12 月 24 日 Landsat 8 遥感影像 (LC81210402013358LGN00) 解译处理获得,网格分辨率为 30 m<sup>[24]</sup>。

1.3 地下水数值模型

1.3.1 概念模型 1) 含水层概化。研究区地貌形态包括山地、丘岗、平原和河谷等,五河下游地区在河流的侵蚀、搬运、堆积作用下,形成冲积平原,地势平缓,一般高程为 13~20 m<sup>[21]</sup>。研究区地下水埋深较浅,含水层岩性以细砂、中砂为主,一般厚度为 7~16 m,导水性良好,渗透系数可达 2~60 m·d<sup>-1</sup><sup>[21]</sup>。根据研究区地下水钻孔资料,含水层主要为第四系松散层孔隙水,潜水含水层间无稳定隔水层,且水力联系紧密,模型可概化为均质各向同性潜水含水层<sup>[21]</sup>。

2) 边界条件。研究区边界与鄱阳湖主湖区距离较远,能有效降低模型边界效应所带来的影响,且鄱阳湖未控区与流域水力联系尚不清楚。为降低模型边界不确定所带来的影响,本研究将模型侧边界

概化为隔水边界,即第二类零流量边界。鄱阳湖在丰枯水变化过程中始终存在永久水体,因此,根据2017年12月24日 Landsat 8 遥感影像提取永久水体边界。湖水位由上游至下游呈降低趋势,依据鄱阳湖水文站(星子、都昌、棠荫、康山站)水位,将水体划分为8段,依次给定相应的水头值。鄱阳湖永久水体可概化为第一类定水头边界。模型上边界为地面,为了使模型输入的地形数据更加准确可靠,采用湖区5 m 分辨率的地形数据对研究区1 km 分辨率地形数据进行修正。研究区底部边界为承压水的隔水顶板,渗透性差且与第四系含水层水力联系较弱,可概化为隔水边界。

3) 源汇项。研究区通过上边界接受大气降水的补给,因此,将上边界概化为垂向渗透边界,接受大气降水入渗,并以潜水蒸发的形式排泄。研究区地下水补给主要源于大气降水入渗补给及地表水体的补给,大气降水入渗补给采用入渗系数法估算。根据对研究区水文地质条件分析可知,降水入渗系数取值范围0.06~0.1<sup>[21]</sup>。排泄项以潜水蒸发及地下水向湖泊排泄为主。

**1.3.2 数学模型的构建** 根据水文地质条件概况和渗透系数分析,以浅层地下水的连续性方程和达西定律为基本原理,采用 MODFLOW2000<sup>[25]</sup> 建立研究区二维稳定流模型,地下水数学模型描述如下:

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial x} \left( K_{xx} \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_{yy} \frac{\partial H}{\partial y} \right) + W = 0 & (x, y) \in \Omega, t \geq 0 \\ h(x, y, t)|_{t=0} = H_0(x, y) & (x, y) \in \Omega \\ h(x, y, t)|_{S_1} = h_1(x, y) & (x, y) \in S_1, t > 0 \\ K \frac{\partial H}{\partial n} |_{S_2} = q(x, y, t) & (x, y) \in S_2, t > 0 \end{cases}$$

式中:  $\Omega$  表示研究区范围;  $K_{xx}$ 、 $K_{yy}$  分别为  $x$ 、 $y$  方向上的渗透系数 ( $\text{m} \cdot \text{d}^{-1}$ );  $H(x, y, t)$  为地下水待求水位 ( $\text{m}$ );  $W$  为流入汇或源项的水量;  $t$  为时间变量 ( $\text{d}$ );  $H_0(x, y)$  为含水层的初始水位 ( $\text{m}$ );  $h_1(x, y)$  为第一类边界水位值 ( $\text{m}$ );  $K$  为渗透系数;  $n$  为边界的法线方向;  $q(x, y, t)$  为第二类边界的单宽流量 ( $\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ ), 流入为正, 流出为负, 隔水边界为0;  $S_1$  和  $S_2$  为第一类定水头边界和第二类零流量边界。

#### 1.4 高斯回归分析

回归模型是建立因变量物种特征与自变量环境因子之间生态关系的重要方法。高斯回归模型可用于评价植被群落沿环境梯度的正态分布<sup>[26]</sup>。当某个环境因子随着植物种群特征增加到某一最大值,此时的环境因子成为最适环境因子,之后则随环境

因子的继续增加逐渐下降,直至消失。因此,本研究中高斯模型的方程表示如下:

$$y = y_0 + A \exp \left[ - \frac{(x-u)^2}{2t^2} \right]$$

式中:  $y$  为能够代表物种生态特征的一个指标,例如密度、盖度或生物量等,本研究中  $y$  为不同地下水埋深下各群落的分布面积;  $x$  为环境因子指标,本研究中指地下水埋深;  $u$  为物种对某种环境因子的最适值,即植被群落分布面积最大时对应的地下水埋深;  $t$  为该物种的耐受度。植被群落可生长的地下水位生态阈值区间为  $[u-2t, u+2t]$ , 最适生态阈值区间为  $[u-t, u+t]$ , 当地下水位处于阈值区间之外时,植被的生长受到明显抑制甚至被其他物种取代。

本研究利用高斯回归模型分析典型植被群落面积沿地下水埋深梯度的分布特征,首先统计了每种植被群落不同地下水埋深梯度内的分布面积,采用植被分布指数来描述该群落的相对多度。植被分布指数为某一群落不同环境梯度下的分布面积占总面积的比例。可用公式表示如下:

$$\omega = S_1 / S_2$$

式中:  $\omega$  为面积比(%) ;  $S_1$  为某一群落不同环境梯度下的分布面积 ( $\text{m}^2$ ) ;  $S_2$  为不同环境梯度的总面积 ( $\text{m}^2$ ) 。

#### 1.5 数据处理

利用 Excel 2016 软件统计日地下水位变化数据;利用 Surfer 15.0 软件进行插值分析生成地下水等值线图,分析研究区内浅层地下水埋深分布特征。通过 Origin 2018 软件构建高斯回归模型分析地下水埋深与典型植被分布的关系;利用 Origin 2018 及 ArcGIS 10.2 软件绘图。

### 2 结果与分析

#### 2.1 典型洲滩湿地地下水埋深的年内变化

基于观测资料较全的2016年鄱阳湖水文站(都昌、康山)水位、典型洲滩湿地下水位及都昌水文站降水量数据,分析鄱阳湖湿地地下水位动态变化。由图3可以看出,年内洲滩地下水位呈单峰变化,与湖泊水位变化过程线形态一致。其中,1—3月地下水位较低,4月开始大幅上涨,最高水位出现在7—8月,地下水位出露地表与湖水位一致,此时洲滩地下水与湖水保持完全的水力连通,直到9月下旬逐渐开始回落,洲滩地下水埋深开始增加,表现出明显的丰、枯水季节性变化。年内洲滩湿地地下水位(0.1~6.3 m)随湖水位(8~20 m)呈明显的季节变化。受洲滩地形影响,蚌湖3#地下水位高于其他地

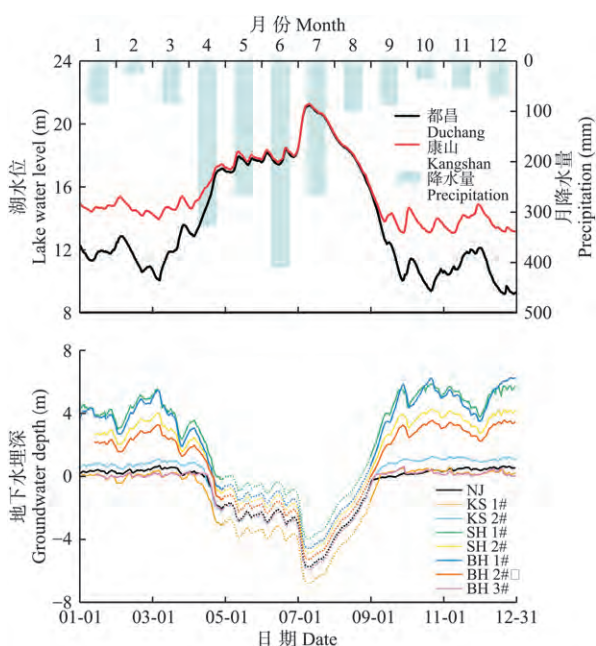


图3 地下水、降水、湖泊水位的时间序列变化

**Fig.3** Water level time series for groundwater, precipitation and lake water level.

地下水埋深的负值表示被淹情况 The negative values of groundwater depth indicated flooding. 下同 The same below. 下图中实线部分代表地下水埋深, 虚线部分代表地下水出露地表的水深 The solid line represented the depth of groundwater, and the dotted line represented the water depth of groundwater exposed to the surface water in the second figure.

下水观测井水位。上游南矾和康山洲滩地下水埋深(0.1~1.3 m)较下游沙湖和蚌湖洲滩地下水埋深(0.1~6.3 m)浅,且年内变化相对较小,表明鄱阳湖洲滩湿地地下水储量丰富且具有空间异质性特征。典型洲滩湿地枯水期的地下水埋深(可达6.3 m)明显高于丰水期(接近地表)。在丰水期,鄱阳湖洲滩湿地大面积被湖水淹没,5—8月地下水与湖水保持充分的水力连通,充分体现了鄱阳湖独特的洪泛水力特征。湖水位与地下水位呈极显著相关关系( $r=0.98$ ),表明鄱阳湖地下水位与湖水位变化动态响应过程一致。

采用2016年鄱阳湖典型洲滩地下水和都昌站降水数据,进一步分析地下水位与降水量的关系发现,即地下水位峰值出现时间较月降水量峰值滞后1个月。年内降水主要集中在4—7月,占全年降水量的55.0%,4月地下水位的涨幅占4—8月地下水涨幅的1/2;6月之后降水量大幅减少并趋于稳定,而地下水位在4月之后则快速上升,7—8月地下水位达到全年最高甚至出露地表。有研究发现,鄱阳湖主湖区-地下水相互作用的通量比子湖-地下水相互作用的通量高4~7倍<sup>[27]</sup>,可见鄱阳湖主湖区的水情变化可能对洲滩湿地地下水的补排转化起着更

为重要的影响作用。

## 2.2 典型洲滩湿地地下水埋深的年际变化

鄱阳湖是季节性的浅水湖泊,根据1953—2018年水文站(星子、都昌、棠阴和康山)的年均湖水位来看,历史最高水位为1998年的15.99 m,最低水位为2011年的11.83 m。采用频率分析典型水文年的代表性,可充分描述湖泊水文情势变化。2016、2018年平均水位分别为14.47、12.38 m,两者对应的频率分别为22.4%、97.0%,根据河川径流划分标准,2016年属于偏丰水年,2018年属于偏枯水年,因此,2014—2018年地下水观测资料具有一定代表性,能够表征研究区地下水位的动态变化特性。有研究表明,夏、秋季鄱阳湖水位受三峡运行的影响较大,而冬季枯水期影响较小<sup>[28]</sup>,因此,本研究仅分析枯水期(2月)地下水年际变化特征。由图4可以看出,2014—2018年2月,南矾和康山洲滩地下水埋深略微上升但基本保持稳定(0.1~1.8 m),沙湖和蚌湖洲滩地下水埋深波动较大(0.1~8.1 m),这与湖水位自上游康山站到下游的都昌站逐渐降低的趋势一致。南矾和康山1#观测点地下水埋深最浅,枯水期年均埋深分别为0.6、0.2 m,而康山2#观测点年均地下水埋深在1 m左右,表明枯水期南矾和康山洲滩地下水可能接受大气降水的入渗补给或周边区域地下水直接补给而维持较高的水位波动。受洲滩地形的影响,2016—2018年蚌湖3#观测点地下水均维持较高水位。2016年枯水期沙湖和蚌湖洲滩地下水埋深较其他年份浅,都昌站湖水位最高,而降水量最小,原因在于枯水期沙湖和蚌湖洲滩地下水位的变受降水影响较小。

## 2.3 地下水稳定流模拟

**2.3.1 模型率定与验证** 研究区采用1 km×1 km等间距平面剖分网格,共剖分为190×233个单元格,其中模拟有效网格24020个。研究区2016年观测资料较全,且12月地下水埋深较大,年际变化较稳定,以便与枯水期典型植被建立空间上的关系。因此,选择2016年12月建立枯水期稳定流数值模型,并采用试错法进行参数率定,使地下水位模拟结果与观测井实测水位拟合程度达到最好<sup>[25]</sup>。模型率定后的降雨入渗系数为0.06,渗透系数为20 m·d<sup>-1</sup>,与美国农业部给出的相应土质参数参考范围基本一致<sup>[29]</sup>。由图5可以看出,沙湖、蚌湖、修水、南矾、康山洲滩观测井模拟值与实测值相关系数( $R^2$ )为0.62,标准误差(SD)为1.39 m,均方根误差(RMSE)为1.19 m,地下水位模拟值与实测值较一

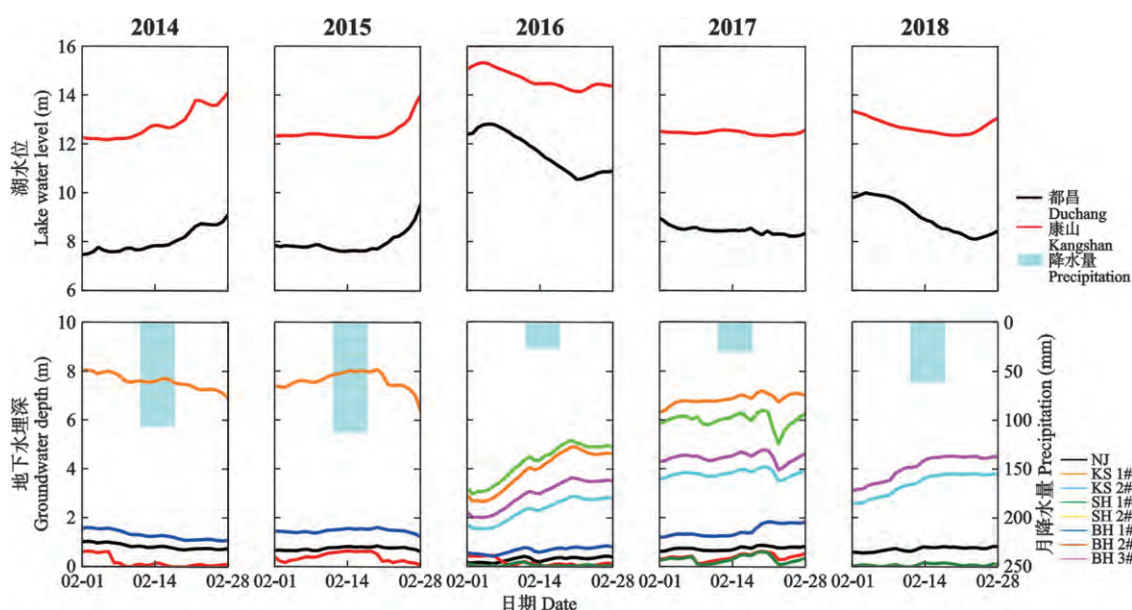


图 4 2014—2018 年枯水期鄱阳湖洲滩湿地地下水埋深的变化

Fig.4 Variations in groundwater depth at Poyang Lake wetland in response to change in lake water level during dry period from 2014 to 2018.

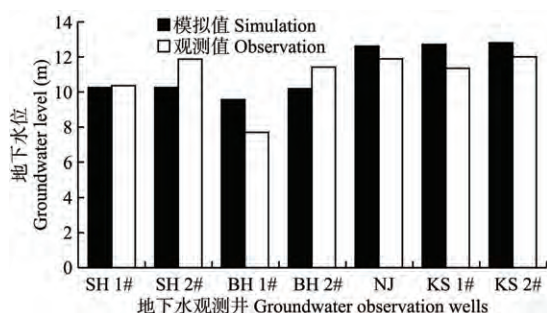


图 5 地下水位模拟值与观测值的比较

Fig.5 Comparison of simulated with observed groundwater level.

致 模型能够准确可靠地模拟研究区地下水位,可以用来预测未来水位的变化。

**2.3.2 地下水流场及埋深分布** 由图 6a 可以看出,研究区地下水流向与地表高程变化方向一致,以枯水期河道为分水岭,由上游地势较高的丘陵地区向下游地势相对平坦的湖区流动补给。研究区地下水位由上游向下游地区呈减小趋势,北部地下水位等值线稀疏,南部地下水等值线密集,表明地下水与湖水之间存在明显的水力梯度,且南部区域地下水的补给作用强烈。研究区上下游之间的地下水位相对高程差可达 6 m,中游之间地下水位相对高程差为 3 m,表明该地区地下水在上下游地区流动较慢,而在中游流动较快。结合研究区地形高程发现,地下水位的空间分布主要与地形起伏密切相关,这与已有研究认为地下水流动规律主要受地形控制的结果一

致<sup>[30]</sup>。

根据研究区地形高程与模拟的地下水位,应用 ArcGIS、Surfer 软件计算插值生成枯水期鄱阳湖最大淹没区域的地下水埋深分布(图 6b)。湖区地下水埋深由南向北递减,地下水埋深空间分布与湖区地形变化基本一致。湖区地下水埋深变幅约为 0~10 m,平均地下水埋深为 2.07 m,最大地下水埋深出现在湖区的四周和地势较高的区域,尤其是西部和南部区域。整体来看,沿着洲滩湿地断面高程存在明显的地下水埋深梯度,由远湖区至近湖区,地下水埋深不断减小。

## 2.4 典型植被群落沿地下水埋深的分布

鄱阳湖湿地受水位急剧变化的影响,植被分布梯度变化显著,季节性洲滩出露直接影响植被空间分布特征<sup>[36]</sup>。高斯回归分析结果显示,研究区苔草、芦苇和茵陈蒿群落的分布格局均符合经典的生态学模型高斯模型(图 7)。其中,苔草群落的植被分布指数与地下水埋深的拟合精度最高,而茵陈蒿群落的植被分布指数与地下水埋深的拟合精度最低。典型植被群落的生态幅度依次为:茵陈蒿>芦苇>苔草。3 种植被群落在地下水埋深 1.1~5.7 m 范围内出现生态位重叠现象,表现为地下水埋深 1.1~3.7 m 范围内,苔草植被分布指数迅速减小,芦苇植被分布指数增至最大。3.7~5.7 m 范围内,芦苇植被分布指数减小,茵陈蒿植被分布指数达到最大。

典型植被的分布对不同地下水埋深的响应差异

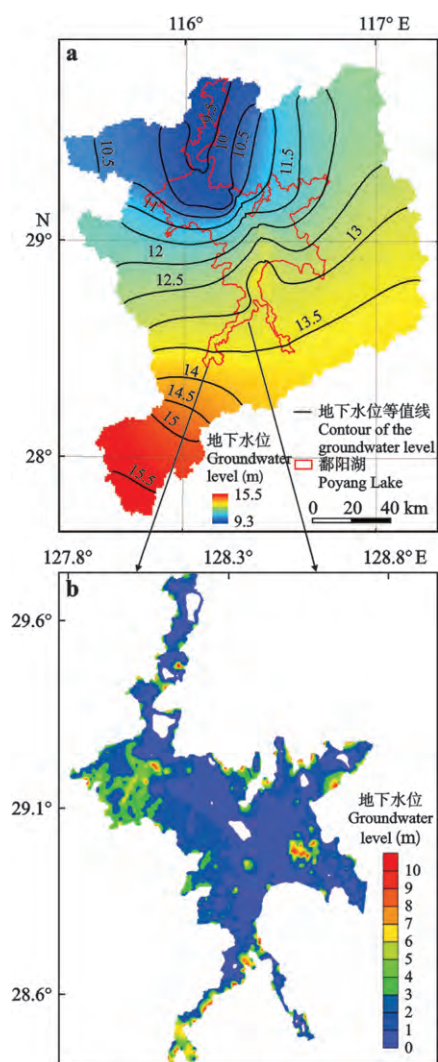


图 6 研究区地下水位等值线 (a) 和鄱阳湖最大淹没区域地下水埋深的空间分布 (b)

**Fig.6** Isolines of groundwater level of the study area (a) and the spatial distribution of groundwater depth of Poyang Lake maximum inundation area (b).

显著。其中, 苔草群落分布的地下水埋深最小 (1.1 m), 芦苇群落居中 (3.7 m), 茵陈蒿群落最大 (5.7 m)。苔草群落生长的最适地下水埋深为 1.1 m, 高程为 10.0~16.0 m。野外调查发现, 随着地下水埋深的不断增大, 即距离湖区较远的区域, 苔草群落分布密度稀疏、覆盖度低、长势明显变差。芦苇群落生长的最适地下水埋深为 3.7 m, 耐受度为 2.1 m, 当湿地被淹或地下水埋深高于 7.7 m 时, 芦苇群落植被分布指数降至最低。芦苇群落分布高程为 13.0~17.0 m, 这与许秀丽等<sup>[32]</sup>发现典型洲滩吴城湿地芦苇群落分布在高程 14~16 m 的结果较一致。茵陈蒿群落生长的最适地下水埋深为 5.7 m, 高程为 15.6~17.1 m。有研究表明, 地下水埋深变化与地表水位和高程一致, 反映了植被枯水期对水分的需求

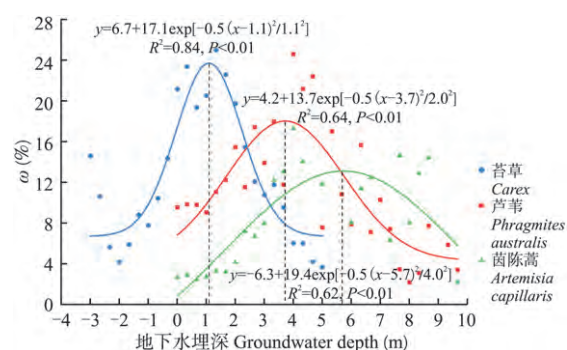


图 7 研究区 3 种典型植被群落分布与地下水埋深的关系

**Fig.7** Relationship between distribution of 3 kinds of typical vegetation communities and groundwater depth in the study area.

$\omega$ : 植被分布指数 Vegetation distribution index.

或丰水期对淹水胁迫的适应。植被分布区的地下水埋深越小, 表明植被在枯水期对水分的需求越大, 在丰水期所经受的淹没期越长<sup>[33]</sup>。茵陈蒿群落最适地下水埋深阈值为 1.7~11.4 m, 生态幅宽大于苔草群落 (地下水埋深 0~2.2 m) 和芦苇群落 (地下水埋深 1.7~6.6 m)。表明芦苇比茵陈蒿和苔草群落更耐旱, 而苔草比芦苇和茵陈蒿群落更耐淹。此外, 苔草的根系相对较浅, 而芦苇的根系可达 10 m 以上<sup>[17]</sup>, 从生物学结构特性上说明芦苇耐旱性较其他两种强, 表明不同植被群落可能受地下水位影响而形成带状分布格局, 同时这也是季节性湿地植被在长期进化过程中平衡淹水胁迫和水分需求的适应性响应。

### 3 讨 论

地下水水位变化影响湿地植被群落的构成、生长和演替, 从而影响整个湿地生态系统的稳定性<sup>[35]</sup>。在干旱或半干旱地区, 地下水位是直接影响植被生存和生长发育最关键的生态因子<sup>[36]</sup>, 而在降水充沛、水资源丰富的湿润地区, 虽然植被可以通过多个途径获得生长所需水分, 但是地下水水位的变化仍是影响湿地物种多样性的一个重要因素<sup>[13]</sup>。鄱阳湖是长江中下游代表性的淡水通江湖泊, 季节性的水位波动使湿地在水-陆生境间交替变化, 湿地出露地表时, 地下水在蒸腾拉力和毛细作用下水分向上迁移补给根系层<sup>[37]</sup>。而地下水位下降时, 湿地植被可能面临不同程度的水分胁迫<sup>[38]</sup>。可见, 在水位波动幅度较大的洪泛湿地, 地下水位变化是影响植被生长发育以及物种多样性的一个重要限制因素。鄱阳湖近年来干旱事件频发, 湖水位与地下水位的协同下降可减少地势较高区域的补给水量, 湿

地植被将遭受严重的水分胁迫,而出现分布高程向地势较低区域迁移的现象,可能造成湿生植被向旱生植被演替,导致湿地萎缩。本研究通过探求地下水埋深与植被分布之间的定量关系,以期对洪泛湿地生态系统的保护和恢复提供科学依据。

高斯回归结果显示,不同典型植被分布区的地下水埋深有显著差异,平均地下水埋深大小为茵陈蒿群落>芦苇群落>苔草群落。苔草群落生长的最适地下水埋深为 1.1 m,分布高程为 10~16 m,为苔草的萌发提供了充足的水分供给。苔草群落是鄱阳湖湿地中面积最大、分布最广的植被类型,春季苔草一般 2—5 月涨水期为萌发生长期,丰水期大部分死亡或进入休眠状态,退水期洲滩出露后开始生长,秋季苔草一般 9—12 月为萌发生长期<sup>[17]</sup>。有研究表明,鄱阳湖洲滩湿地的退水过程更有利于苔草的萌芽生长和扩张<sup>[39]</sup>,苔草的这种生长规律是对鄱阳湖湿地水位节律性变化的生态适应。芦苇群落是鄱阳湖湿地最典型的挺水植被类型,每年 3 月底开始萌发,4—5 月为幼苗发育期,6—9 月为关键生长期。枯水期生长的最适地下水埋深为 3.7 m,主要分布在河口三角洲及天然堤坝区域,这一空间格局的形成是湿地植被对生境条件长期适应的结果<sup>[40]</sup>。茵陈蒿群落位于研究区地形最高处,分布高程在 15.6~17.1 m,适宜地下水埋深为 5.7 m,其生长所需水分受地下水的补给远小于芦苇和苔草群落。这种水分严重匮乏的生境条件不适宜挺水和湿生植被的长期生存,因此,芦苇和苔草群落的分布受到一定限制。有研究表明,对于季节性洪泛湿地而言,地下水水位是所有环境因子中对植被的生长和分布起决定性作用的因子<sup>[41]</sup>。苔草、芦苇、茵陈蒿群落就不同地下水埋深下的分布规律是预测其生存和分布的重要因素。高斯回归结果进一步显示,鄱阳湖湿地茵陈蒿群落主要分布在地下水埋深 1.7~11.4 m,生态幅宽大于苔草群落(地下水埋深 0~2.2 m)和芦苇群落(地下水埋深 1.7~6.6 m)。这与许秀丽等<sup>[13]</sup>探究鄱阳湖典型洲滩不同植被群落分布的地下水埋深结果较一致,表明不同植被带地下水位空间变化差异显著。Sanderson 等<sup>[42]</sup>发现,湿地植被蒸散用水的 75%~88%来自地下水埋深 0~1.2 m 的浅层地下水补给;冯文娟等<sup>[16]</sup>认为,地下水埋深大于 80 cm 时,由于地下水对地表的水分补给急剧减少,不利于苔草的生长和分布。鄱阳湖近年来水位变化显著,表现为枯水期洲滩湿地出露时间提前且延长、水位下降速度加快,该变化直接影响湿地植被的生长和分

布,进而影响湿地生态系统功能。本研究从空间角度量化了鄱阳湖洲滩湿地典型植被群落沿不同地下水埋深分布的生态位和生态幅,并探讨了湖区典型植被群落沿地下水埋深分布的差异。研究结果可为鄱阳湖湿地生态系统的保护和管理提供理论依据,对理解季节性洪泛湿地植被在水位波动环境下的种群竞争具有重要的科学价值和现实意义。

由于湿地生态水文环境复杂、可达性差,观测数据的获取尤为困难,地下水观测数据样本非常有限。本研究使用的地下水观测数据点位分布很有限,尚无法表征鄱阳湖湿地整体的水文条件,使研究结果带有一定局限性。未来应强化更高时空分辨率的地下水动态变化研究,可采用地下水同位素示踪和数学模型结合的方法,深入揭示地下水的动态变化与湿地植被的用水策略,全面阐明鄱阳湖洪泛湿地的地下水动力过程与植被的响应规律。

#### 4 结 论

鄱阳湖典型洲滩湿地地下水位季节变化显著,且与湖水位动态变化高度一致,年内洲滩地下水埋深在 0.1~6.3 m,地下水位变化与降水量季节性分布之间存在 1 个月的滞后。洲滩湿地地下水位年内与年际变化均表现出明显的空间异质性特征。2016 年枯水期沙湖和蚌湖洲滩地下水位随湖水位升高,说明湖水位的变化是洲滩湿地地下水位变化的主要驱动因子。

研究区地下水流向以枯水期河道为分水岭,由上游地势较高的丘陵区向下游相对平坦的湖区方向流动补给,地下水位与地形高程变化一致。研究区南部地下水与湖水存在明显的水力梯度,地下水补给作用较强烈。研究区地下水在上下游地区流动较慢,在中游流动较快。湖区地下水埋深在 0~10 m,平均地下水埋深为 2.07 m,最大地下水埋深出现在湖区四周及地势较高的区域,地下水位的空间分布主要与地形起伏有关。

苔草群落分布的地下水埋深最小(1.1 m),芦苇群落居中(3.7 m),茵陈蒿群落最大(5.7 m)。茵陈蒿群落的生态幅宽大于苔草和芦苇群落。3 种植被群落均出现在地下水埋深 1.1~5.7 m 范围内,且苔草植被分布指数迅速减小,芦苇植被分布指数先增大后减小,而茵陈蒿植被分布指数持续增大。由远湖区至近湖区,典型植被的分布沿地下水埋深梯度差异显著。

## 参考文献

- [1] McInnes R. Recognizing ecosystem services from wetlands of international importance: An example from Sussex, UK. *Wetlands*, 2013, **33**: 1001–1017
- [2] Hupet F, Vanclooster M. Intraseasonal dynamics of soil moisture variability within a small agricultural maize cropped field. *Journal of Hydrology*, 2002, **261**: 86–101
- [3] Muneepeerakul CP, Miralles WF, Tamea S, et al. Coupled hydrologic and vegetation dynamics in wetland ecosystems. *Water Resources Research*, 2008, **44**: W07421
- [4] Laio F, Tamea S, Ridolfi L, et al. Ecohydrology of groundwater-dependent ecosystems: 1. Stochastic water table dynamics. *Water Resources Research*, 2009, **45**: W05419
- [5] Scholte P. Maximum flood depth characterizes above-ground biomass in African seasonally shallowly flooded grasslands. *Journal of Tropical Ecology*, 2007, **23**: 63–72
- [6] Zhang L, Yin J, Jiang Y, et al. Relationship between the hydrological conditions and the distribution of vegetation communities within the Poyang Lake National Nature Reserve, China. *Ecological Informatics*, 2012, **11**: 65–75
- [7] 刘信中, 叶居新. 江西湿地. 北京: 中国林业出版社, 2000 [Liu X-Z, Ye J-X. The Wetland in Jiangxi Province. Beijing: China Forestry Press, 2000]
- [8] 郭华, 张奇, 王艳君. 鄱阳湖流域水文变化特征成因及旱涝规律. *地理学报*, 2012, **67**(5): 699–709 [Guo H, Zhang Q, Wang Y-J. Annual variations in climatic and hydrological processes and related flood and drought occurrences in the Poyang Lake Basin. *Acta Geographica Sinica*, 2012, **67**(5): 699–709]
- [9] 刘元波, 赵晓松, 吴桂平. 近十年鄱阳湖区极端干旱事件频发现象成因初析. *长江流域资源与环境*, 2014, **23**(1): 131–138 [Liu Y-B, Zhao X-S, Wu G-P. A primary investigation on the formation of frequent droughts in the Poyang Lake Basin in recent decade. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2014, **23**(1): 131–138]
- [10] 李云良, 赵贵章, 姚静, 等. 湖岸带地下水与湖水作用关系——以鄱阳湖为例. *热带地理*, 2017, **37**(4): 522–529 [Li Y-L, Zhao G-Z, Yao J, et al. Interactions between groundwater and lake water of riparian zone in the typical area of Poyang Lake. *Tropical Geography*, 2017, **37**(4): 522–529]
- [11] 李云良, 张小琳, 赵贵章, 等. 鄱阳湖区地下水水位动态及其与湖水侧向水力联系分析. *长江流域资源与环境*, 2016, **25**(12): 1894–1902 [Li Y-L, Zhang X-L, Zhao G-Z, et al. Dynamics of groundwater level and laterally hydraulic connection between lake and groundwater in Poyang Lake area. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2016, **25**(12): 1894–1902]
- [12] 胡春华, 童乐, 万齐远, 等. 环鄱阳湖浅层地下水水化学特征的时空变化. *环境化学*, 2013, **32**(6): 974–979 [Hu C-H, Tong L, Wan Q-Y, et al. Spatial and temporal variation of shallow groundwater chemical characteristics around Poyang Lake. *Environmental Chemistry*, 2013, **32**(6): 974–979]
- [13] 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. *湖泊科学*, 2014, **26**(2): 260–268 [Xu X-L, Zhang Q, Li Y-L, et al. Inner-annual variation of soil water content and groundwater level in a typical islet wetland of Lake Poyang. *Journal of Lake Science*, 2014, **26**(2): 260–268]
- [14] 许秀丽, 李云良, 谭志强, 等. 鄱阳湖湿地典型植被群落地下水-土壤-植被-大气系统界面水分通量及水源组成. *湖泊科学*, 2018, **30**(5): 1351–1367 [Xu X-L, Li Y-L, Tan Z-Q, et al. Water fluxes in the groundwater-soil-plant-atmosphere continuum and water sources of typical wetland vegetation communities in Poyang Lake. *Journal of Lake Science*, 2018, **30**(5): 1351–1367]
- [15] 李文, 王鑫, 潘艺雯, 等. 不同水淹深度对鄱阳湖洲滩湿地植物生长及营养繁殖的影响. *生态学报*, 2018, **38**(9): 26–33 [Li W, Wang X, Pan Y-W, et al. Effects of different water depths on the growth and vegetative reproductive characteristics of wetland vegetation in Lake Poyang. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, **38**(9): 26–33]
- [16] 冯文娟, 徐力刚, 王晓龙, 等. 鄱阳湖洲滩湿地地下水位对灰化藁草种群的影响. *生态学报*, 2016, **36**(16): 5109–5115 [Feng W-J, Xu L-G, Wang X-L, et al. Response of *Carex cinerascens* populations to groundwater level gradients in the Poyang Lake wetland. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, **36**(16): 5109–5115]
- [17] 张丽丽, 殷峻暹, 蒋云钟, 等. 鄱阳湖自然保护区湿地植被群落与水文情势关系. *水科学进展*, 2012, **23**(6): 768–775 [Zhang L-L, Yin J-X, Jiang Y-Z, et al. Relationship between wetland vegetation community and hydrological regime in Lake Poyang nature reserve. *Advances in Water Science*, 2012, **23**(6): 768–775]
- [18] 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. *长江流域资源与环境*, 2010, **19**(6): 597–605 [Hu Z-P, Ge G, Liu C-L, et al. Study on the structure of Lake Poyang wetland plant ecosystem and influence of water level on it. *Resources and Environment in the Yangtze*, 2010, **19**(6): 597–605]
- [19] Milzow C, Burg V, Kinzelbach W. Estimating future ecoregion distributions within the Okavango Delta wetlands based on hydrological simulations and future climate and development scenarios. *Journal of Hydrology*, 2010, **381**: 89–100
- [20] 朱君妍, 李翠梅, 贺靖雄, 等. GMS 模型的水文水质模拟应用研究. *水文*, 2019, **39**(1): 66–73 [Zhu J-Y, Li C-M, He J-X, et al. Application of GMS model in hydrological and water quality simulation. *Journal of China Hydrology*, 2019, **39**(1): 66–73]
- [21] 兰盈盈, 曾马荪, 靳孟贵, 等. 基于 GMS 鄱阳湖拟建枢纽对地下水影响探讨. *水文*, 2015, **35**(6): 37–41 [Lan Y-Y, Zeng M-S, Jin M-G, et al. Discussion on effects of proposed water structure on Poyang Lake groundwater using GMS. *Journal of China Hydrology*, 2015, **35**(6): 37–41]
- [22] Feng L, Hu C, Chen X, et al. Assessment of inundation changes of Poyang Lake using MODIS observations between 2000 and 2010. *Remote Sensing of Environment*, 2012, **121**: 80–92
- [23] 胡振鹏, 张祖芳, 刘以珍, 等. 碟形湖在鄱阳湖湿地生态系统的作用和意义. *江西水利科技*, 2015, **41**(5): 317–323 [Hu Z-P, Zhang Z-F, Liu Y-Z, et al. The function and significance of the Shallow-Lakes in the Poyang Lake wetland ecosystem. *Jiangxi Hydraulic Sci-*

- ence & Technology, 2015, **41**( 5 ): 317-323]
- [24] Tan ZQ, Zhang Q, Li MF, *et al.* A study of the relationship between wetland vegetation communities and water regimes using a combined remote sensing and hydraulic modeling approach. *Hydrology Research*, 2016, **47**: 278-292
- [25] 陈耀登, 高玉芳. MODFLOW 2000 在沿海地区地下水模拟中的应用. 人民黄河, 2007, **29**( 6 ): 35-36 [Chen Y-D, Gao Y-F. Application of MODFLOW 2000 in groundwater simulation of coastal areas. *Yellow River*, 2007, **29**( 6 ): 35-36]
- [26] Gause G. The influence of ecological factors on the size of population. *The American Naturalist*, 1931, **65**: 70-76
- [27] Li YL, Zhang Q, Lu JR, *et al.* Assessing surface water-groundwater interactions in a complex river-floodplain wetland-isolated lake system. *River Research and Applications*, 2019, **35**: 25-36
- [28] Zhang Q, Li L, Wang YG, *et al.* Has the Three-Gorges Dam made the Poyang Lake wetlands wetter and drier? *Geophysical Research Letters*, 2012, **39**: L20402
- [29] 邵明安, 王全九, 黄明斌. 土壤物理学. 北京: 高等教育出版社, 2006 [Shao M-A, Wang Q-J, Huang M-B. Soil Physics. Beijing: Higher Education Press, 2006]
- [30] Liu HL, Chen X, Bao AM, *et al.* Investigation of groundwater response to overland flow and topography using a coupled MIKE SHE/MIKE 11 modeling system for an arid watershed. *Journal of Hydrology*, **347**: 448-459
- [31] 谢冬明, 黄庆华, 易青, 等. 鄱阳湖湿地洲滩植物梯度变化. 生态学报, 2019, **39**( 11 ): 4070-4079 [Xie D-M, Huang Q-H, Yi Q, *et al.* Changes in floodplain vegetation in Poyang Lake wetlands. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, **39**( 11 ): 4070-4079]
- [32] 许秀丽, 张奇, 李云良, 等. 鄱阳湖洲滩芦苇种群特征及其与淹水深度和地下水埋深的关系. 湿地科学, 2014, **12**( 6 ): 714-722 [Xu X-L, Zhang Q, Li Y-L, *et al.* Reed population features and relationships between feature indicators and flooding depth, groundwater depth in an islet in Poyang Lake. *Wetland Science*, 2014, **12**( 6 ): 714-722]
- [33] Luo WB, Song FB, Xie YH, *et al.* Trade-off between tolerance to drought and tolerance to flooding in three wetland plants. *Wetlands*, 2008, **28**: 866-873
- [34] 彭佩钦, 张文菊, 董成立, 等. 洞庭湖湿地土壤碳、氮、磷及其与土壤物理性状的关系. 应用生态学报, 2005, **16**( 10 ): 1872-1878 [Peng P-Q, Zhang W-J, Tong C-L, *et al.* Soil C, N and P contents and their relationships with soil physical properties in wetlands of Dongting Lake floodplain. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2005, **16**( 10 ): 1872-1878]
- [35] Johansen OM, Andersen DK, Ejrn SR, *et al.* Relations between vegetation and water level in groundwater dependent terrestrial ecosystems ( GWDTEs ). *Limnologia*, 2017, **68**: 130-141
- [36] 马玉蕾, 王德, 刘俊民, 等. 黄河三角洲典型植被与地下水埋深和土壤盐分的关系. 应用生态学报, 2013, **24**( 9 ): 2423-2430 [Ma Y-L, Wang D, Liu J-M, *et al.* Relationships between typical vegetations, soil salinity, and groundwater depth in the Yellow River Delta of China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2013, **24**( 9 ): 2423-2430]
- [37] Xie T, Liu X, Sun T. The effects of groundwater table and flood irrigation strategies on soil water and salt dynamics and reed water use in the Yellow River Delta, China. *Ecological Modelling*, 2011, **222**: 241-252
- [38] Li F, Qin X, Xie Y, *et al.* Physiological mechanisms for plant distribution pattern: Responses to flooding and drought in three wetland plants from Dongting Lake, China. *Limnology*, 2013, **14**: 71-76
- [39] 周云凯, 白秀玲, 宁立新. 鄱阳湖湿地苔草景观变化及其水文响应. 湖泊科学, 2017, **29**( 4 ): 870-879 [Zhou Y-K, Bai X-L, Ning L-X. Landscape pattern changes of *Carex* and its response to water level in Lake Poyang wetland. *Journal of Lake Sciences*, 2017, **29**( 4 ): 870-879]
- [40] 吴桂平, 叶春, 刘元波. 鄱阳湖自然保护区湿地植被生物量空间分布规律. 生态学报, 2015, **35**( 2 ): 361-369 [Wu G-P, Ye C, Liu Y-B. Spatial distribution of wetland vegetation biomass in the Poyang Lake National Nature Reserve, China. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, **35**( 2 ): 361-369]
- [41] Chen XS, Li X, Xie YH, *et al.* Combined influence of hydrological gradient and edaphic factors on the distribution of macrophyte communities in Dongting Lake wetlands, China. *Wetlands Ecology and Management*, 2015, **23**: 481-490
- [42] Sanderson JS, Cooper DJ. Ground water discharge by evapotranspiration in wetlands of an arid intermountain basin. *Journal of Hydrology*, 2008, **351**: 344-359

作者简介 宋炎炎, 女, 1993 年生, 博士研究生. 主要从事地下水数值模拟研究. E-mail: 18236532106@163.com

责任编辑 杨 弘

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. 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. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2021, **32**( 1 ): 123-133