

DOI: 10.19951/j.cnki.1672-9331.20230110002

文章编号: 1672-9331(2023)04-0076-13

引用格式: 危润初, 王吾乡, 彭向训, 等. 洞庭湖盆地地下水系统与环境研究综述[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2023, 20(4): 76-88.

Citation: WEI Runchu, WANG Wuxiang, PENG Xiangxun, et al. A review of groundwater system and environment research in Dongting Lake Basin[J]. J Changsha Univ Sci Tech (Nat Sci), 2023, 20(4): 76-88.

# 洞庭湖盆地地下水系统与环境研究综述

危润初<sup>1,2,3</sup>, 王吾乡<sup>1,2,3</sup>, 彭向训<sup>1</sup>, 欧阳琦<sup>1,2,3</sup>, 金镇涛<sup>1</sup>, 柏道远<sup>4</sup>

(1. 长沙理工大学 水利与环境工程学院, 湖南 长沙 410114; 2. 长沙理工大学 水沙科学与水灾害防治湖南省重点实验室, 湖南 长沙 410114; 3. 长沙理工大学 洞庭湖水环境治理与生态修复湖南省重点实验室, 湖南 长沙 410114; 4. 湖南省地质调查所, 湖南 长沙 410014)

**摘要:** 洞庭湖是长江中游重要的调蓄湖泊, 其复杂的地下水系统与突出的地下水环境问题持续受到关注。本文从洞庭湖盆地第四纪构造演化、洞庭湖盆地地下水系统结构及洞庭湖区水循环特征、地下水环境及影响因素等3个方面归纳、总结和讨论了相关研究成果, 并在此基础上对洞庭湖地下水系统与环境的研究前景进行了展望。洞庭湖盆地第四纪构造活动强烈, 在此过程中沉积了平均厚度达150 m的第四纪沉积物, 塑造了湖区地下水系统的构造与地层格局。区内地下水系统受盆地整体地形、基底构造格局、含水层分布、地表河湖系统等多因素控制, 水循环过程非常复杂。受原生地球化学环境、人类活动等的影响, 洞庭湖平原大部分区域地下水存在铁、锰、氨氮、硝酸盐等水质因子超标的问题, 其中铁、锰与氨氮的含量还呈现出明显的自平原外围向湖盆腹地逐渐增大的空间分布规律。综合已有研究成果及洞庭湖平原在水资源配置、湿地保护、生态环境治理等方面的需求, 认为未来洞庭湖地下水系统与环境的研究重点是: 1) 洞庭湖平原垂向交互带水分交换过程及生物地球化学演替规律; 2) 复杂河湖系统下洞庭湖地下水系统的尺度分异及地表水-地下水的交互作用; 3) 洞庭湖平原多要素耦合作用下湖区平原水环境演化机制。

**关键词:** 洞庭湖; 构造演化; 地下水系统; 水循环; 地下水环境; 重金属

**中图分类号:** P942

**文献标志码:** A

## 0 引言

洞庭湖位于湖南省北部, 荆江南岸, 是长江最重要的调蓄湖泊, 其周边平原区拥有中国最复杂的河湖网络和水文系统<sup>[1]</sup>。21世纪以来, 受气候变化、三峡工程等的影响, 洞庭湖水循环发生了明显变化, 水文水动力环境也发生了较大改变, 季节性缺水日益严重, 特别是湖区北部的华容、南县、安乡等区域经常面临供水困难<sup>[2-3]</sup>。目前, 地下水已成为湖区平原最重要的供水水源<sup>[4]</sup>, 但是多年来, 受地下水系统研究不足、水质大范围超标等问题的制约, 区内地下水开发始终处于较低水平。因此, 区内地下水资源的合理开发亟须洞庭湖地

下水系统及环境研究成果的支撑。

20世纪60年代以来, 相关学者与调查人员在洞庭湖区就盆地地质环境与动力学机制、地下水系统分析等方面开展了大量的调查与研究。近年来, 洞庭湖地下水污染类型、来源及评价已成为研究热点, 并且已取得了许多极具参考价值的成果。

本文尝试对洞庭湖盆地第四纪构造演化、洞庭湖盆地地下水系统结构及水循环特征、洞庭湖区地下水环境及影响因素等3个方面的研究成果开展全面归纳与总结, 并结合笔者多年来的研究实践给出洞庭湖地下水研究亟须解决的关键问题和未来的研究热点, 旨在为洞庭湖平原的地下水研究及实践工作提供参考。

收稿日期: 2023-01-10; 修回日期: 2023-03-17; 接受日期: 2023-03-18

基金项目: 国家自然科学基金青年基金资助项目(41602264); 湖南省自然科学基金资助项目(2020JJ5572); 湖南省水利厅重点科研项目(XSKJ2019081-09)

通信作者: 危润初(1984—)(ORCID: 0000-0001-7038-1628), 男, 副教授, 主要从事地下水文演化等方面的研究。

E-mail: weirunchu@163.com

## 1 洞庭湖盆地第四纪构造演化研究进展

洞庭湖盆地自早白垩世开始发育,早期主要形成桃源山间盆地,晚期扩展至石门一带。中晚白垩世湖盆进一步扩大,形成了由西向东的一系列凹陷,主要有安乡-汉寿凹陷、石门-澧县凹陷和沅江-湘阴凹陷,此时洞庭湖盆地的构造格局已基本形成<sup>[5]</sup>,如图1所示(文中所有平面图上的横坐标数值为东经,纵坐标数值为北纬)。受早期喜马拉雅造山运动中的断块运动影响,洞庭湖盆地出现萎缩,至新近纪完全隆起成陆,从而形成了从白垩纪至新近纪的第一个构造旋回<sup>[6]</sup>。

第四纪是洞庭湖盆地重要的演化阶段,也是塑造现代湖盆地下水系统赋存和循环条件的阶段。近40年来,有关学者对洞庭湖盆地的构造机理进行了大量的探索研究,相关认识也不尽一致。早期很多学者认为洞庭湖盆地在第四纪期间主要表现为断陷沉降<sup>[6-8]</sup>,也有不少学者基于地壳形变测量资料<sup>[9]</sup>和第四系分统等厚度图,认为洞庭湖盆地在第四纪期间主要以拗陷沉降为主,当然也有学者认为洞庭湖盆地在整体拗陷情况下存在不

同程度的断块差异运动<sup>[10]</sup>。除上述截然不同的观点外,更多学者认为洞庭湖盆地在第四纪存在分阶段差异特性,即在早、中更新世为断陷沉降,而自晚更新世以来为拗陷沉降<sup>[11-12]</sup>。后期,柏道远等<sup>[13]</sup>的系列研究进一步强化了两阶段演化观点,并对各个次级构造单元的构造演化过程开展了细致研究,将洞庭湖盆地第四纪构造演化研究推向了高潮。

在前人研究的基础上,柏道远等<sup>[14-15]</sup>指出洞庭湖盆地内部在第四纪发育了多个隆起和凹陷,因而具有较复杂的隆-凹构造格局(图2),并对部分子单元的演化过程进行了专门研究,取得了很多新的认识,这些成果为全面理解洞庭湖区地下水系统特征奠定了构造学研究基础。针对华容隆起的形成机制,柏道远等<sup>[16]</sup>认为华容隆起在第四纪总体表现为显著的沉降,其隆起特征主要由前第四纪盆-山地貌分异控制,而并非由琴键式差异断块活动所致。在相邻的安乡凹陷,他们发现洞庭湖组砾石粒径存在两个较大尺度的由大到小的旋回<sup>[17]</sup>,这说明安乡凹陷经历了两次缓慢与快速沉降交替的幕式沉降过程<sup>[18]</sup>。受构造作用性质与强度阶段性变化的影响,其他凹陷同样经历了多

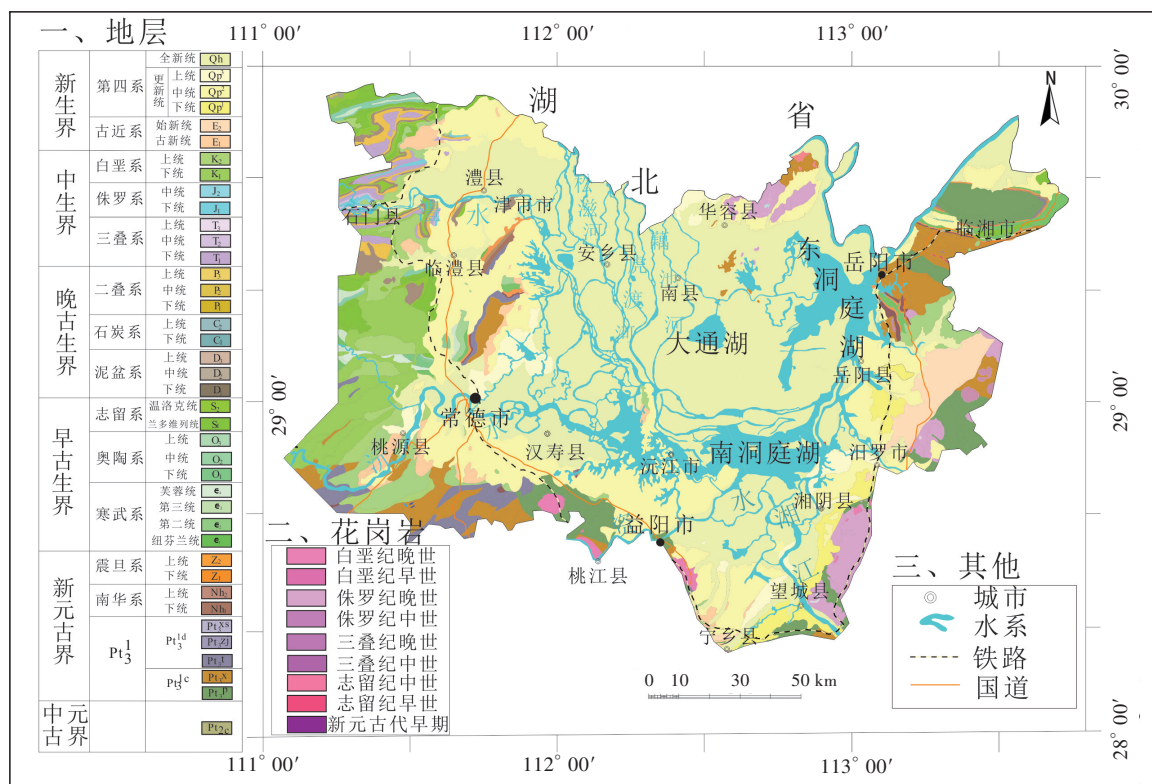
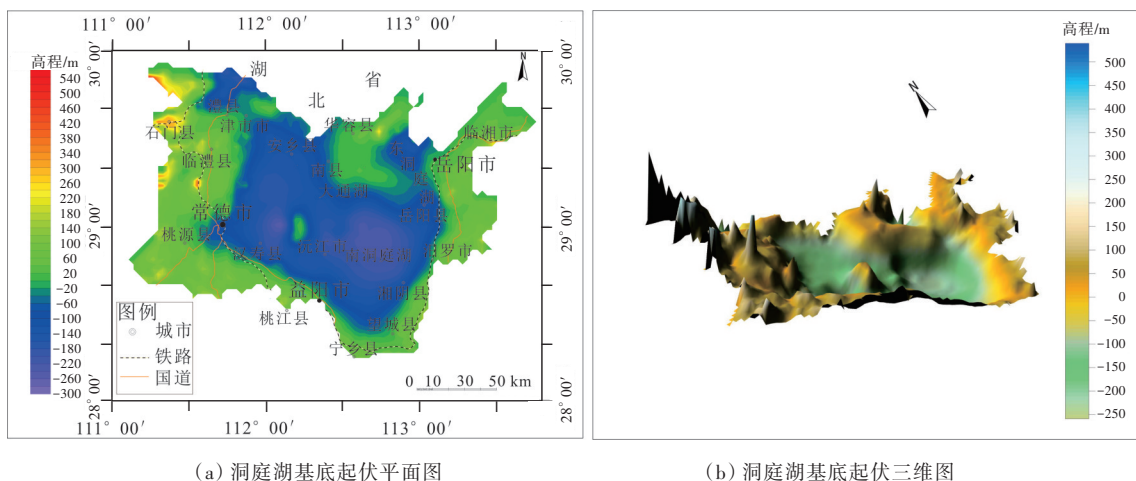


图1 洞庭湖盆地地质略图<sup>[5]</sup>

Fig. 1 Geological map of Dongting Lake Basin<sup>[5]</sup>





图3 洞庭湖平原基岩地形图<sup>[23]</sup>Fig. 3 Bedrock topography of the Dongting Lake Plain<sup>[23]</sup>

## 2 洞庭湖盆地地下水系统结构及水循环特征

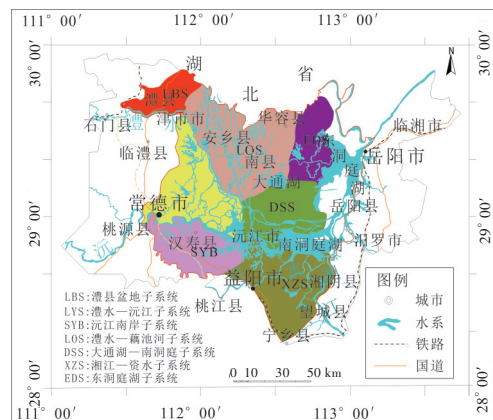
与基岩区相比,平原区地下水系统很难仅通过地形起伏来开展区划,因为其纵横交错的河流-湖泊网络会使其地表水-地下水的交互作用变得非常复杂<sup>[24]</sup>。同时,平原的形成通常与第四纪构造沉降密切相关<sup>[25-26]</sup>,第四纪沉积序列可以形成从表层到深层的多个含水层框架<sup>[27]</sup>,不同含水层的水力特性可能存在较大差异,这进一步增加了平原区地下水系统的复杂性。

### 2.1 洞庭湖盆地地下水系统结构特征

对洞庭湖盆地地下水的研究开始于20世纪60年代的地质普查。直至20世纪80年代初,地矿部门完成了1:20万的水文地质普查,并在1983年的普查基础上对洞庭湖平原的水文地质及工程地质条件进行了综合评价。2010—2015年,湖南省地质调查院进一步对洞庭湖平原地下水资源及水环境问题开展了专门调查。以上工作对洞庭湖区地下水系统进行了比较深入的研究与分析,为洞庭湖地下水研究奠定了良好的基础。

总体上,洞庭湖区地下水系统结构受湖区地形、基底起伏、地层结构与性质、地表水系网络等的共同影响。洞庭湖平原东、南、西三面环山,北面与江汉平原相连,其地形整体上呈“簸箕”状。受整体地形控制,其地下水总体上也呈现出自外围高地向湖区平原流动的特征<sup>[28]</sup>。2015年,湖南省地质调查院在洞庭湖一级地下水系统的划分基础上,根据地形地貌、地下水分水岭及岩相古地理

界线等,将洞庭湖区划分为东洞庭湖和西洞庭湖2个二级地下水系统,并进一步划分出了10个三级地下水系统<sup>[29]</sup>。近年来,WEI等<sup>[23]</sup>从基底构造视角将洞庭湖平原地下水系统划分为澧县盆地等7个子系统,并运用水化学和流场对划分结果进行了验证(图4)。

图4 洞庭湖平原地下水系统区划图<sup>[23]</sup>Fig. 4 Zoning map of groundwater system in the Dongting Lake Plain<sup>[23]</sup>

洞庭湖平原区第四纪沉积物分布广泛,具有多变沉积韵律,因而自上而下其赋水特性变化较大,但一般认为可大致将其自上而下分为3个含水层系统<sup>[29-30]</sup>。最上层为全新统孔隙潜水含水层系统,其广泛分布于洞庭湖区的地表浅部,由第四系全新世沉积物组成,含水层介质主要为中细砂,厚度为5~10 m;其下是上-中更新统孔隙承压含水层系统,其部分出露于湖区边缘,含水层介质多为砂砾石,沉积物厚度一般为54~150 m;最下层为下更新统孔隙承压含水层系统,其分布面积较小,主要



中下含水层地下水径流的垂直运动和水平运动同时进行,其补给和排泄过程相对复杂,并且各含水层之间存在着广泛的薄厚不一的黏土隔水层,这对地下水动态产生了巨大的影响。充分了解洞庭湖区地下水的基本运动特征是正确研究复杂河湖背景下地表水-地下水交互关系的基础,否则很难对研究结果做出合理判断。如孙晓梁等<sup>[34-35]</sup>利用氩同位素方法估算出1996—2017年枯水期地下水向洞庭湖区的平均排泄量为 $0.51 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{d}$ ,枯水期地下水排泄对湖泊水量均衡的贡献达8.70%~30.37%,这较其他研究成果偏大近20倍<sup>[29-31]</sup>,究其原因,是作者对湖区地下水运动特征及复杂的河湖关系认识不足,以致水均衡项设定不准确。

21世纪以来,受长江三峡工程的影响,洞庭湖水文情势与地下水动态发生了很大变化<sup>[36]</sup>,城陵矶平均水位持续下降<sup>[37]</sup>。受此影响,洞庭湖平原地下水位也呈现出明显的下降趋势。与20世纪80年代中期的测量结果相比,2015年洞庭湖平原边缘的地下水水位下降了1~2 m,湖盆中心的下降幅度最大达到了5 m<sup>[29]</sup>。近5年来,随着“三峡后续工作长江中下游城镇供水及农业灌溉影响处理项目”的全面实施,洞庭湖平原腹地地下水开发量快速增加,其地下水位也随之下降,并形成了以南县一带为中心、面积超过2 000 km<sup>2</sup>的降落漏斗<sup>[33]</sup>。

### 3 洞庭湖区地下水环境及影响因素

一般认为,平原区地下水环境状态主要受地下水系统特征、介质化学特征及污染源分布等控制<sup>[38]</sup>。受原生水文地球化学环境和高强度农业活动的影响,铁、锰、氨氮超标是平原区地下水最为常见的问题。洞庭湖地下水的水质因子普遍超标。多年来,学者们从湖区地下水环境、土壤、底泥等方面开展了大量研究,初步揭示了主要水质因子的空间演化规律及湖区地下水污染的主要途径。

#### 3.1 洞庭湖区地下水环境

虽然学者们很早就关注了洞庭湖平原的地下水环境问题,但是一直没有进行系统的调查和研究。直到2003年,湖南省地质研究所和中国地质调查局才联合实施并完成了“湖南省洞庭湖区生态地球化学调查”项目。该项目在洞庭湖平原共

采了1 720个浅层地下水样,并对其进行了水质检测,这是迄今为止在洞庭湖平原完成的最全面的地下水环境调查工作<sup>[39]</sup>。该调查结果表明,洞庭湖平原大部分区域的地下水存在总铁、锰、氨氮超标的问题,超标面积占比均在80%以上。此外,亚硝酸盐也大范围超标,但其超标区域呈斑块状分布。硝酸盐的超标范围主要分布在平原区外围,pH则在平原区东南部的较大范围内低于标准值。洞庭湖区地下水重金属的超标情况相对较轻,仅在东洞庭湖与长江所夹的君山一带、大通湖以南局部地区以及湘江与澧水的部分沿岸地区出现了砷超标<sup>[39]</sup>。

洞庭湖平原属于典型的构造沉降冲洪积低平原,具有复杂的沉积韵律,且表层的黏土层分布广泛。特殊的地质与水文地质条件使湖区平原地下水动力滞缓而封闭,地下水系统整体处于相对还原的环境中<sup>[40]</sup>,这使得洞庭湖区沉积层中含铁、锰的矿物易溶解并富集<sup>[41]</sup>。洞庭湖平原是我国南方重要的商品粮生产基地,农业化肥施用强度高,这是区内地下水氮素污染的主要原因<sup>[28]</sup>。同时,洞庭湖区是我国重要的湿地分布区,在沼泽地层有机质积累较多,矿化后的天然有机质也是地下水氮素的重要来源<sup>[42]</sup>。区内pH超标区域主要位于平原南部湘江、资江、沅江等河流的尾间地区,一般认为这与沉积物物源有关<sup>[28]</sup>,但具体机制还需进一步研究。

地下水水质因子受介质矿物成分、氧化还原环境、地表水-地下水交互作用、人类活动等多种因素的共同影响,其空间分布往往呈现出一定的规律。洞庭湖平原地下水各水质因子的空间分布也不例外<sup>[28,43-44]</sup>。总体上看,洞庭湖平原浅层地下水中氨氮、总铁、锰、TDS(总溶解固体)、COD(化学需氧量)具有基本一致的空间变化趋势,即自平原外围至湖盆腹地含量逐渐增大,但硝酸盐的变化趋势刚好相反。pH明显地呈现出从西北到东南逐渐减小的单向趋势,在东南部大部分区域pH低于6.5,最低低至4.5<sup>[28]</sup>。

对于一个典型的平原地下水系统来说,受控于矿物溶解与沉淀、氧化还原作用、离子交换作用、蒸发浓缩作用等水文地球化学过程,地下水的化学成分往往沿地下水径流方向呈现出一定的渐变规律<sup>[38,45]</sup>。危润初等<sup>[28]</sup>在对洞庭湖平原进行地下水系统区划的基础上,进一步给出了洞庭湖区



浅层地下水氧化还原作用的空间分带<sup>[40]</sup>。结果表明,洞庭湖区浅层地下水氧化还原电位自外围山地、丘陵到洞庭湖腹地呈逐渐减小趋势,地下水环境逐渐由氧化环境转为还原环境;地下水中总铁、锰、氨氮、亚硝酸盐、硝酸盐的空间分布与湖区平原地下水氧化还原分带规律高度吻合,这也符合氧化还原反应中电子受体争夺电子的能力顺序<sup>[28,40]</sup>。

### 3.2 洞庭湖区土壤与河湖底泥污染

地表土壤与河湖底泥作为降水或地表水入渗补给地下水的必经路径,是地下水化学成分的重要来源。多年来,洞庭湖区土壤和河湖底泥污染问题始终是学者们关注的热点问题,但主要集中在重金属污染领域,其他污染物的研究成果相对较少。

很多学者的研究都表明,重金属是洞庭湖区很多区域土壤的主要超标因子<sup>[46]</sup>,其中污染总面积排名前五的重金属为镉、铜、铊、镉、汞,按重度污染面积由大到小排序,则重金属的次序为镉、铊、铊、锡、钼、钨、汞、铅、锌、砷、铜、镍、铬,不同地区的污染物类型与污染程度存在较大差异<sup>[47-49]</sup>,但总体上具有污染程度严重、范围较广、危害较大及污染物种类多的特点<sup>[50]</sup>(表1)。从空间上看,湘江河道与沅江河道两侧是区内土壤重金属污染最为严重的区域<sup>[46,51]</sup>,这与洞庭湖区内浅层地下水重金属污染分布一致,表明洞庭湖流域上游的重金属矿山开采及冶炼是湖区土壤污染的重要原因。LIN等<sup>[52]</sup>研究了东洞庭湖湿地不同土地利用类型土壤中重金属的污染特征,发现农田中镉、锌、铅、汞元素的含量明显比其他土地利用类型中的大,这说明化肥、农药对土壤重金属的累积也起到了重要的推动作用。此外,成土矿物、交通运输等也是土壤重金属的来源<sup>[53]</sup>。

表1 洞庭湖地下水环境主要污染因子

Table 1 Major pollution factors of groundwater environment in Dongting Lake

污染对象	污染因子
地下水	铁、锰、氨氮、亚硝酸盐
土壤	镉、铜、铊、镉、汞
河湖底泥	镉、锌、铅、砷、铬、铜

底泥也是水体生态系统的重要组成部分,与地表水、地下水有着密切的交互作用。与区内土壤类似,重金属污染也是洞庭湖区河湖底泥面临的最主要问题<sup>[54-55]</sup>,其中镉污染最为严重。分河

流和湖域看,湘江底泥重金属污染最为严重,洞庭湖次之,沅江、资江和澧水的重金属污染最轻<sup>[56]</sup>。就洞庭湖区内部而言,南洞庭湖底泥的重金属污染最为严重,其次是东洞庭湖与西洞庭湖<sup>[57]</sup>。很多研究已证明,洞庭湖与湘江底泥的多种重金属污染具有高度同源性<sup>[56]</sup>,即来自湘江流域上游的有色金属矿业开采与冶炼。LI等<sup>[58]</sup>利用多元统计分析方法更细致地识别了湘江和洞庭湖底泥中的重金属来源,结果表明锌、铅、镉和砷主要来源于采矿废水和工业废水,铬和铜则主要来源于自然侵蚀和非点源污染。

LI等<sup>[59]</sup>对底泥中的溶解有机物进行了研究,认为溶解有机物主要来源于陆源输入与生物代谢,其组成和结构特征与水质密切相关。SUN等<sup>[60]</sup>对洞庭湖氨氮污染的来源与特征进行了研究,认为洞庭湖底泥中的过量氨氮,除部分来自生活污水、农业化肥外,还有部分来自地层的矿化,并给出了在还原条件下氨态氮在异养硝化和厌氧氨氧化作用下向地下水中释放的机制。

## 4 总结与展望

自20世纪60年代以来,相关单位与学者对洞庭湖平原第四纪构造演化开展了大量研究,基于钻探揭露成果初步查明了平原区地层层序、岩性等的变化特征,构建了洞庭湖盆地的第四纪构造演化格局,这为地下水系统与环境的研究奠定了构造与地层基础。但是,也必须认识到,传统上有关洞庭湖地下水的研究主要以区域地质、地球化学和水文地质调查为主,近几年研究深化也多是建立在以往区域调查数据基础上的,这极大限制了对洞庭湖区地下水诸多科学问题的深化认识,使得相关研究结论存在一定的局限性,主要表现在对地下水循环规律的认知不足,特别是对入渗-蒸发过程、地表水-地下水交互作用等的认识还非常有限。

综上所述,已有研究为全面分析洞庭湖平原地下水系统与环境特征奠定了基础,但是关于洞庭湖平原地下水系统与环境的研究水平整体上还较低,远不能满足洞庭湖区水资源安全保障、湿地保护、生态环境治理等方面的需求<sup>[61]</sup>。根据已有研究成果,结合洞庭湖生态经济区全面深化建设

的需求,笔者认为湖区平原地下水系统与环境的研究热点将主要集中在以下几个方面:

1) 洞庭湖平原垂向交互带水分交换及生物地球化学演替规律。洞庭湖平原地形平缓,自上而下沉积物性质多变,在河湖网络及地下流场异常复杂的背景下平原区垂向交互带水分交换过程始终是有待进一步厘清的难点问题。同时,其作为地表水-地下水与物质的主要交流通道,垂向的生物地球化学演替对全面理解洞庭湖平原地下水环境的演化规律有极其重要的影响。

2) 复杂河湖系统中洞庭湖地下水系统的尺度分异及地表水-地下水的交互作用。洞庭湖地下水系统既受湖区盆地整体的地形、构造与地层层序格局控制,又受复杂河湖系统的影响,因此具有明显的尺度分异特征,湖区平原地下水系统的尺度效应是亟待深入研究的问题。在此基础上,湖区平原地表水-地下水的交互作用将是洞庭湖平原地下水系统研究的重点。

3) 洞庭湖平原多要素耦合作用下湖区平原水环境的演化机制。洞庭湖地下水环境受地下水系统、复杂河湖网络、湿地格局、沉积物性质、人类活动等多因素的共同影响。地下水系统与各相关因素间存在着非常复杂的界面耦合效应,这决定了洞庭湖平原地下水系统的生物地球化学过程,只有深刻理解湖区平原的复杂界面效应,才能真正揭示洞庭湖平原地下水环境的演化机制。

#### [参考文献]

- [1] WANG Y M, LI Z W, TANG Z H, et al. A GIS-based spatial multi-criteria approach for flood risk assessment in the Dongting Lake region, Hunan, central China[J]. *Water Resources Management*, 2011, 25(13): 3465-3484. DOI: 10.1007/s11269-011-9866-2.
- [2] 方春明, 胡春宏, 陈绪坚. 三峡水库运用对荆江三口分流及洞庭湖的影响[J]. *水利学报*, 2014, 45(1): 36-41. DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.2014.01.005.
- FANG Chunming, HU Chunhong, CHEN Xujian. Impacts of Three Georges Reservoir's operation on outflow of the three outlets of Jingjiang River and Dongting Lake[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2014, 45(1): 36-41. DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.2014.01.005.
- [3] 赖锡军, 姜加虎, 黄群. 三峡工程蓄水对洞庭湖水情的影响格局及其作用机制[J]. *湖泊科学*, 2012, 24(2): 178-184. DOI: 10.3969/j.issn.1003-5427.2012.02.002.
- LAI Xijun, JIANG Jiahui, HUANG Qun. Pattern of impoundment effects and influencing mechanism of Three Gorges Project on water regime of Lake Dongting[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2012, 24(2): 178-184. DOI: 10.3969/j.issn.1003-5427.2012.02.002.
- [4] 李景保, 钟一苇, 周永强, 等. 三峡水库运行对洞庭湖北部地区水资源开发利用的影响[J]. *自然资源学报*, 2013, 28(9): 1583-1593. DOI: 10.11849/zrzyxb.2013.09.013.
- LI Jingbao, ZHONG Yiwei, ZHOU Yongqiang, et al. Impacts of the operation of Three Gorges Reservoir on the development and utilization of water resources of northern Dongting Lake area[J]. *Journal of Natural Resources*, 2013, 28(9): 1583-1593. DOI: 10.11849/zrzyxb.2013.09.013.
- [5] 张建新, 申志军, 顾海滨. 洞庭湖区第四纪环境地球化学[M]. 北京: 地质出版社, 2007.
- ZHANG Jianxin, SHEN Zhijun, GU Haibin. Quaternary environmental geochemistry in Dongting Lake area[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2007.
- [6] 王道经, 黄怀勇. 洞庭湖现代构造与湖盆演变[J]. *湖南地质*, 2000, 19(1): 30-36.
- WANG Daojing, HUANG Huaiyong. Dongtinghu modern tectonics and its basin evolution[J]. *Hunan Geology*, 2000, 19(1): 30-36.
- [7] 景存义. 洞庭湖的形成与演变[J]. *南京师大学报(自然科学版)*, 1982, 5(2): 52-60.
- JING Cunyi. The formation and evolution of Dongting Lake[J]. *Journal of Nanjing Normal University (Natural Science Edition)*, 1982, 5(2): 52-60.
- [8] 甘家思. 江汉洞庭盆地的构造演化与新构造运动特征: 地壳形变与地震[M]. 北京: 地震出版社, 1989.
- GAN Jiasi. Tectonic evolution and neotectonic movement characteristics of Jianghan Dongting Basin: crustal deformation and earthquakes[M]. Beijing: Earthquake Press, 1989.
- [9] 杨达源. 洞庭湖的演变及其整治[J]. *地理研究*, 1986, 5(3): 39-46.
- YANG Dayuan. On the evolution of the Dongting Lake during Holocene and the way of management[J]. *Geographical Research*, 1986, 5(3): 39-46.
- [10] 徐杰, 邓起东, 张玉岫, 等. 江汉-洞庭盆地构造特征和地震活动的初步分析[J]. *地震地质*, 1991, 13(4): 332-342.
- XU Jie, DENG Qidong, ZHANG Yuxiu, et al. Structural features and seismicity in Jianghan-dongting Lake basin[J]. *Seismology and Geology*, 1991, 13(4): 332-342.
- [11] 皮建高, 张国梁, 梁杏, 等. 洞庭盆地第四纪沉积环境演变的初步分析[J]. *地质科技情报*, 2001, 20(2):



- 6-10. DOI: 10.3969/j.issn.1000-7849.2001.02.002.
- PI Jiangao, ZHANG Guoliang, LIANG Xing, et al. Preliminary research on sedimentary environment evolution in Dongting Basin in the quaternary period[J]. Geological Science and Technology Information, 2001, 20(2): 6-10. DOI: 10.3969/j.issn.1000-7849.2001.02.002.
- [12] 梁杏, 张人权, 皮建高, 等. 洞庭盆地第四纪构造活动特征[J]. 地质科技情报, 2001, 20(2): 11-14. DOI: 10.3969/j.issn.1000-7849.2001.02.003.
- LIANG Xing, ZHANG Renquan, PI Jiangao, et al. Characteristics of tectonic movement of Dongting Basin in the quaternary period[J]. Geological Science and Technology Information, 2001, 20(2): 11-14. DOI: 10.3969/j.issn.1000-7849.2001.02.003.
- [13] 柏道远, 李长安, 王先辉, 等. 第四纪洞庭盆地构造性质及动力机制探讨[J]. 大地构造与成矿学, 2010, 34(3): 317-330. DOI: 10.16539/j.ddgzyckx.2010.03.010.
- BAI Daoyuan, LI Chang'an, WANG Xianhui, et al. Quaternary tectonic characteristics and dynamic mechanisms of the Dongting Basin[J]. Geotectonica et Metallogenia, 2010, 34(3): 317-330. DOI: 10.16539/j.ddgzyckx.2010.03.010.
- [14] 柏道远, 李送文, 周柯军, 等. 1:25万常德市幅构造-沉积地貌类型划分及其对江汉-洞庭盆地第四纪地质与环境研究的启示[J]. 中国地质, 2010, 37(2): 280-297. DOI: 10.3969/j.issn.1000-3657.2010.02.003.
- BAI Daoyuan, LI Songwen, ZHOU Kejun, et al. Tectonic-sedimentary landform classification of 1:250 000 Changde sheet and its implication for researches on Quaternary geology and environment of Jianghan-Dongting Basin[J]. Geology in China, 2010, 37(2): 280-297. DOI: 10.3969/j.issn.1000-3657.2010.02.003.
- [15] 柏道远, 李建清, 马铁球, 等. 第四纪江汉-洞庭盆地东部中段构造-沉积地貌类型划分及特征[J]. 地理科学, 2010, 30(2): 236-241. DOI: 10.13249/j.cnki.sgs.2010.02.002.
- BAI Daoyuan, LI Jianqing, MA Tieqiu, et al. Tectonic-sedimentary landforms classification of middle segment of east quaternary Jianghan-Dongting Basin[J]. Scientia Geographica Sinica, 2010, 30(2): 236-241. DOI: 10.13249/j.cnki.sgs.2010.02.002.
- [16] 柏道远, 李长安, 王先辉, 等. 第四纪华容隆起构造活动、成因及动力机制[J]. 地质科学, 2010, 45(2): 411-427. DOI: 10.3969/j.issn.0563-5020.2010.02.005.
- BAI Daoyuan, LI Chang'an, WANG Xianhui, et al. Tectonic activities, genesis and dynamic mechanisms of Quaternary Huarong uplift[J]. Chinese Journal of Geology, 2010, 45(2): 411-427. DOI: 10.3969/j.issn.0563-5020.2010.02.005.
- [17] 陈建成, 柏道远, 李长安, 等. 洞庭盆地中更新世洞庭湖组砾石特征及其意义[J]. 华南地质与矿产, 2010, 26(4): 16-22. DOI: 10.3969/j.issn.1007-3701.2010.04.003.
- CHEN Jiancheng, BAI Daoyuan, LI Chang'an, et al. Statistics of gravel particle size and shape features of Middle Pleistocene Dongtinghu formation in Dongting Basin, and its tectonic and environmental significances[J]. Geology and Mineral Resources of South China, 2010, 26(4): 16-22. DOI: 10.3969/j.issn.1007-3701.2010.04.003.
- [18] 柏道远, 李长安, 周柯军, 等. 第四纪洞庭盆地赤山隆起与安乡凹陷升降运动的沉积记录[J]. 沉积学报, 2010, 28(4): 645-658. DOI: 10.14027/j.cnki.cjxb.2010.04.004.
- BAI Daoyuan, LI Chang'an, ZHOU Kejun, et al. Geological characteristics and tectonic-sedimentary coupling relation of the Chishan uplift and Anxiang sag of quaternary Dongting Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2010, 28(4): 645-658. DOI: 10.14027/j.cnki.cjxb.2010.04.004.
- [19] 柏道远, 刘波, 李长安, 等. 第四纪洞庭盆地临澧凹陷构造-沉积特征与环境演化[J]. 山地学报, 2010, 28(6): 641-652. DOI: 10.16089/j.cnki.1008-2786.2010.06.009.
- BAI Daoyuan, LIU Bo, LI Chang'an, et al. Quaternary tectonic-sedimentary characteristics and environmental evolution of Linli sag, Dongting Basin[J]. Journal of Mountain Science, 2010, 28(6): 641-652. DOI: 10.16089/j.cnki.1008-2786.2010.06.009.
- [20] 柏道远, 高峰, 马铁球, 等. 洞庭盆地澧县凹陷第四纪沉积特征与古地理演化[J]. 沉积与特提斯地质, 2009, 29(4): 10-21. DOI: 10.3969/j.issn.1009-3850.2009.04.003.
- BAI Daoyuan, GAO Feng, MA Tieqiu, et al. Quaternary deposits and palaeogeographic evolution in the Lixian depression, Dongting Basin, Hunan[J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 2009, 29(4): 10-21. DOI: 10.3969/j.issn.1009-3850.2009.04.003.
- [21] 柏道远, 马铁球, 王先辉, 等. 洞庭盆地第四纪地质研究进展: 1:25万常德市幅和岳阳市幅区域地质调查主要成果[J]. 华南地质与矿产, 2011, 27(4): 273-285. DOI: 10.3969/j.issn.1007-3701.2011.04.004.
- BAI Daoyuan, MA Tieqiu, WANG Xianhui, et al. Progresses in quaternary geology of Dongting Basin: major achievements in regional geological survey of 1:250 000 Changde and Yueyang sheets[J]. Geology and Mineral Resources of South China, 2011, 27(4): 273-285. DOI: 10.3969/j.issn.1007-3701.2011.04.004.

- [22] 柏道远. 洞庭盆地第四纪地质环境演化[D]. 武汉: 中国地质大学, 2010.  
BAI Daoyuan. Quaternary geological and environmental evolution of the Dongting Basin [D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2010.
- [23] WEI R C, TANG S M, OUYANG Q, et al. Study on the groundwater system of the Dongting Lake Plain, central-south China: a tectonic perspective [J]. Hydrogeology Journal, 2022, 30(2): 707–721. DOI: 10.1007/s10040-021-02436-7.
- [24] WINTER T C. Relation of streams, lakes, and wetlands to groundwater flow systems [J]. Hydrogeology Journal, 1999, 7(1): 28–45. DOI: 10.1007/s100400050178.
- [25] 李昌鸿, 刘新民, 付宜兴, 等. 江汉平原区中、古生界构造特征及演化[J]. 地质科技情报, 2008, 27(2): 34–38. DOI: 10.3969/j.issn.1000-7849.2008.02.006.  
LI Changhong, LIU Xinmin, FU Yixing, et al. Tectonic features and evolution of mesozoic-paleozoic in Jianghan plain region [J]. Geological Science and Technology Information, 2008, 27(2): 34–38. DOI: 10.3969/j.issn.1000-7849.2008.02.006.
- [26] HELMENS K F, VAN DER HAMMEN T. The Pliocene and Quaternary of the high plain of Bogotá (Colombia): a history of tectonic uplift, basin development and climatic change [J]. Quaternary International, 1994, 21: 41–61. DOI: 10.1016/1040-6182(94)90020-5.
- [27] GOODBRED S L, KUEHL S A. The significance of large sediment supply, active tectonism, and eustasy on margin sequence development: late Quaternary stratigraphy and evolution of the Ganges-Brahmaputra delta [J]. Sedimentary Geology, 2000, 133(3–4): 227–248. DOI: 10.1016/S0037-0738(00)00041-5.
- [28] 危润初, 曹阳, 唐仕明, 等. 洞庭湖区浅层地下水水质指标空间分异及其控制因素研究[J]. 湿地科学, 2022, 20(1): 1–14. DOI: 10.13248/j.cnki.wetlandsci.2022.01.001.  
WEI Runchu, CAO Yang, TANG Shiming, et al. Spatial variation of quality indices of shallow groundwater in the Dongting Lake area and their control factors [J]. Wetland Science, 2022, 20(1): 1–14. DOI: 10.13248/j.cnki.wetlandsci.2022.01.001.
- [29] 孙锡良, 姚腾飞, 王璨, 等. 江汉-洞庭平原地下水资源及其环境问题调查评价报告(湖南)[R]. 长沙: 湖南省地质调查院, 2015.  
SUN Xiliang, YAO Tengfei, WANG Can, et al. Investigation report on groundwater resources and environmental problems in Jianghan-Dongting Plain (Hunan) [R]. Changsha: Geological Survey Institute of Hunan Province, 2015.
- [30] 陈宝顺, 周沐林, 孙锡良, 等. 湖南省洞庭湖区水文地质工程地质综合评价报告[R]. 长沙: 湖南省地质矿产局, 1985.  
CHEN Baoshun, ZHOU Mulin, SUN Xiliang, et al. Comprehensive evaluation report of hydrogeology and engineering geology in Dongting Lake, Hunan Province [R]. Changsha: Hunan Bureau of Geology and Mineral Resources, 1985.
- [31] 陈三新, 卢庆林, 李贵仁, 等. 湖南省地下水资源评价[R]. 长沙: 湖南省国土资源厅, 2002.  
CHEN Sanxin, LU Qinglin, LI Guiren, et al. Groundwater resources assessment of Hunan Province [R]. Changsha: Hunan Department of Land and Resources, 2002.
- [32] 詹沪成, 陈建生, 张时音. 洞庭湖湖区降水-地表水-地下水同位素特征[J]. 水科学进展, 2014, 25(3): 327–335. DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2014.03.003.  
ZHAN Lucheng, CHEN Jiansheng, ZHANG Shiyin. Characteristics of stable isotopes in precipitation, surface water and groundwater in the Dongting Lake region [J]. Advances in Water Science, 2014, 25(3): 327–335. DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2014.03.003.
- [33] 曹阳. 洞庭湖平原区浅层地下水动态特征研究[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2022.  
CAO Yang. Study on dynamic characteristics of shallow groundwater in Dongting Lake Plain [D]. Changsha: Changsha University of Science & Technology, 2022.
- [34] 孙晓梁, 杜尧, 邓娅敏, 等. 1996—2017年枯水期地下水排泄对洞庭湖水量均衡的贡献及其时间变异性[J]. 地球科学, 2021, 46(7): 2555–2564.  
SUN Xiaoliang, DU Yao, DENG Yamin, et al. Contribution and its temporal variation of groundwater discharge to the water mass balance of Dongting Lake from 1996 to 2017 [J]. Earth Science, 2021, 46(7): 2555–2564.
- [35] SUN X L, DU Y, DENG Y M, et al. Contribution of groundwater discharge and associated contaminants input to Dongting Lake, Central China, using multiple tracers ( $^{222}\text{Rn}$ ,  $^{18}\text{O}$ , Cl) [J]. Environmental Geochemistry and Health, 2021, 43(3): 1239–1255. DOI: 10.1007/s10653-020-00687-z.
- [36] 梁亚琳, 黎昔春, 郑颖. 洞庭湖径流变化特性研究[J]. 中国农村水利水电, 2015(5): 67–71.  
LIANG Yalin, LI Xichun, ZHENG Ying. Study on runoff variation characteristics of Dongting Lake [J]. China Rural Water and Hydropower, 2015(5): 67–71.
- [37] 周慧, 毛德华, 刘培亮. 三峡运行对东洞庭湖水位影响分析[J]. 海洋湖沼通报, 2014(4): 180–186. DOI: 10.13984/j.cnki.cn37-1141.2014.04.025.  
ZHOU Hui, MAO Dehua, LIU Peiliang. The

- investigation on water lever of East Dongting Lake affected by Three-Gorge Reservoir[J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 2014(4): 180-186. DOI: 10.13984/j.cnki.cn37-1141.2014.04.025.
- [38] ZHOU Z M, ZHANG G H, YAN M J, et al. Spatial variability of the shallow groundwater level and its chemistry characteristics in the low plain around the Bohai Sea, North China[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2012, 184(6): 3697-3710. DOI: 10.1007/s10661-011-2217-1.
- [39] 龙服忠, 张建新, 骆检兰, 等. 湖南省洞庭湖区生态地球化学调查总体综合评价报告[R]. 长沙: 湖南省洞庭湖区生态地球化学调查项目部, 2008.
- LONG Fuzhong, ZHANG Jianxin, LUO Jianlan, et al. Comprehensive evaluation report of ecological geochemical survey in Dongting Lake Area, Hunan Province [R]. Changsha: Department of Eco-geochemical Survey Project in Dongting Lake District, Hunan Province, 2008.
- [40] 危润初, 唐仕明, 吴长山, 等. 洞庭湖区浅层地下水氧化还原分带规律[J]. 中国环境科学, 2020, 40(4): 1715-1722. DOI: 10.19674/j.cnki.issn1000-6923.2020.0191.
- WEI Runchu, TANG Shiming, WU Changshan, et al. Redox zoning of shallow groundwater in Dongting Lake region [J]. China Environmental Science, 2020, 40(4): 1715-1722. DOI: 10.19674/j.cnki.issn1000-6923.2020.0191.
- [41] 袁瑞强, 章良玉, 龙西亭. 洞庭湖上游平原浅层地下水的铁锰污染[J]. 水文, 2021, 41(5): 97-102. DOI: 10.19797/j.cnki.1000-0852.20200200.
- YUAN Ruiqiang, ZHANG Liangyu, LONG Xiting. Fe-Mn pollution in shallow groundwater in the upper plain of the Dongting Lake [J]. Journal of China Hydrology, 2021, 41(5): 97-102. DOI: 10.19797/j.cnki.1000-0852.20200200.
- [42] 黄艳雯, 杜尧, 徐宇, 等. 洞庭湖平原西部地区浅层承压水中铵氮的来源与富集机理[J]. 地质科技通报, 2020, 39(6): 165-174. DOI: 10.19509/j.cnki.dzkg.2020.0618.
- HUANG Yanwen, DU Yao, XU Yu, et al. Source and enrichment mechanism of ammonium in shallow confined aquifer in the west of Dongting Plain [J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2020, 39(6): 165-174. DOI: 10.19509/j.cnki.dzkg.2020.0618.
- [43] 姜燕松. 洞庭湖滨湖平原区地下水铁锰污染特征研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2013.
- JIANG Yansong. Study on the characteristics of iron and manganese pollution in lakeshore groundwater of Dongting Lake [D]. Changsha: Hunan University, 2013.
- [44] HUANG Y W, DU Y, MA T, et al. Dissolved organic matter characterization in high and low ammonium groundwater of Dongting Plain, central China [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2021, 208: 111779. DOI: 10.1016/j.ecoenv.2020.111779.
- [45] STUYFZAND P J. Patterns in groundwater chemistry resulting from groundwater flow [J]. Hydrogeology Journal, 1999, 7(1): 15-27. DOI: 10.1007/s100400050177.
- [46] 张建新. 洞庭湖区土壤地球化学基准值与污染等级划分[J]. 物探与化探, 2014, 38(4): 793-799. DOI: 10.11720/wtyht.2014.4.29.
- ZHANG Jianxin. Soil geochemical baseline and pollution level division in Dongting Lake area [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2014, 38(4): 793-799. DOI: 10.11720/wtyht.2014.4.29.
- [47] 周惜时, 秦普丰, 李学初, 等. 洞庭湖平原区耕地环境质量初步评价[J]. 环境科学与技术, 2007, 30(6): 55-56, 71, 118. DOI: 10.19672/j.cnki.1003-6504.2007.06.021.
- ZHOU Xishi, QIN Pufeng, LI Xuechu, et al. Primary appraisal on environmental quality of cultivated land in Dongting Lake plain [J]. Environmental Science & Technology, 2007, 30(6): 55-56, 71, 118. DOI: 10.19672/j.cnki.1003-6504.2007.06.021.
- [48] 王婧文, 姚欣, 李有志, 等. 东洞庭湖莲藕种植区土壤重金属污染及其对莲藕重金属含量的影响[J]. 生态科学, 2017, 36(4): 46-51. DOI: 10.14108/j.cnki.1008-8873.2017.04.006.
- WANG Jingwen, YAO Xin, LI Youzhi, et al. Heavy metal contamination in soils and their impact on heavy metal content in lotus in the East Dongting Lake [J]. Ecological Science, 2017, 36(4): 46-51. DOI: 10.14108/j.cnki.1008-8873.2017.04.006.
- [49] 石雪芳, 张海涛, 张宇, 等. 洞庭湖表层沉积物中重金属污染评价与分析[J]. 环境科学与技术, 2017, 40(12): 267-277.
- SHI Xuefang, ZHANG Haitao, ZHANG Yu, et al. Analysis and pollution assessment of heavy metals in surface sediments of Dongting Lake [J]. Environmental Science & Technology, 2017, 40(12): 267-277.
- [50] 易凌霄, 曾清如. 洞庭湖区土壤重金属污染现状及防治对策[J]. 土壤通报, 2015, 46(6): 1509-1513. DOI: 10.19336/j.cnki.trtb.2015.06.036.
- YI Lingxiao, ZENG Qingru. The situation of heavy mental pollution in farmland and control measures in the Dongting Lake region [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2015, 46(6): 1509-1513. DOI: 10.19336/j.cnki.trtb.2015.06.036.
- [51] 刘娜, 曾静, 李旭, 等. 东洞庭湖湿地土壤重金属污



- 染特征及潜在生态风险评价[J]. 农业现代化研究, 2015, 36(5): 901-905. DOI: 10.13872/j.1000-0275.2015.0081.
- LIU Na, ZENG Jing, LI Xu, et al. Characteristics and potential ecological risk of heavy metals in wetland soils around East Dongting Lake [J]. Research of Agricultural Modernization, 2015, 36(5): 901-905. DOI: 10.13872/j.1000-0275.2015.0081.
- [52] LIN Y, LUO K, SU Z L, et al. Imposed by urbanization on soil heavy metal content of lake wetland and evaluation of ecological risks in East Dongting Lake [J]. Urban Climate, 2022, 42: 101117. DOI: 10.1016/j.uclim.2022.101117.
- [53] 欧芙蓉. 东洞庭湖湖滨带土壤主微量元素的分布和污染状况研究[D]. 长沙: 湖南师范大学, 2015.
- OU Furong. Study on the distribution and pollution condition of major and trace elements in eastern Dongting Lake lakeshore zone [D]. Changsha: Hunan Normal University, 2015.
- [54] 郭晶, 李利强, 黄代中, 等. 洞庭湖表层水和底泥中重金属污染状况及其变化趋势[J]. 环境科学研究, 2016, 29(1): 44-51. DOI: 10.13198/j.issn.1001-6929.2016.01.06.
- GUO Jing, LI Liqiang, HUANG Daizhong, et al. Assessment of heavy metal pollution in surface water and sediment of Dongting Lake [J]. Research of Environmental Sciences, 2016, 29(1): 44-51. DOI: 10.13198/j.issn.1001-6929.2016.01.06.
- [55] 高吉权, 朱姗姗, 刘鹏飞. 洞庭湖底泥沉积物重金属分布与生态风险评价[J]. 云南大学学报(自然科学版), 2019, 41(4): 851-859. DOI: 10.7540/j.ynu.20180567.
- GAO Jiquan, ZHU Shanshan, LIU Pengfei. Spatial distribution characteristics and ecological risk assessment of heavy metals in surface sediments of Dongting Lake [J]. Journal of Yunnan University (Natural Sciences Edition), 2019, 41(4): 851-859. DOI: 10.7540/j.ynu.20180567.
- [56] 杨帆, 袁隆湖, 黎一夫, 等. 湖南省主要水系底泥重金属污染特征及其生态风险评价[J]. 生态学报, 2022, 42(5): 1934-1946. DOI: 10.5846/stxb202008112087.
- YANG Fan, YUAN Longhu, LI Yifu, et al. Pollution characteristics and ecological risk assessment of heavy metals in sediments of main water systems in Hunan Province [J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(5): 1934-1946. DOI: 10.5846/stxb202008112087.
- [57] 尹宇莹, 彭高卓, 谢意南, 等. 洞庭湖表层沉积物中营养元素、重金属的污染特征与评价分析[J]. 环境化学, 2021, 40(8): 2399-2409. DOI: 10.7524/j.issn.0254-6108.2020042401.
- YIN Yuying, PENG Gaozhao, XIE Yinan, et al. Characteristics and risk assessment of nutrients and heavy metals pollution in sediments of Dongting Lake [J]. Environmental Chemistry, 2021, 40(8): 2399-2409. DOI: 10.7524/j.issn.0254-6108.2020042401.
- [58] LI F, HUANG J H, ZENG G M, et al. Spatial risk assessment and sources identification of heavy metals in surface sediments from the Dongting Lake, Middle China [J]. Journal of Geochemical Exploration, 2013, 132: 75-83. DOI: 10.1016/j.gexplo.2013.05.007.
- [59] LI Y P, ZHANG L, WANG S R, et al. Composition, structural characteristics and indication of water quality of dissolved organic matter in Dongting Lake sediments [J]. Ecological Engineering, 2016, 97: 370-380. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2016.10.035.
- [60] SUN L Q, LIANG X, JIN M G, et al. Sources and fate of excessive ammonium in the Quaternary sediments on the Dongting Plain, China [J]. Science of the Total Environment, 2022, 806: 150479. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.150479.
- [61] 彭世良, 余德清, 张永忠, 等. 洞庭湖区生态修复现状及应对策略[J]. 国土资源导刊, 2022, 19(2): 1-6.
- PENG Shiliang, YU Deqing, ZHANG Yongzhong, et al. Current situation and countermeasures of ecological restoration in Dongting Lake area [J]. Land & Resources Herald, 2022, 19(2): 1-6.
- [62] 李忠武, 王磊, 冉凤维, 等. 基于APCS-MLR模型的西洞庭湖沉积物重金属来源解析[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2022, 19(2): 1-14. DOI: 10.19951/j.cnki.1672-9331.2022.02.001.
- LI Zhongwu, WANG Lei, RAN Fengwei, et al. Source analysis of heavy metals in sediments of West Dongting Lake based on APCS-MLR model [J]. Journal of Changsha University of Science and Technology (Natural Science), 2022, 19(2): 1-14. DOI: 10.19951/j.cnki.1672-9331.2022.02.001.

## A review of groundwater system and environment research in Dongting Lake Basin

WEI Runchu<sup>1,2,3</sup>, WANG Wuxiang<sup>1,2,3</sup>, PENG Xiangxun<sup>1</sup>, OU-YANG Qi<sup>1,2,3</sup>,  
JIN Zhentao<sup>1</sup>, BAI Daoyuan<sup>4</sup>

(1.School of Hydraulic and Environmental Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China;

2.Key Laboratory of Water-Sediment Sciences and Water Disaster Prevention of Hunan Province, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China; 3.Key Laboratory of Dongting Lake Aquatic Eco-Environmental Control and

Restoration of Hunan Province, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China;

4. Geological Survey Institute of Hunan Province, Changsha 410014, China)

**Abstract:** Dongting Lake is an important storage lake in the middle reaches of the Yangtze River, and its complex groundwater system and prominent groundwater environmental problems have received continuous attention. This paper first summarizes and discusses the research results from three aspects: the Quaternary tectonic evolution, structure and circulation characteristics of groundwater system, and groundwater environment and associated influencing factors of the Dongting Lake Basin. Then, the research prospects of the groundwater system and environment of Dongting Lake were presented. The strong Quaternary tectonic activity in the Dongting Lake Basin has accumulated and deposited Quaternary sediments with an average thickness of 150 m, shaping the tectonic and stratigraphic pattern for the groundwater system in the lake area. The groundwater system in the Dongting Lake area is controlled by multiple factors such as the overall topography of the basin, basement tectonic pattern, aquifer distribution, and surface river and lake systems, and the water circulation process is very complex. Influenced by the primary geochemical environment and human activities, groundwater in a large area of the Dongting Lake Plain has problems of water quality factors exceeding the standards, such as iron, manganese, ammonia, and nitrogen, and many water quality factors show obvious spatial distribution patterns. Based on the existing research results and the needs of the Dongting Lake Plain in terms of water resources allocation, wetland protection, and ecological environment management. This paper argues that future research on the groundwater system and environment of Dongting Lake will be focused on 1) the water exchange process and its biogeochemical succession law in the vertical interaction zone of Dongting Lake plain area, 2) the scale differentiation and surface water-groundwater interaction of the Dongting Lake groundwater system under the complex river-lake system, and 3) the water environment evolution mechanism of the lake plain under the coupling effect of multiple elements in the Dongting Lake Plain.

**Key words:** Dongting Lake; tectonic evolution; groundwater system; water cycle; groundwater environment; heavy metal

**Manuscript received:** 2023-01-10; **revised:** 2023-03-17; **accepted:** 2023-03-18

**Foundation item:** Project (41602264) supported by the National Natural Science Youth Foundation of China; Project (2020JJ5572) supported by Natural Science Youth Fund of Hunan Province; Project (XSKJ2019081-09) supported by key scientific research projects of Hunan Provincial Department of Water Resources

**Corresponding author:** WEI Runchu(1984—)(ORCID:0000-0001-7038-1628), male, associate professor, research interest: underground hydrological evolution. E-mail: weirunchu@163.com

(责任编辑:石月珍;校对:刘平;英文编辑:黄志勇)