

doi: 10.12029/gc20210504

王雨山, 尹德超, 王旭清, 祁晓凡, 夏雨波, 马稚桐, 张亮, 徐蓉桢. 2021. 雄安新区白洋淀湿地地表水和地下水转化关系及其对芦苇分布的影响[J]. 中国地质, 48(5): 1368–1381.

Wang Yushan, Yin Dechao, Wang Xuqing, Qi Xiaofan, Xia Yubo, Ma Zhitong, Zhang Liang, Xu Rongzhen. 2021. Groundwater– surface water interactions in the Baiyangdian wetland, Xiong'an New Area and its impact on reed land[J]. *Geology in China*, 48(5): 1368–1381(in Chinese with English abstract).

雄安新区白洋淀湿地地表水和地下水转化关系及其对芦苇分布的影响

王雨山¹, 尹德超¹, 王旭清¹, 祁晓凡², 夏雨波³, 马稚桐⁴, 张亮⁵, 徐蓉桢¹

(1. 中国地质调查局水文地质环境地质调查中心, 河北 保定 071051; 2. 中国地质调查局地质环境监测院, 北京 100081; 3. 中国地质调查局天津地质调查中心, 天津 300170; 4. 长安大学环境科学与工程学院, 陕西 西安 710054; 5. 中国地质大学(武汉)环境学院, 湖北 武汉 430074)

摘要:查明地表水和地下水作用关系对湿地生态保护与修复具有重要意义。采用地表水和地下水位监测、氢氧稳定同位素分析、湖床沉积物温度示踪等方法,研究了白洋淀渗漏对周边浅层地下水的影响范围和深度,评价了地表水垂向渗漏速率,并探讨了芦苇分布面积和地表水位以及地下水位埋深的关系。结果表明:白洋淀渗漏受地质结构和水力梯度等因素影响,对浅层地下水垂向上影响深度为 20 m,水平向上影响范围存在较大空间变异。周边浅层地下水的补给来源为大气降雨和地表水,其中地表水渗漏的补给比例为 0~90.5%。淀区渗漏速率 0.01~0.59 mm/d,和含水层埋深关系密切,埋深越小,越有利于地表水渗漏。1976—2020 年,白洋淀芦苇分布面积和地表水位关系密切。当地表水位为 6.3~6.8 m 时,芦苇分布面积最大,在水位小于 6.3 m 条件下芦苇面积随着水位增高而增加,大于 6.8 m 条件下随着水位增高而减少。芦苇台地下水埋深和地表水位显著相关,在 2020 年 4—9 月芦苇生长期,除雨季前期外多数时段台地地下水埋深均适宜芦苇发育,建议在雨季前期实施生态补水,通过降低台地地下水埋深促进芦苇生长发育。研究结果可为白洋淀生态补水、渗漏防治和生态保护提供参考。

关键词:地表水渗漏;氢氧同位素;温度示踪;芦苇分布;地质调查工程;白洋淀;雄安新区

中图分类号:P641.2;X143 文献标志码:A 文章编号:1000-3657(2021)05-1368-14

Groundwater–surface water interactions in the Baiyangdian wetland, Xiong'an New Area and its impact on reed land

WANG Yushan¹, YIN Dechao¹, WANG Xuqing¹, QI Xiaofan², XIA Yubo³,
MA Zhitong⁴, ZHANG Liang⁵, XU Rongzhen¹

(1. Center For Hydrogeology and Environmental Geology, CGS, Baoding 071051, Hebei, China; 2. China Institute of Geo-Environmental Monitoring, CGS, Beijing 100081, China; 3. Tianjin Institute of Geology and Mineral Resources, CGS, Tianjin 300170, China; 4. School of Environmental Science and Engineering, Chang'an University, Xi'an 710054, Shaanxi, China; 5. School of Environment Studies, China University of Geosciences, Wuhan 430074, Hubei, China)

收稿日期:2021-03-23; 改回日期:2021-07-25

基金项目:国家自然科学基金(4170021290)和中国地质调查局项目(DD20190300)资助。

作者简介:王雨山,男,1984年生,高级工程师,主要从事水文地质生态地质调查研究;E-mail: wangyushan@mail.cgs.gov.cn。

Abstract: It is of great significance to find out the interaction between surface water and groundwater for wetland ecological protection and restoration. A multiply tracers approach including water level monitoring, oxygen and hydrogen isotopes analysis and temperature tracing was used to identify the location, magnitude and depth of surface water leakage to shallow groundwater. As also, a brief study of relationship between reed land and water level and groundwater depth was conducted. The results show that the scope of leakage water is controlled by geological and hydrogeological conditions. The depth is about 20m and the length from lake shore varies spatially. The recharge sources of surrounding shallow groundwater are atmospheric rainfall and surface water, of which the recharge proportion of surface water leakage is 0–90.5%. The leakage rate is from 0.01 to 0.59 mm/d inside the wetland and has a strong relationship with the depth of the shallow aquifer. The less the burial depth, the more conducive to surface water leakage. There was a significant relationship between reed land and the average surface water level from 1976 to 2020. When the surface water level was between 6.3 to 6.8 m, the reed land was the largest. When the water level was less than 6.3 m, the reed land had a positive correlation with it, while the reed land area decreased as the water level was higher than 6.8 m. Groundwater depth had an obvious relationship with surface water level where reeds grew. During the growing season, it showed that groundwater depth was suitable for reeds growth most of the time. In order to prompt reed growth, it is suggested that artificial recharge should be conducted before monsoon season to lower groundwater depth. The conclusions can provide basic supports for water recharge, leakage resisting and eco–environment protecting in the Baiyangdian wetland.

Keywords: surface water leakage; oxygen and hydrogen isotopes; temperature tracing; reed land; hydrogeology survey engineering; Baiyangdian wetland; Xiong'an New Area

About the first author: WANG Yushan, born in 1984, senior engineer, engaged in the study of hydrogeology and eco–geology; E–mail: wangyushan@mail.cgs.gov.cn.

Fund support: Supported by National Natural Science foundation (No.4170021290) and the project of China Geological Survey (No.DD20190300).

1 引言

湿地地表水和地下水交互作用对于维持湿地水平衡和生态功能具有重要作用(Crosbie et al., 2009; 范伟等, 2012), 在干旱半干旱地区, 两者之间的补排关系深刻影响着湿地的形成演化(万力等, 2005; Min et al., 2010; Schwerdtfeger et al., 2016), 并进一步作用于湿地的物理–化学–生物过程, 最终影响了湿地生态系统的结构特征和功能(Paces et al., 2014; 李云良等, 2019)。大量研究表明, 查明湿地地表水和地下水作用规律及其过程对湿地生态保护与修复意义重大(Shang et al., 2016)。三江平原由于大规模垦殖和农业开采地下水造成湿地萎缩(章远钰等, 2009), 北京西苑地下水超采导致湿地面积减少(韩爱果等, 2006), 埃塞俄比亚 wonji 湿地由于周边地下水位上升导致土壤盐渍化(Furi et al., 2011)。

白洋淀是华北平原最大的湖泊湿地, 历史上曾发生多次生态危机(马震等, 2021)。2017年雄安新区成立以来, 实施了大规模的生态环境治理。地表水和地下水交互作用关系及其对生态的影响是生

态修复过程中需要解决的关键地质问题, 目前已开展了相关研究。袁瑞强等(2012)研究表明白洋淀周边浅层地下水水位和水质受地表水渗漏影响。王凯霖等(2018)通过分析地下水流场特征认为白洋淀地表水单向补给地下水。李刚等(2021)基于地下水位和温度动态的分析, 反演了湖岸带垂向渗透系数。李英华等(2004)探讨了白洋淀入淀流量、蒸发和输入沙量等水文特征的变化对白洋淀水质、水生生物资源和湿地功能的影响, 并提出了可持续发展对策。Zhao et al. (2020)从水文地球化学角度, 证实地表水和浅层地下水关系密切。

然而, 湖泊湿地地表水和地下水交互作用受水文和水文地质等多种因素影响, 时空变化较为复杂, 定量评价其作用关系是该领域的研究难点(王文科等, 2018; 吴斌等, 2019)。以往工作尽管对白洋淀和地下水补排关系取得了一定认识, 但多以定性分析为主, 对白洋淀渗漏速率的定量评价尚存在不足, 特别是在地表水和地下水转化对生态的影响方面考虑较少。2019年以来, 中国地质调查局实施了白洋淀地区生态地质调查项目, 开展了钻探、测试和水文–气象–地下水监测工作。基于对白洋淀

浅部结构、水位动态和氢氧稳定同位素特征的认识,分析了白洋淀地表水对地下水的影响范围、深度以及渗漏速率的空间变化,并研判了1976—2020年白洋淀芦苇分布面积和湿地水位的关系,进一步从芦苇生长的角度探讨现阶段台地地下水位埋深的适宜性和应对措施,旨在为白洋淀生态补水、渗漏防治和生态保护提供基础依据。

2 研究区概况

白洋淀位于雄安新区,是河北平原上最大的淡水湿地,主体位于安新县境内。在地貌位置上,白洋淀处于太行山东麓的滹沱河冲积扇平原和永定河冲积扇平原夹持的低洼地区,由于河流的差异堆积作用,在冲积扇或古河道高地之间逐步形成了一系列扇间洼地和河间洼地,构成了白洋淀湖盆(张梦嫚等,2018)。大清河南部支流潞龙河、孝义河、唐河、府河、漕河、瀑河、萍河及白沟引河等8条河流汇入白洋淀,形成了湖泊湿地(张敏等,2016)。在天然和人为因素作用下,淀内形成了沟壕相连、淀中有淀和水-田相间分布的生态格局,主要淀泊包括藻荇淀、烧车淀、小白洋淀、捞王淀、泛鱼淀和范峪淀等。在7.0 m白洋淀水位条件下,水深一般为1~3 m,部分村庄附近可达10 m。雄安新区成立以来,白洋淀生态环境治理取得显著成效,水位基本稳定在7 m左右,水质持续改善,2020年湖心区水质已提升到IV类。

白洋淀淀区及周边以湖相沉积为主,50 m以浅粉土、粉质黏土和黏土广泛分布。根据钻孔资料,淀区50 m以浅黏性土厚度占比达到81.1%,粉砂、细砂和中砂构成的砂层厚度占比18.9%,且空间上分布不连续(图1)。浅层地下水(<50 m)主要赋存于条带状砂层中,含水层结构较为复杂,上部由稳定分布的粉土、粉质黏土构成相对隔水层,垂向上分布数层厚度不等的粉砂、细砂层。浅层地下水位埋深0~15 m,淀区一般0.5~4 m,向远离淀区方向逐渐增加,总体上浅层地下水由白洋淀流向周边。淀区西北、东北和西南方向水力梯度为1.5‰~3‰,东部地区降低,约为1‰。白洋淀周边受农业开采影响,形成了多个降落漏斗,湿地渗漏已成为浅层地下水的重要补给来源。

3 研究方法

3.1 水文-气象-地下水观测

在白洋淀淀区及周边布设浅层地下水监测井35个,其中在烧车淀、藻荇淀和小白洋淀周边布设监测剖面3条,每条剖面由垂直湖岸部署分层监测井3个,井间距500~700 m,每个井孔监测3层地下水位,监测深度分别为上层(0~20 m)、中层(20~35 m)、下层(35~50 m)。另外,在捞王淀开展地表水位和降雨观测。地下水和地表水水位、降雨监测频率均为1次/h。

3.2 温度示踪

根据白洋淀浅部地质结构特征和砂层埋深,沿淀区部署了1条温度示踪监测剖面,布设监测站点5个(图1),分别监测气温、湖水温度(湖底)、湖底以下不同深度沉积物温度(间距0.1 m),监测频率1次/30 min,通过地表水-沉积物介质温度的高精度连续监测来评价垂向渗漏速率。湖水和地下水相互作用在湖底潜流带内进行,考虑到白洋淀垂向渗漏补给地下水,且垂向上温度差异性较大,故把温度分布近似概化为垂向一维稳定热转移概念模型。假定潜流带中水流服从达西公式,针对湖底地下水和地表水垂向交换(忽略侧向交换),利用热示踪法,对潜流交换中的热量运输和转移采用饱和多孔介质的一维稳态热扩散对流方程来描述(林晶晶等,2015),方程如下:

$$k \frac{\partial^2 T}{\partial Z^2} - \frac{\rho_f c_f q_z}{\rho c} \frac{\partial T}{\partial Z} = \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

式中: T —在深度为 Z 的湖床沉积物温度(°C); ρc —固液系统的体积热容($\text{J} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$); ρ_f —液体密度($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$); c_f —液体的比热容($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$); k —固-液系统的热导率($\text{J} \cdot \text{S}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$); q_z —湖水渗漏速率($\text{m} \cdot \text{S}^{-1}$)。

当给定边界条件: $Z=0$ 时, $T=T_0$; $Z=L$ 时, $T=T_L$,可以得到任意深度处沉积物温度的解析解:

$$\frac{T - T_0}{T_L - T_0} = \frac{\exp\left(-\frac{q_z \rho_f c_f}{k} z\right) - 1}{\exp\left(-\frac{q_z \rho_f c_f}{k} L\right) - 1} \quad (2)$$

由上式可知,在特定边界条件下,沉积物温度和深度存在定量关系,由此根据湖底沉积物不同深

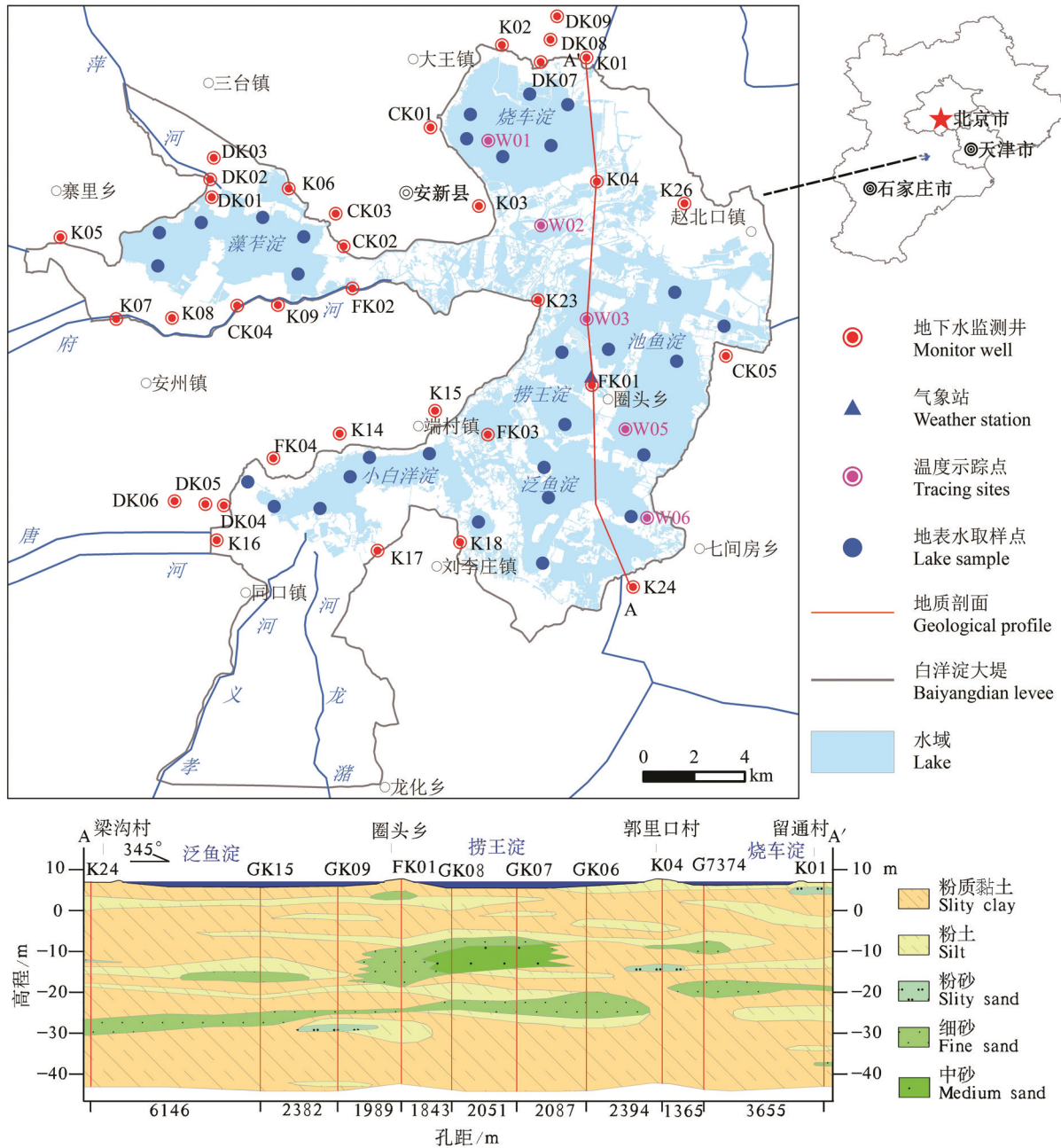


图1 研究区地理位置和地质剖面图
 Fig.1 Sampling locations and geological profile of the study area

度温度数据,可以反演垂向渗漏速率。本次评价各参数采用经验值(Hatch et al., 2006), k 取值 $2.0 \text{ J} \cdot \text{S}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$, ρ_f 取值 $10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, c_f 取值 $4.2 \times 10^3 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ 。

3.3 采样和分析

2020年全年采集淀区大气降雨样品6组,2020年6月在白洋淀及周边采集地下水和地表水共83组,包括上层地下水35组、中层9组、下层9组和地表水30组,用于测试 ^{18}O 和 ^2H 同位素。采样时均避

开降雨事件,并在1~2 d内完成。地表水取自水面以下0.3 m,地下水样采自监测井。采样后1~2 d内送至中国地质调查局水文地质环境地质调查中心实验室完成测试, $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 采用波长扫描光强衰减光谱技术测试,精度分别为0.1‰和0.025‰,分析结果采用VSMOW标准。

3.4 遥感解译

利用Landsat MSS/TM/ETM+/OLI、GF-01/GF-

02/GF-06等卫星影像建立1976—2020年白洋淀湿地监测序列,监测频率为1次/3年,时相选择在芦苇的生长周期以内(每年5—10月),空间分辨率为30 m。利用不同类型地物在光谱空间中的差异性,选取纯净地物像元作为训练样本,采用监督分类方法提取地物信息。在ArcGIS软件中与真彩色影像叠加进行人工交互解译处理,获取各个时相的地物分类结果,进一步得出芦苇分布面积。

4 结果分析

4.1 地表水和地下水位动态特征

根据白洋淀湿地水文情势,地表水水位的控制因素包括河流补给、降雨补给、生态补水、蒸散发、渗漏、下游放水等,其中引黄济淀、南水北调补给和山区水库放水等生态补水成为目前白洋淀湿地的重要水源,也是影响白洋淀水位的主要因素。2019年10月至2020年10月监测数据显示(图2),白洋淀水位6.8~7.5 m,变幅0.7 m,年内变化明显,总的特

征是秋冬季水位上升,春季下降,夏季波动。2019年10月至2020年3月,受引黄济淀等生态补水影响,白洋淀水位持续上升,局部时段因向下游放水水位下降。2020年3月至6月,白洋淀水位主要受蒸散发控制,呈现持续下降趋势,并降至年内最低。7月至8月进入雨季,地表水位明显受强降雨影响。2020年9月以后,随着山区水库放水等水源到达淀区,水位逐渐上升,期间因局部时段向下游放水而下降。

和地表水相比,地下水位动态变化的影响因素更为复杂,和降雨入渗、地表水补给、蒸发、侧向径流和人工开采等多种因素有关(Wang et al., 2011; 刘裕等, 2019; 郭旭等, 2019)。根据浅层地下水动态变化特征大致可以分为3类:一类是年内水位较为稳定,无显著变化;另一类是总体上水位稳定,但对大规模降雨事件有明显响应;还有一类是水位动态变化较大,灌溉期水位降低,灌溉后水位缓慢恢复,年内形成若干个水位低值。地下水位动态变

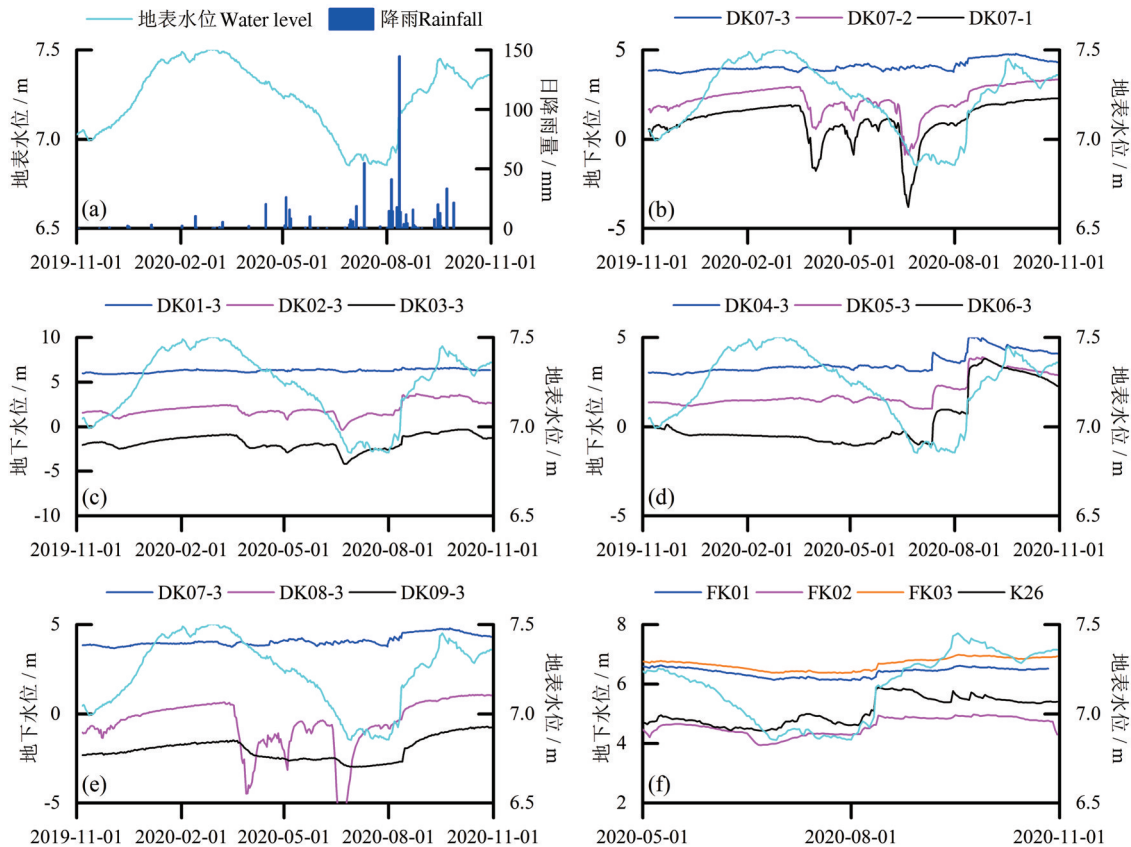


图2 地表水和典型监测井地下水位动态
Fig.2 Water level dynamics of groundwater and surface water

化特征具有空间变异,总体上,水平向上远离淀区的监测井水位动态变化大,垂向上随着监测井深度增加,水位动态受灌溉开采影响更为显著。下面以代表性监测井地下水位动态为例进行说明:

3条监测剖面呈现出较为一致的规律性,同一剖面,随着远离淀泊方向地下水位逐渐降低,表明地下水径流方向为由淀区至周边。同一监测点位,地下水位随着深度增加而降低。表明上层地下水位高于下层地下水位。藻荇淀周边监测剖面包括DK01-DK03三个分层监测井。DK01孔距离藻荇淀较近,DK01-3孔所代表的20 m以浅上层地下水位动态较为稳定,监测期内水位变幅仅为0.73 m。DK01-2(监测中层)、DK01-1(监测下层)动态变化较大,受到农业开采影响。DK02、DK03孔不同深度水位动态均受农业开采影响,表现为灌溉期水位陡降,一年内形成多个水位低值,其中35~50 m深度监测井尤为明显。这表明,随着离地表水距离的增加,浅层地下水位动态受农业开采的影响程度随之增加。小白洋淀周边监测剖面,包括DK04-DK06三个分层监测井,20 m以浅监测井地下水位动态主要受降雨控制,7—8月单日降雨后,剖面上3个监测井水位均明显上升。20~50 m深度监测井地下水位动态呈现出开采控制型特征。烧车淀周边监测剖面,包括DK07、DK08和DK09三个分层监测井。监测期内DK07孔由浅到深不同深度水位为3.68~4.79 m、-0.89~3.35 m、-3.8~2.29 m,变幅分别为1.11 m、4.24 m、6.09 m,表明20 m以浅监测井地下水位较20~50 m更为稳定,DK1-2、DK1-1水位动态主要受农业开采控制,这和藻荇淀周边监测剖面较为一致。沿剖面远离淀泊方向,DK08-3水位为-7.62~1.08 m、变幅8.7 m,明显受农业开采影响。DK09-3因所在地区受雄安新区建设影响,原有农业用地转为建设备用地,水位动态较为稳定,水位为-2.98~-0.73 m、变幅2.26 m。从3条监测剖面可以看出,20 m以浅的上层监测井地下水位动态多数较为稳定,20 m以下监测井水位动态多受农业开采控制。

FK01、FK02、FK03和K26为淀区监测井,该类监测井均位于淀泊内部,浅部含水层上部为地表水覆盖。由于上部隔水层岩性和厚度的不同,地下水动态特征具有差异性。FK01、FK03孔位于东部捞

王淀、池鱼淀,水位稍低于地表水位,监测期内水位变幅较小,分别为0.5 m、0.62 m,两孔水位对极端降雨有较好的响应。FK02孔位于藻荇淀,水位低于FK01和FK03孔,监测期内水位变幅1.03 m,局部时段受地下水开采影响。K26所在地为水田,水位动态受农业开采和降雨双重因素控制,波动相对较大,雨季水位上升明显。

4.2 氢氧稳定同位素特征

地下水位动态受多种因素影响,单一方法分析结果可能存在较大误差。氢氧稳定同位素是水体的天然组成,记录了水循环过程,广泛用于指示地表水和地下水交互作用研究中(王雨山等,2015)。据测试结果,地表水 δD 和 $\delta^{18}O$ 值分别为-41.21‰~-25.06‰、-4.35‰~-1.29‰。20 m以浅地下水 δD 和 $\delta^{18}O$ 值分别为-66.93‰~-35.09‰、-8.84‰~-3.35‰,20~35 m地下水分别为-73.39‰~-52.28‰、-9.84‰~-6.6‰,35~50 m地下水分别为-79.83‰~-61.44‰、-10.84‰~-7.64‰。可以看出,湿地地表水同位素较地下水更为富集,且相对变化较小。地下水分层监测井样品显示,随着深度增加氢氧同位素贫化,说明垂向上由浅到深,地下水接受大气降雨和地表水补给的作用逐渐减弱,受侧向径流的影响增加,这表明地表水渗漏主要影响上层地下水,影响深度约20 m。

根据降雨同位素数据,当地大气降雨线方程为 $\delta D=8.58\delta^{18}O+10.32$ 。从 $\delta D-\delta^{18}O$ 关系图(图3)可以看出,地表水和地下水均分布在当地降雨线下方,地表水沿着蒸发线分布,表明经历了较强的蒸发作用。由于白洋淀入淀河流中仅有府河和孝义河常

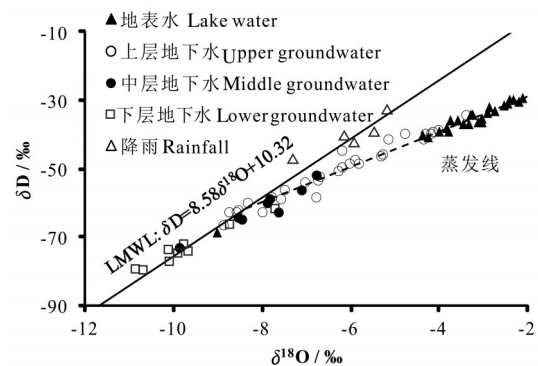


图3 $\delta D-\delta^{18}O$ 关系图

Fig.3 $\delta D-\delta^{18}O$ diagram

年有水补给,湿地水源主要依靠不定期的人工补水,地表水水力微弱,循环交替较差,蒸发较为强烈(何明霞等,2020)。同时可以看出,部分上层和 中层地下水样品沿着当地降雨线分布,表明大气降雨对地下水具有补给作用。下层地下水尽管沿着当地降雨线分布,但较大气降雨同位素贫化,表明可能有其他补给来源(陈松等,2019)。大部分地下水 δD 和 $\delta^{18}O$ 值较地表水明显偏负,表明两者之间水力联系较差,特别是中层和下层地下水样品和地表

水分布于不同区间,两者具有不同的补给来源且几乎无水力联系。

4.3 湖床沉积物温度特征

地表水和地下水两种介质中温差越大,利用温度来评价渗漏速率的效果越好(曾磊等,2015)。为此,选择冬季2020年11月27日至12月3日作为评价时段。根据监测数据(图4),该时段淀区气温 $-2.3\sim 5.2\text{ }^{\circ}\text{C}$,变幅 $7.5\text{ }^{\circ}\text{C}$,呈波动中下降趋势。相对于气温,湖底水温相对变化较小,变化范围 $5.57\sim$

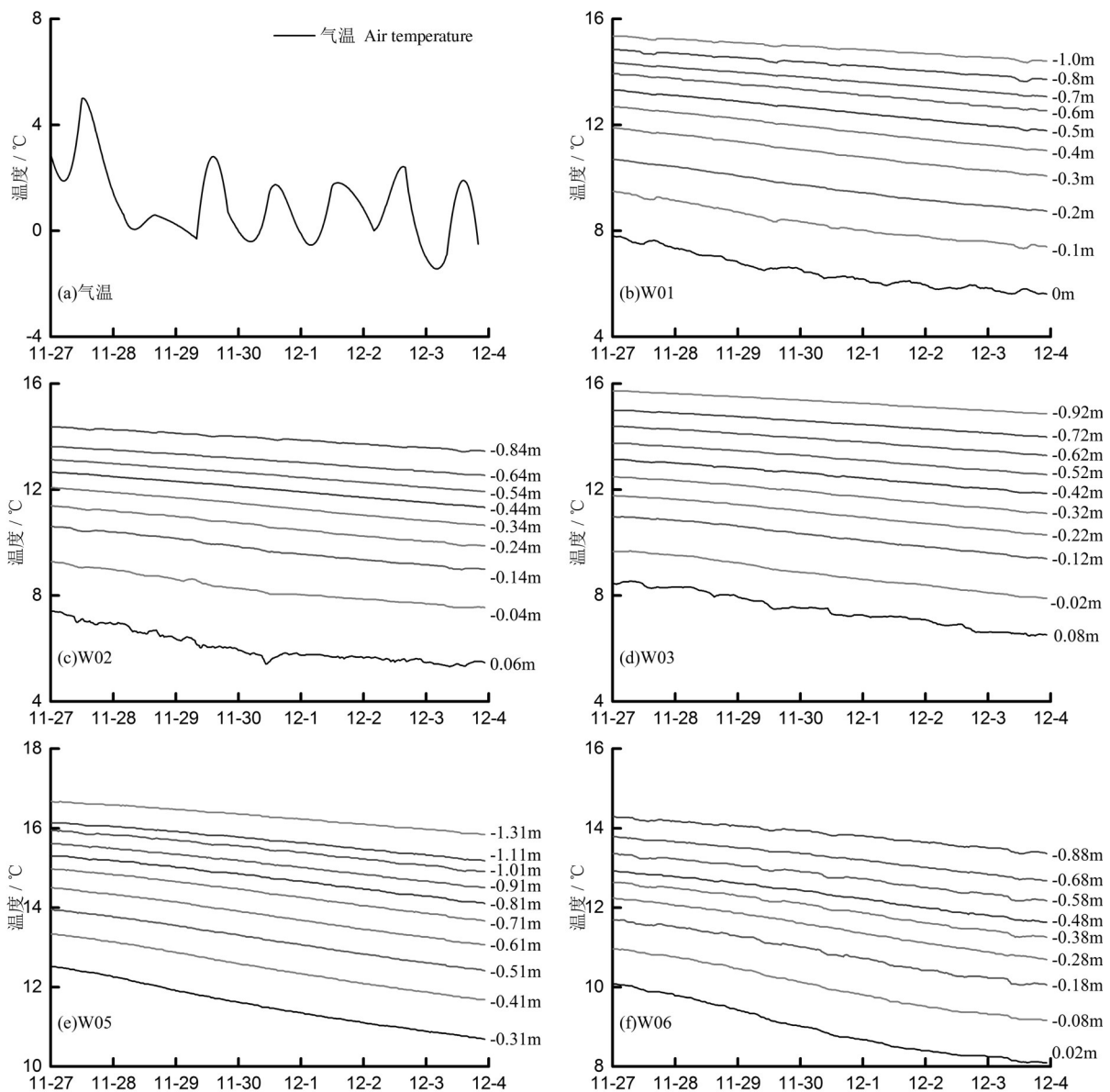


图4 各监测点沉积物温度动态变化
Fig.4 Temperature dynamic change of sediments

7.82℃,变幅2.25℃,同一时段内对气温变化的响应存在一定滞后。湖底沉积物温度变化更为稳定,以W01监测点为例,0.2 m、0.4 m、0.6 m、0.8 m和1 m深度沉积物温度变化范围分别为8.74~10.69℃、11.03~12.68℃、12.51~13.93℃、13.64~14.84℃、14.34~15.34℃,变幅分别为1.95℃、1.65℃、1.42℃、1.20℃、1.01℃,可见随着深度增加,湖床沉积物温度也随之升高,随时间变化的幅度降低,趋于稳定。总体上,气温是控制沉积物温度的重要因素,随着气温降低不同深度沉积物温度均降低。

冬季湖水温度低于沉积物温度,且湖水温度随时间的波动较大。一般来说,渗漏量越大,表明湖水与地下水的连通性越好,河床温度越接近湖水温度,垂向上温度相对稳定的位置距湖床表面越远(霍思远等,2019),湖水和地下水相互作用的潜流带深度越大。各监测站点不同时段沉积物温度垂向变化特征显示,随着深度增加,温度变化幅度减少,逐渐呈稳定趋势。不同站点沉积物温度趋于相对稳定的深度不一,W01、W03、W05相对稳定深度分别为0.2 m、0.22 m和0.31 m,W02稳定深度为0.34 m、W06稳定深度大于0.88 m,可以推测W02和W06的渗漏速率更高。

5 讨论

5.1 地下水位对地表水位动态的响应

地下水位的动态变化是含水层对地表水渗漏的内在响应,是指示地表水和地下水作用规律的重要信息。为揭示浅部含水层对地表水位动态变化的响应特征,深入分析地表水渗漏规律,必须尽量排除农业开采和大气降雨的干扰。为此,选择2019年12月1日至2020年1月31日的生态补水期为分

析时段,该时段内湿地地表水位持续上升,几乎无降雨和农业开采,浅层地下水位的上升应当主要来自地表水渗漏补给。通过对比典型生态补水期白洋淀湿地地表水和周边浅层地下水位变化规律,分析地表水和地下水作用关系。将湿地地表水位和35个20 m深度以浅监测井的地下水位动态进行相关性分析(表1),结果表明,DK01-3等20个监测井地下水位动态和地表水相关系数0.653~0.984,呈显著正相关,表明该类地下水可以较好地接受地表水渗漏补给。K04等7个监测井相关系数为0.315~0.538,呈正相关,表明和地表水存在水力联系。DK03-3等8个监测井和地表水位动态不相关或负相关,表明和地下水无水力联系或联系较弱。

以上分析表明,湿地地表水和地下水补排关系存在较大的空间变异,这是由地层结构所决定的。白洋淀浅部地层以河湖相沉积为主,浅层地下水赋存于不连续分布的粉砂、细砂层中,上部由粉土、粉黏构成相对隔水层。这种地质结构特征的空间变化决定了地表水和地下水补排关系的变化。以淀区监测井为例,FK01、FK03相关系数分别为0.935、0.984,生态补水期间地下水位上升明显。根据地质结构特征,这两个监测井均位于淀区浅部古河道分布区,砂层埋深较浅,分别为2.6 m、6.5 m,地表水可以通过相对隔水层渗漏补给浅层地下水,该类监测井地下水位动态主要受地表水渗漏补给影响。根据水位动态特征,浅部古河道地下水对地表水位响应极好,地表水位增加后,地下水位也随之增加,几乎不存在滞后现象。这表明,由于地表水和浅部含水层之间的相对隔水层厚度较薄,渗漏可以迅速对地下水形成补给,这些地段也是地表水强渗漏区。FK02和K26井同样位于淀区,砂层埋深分别为

表1 地表水和地下水位相关性分析

Table 1 Relationship of groundwater and surface water

监测井	地表水	监测井	地表水	监测井	地表水	监测井	地表水	监测井	地表水
DK01-3	0.929**	DK08-3	0.910**	K06	0.761**	K17	0.411*	CK03	0.735**
DK02-3	0.910**	DK09-3	0.954**	K07	0.798**	K18	0.653**	CK04	0.223
DK03-3	0.876**	K01	0.983**	K08	0.334*	K23	-0.783**	CK05	0.984**
DK04-3	0.973**	K02	0.960**	K09	0.368*	K24	0.883**	FK01	0.852**
DK05-3	0.922**	K03	0.012	K14	0.315*	K26	-0.234	FK02	-0.540**
DK06-3	-0.541*	K04	0.538*	K15	0.023	CK01	0.937**	FK03	0.912**
DK07-3	0.961**	K05	0.432*	K16	0.405*	CK02	0.725**	FK04	-0.341

注:*代表在0.05水平上显著相关,**代表在0.01水平上显著相关。

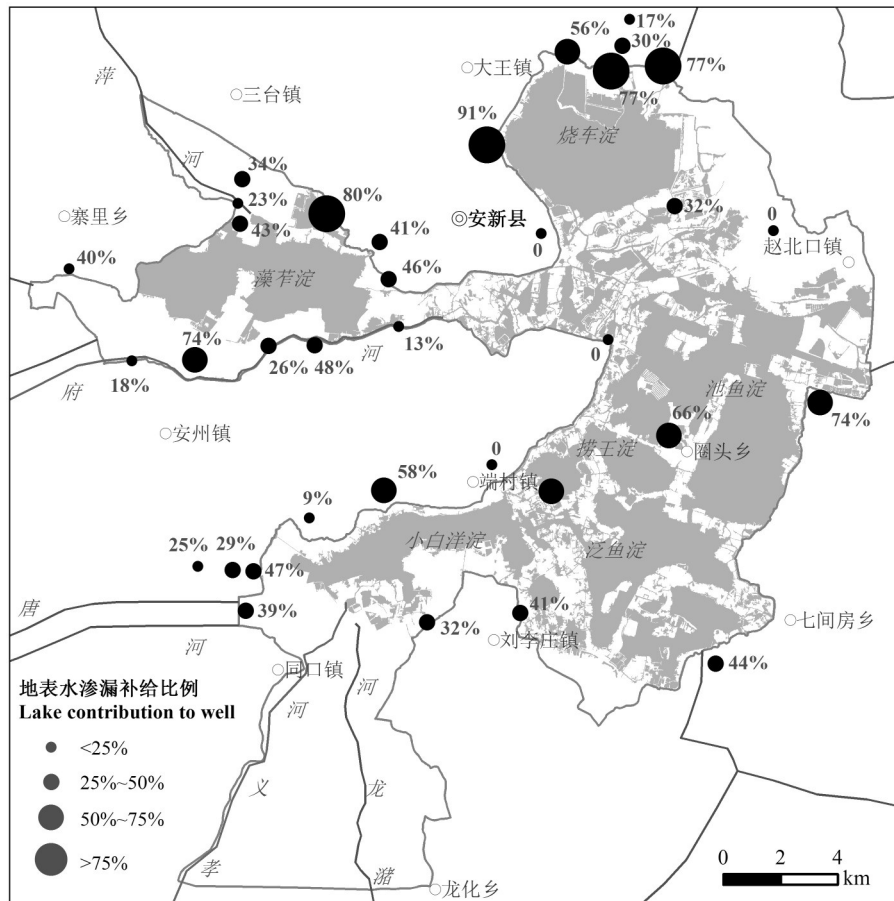


图5 各取样点地表水补给比例
Fig.5 The proportion of surface water recharge

16.3 m、8.7 m,较FK01、FK03井埋深增加,且上部均分布一层粉黏,渗透性较差,地表水难以通过厚层隔水层渗漏补给地下水,因而和地表水水位动态相关性较差。

5.2 同位素对渗漏的指示意义

上层地下水样品均取自白洋淀淀区及湖岸附近,根据研究区水文地质条件,上层地下水从淀区流向周边,且垂向上由浅到深水位降低。这表明,上层地下水仅以大气降雨和地表水为补给来源。氢氧同位素关系图也显示,多数上层地下水均分布于大气降雨线和地表水样品之间。考虑到上层地下水埋深4~15 m,多位于潜水蒸发深度以下,因此受蒸发作用影响较小。由此,可以通过建立氧同位素二元混合模型来计算地表水渗漏对地下水的贡献。其中,大气降雨端元取分布在降雨线上的上层地下水样品平均值,地表水端元取不同淀区地表水样品平均值,分别为-8.48‰、-2.81‰。

根据二元模型,35个上层地下水样品中地表水的贡献比例为0~90.5%(图5)。其中,K01、K02、K06、K08、K14、DK07-3、FK01、FK03、CK01、CK05等10个样品地表水贡献比例大于50%,表明所在区段地表水渗漏作用较强,地表水和地下水联系密切,该类监测井多数位于浅部古河道分布区,为地表水强渗漏带。值得注意的是,CK01地表水贡献比例达到91%,但根据该井地质结构特征,含水层埋深较大,渗透条件较差。推测可能是由于该井地下水位埋深较浅,受蒸发影响导致重同位素富集,二元模型未考虑该因素导致评价结果存在偏差。K09等15个样品地表水贡献比例25%~47.7%,表明地表水对地下水有渗漏补给,但作用强度变弱,该类监测井所在区段为中等渗漏带。K07等10个样品地表水贡献比例0~23.5%,表明地表水和地下水之间补排关系较弱,所在区段为弱渗漏带。其中,K03、K15、K23和K26等样品取自湖滨带,但地

表水对地下水的贡献比例为0,表明所在区段渗透条件极差,地表水难以对地下水形成补给。

3条监测剖面显示,远离淀泊方向,地表水对地下水贡献比例增降低趋势。烧车淀北部监测剖面的DK8-3、DK9-3孔尽管水位动态和地表水相关性较好,但随着远离淀泊方向,地表水补给比例迅速降至30%和17%,这也是烧车淀地表水渗漏所能到达的影响范围。藻荇淀监测剖面中地表水补给比例23.2%~42.6%,小白洋淀监测剖面各井样品接受地表水补给比例25.0%~46.7%,表明均受到渗漏补给。

水力梯度是影响白洋淀和地下水补排关系的又一因素。根据浅层地下水动力场特征,淀区西

北、东北和西南地下水多用于农业灌溉,水位较低,和地表水之间水位差3~12 m,水力梯度一般为1.5‰~3‰。淀区东部浅层地下水开发利用较少,水位较高,和地表水之间水位差2~6 m,水力梯度约1‰。水力梯度的差异导致了地表水和地下水补排关系的差异,同样是处于地表水强渗漏带,淀区西部地下水样品中地表水渗漏补给比例高于东部。

5.3 渗漏速率评价

根据公式(2),通过将不同深度沉积物温度监测数据和计算数据进行拟合,获取了评价时段5个监测点的渗漏速率。由于湖底0.2 m深度以下温度趋于稳定,各站点均利用该深度以下监测数据拟合。由拟合曲线可知(图6),各站点温度实测值和计

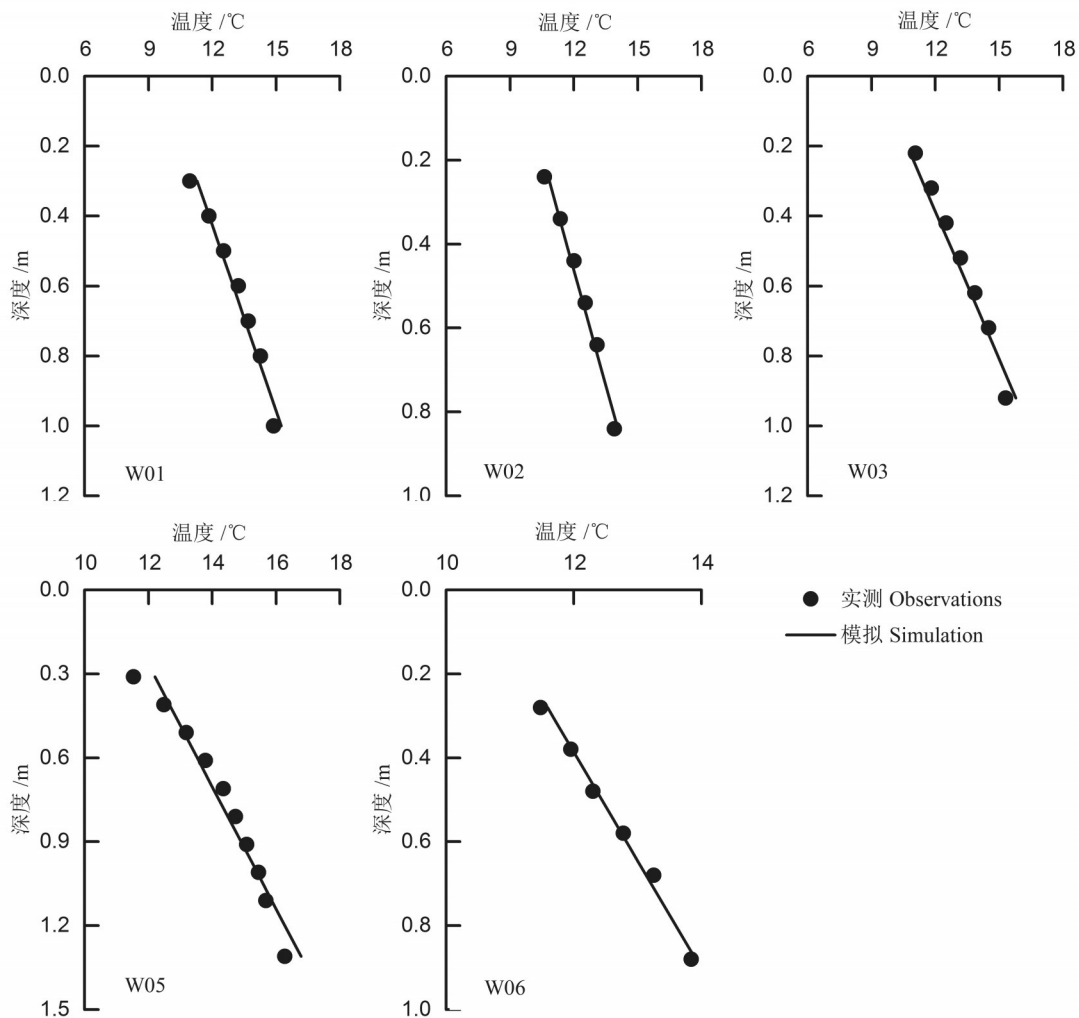


图6 各监测站点温度实测值和模拟值对比
Fig.6 Comparison of modeling results and field measurements of temperature

算值拟合较好。W01、W02、W03、W05、W06监测站点计算的渗漏速率分别为0.03、0.22、0.07、0.01、0.59 mm/d,可以看出不同站点渗漏速率差异很大,可达2个数量级。这是由于湖水渗漏速率和湖底沉积物岩性、厚度、地下水埋深、地表水和地下水等多种因素有关,湖床沉积物介质具有较强的空间非均质性,导致湖水渗漏存在较大的空间变异。从温度示踪评价结果来看,含水层埋深是重要影响因素。W02、W06站点布设于浅部古河道,砂层埋深均小于10 m,其他3个站点砂层埋深均大于10 m,含水层埋深越浅,越有利于湖水渗漏。根据上述时段的评价结果,认为白洋淀渗漏速率0.01~0.59 mm/d。

本次工作仅基于5个温度监测站点,初步对不同含水层埋深条件下的湖水渗漏速率进行了评估,限于面状湖泊渗漏时空变异的复杂性,评价结果仅能代表点尺度渗漏速率。同时,温度示踪方法也存在较多的不确定性。土壤热导率是评价中所需的重要参数,主要由土壤含水率决定,因此土壤含水率的时空变异会导致温度示踪评价结果的不确定性。另外,土壤容重等物理特征的垂向变化会导致渗透性的变化,这种垂向非均质性是导致评价误差的潜在因素,在评价中未予考虑。湖水垂向渗漏机理的复杂性同样会导致评价的不确定性,即便是冬季,白洋淀湖床底部仍生长较多水生植物,由于植物根系吸收会发生水量消耗,渗漏量并不能完全代表地表水对地下水的真正补给量。因此,需要开展进一步的研究工作,才能全面评价白洋淀渗漏特征。

湿地渗漏的定量评价是水文学领域的研究难点,理论上可以通过渗流仪直接进行观测,由于湖底沉积物介质的空间非均质性,需要投入较多的工作量,在实际中难以实现。一般来说,常用评价方法包括水量均衡法、湿地-地下水水位监测、同位素平衡、温度示踪和数值模拟等(王雨山等,2018),本次研究中利用温度示踪方法评价了白洋淀渗漏速率,但仅具点尺度意义。白洋淀地表水渗漏空间上变化较大,影响因素复杂,为全面评价白洋淀渗漏量及其时空分布规律,需要不同评价方法相互印证。通过水平衡分析对蒸发和渗漏损失量宏观把控,通过水位监测和温度示踪进行典型剖析,最终应根据白洋淀水文-水文地质特征,建立淀区地表

水-地下水耦合模型来评价白洋淀渗漏量。

5.4 地表水和地下水作用对生态的影响

大量研究表明,湿地植被类型、生长状态与地表水位、地下水埋深等因素密切相关(张云龙等,2020)。芦苇是白洋淀优势植物群落,在白洋淀生态系统具有重要作用,其生长发育高度依赖水文-水文地质特征。根据1976—2020年遥感解译结果,分析了芦苇分布面积与地表水位的关系(图7)。考虑到芦苇生长周期较长,地表水位采用监测时段近2年以来的平均水位。可以看出,两者存在较好的相关性。总体上,当地表水位为6.3~6.8 m时,芦苇分布面积最大。水位小于6.3 m,芦苇面积随着水位增高而增加,水位高于6.8 m时,随着水位增加而减低。这种规律是由芦苇生长的埋深条件所决定,据研究,芦苇适宜的水位埋深为-1.5~1.5 m(负值表示淹没)(许秀丽等,2014),受此条件限制,白洋淀芦苇主要分布于淀区台地和浅水区域。当水位过低时,台地地下水埋深低于1.5 m,不利于芦苇生长。当水位过高时,浅水区水深超过1.5 m,芦苇将消亡。

前文分析可知,白洋淀地表水渗漏补给地下水,台地地下水可以较好地接受地表水渗漏。通过分析FK01井所代表的芦苇台地地下水埋深和周边淀泊水深的关系(图8),可以发现,地下水位低于地表水0.63~0.91 m,均值0.77 m。台地地下水埋深和淀泊水深显著相关,地下水位随着地表水位升高而增加。2020年4—9月芦苇生长季节,台地地下水埋深1.18~1.68 m,大部分时段埋深小于1.5 m,适宜芦苇生长,但雨季和生态补水未到达之前的6月中旬至7月下旬,地下水埋深大于1.5 m,可能会对芦苇生长产生影响。考虑到台地是白洋淀芦苇的重要分布区域和特色生态景观,湿地地表水-地下水交换通过影响台地地下水埋深对芦苇生态系统产生作用。因此,在雨季前期,可通过实施生态补水提升地表水位、降低台地地下水埋深,以利于芦苇生长发育。

另外,已有研究表明芦苇的生长特征存在较大的季节变化(管博等,2014),不同时期的生态需水量存在差异,对地下水埋深的依赖程度也不同。下一步,应开展生长季芦苇生物特征与地下水埋深

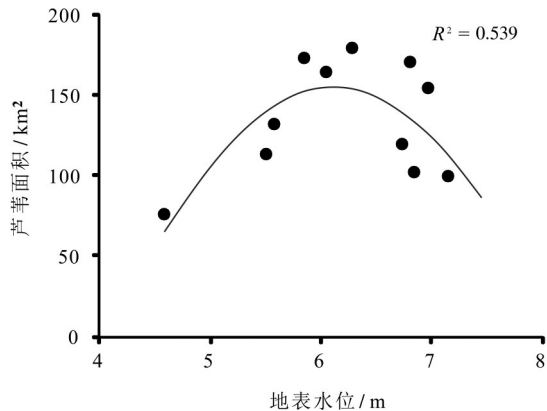


图7 1976—2020年芦苇面积与地表水位关系

Fig. 7 Relationship between reed land and surface water level from 1976 to 2020

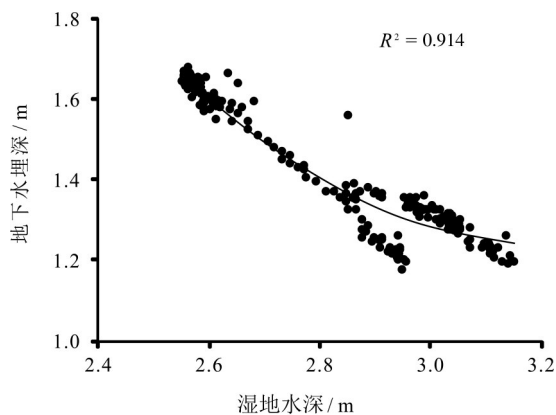


图8 典型台地地下水埋深-湿地水深关系

Fig. 8 Relationship between groundwater and surface water depth

关系研究,从植被生长需求和生态节水的角度确定最优的白洋淀台地地下水埋深,从而为白洋淀生态补水水量和时段的优化提供科学依据。

6 结 论

(1)白洋淀和地下水补排关系受地质结构和水力梯度等条件控制,渗漏对周边浅层地下水垂向上影响深度为20 m,水平向上影响范围存在较大的空间变异。白洋淀周边浅层地下水的补给来源为大气降雨和地表水,其中地表水渗漏的补给比例为0~90.5%,强渗漏带和浅部古河道分布基本一致。

(2)湖床沉积物温度示踪表明,白洋淀淀区渗漏速率0.01~0.59 mm/d。渗漏速率和含水层埋深密切相关,埋深越小,越有利于湖水渗漏。开展生

态清淤等工程时应注意避开砂层浅埋区,防止破坏浅部隔水层造成渗漏量增加。

(3)1976—2020年白洋淀芦苇分布面积和地表水位相关性较好,水位为6.3~6.8 m时,芦苇面积最大,水位小于6.3 m时两者呈正相关,水位大于6.8 m时两者呈负相关。芦苇台地下水埋深和地表水位显著相关,现阶段芦苇生长季多数时段地下水埋深适宜芦苇生长。建议在雨季前期实施生态补水,通过降低台地地下水埋深促进芦苇生长发育。

References

- Chen Song, Gui Herong. 2019. The age and isotopic characteristics of groundwater in Taiyuan Formation limestone aquifer of the Huaibei coalfield [J]. *Geology in China*, 46(2): 337-345 (in Chinese with English abstract).
- Crosbie R S, Mcewan K L, Jolly I D, Holland K L, Lamontagne S, Moe K G. 2010. Salinization risk in semi-arid floodplain wetlands subjected to engineered wetting and drying cycles [J]. *Hydrological Processes*, 23(24): 3440-3452.
- Fan Wei, Zhang Guangxin, Li Ranran. 2012. Review of ground-surface water interactions in wetland [J]. *Advances of Earth Science*, 27(4): 413-423 (in Chinese with English abstract).
- Furi W, Razack M, Haile T, Abiye T A, Legesse D. 2011. The hydrogeology of Adama-Wonji basin and assessment of groundwater level changes in Wonji wetland, main Ethiopian rift: Results from 2D tomography and electrical sounding methods [J]. *Environmental Earth Science*, 62(6): 1323-1335.
- Guan Bo, Su Yunzhao, Xia Jiangbao, Dong Hongfang, Lü Zhenbo, Yu Junbao. 2014. Ecological characteristics of phragmites australis vegetation at different water table levels and their relation to environmental factors in the Yellow River Delta [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 33(10): 2633-2639 (in Chinese with English abstract).
- Guo Xu, Bai Yaonan, Liu Hongwei, Tang Hui, Mao Jinjie. 2019. Geological influence and suitability evaluation of the construction of Sponge city: A case study of the Zhengzhou Airport Economy Zone [J]. *Geological Survey and Research*, 42(2): 123-128 (in Chinese with English abstract).
- Han Aiguo, Sun Yin, Han Kunli. 2006. Discussion on the relationship between wetlands restoration and groundwater resource in Beijing area [J]. *Research of Water and Soil Conservation*, 13(4): 61-63 (in Chinese with English abstract).
- Hatch C E, Fisher A T, Revenaugh J S, Constantz J, Ruehl C. 2006. Quantifying surface water-ground water interactions using time series analysis of streambed thermal records [J]. *Water Resources Research*, 42(10): W10410.
- He Minxia, Zhang Bin, Wang Yidong, Wang Zhongliang. 2020. Stable

- hydrogen and oxygen isotopic characteristics of surface water and underground water in Baiyangdian Lake [J]. *Journal of Tianjin Normal University (Natural Science Edition)*, 40(6): 62–67 (in Chinese with English abstract).
- Huo Siyuan, Jin Menggui, Zhu Changkun, Cheng Xuhai. 2019. Estimating stable infiltration recharge by temperature tracer method [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 50(6): 761–772 (in Chinese with English abstract).
- Li Gang, Ma Baiheng, Zhou Yangxiao, Zhao Kai, You Bin, Li Muzi, Dong Huijun, Li Haitao. 2021. Research on vertical exchange between surface water and groundwater around banks of Baiyangdian Lake [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 48(4): 48–54 (in Chinese with English abstract).
- Li Yinghua, Cui Baoshan, Yang Zhifeng. 2004. Influence of hydrological characteristics change of Baiyangdian on the ecological environment in wetland [J]. *Journal of Natural Resources*, 19(1): 62–68 (in Chinese with English abstract).
- Li Yunliang, Yao Jing, Tan Zhiqiang, Zhang Qi. 2019. Interactions between typical sub-lakes and groundwater in floodplains of Poyang Lake [J]. *Journal of China Hydrology*, 39(5): 1–7 (in Chinese with English abstract).
- Lin Jingjing, Ma Rui, Sun Ziyong, Wei Wenhao, Wang Shuo. 2015. Laboratory investigation on the effect of the intraborehole flow in fully-screened well on the temperature change during tracing river and groundwater interaction [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 42(5): 14–21 (in Chinese with English abstract).
- Liu Yu, Lu Chenming, Ma Rong. 2019. Discriminant analysis on iron ion provenance in groundwater, eastern Hebei Plain [J]. *Geological Survey and Research*, 42(2): 135–142 (in Chinese with English abstract).
- Ma Zhen, Xia Yubo, Li Haitao, Han Bo, Yu Xuezhong, Zhou Yalong, Wang Yushan, Guo Xu, Li Hongqiang, Pei Yanzhong. 2021. Analysis of natural resources and environment eco-geological conditions in the Xiong'an New Area [J]. *Geology in China*, 48(3): 677–696 (in Chinese with English abstract).
- Min J H, Perkins D B, Jawitz J W. 2010. Wetland–Groundwater interactions in subtropical depressional wetlands [J]. *Wetlands*, 30(5): 997–1006.
- Paces J B, Wurster F C. 2014. Natural uranium and strontium isotope tracers of water sources and surface water–groundwater interactions in arid wetlands–Pahrangat Valley, Nevada, USA [J]. *Journal of Hydrology*, 517: 213–225.
- Schwerdtfeger J, Hartmann A, Weiler M. 2016. A tracer-based simulation approach to quantify seasonal dynamics of surface–groundwater interactions in the Pantanal wetland [J]. *Hydrological Processes*, 15(30): 2590–2602.
- Shang Haimin, Wang Wenke, Dai Zhenxue, Duan Lei, Zhao Yaqian, Zhang Jing. 2016. An ecology-oriented exploitation mode of groundwater resources in the northern Tianshan Mountains, China [J]. *Journal of Hydrology*, 543: 386–394.
- Wan Li, Cao Wengeng, Hu Fusheng, Liang Sihai, Jin Xiaomei. 2005. Eco-hydrology and eco-hydrogeology [J]. *Geological Bulletin of China*, 24(8): 700–703 (in Chinese with English abstract).
- Wang Kailin, Li Haitao, Wu Aimin, Li Muzi, Zhou Yi, Li Wenpeng. 2018. An analysis of the evolution of Baiyangdian wetlands in Hebei province with artificial recharge [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 39(5): 549–558 (in Chinese with English abstract).
- Wang Wenke, Gong Chengcheng, Zhang Zaiyong, Chen Li. 2018. Research status and prospect of the subsurface hydrology and ecological effect in arid regions [J]. *Advances in Earth Science*, 33(7): 702–718 (in Chinese with English abstract).
- Wang Wenke, Li Junting, Feng Xizhou, Chen Xunhong, Yao Kejun. 2011. Evolution of stream-aquifer hydrologic connectedness during pumping-Experiment [J]. *Journal of Hydrology*, 402(3): 401–414.
- Wang Yushan, Cheng Xuxue, Zhang Mengnan, Qi Xiaofan. 2018. The study on the spatial variation of groundwater inflows to river using ²²²Rn in the lower reaches of the Malian river [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 45(5): 34–40 (in Chinese with English abstract).
- Wang Yushan, Guo Yuan. 2015. Study on groundwater salinization mechanism in arid areas using regional deuterium excess [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 42(6): 29–35 (in Chinese with English abstract).
- Wu Bin, Wang Sai, Wang Wenxiang, An Yonghui. 2019. Impact of future climate change on water resources in the arid regions of Northwest China based on surface water–groundwater coupling model: A case study of the middle reaches of the Heihe River [J]. *Geology in China*, 46(2): 369–380 (in Chinese with English abstract).
- Yuan Ruiqiang, Song Xianfang, Wang Peng, Zhang Yinghua, Wang Shiqin, Tang Chagnyuan. 2012. Impacts of percolation in Baiyangdian Lake on groundwater [J]. *Advances in Water Science*, 23(6): 751–756 (in Chinese with English abstract).
- Xu Xiuli, Zhang Qi, Li Yunliang, Tan Zhiqiang, Wang Xiaolong. 2014. Reed population features and relationships between feature indicators and flooding depth, groundwater depth in an islet in Poyang lake [J]. *Wetland Science*, 12(6): 714–722 (in Chinese with English abstract).
- Zeng Lei, Zhao Guizhang, Hu Wei, Huang Jinting. 2015. Spatial variation characteristics of temperature and moisture in shallow loess layer under freezing–thawing condition [J]. *Geological Bulletin of China*, 34(11): 2123–2131 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Mengman, Wu Xiuqin. 2018. Changes in hydrological connectivity and spatial morphology of Baiyangdian wetland over the last 20 years [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 38(12): 4205–4213 (in

- Chinese with English abstract).
- Zhang Min, Gong Zhaoning, Zhao Wenji, A Duo. 2016. Landscape pattern change and the driving forces in Baiyangdian wetland from 1984 to 2014 [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 36(15): 4780–4791 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Yuanyu, Cui Hanwen. 2009. The variety of wetland environment in Sanjiang Plain [J]. *Ecology and Environmental Science*, 18(4): 1374–1378 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Yunlong, Wang Xuan, Liu Dan, Liao Zhenmei, Liu Qiang, Li Chunhui, Cai Yanpeng. 2020. Influences of groundwater depth on water transport and dissipation in spac system of phragmites australis in a semi-arid wetland [J]. *Environmental Engineering*, 38(10): 7–13 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Yong, Han Jingyan, Zhang Bing, Gong Jianguo. 2020. Impact of transferred water on the hydrochemistry and water quality of surface water and groundwater in Baiyangdian Lake, North China [J]. *Geoscience Frontiers*, 12(3): 110–118.
- ### 附中文参考文献
- 陈松, 桂和荣. 2019. 淮北煤田太原组灰岩水年龄及同位素地球化学特征[J]. *中国地质*, 46(2): 337–345.
- 范伟, 章光新, 李然然. 2012. 湿地地表水-地下水相互作用的研究综述[J]. *地球科学进展*, 27(4): 413–423.
- 管博, 栗云召, 夏江宝, 董洪芳, 吕振波, 于君宝. 2014. 黄河三角洲不同水位梯度下芦苇植被生态特征及其与环境因子相关关系[J]. *生态学杂志*, 33(10): 2633–2639.
- 郭旭, 白耀楠, 刘宏伟, 唐辉, 苗晋杰. 2019. 海绵城市建设地质适宜性评价——以郑州航空港经济综合实验区为例[J]. *地质调查与研究*, 42(2): 123–128.
- 韩爱果, 孙颖, 韩坤立. 2006. 浅谈北京地区湿地修复与地下水资源的关系[J]. *水土保持研究*, 13(4): 61–63.
- 何明霞, 张兵, 王义东, 王中良. 2020. 白洋淀地表水和地下水的稳定氢氧同位素特征[J]. *天津师范大学学报(自然科学版)*, 40(6): 62–67.
- 霍思远, 靳孟贵, 朱常坤, 程绪海. 2019. 运用温度示踪法确定稳定入渗补给速率[J]. *水利学报*, 50(6): 761–772.
- 李刚, 马佰衡, 周仰效, 赵凯, 尤冰, 李木子, 董会军, 李海涛. 2021. 白洋淀湖岸带地表水与地下水垂向交换研究[J]. *水文地质工程地质*, 48(4): 48–54.
- 李英华, 崔宝山, 杨志峰. 2004. 白洋淀水文特征变化对湿地生态环境的影响[J]. *自然资源学报*, 19(1): 62–68.
- 李云良, 姚静, 谭志强, 张奇. 2019. 鄱阳湖洪泛区碟形湖域与地下水转化关系分析[J]. *水文*, 39(5): 1–7.
- 林晶晶, 马瑞, 孙自永, 魏文浩, 王烁. 2015. 河水与地下水作用带内井中流对温度示踪结果影响的实验研究[J]. *水文地质工程地质*, 42(5): 14–21.
- 刘裕, 陆晨明, 马荣. 2019. 冀东平原地下水中铁离子来源判别分析研究[J]. *地质调查与研究*, 42(2): 135–142.
- 马震, 夏雨波, 李海涛, 韩博, 余学中, 周亚龙, 王雨山, 郭旭, 李洪强, 裴艳东. 2021. 雄安新区自然资源与环境-生态地质条件分析[J]. *中国地质*, 48(3): 677–696.
- 万力, 曹文炳, 胡伏生, 梁四海, 金晓媚. 2005. 生态水文学与生态水文地质学[J]. *地质通报*, 24(8): 700–703.
- 王凯霖, 李海涛, 吴爱民, 李木子, 周艺, 李文鹏. 2018. 人工补水条件下白洋淀湿地演变研究[J]. *地球学报*, 39(5): 549–558.
- 王文科, 宫程程, 张在勇, 陈立. 2018. 旱区地下水文与生态效应研究现状与展望[J]. *地球科学进展*, 33(7): 702–718.
- 王雨山, 程旭学, 张梦南, 祁晓凡. 2018. 基于²²²Rn的马莲河下游地下水补给河水空间差异特征研究[J]. *水文地质工程地质*, 45(5): 34–40.
- 王雨山, 郭媛. 2015. 干旱区地下水咸化机制的区域氡盈余解析[J]. *水文地质工程地质*, 42(6): 29–35.
- 吴斌, 王赛, 王文祥, 安永会. 2019. 基于地表水-地下水耦合模型的未来气候变化对西北干旱区水资源影响研究——以黑河中游为例[J]. *中国地质*, 46(2): 369–380.
- 袁瑞强, 宋献方, 王鹏, 张应华, 王仕琴, 唐常源. 2012. 白洋淀渗漏对周边地下水的影响[J]. *水科学进展*, 23(6): 751–756.
- 许秀丽, 张奇, 李云良, 谭志强, 王晓龙. 2014. 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[J]. *湿地科学*, 12(6): 714–722.
- 曾磊, 赵贵章, 胡炜, 黄金廷. 2015. 冻融条件下浅层黄土中温度与水分的空间变化相关性[J]. *地质通报*, 34(11): 2123–2131.
- 张梦媛, 吴秀芹. 2018. 近20年白洋淀湿地水文连通性及空间形态演变[J]. *生态学报*, 38(12): 4205–4213.
- 张敏, 宫兆宁, 赵文吉, 阿多. 2016. 近30年来白洋淀湿地景观格局变化及其驱动机制[J]. *生态学报*, 36(15): 4780–4791.
- 章远钰, 崔瀚文. 2009. 东北三江平原湿地环境变化[J]. *生态环境学报*, 18(4): 1374–1378.
- 张云龙, 王焯, 刘丹, 廖珍梅, 刘强, 李春晖, 蔡宴朋. 2020. 半干旱区湿地地下水埋深对芦苇SPAC系统水分运移耗散的影响[J]. *环境工程*, 38(10): 7–13.