



白洋淀湖岸带地表水与地下水垂向交换研究

李刚, 马佰衡, 周仰效, 赵凯, 尤冰, 李木子, 董会军, 李海涛

A study of vertical exchange between surface water and groundwater around the banks of Baiyangdian Lake

LI Gang, MA Baiheng, ZHOU Yangxiao, ZHAO Kai, YOU Bing, LI Muzi, DONG Huijun, and LI Haitao

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202008004>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[半干旱地区地表-地下水系统水热运移与裸土蒸发研究](#)

Hydrothermal transfer and bare soil evaporation in surface-groundwater systems in semi-arid areas

马稚桐, 王文科, 赵明, 黄金廷, 卢艳莹, 侯昕悦, 王一 水文地质工程地质. 2021, 48(4): 7–14

[同位素技术解析安阳河与地下水相互作用](#)

Isotope analyses of the interaction between the Anyang River and groundwater

张敏, 平建华, 禹言, 黄先贵, 朱亚强, 程玉刚 水文地质工程地质. 2019, 46(6): 31–39

[非均匀多孔介质等效渗透率的普适表达式](#)

A universal expression of the equivalent permeability of heterogeneous porous media

张东, 刘晓丽, 王恩志 水文地质工程地质. 2020, 47(4): 35–42

[伊犁河支流大西沟河水与地下水转化关系研究](#)

A study of the conversion between the Daxigou river and groundwater

张琛, 段磊, 刘明明, 李瑛, 宋浩 水文地质工程地质. 2019, 46(3): 18–18

[地下水位波动带三氮迁移转化过程研究进展](#)

Advances in researches on ammonia, nitrite and nitrate on migration and transformation in the groundwater level fluctuation zone

刘鑫, 左锐, 王金生, 何柱锟, 李桥 水文地质工程地质. 2021, 48(2): 27–36

[鄱阳湖平原地下水重金属含量特征与健康风险评估](#)

Health risk assessment of groundwater heavy metal pollution in the Poyang Lake Plain

饶志, 储小东, 吴代赦, 颜春, 陈婷, 何景媛 水文地质工程地质. 2019, 46(5): 31–37



关注微信公众号，获得更多资讯信息

DOI: [10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202008004](https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202008004)

白洋淀湖岸带地表水与地下水垂向交换研究

李刚¹, 马佰衡², 周仰效³, 赵凯¹, 尤冰⁴, 李木子¹, 董会军², 李海涛¹

(1. 中国地质环境监测院, 北京 100081; 2. 河北省地质资源环境监测与保护重点实验室,
河北 石家庄 050021; 3. 联合国教科文组织荷兰水资源学院, 荷兰 德尔福特 2611AX;
4. 河北省水文工程地质勘查院, 河北 石家庄 050021)

摘要: 地表水与地下水相互转化关系一直是水文地质研究的热点问题。以往研究更多关注河流的河岸带, 但对于相对静止水体——湖泊的湖岸带研究相对偏少。选择白洋淀湖岸带作为研究对象, 在周边湖岸带系统部署水位、水温监测系统, 采用温度示踪法, 开展白洋淀湖岸带区域的地表水与地下水垂向交换量化研究。同时, 结合达西定律, 间接反演获取垂向渗透系数, 系统总结出一套联合利用温度示踪法和达西定律定量研究湿地垂向水交换的方法。结果表明, 白洋淀湖岸带以地表水渗漏补给地下水为主, 其垂向交换流速可达 0.2~1.1 cm/d, 沉积岩性主要为粉质黏土、粉土及粉细砂, 垂向渗透系数为 0.038~0.912 m/d。研究结果可为制定白洋淀湿地补水方案和生态环境保护措施提供基础数据支撑。

关键词: 白洋淀; 湖岸带; 地表水-地下水交换; 温度示踪法; 达西定律

中图分类号: P641.3

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2021)04-0048-07

A study of vertical exchange between surface water and groundwater around the banks of Baiyangdian Lake

LI Gang¹, MA Baiheng², ZHOU Yangxiao³, ZHAO Kai¹, YOU Bing⁴,
LI Muzi¹, DONG Huijun², LI Haitao¹

(1. China Institute of Geo-Environment Monitoring, Beijing 100081, China; 2. Hebei Key Laboratory of Geological Resources and Environmental Monitoring and Protection, Shijiazhuang, Hebei 050021, China;
3. IHE Delft Institute for Water Education, Delft, South Holland 2611AX, Netherlands; 4. Hydrological Engineering and Geological Prospecting Institute of Hebei Province, Shijiazhuang, Hebei 050021, China)

Abstract: Interaction between surface water and groundwater has always been a hot topic in hydrogeological researches. Previous studies focused on the hyporheic zone of rivers, but the hypolentic zone of lakes with relatively static water bodies was seldom examined. The Baiyangdian Wetlands is taken as a pilot area in this study, and a monitoring system of water table and temperature is set up. The vertical interaction fluxes between surface water and groundwater is quantified by using a heat tracing method. According to the Darcy's Law, the vertical coefficient of permeability is calculated inversely. Based on the heat tracing method and the Darcy's Law, a way of quantifying vertical interaction between surface water and groundwater is summarized. The results show that infiltration from surface water to groundwater around the banks of the Baiyangdian Wetlands is dominant in the interaction procedure. The total infiltration velocity from surface water to groundwater during the monitoring

收稿日期: 2020-08-18; 修订日期: 2020-12-16

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目(DD20189142); 河北省地质资源环境监测与保护重点实验室开放课题(JCYKT201904); 国家自然科学基金项目(41807220)

第一作者: 李刚(1989-), 男, 博士, 工程师, 主要从事湿地水文地质与水资源环境研究。E-mail: lgang@mail.cgs.gov.cn

通讯作者: 李海涛(1979-), 男, 博士, 教授级高级工程师, 主要从事水文地质环境地质调查、监测研究。E-mail: lihaitao@mail.cgs.gov.cn

period ranges from 0.2 to 1.1 cm/d, and the vertical hydraulic conductivity, from 0.038 to 0.912 m/d. The conclusions in this paper can provide data support for strategy of water diversion and protection of eco-environment in the Baiyangdian Wetlands.

Keywords: Baiyangdian Lake; hypolentic zone; exchange between surface water and groundwater; heat tracing method; Darcy's Law

地表水与地下水之间的交换转化,一直是水文地质研究中的热点,特别是在一些生态环境敏感脆弱区(如湿地),两者之间的交互作用过程对所依附或承载的生态环境具有决定性影响。

自20世纪90年代以来,国内外对河流的地表水-地下水交换转化研究较多,而对水体流动较缓滞的湖泊或湿地研究相对偏少^[1]。针对河流的地表水与地下水交换研究主要有:河水和地下水循环的时空过程^[2]、河床下层水量-物质-能量交换^[3]、不同自然因素和人类活动对河流-含水层水量交换的定量影响评价^[4]等。近年来,湖泊中的地表水和地下水作为一个有机联系

的整体,它们之间的定量转化关系也逐渐被更多学者和政府决策者高度关注。主要集中在两个方面:①地表水与地下水的水量交换对湖泊水循环水平衡的影响;②地表水与地下水的水质交换对湖泊盐分、污染物等迁移转化的作用。

前人研究成果形成了定量研究地表水与地下水交换转化过程的多种方法,主要包括直接测量法、水量平衡法、水动力学法、温度示踪法、水化学和同位素法、数值模拟法等。各种方法均有其适用条件和局限性^[2,4-9](表1)。选择研究方法前,应结合实际问题的时空尺度及方法本身优劣势进行取舍或组合。

表1 地表水-地下水交换转化定量研究常用方法

Table 1 Methods for quantification of interaction between surface water and groundwater

序号	方法	原理	适用性与优越性	局限性	文献
1	直接测量法	利用渗流仪、水头压差计等测定地表水-地下水界面水流通量	点位上直接捕获界面通量,原位数据准确度较高	观测尺度较小,区域代表性略差,需多组重复试验,对沉积物有一定扰动	[5]
2	水量平衡法	通过确定源汇项的水量,推算出地表水-地下水界面通量	控制一些流域尺度上便于直接测量的水均衡项,推得难以测定的均衡项	需要长时间序列的准确数据,但蒸散发量等具有较大不确定性,得到某时段内的平均通量水平	[6]
3	水动力学法	监测水位差、沉积物渗透系数等,基于达西定律、裘布依公式计算	使用范围较广,点位、垂向剖面以及面状区域均可使用	获取准确的原始数据有一定困难,计算可能存在误差传递	[4]
4	温度示踪法	通过不同深度处温度观测和热力学方法进行解析计算	温度随时间及深度的变化较明显,温度连续监测成本低、灵敏度高、数据获取直接、质量稳定	应用时存在前提假设条件,相关热力学参数较难直接测定,需对原始数据进行傅里叶变换、带通滤波等预处理	[7]
5	水化学/同位素法	保守离子/同位素作为示踪剂,不同端元浓度/活度差异较大,基于质量守恒定律求解 对实际问题概化后,借助计算机强大的运算能力,采用有限元/差分方法,对数学模型的偏微分方程进行高效迭代求解	可平滑掉水交换的非均一性,获得流域、区域等大空间尺度的平均通量结果 适用于多种不同时空尺度,能快速处理现实复杂的水文条件、边界条件、初始条件	化学组分的测定存在一定误差,受端元浓度/活度值影响较大 地表水和地下水流动控制方程不同,模型简化会带来误差,耦合二者的计算量更大,需分析模型收敛性、稳定性、参数敏感性和结果不确定性	[8-9]
6	数值模拟法				[2]

白洋淀地表水与地下水的交换转化对湿地生态环境具有十分重要的作用。目前,白洋淀湿地研究主要集中在生态需水量、湿地演变驱动因子、水量及水域面积变化、湖泊水质及污染问题、土地类型变化,以及整个白洋淀流域的气候、水文、跨流域调水、生态环境指标、地下水化学特征等^[6,8-12]。针对白洋淀地表水与地下水垂向交换的定量研究很少。本研究采用温度示踪法,对白洋淀周边湖岸带垂直方向的地表水与地下水交换进行量化研究,并结合达西定律,对其渗透能力进行评估,该研究可为白洋淀湿地生态

环境修复和保护提供基础科学依据。

1 研究区概况

白洋淀位于河北雄安新区,是华北平原最大的浅水型淡水湖泊,历来享有“华北明珠”的美称。白洋淀地区属暖温带季风大陆性半湿润半干旱气候,春季干旱多风、夏季高温多雨、秋季天高气爽、冬季寒冷干燥,年平均降水量约500 mm。

白洋淀属于海河流域大清河水系中游,上游有白沟引河、萍河、瀑河、漕河、府河、唐河、孝义河、潴

龙河8条河流汇入,但多数断流,仅白沟引河、府河、孝义河常年有水。下游经赵王新河东流与海河相通(图1)。湿地四周以堤为界,内部纵横交错有3700余条沟壕,分割出143个大小不等又相互连通的淀泊。

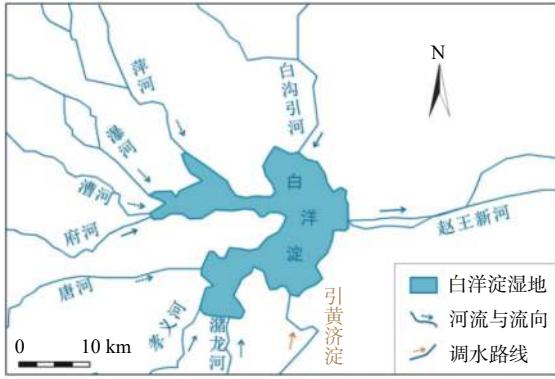


图1 研究区示意图
Fig. 1 Location of the study area

关于白洋淀成因众说纷纭,主要有构造、气候、河流沉积、海侵、人工和陨石撞击等不同说法^[12]。自有记录以来,白洋淀曾在1982年、1983—1988年、1994年、2001—2003年、2006—2008年发生干涸。目前,白洋淀除接受降水和少量河水补给外,主要依靠跨流域(南水北调中线、引黄入冀补淀)及水库(安各庄、西大洋、王快、岳城)调水,水位维持在一定范围。蒸散发是白洋淀排泄的主要途径,渗漏次之,河流排泄和灌溉引用很少^[13]。分析近两年区域地下水位统测数据可知,白洋淀地表水与地下水交换转化关系主要为地表水单向渗漏补给地下水。因此,白洋淀渗漏是影响湿地生态环境不可忽视的关键因素,但至今仍缺少直接准确的定量计算分析。

2 研究方法与数据

2.1 温度示踪法

在饱和或非饱和水流系统中,垂向一维热传导方程可表示为^[14]:

$$k_e \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} - \frac{v_z}{\lambda} \frac{\partial T}{\partial z} = \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

式中: k_e —有效热扩散率/(m²·s⁻¹);

T —温度/℃;

z —垂向深度/m;

v_z —垂向流速(向下为正值)/(m·s⁻¹);

λ —沉积物与流体的体积热容比值;

t —时间/s。

当地下水温度处于稳定态时,式(1)右边表达项为0。结合边界条件: $T|_{z=0}=T_0$ 、 $T|_{z=L}=T_L$,求解式(1)得到^[15]:

$$\frac{T_z - T_0}{T_L - T_0} = \frac{e^{\beta(z/L)} - 1}{e^\beta - 1} \quad (2)$$

$$\beta = \frac{c_w \rho_w v_z L}{k} \quad (3)$$

式中: T_0 —上边界温度/℃;

T_L —下边界温度/℃;

L —上下边界的垂向距离/m;

c_w —流体比热容/(J·kg⁻¹·℃⁻¹);

ρ_w —流体密度/(kg·m⁻³);

k —热传导系数/(W·m⁻¹·℃⁻¹)。

将不同深度处温度的平均值代入式(2),通过调整 β ,利用最小二乘法,可获得最终的 β 值。基于白洋淀周边地层沉积岩性特征,结合前人研究成果^[16—18],确定式(3)中的相关参数:水密度 ρ_w 为1000 kg/m³、比热容 c_w 为4180 J/(kg·℃)、热传导系数 k 为0.6 W/(m·℃)。根据式(3)计算得到 v_z 。结合垂向水力梯度,利用达西定律,反演垂向渗透系数 K_z 。

2.2 数据获取

基于前期白洋淀湿地的环境调查,在白洋淀四周湖岸带选取12个位置布设地下水监测站点见图2(a)。在每个站点,垂直于岸边的湿地内侧部署2个巢式监测孔。一个监测孔距离岸边50 m以内(D_{50}),监测浅层地下水的3个不同深度;另一个距离岸边约200 m(D_{200}),监测地表水和浅层地下水3个不同深度见图2(b)。各站点监测层埋深均以湖床面为基准,地下水监测层(1#、2#和3#)埋深见表2,地表水监测层埋深均为0 m。监测设备采用水位-水温一体化自动在线传输,数据采集频率为1次/h。监测时间从2019年8月1日开始。图3为P8监测站点的水位、水温动态曲线。

3 结果与讨论

3.1 垂向交换流速计算

根据式(1)和式(2)的适用条件要求,筛选温度基本处于稳定态的时段,计算地表水与地下水垂向交换流速。分析温度数据的动态变化过程时,选择方差作为判断温度稳定的指标。监测设备的温度测量误差为0.1 ℃,因此,当温度方差小于0.01时,判定温度达到相对稳定态。温度方差的时间跨度取3 d。计算采用“最小二乘法”,得到式(2)中的 β 值后,代入式(3)获得地表水与地下水垂向交换流速 v_z (表3)。

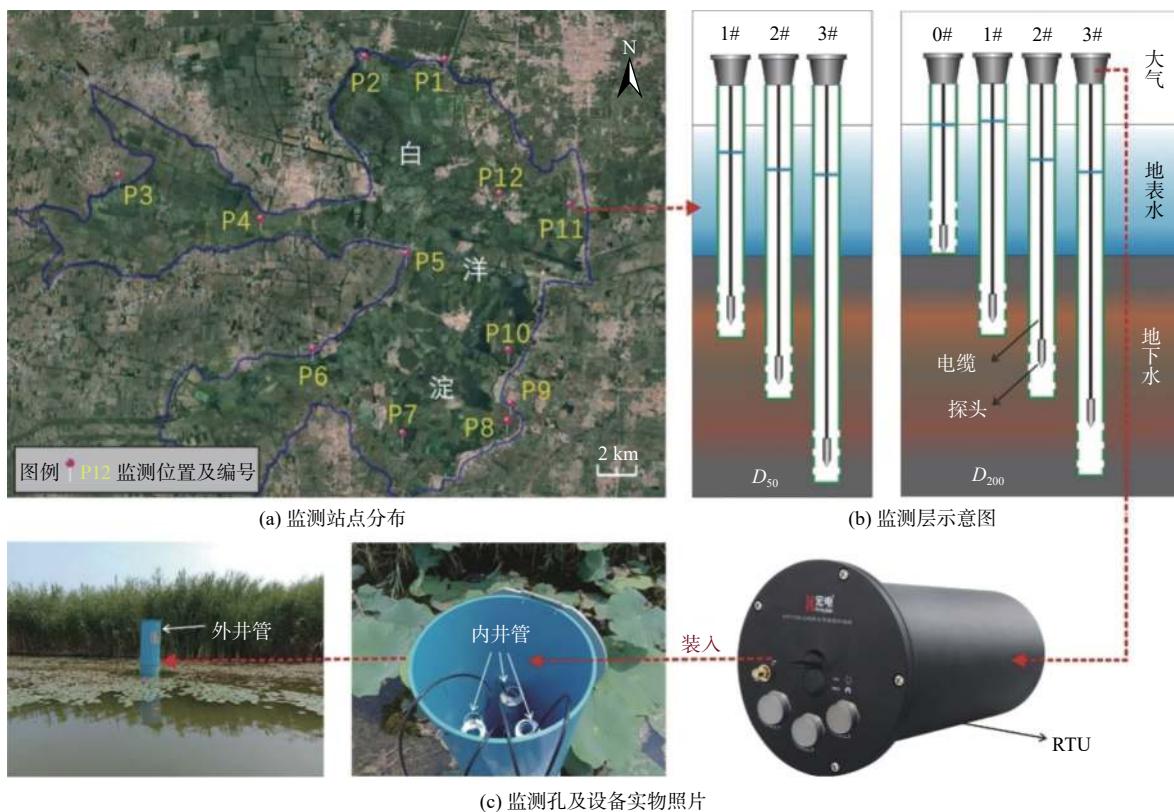


图2 白洋淀湖岸带地表水与地下水交换转化监测系统

Fig. 2 Monitoring systems of exchange between surface water and groundwater around the Baiyangdian Lake

表2 地下水监测层中心埋深

Table 2 Depths of the monitoring layers at different locations

编号	监测层	监测层埋深/m		编号	监测层	监测层埋深/m	
		D ₅₀	D ₂₀₀			D ₅₀	D ₂₀₀
P1	1#	0.60	0.60	P7	1#	1.35	0.60
	2#	1.30	1.30		2#	5.35	2.20
	3#	5.10	5.60		3#	9.15	7.10
P2	1#	0.60	1.40	P8	1#	0.30	0.60
	2#	1.40	2.10		2#	1.00	1.50
	3#	6.10	7.30		3#	4.10	7.40
P3	1#	1.80	1.50	P9	1#	1.20	0.80
	2#	2.50	3.20		2#	2.70	4.00
	3#	7.50	7.10		3#	7.00	7.30
P4	1#	2.60	1.90	P10	1#	0.40	1.25
	2#	4.60	4.60		2#	1.40	3.70
	3#	8.10	8.60		3#	6.20	6.50
P5	1#	0.50	2.00	P11	1#	1.90	0.70
	2#	2.50	3.00		2#	3.40	1.80
	3#	4.70	5.30		3#	8.10	8.15
P6	1#	1.20	0.40	P12	1#	0.25	0.20
	2#	4.10	4.10		2#	3.45	0.90
	3#	6.30	7.40		3#	5.25	4.00

由表3结果可知,在距离岸边约50,200 m的不同位置,垂向交换流速存在一定差异,但均为正值,其变

化范围为0.2~1.1 cm/d。说明围绕白洋淀湖岸带不同监测站点的垂向水量交换以地表水向下渗漏补给浅层地下水为主。这与王凯霖等^[13]分析地下水位统测数据得出的结论“白洋淀地表水单向补给周边地区地下水”一致。

3.2 垂向渗透系数反演

水位监测数据、监测层埋深和计算的垂向交换流速(v_z),利用达西定律反演计算垂向渗透系数 K_z (表4)。由于温度示踪法中热力学参数 k 的取值范围对于不同的水体沉积物变化较小,常处于一个数量级之内^[17]。因此,借助热传导系数 k 反演得到 K_z ,能有效降低原位及室内试验获取 K_z 的误差^[19]。

渗透系数与地层岩性密切相关。基于水文地质钻探岩心编录,白洋淀湖岸带的沉积岩性以粉质黏土和粉土为主,夹有粉细砂。《河北地下水》^[20]总结的河北平原浅层(<50 m)松散岩类垂向渗透系数:亚黏土0.003~0.01 m/d,亚砂土0.01~0.05 m/d,粉砂0.05~0.50 m/d。尹立河等^[21~22]研究得到大克泊湖湖床沉积岩性为黏土、粉质黏土至粉砂,垂向渗透系数为0.002~0.011 m/d;乞盖淖湖湖床沉积岩性主要为粉砂和细砂,垂向渗透系数为0.008~0.140 m/d。结合白洋淀湖

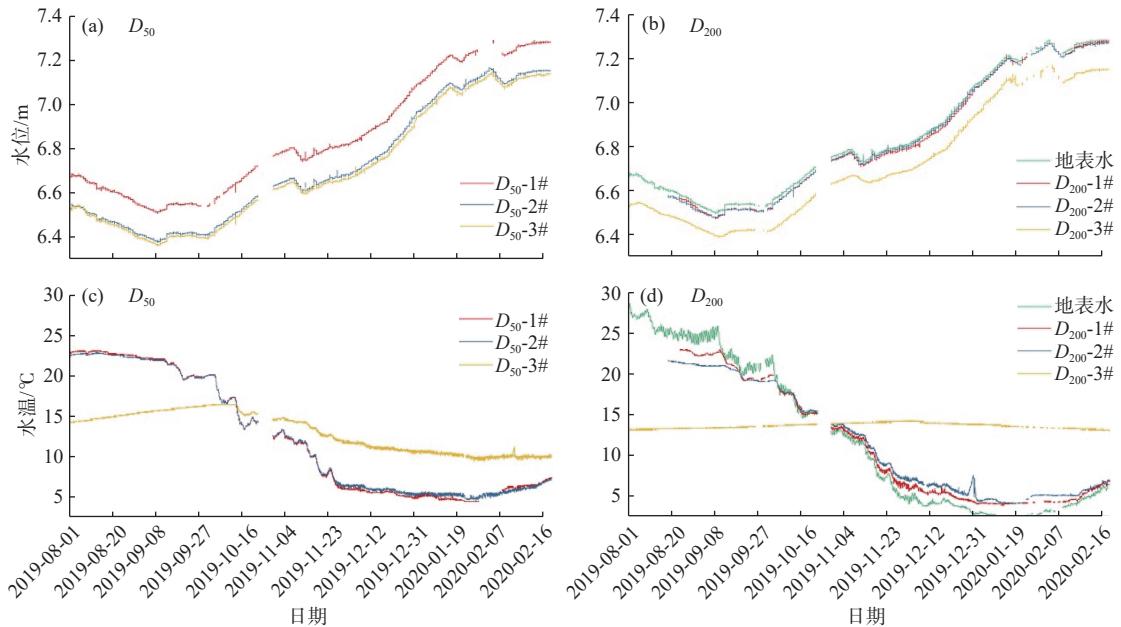


图 3 P8 监测站点水位、水温动态曲线

Fig. 3 Dynamic curves of the monitored water table and temperature data at monitoring station P8

表 3 稳定态时段垂向交换流速 v_z 计算结果Table 3 Vertical exchange velocities during steady phases / (cm·d⁻¹)

监测站点编号	垂向交换流速 v_z	
	D_{50}	D_{200}
P1	0.7	N/A
P2	0.4	0.3
P3	0.5	0.3
P4	N/A	N/A
P5	0.6	0.2
P6	1.0	N/A
P7	N/A	N/A
P8	1.1	0.4
P9	0.4	N/A
P10	0.8	N/A
P11	N/A	N/A
P12	N/A	N/A
范围	0.4 ~ 1.1	0.2 ~ 0.4

注: N/A 代表数据缺失或不存在稳定态时段。

岸带实际地层岩性, 表 4 中的垂向渗透系数计算结果 (0.038 ~ 0.912 m/d) 与河北平原浅层松散岩类经验值和沉积岩性相近的天然湖床实测值基本吻合。

白洋淀湖岸带垂向渗透系数空间上存在一定差异, 但差别在一个数量级之内; 白洋淀北部(P1, P2)、西北部(P3)、西南部(P6)、东南部(P8), 湖岸带垂向渗透系数较大, 西部(P5)、东南部(P9, P10)垂向渗透系数较小。总体上看, 上游地区的垂向渗透系数大于下游地区。对于同一监测站点, 距离岸边约 50, 200 m

表 4 垂向渗透系数 K_z 计算结果Table 4 Equivalent vertical coefficient of permeability / (m·d⁻¹)

监测站点编号	垂向渗透系数 K_z	
	D_{50}	D_{200}
P1	0.101	N/A
P2	0.210	0.169
P3	0.173	0.912
P4	N/A	N/A
P5	0.074	0.038
P6	0.294	N/A
P7	N/A	N/A
P8	0.316	0.272
P9	0.047	N/A
P10	0.041	N/A
P11	N/A	N/A
P12	N/A	N/A
范围	0.041 ~ 0.316	0.038 ~ 0.912

的垂向渗透系数略有差别, 但处于同一数量级。

4 结论

(1) 运用温度示踪法对白洋淀湖岸带地表水与地下水垂向交换定量计算, 发现监测期内湖岸带“两水”交换方式以地表水补给地下水为主, 垂向交换流速可达 0.2 ~ 1.1 cm/d。

(2) 建立了联合利用水位水温数据间接获取垂向渗透系数的方法。白洋淀湖岸带沉积岩性以粉质黏土和粉土为主, 局部夹粉砂、细砂, 垂向渗透系数为

0.038~0.912 m/d。垂向渗透系数存在一定空间差异性,总体呈现出上游地区略大于下游地区。在同一监测站点,距离湖岸约50,200 m的垂向渗透系数差别不大,处于同一数量级。

本文仅针对白洋淀湖岸带的垂向水量交换进行了研究,对于整个白洋淀渗漏的途径及量化,还需进一步借助水均衡分析、同位素示踪、耦合数值模拟等其他手段验证研究。

参考文献(References):

- [1] 李勇,张维维,袁佳慧,等.潜流带水流特性及氮素运移转化研究进展[J].河海大学学报(自然科学版),2016,44(1):1~7. [LI Yong, ZHANG Weiwei, YUAN Jiahui, et al. Research advances in flow patterns and nitrogen transformation in hyporheic zones[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2016, 44(1): 1~7. (in Chinese with English abstract)]
- [2] 朱金峰,刘悦忆,章树安,等.地表水与地下水相互作用研究进展[J].中国环境科学,2017,37(8):3002~3010. [ZHU Jinfeng, LIU Yueyi, ZHANG Shu'an, et al. Review on the research of surface water and groundwater interactions[J]. China Environmental Science, 2017, 37(8): 3002~3010. (in Chinese with English abstract)]
- [3] 王文科,李俊亭,王钊,等.河流与地下水关系的演化及若干科学问题[J].吉林大学学报(地球科学版),2007,37(2):231~238. [WANG Wenke, LI Junting, WANG Zhao, et al. Evolution of the relationship between river and groundwater and several scientific problems[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2007, 37(2): 231~238. (in Chinese with English abstract)]
- [4] 胡俊锋,王金生,滕彦国.地下水与河水相互作用的研究进展[J].水文地质工程地质,2004,31(1):108~113. [HU Junfeng, WANG Jinsheng, TENG Yanguo. Study progress of interaction between stream and groundwater[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2004, 31(1): 108~113. (in Chinese with English abstract)]
- [5] 李刚,李海涛,孙璐,等.沉积物—水界面水流通量研究之渗流仪直接测量法回顾与进展[J].地质论评,2019,65(增刊1):24~26. [LI Gang, LI Haitao, SUN Lu, et al. Retrospect and progress on seepage meters for direct measurement of water flux across sediment-water surfaces[J]. Geological Review, 2019, 65(Sup1): 24~26. (in Chinese with English abstract)]
- [6] 王秀艳.白洋淀湿地系统地表水和地下水相互关系的研究[D].保定:河北农业大学,2011. [WANG Xiuyan. Study on relationship between surface water and groundwater of Baiyangdian Wetland System[D]. Baoding: Hebei Agricultural University, 2011. (in Chinese with English abstract)]
- [7] KALBUS E, REINSTORF F, SCHIRMER M. Measuring methods for groundwater – surface water interactions: a review[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2006, 10(6): 873~887.
- [8] 张敏,平建华,禹言,等.同位素技术解析安阳河与地下水相互作用[J].水文地质工程地质,2019,46(6):31~39. [ZHANG Min, PING Jianhua, YU Yan, et al. Isotope analyses of the interaction between the Anyang River and groundwater[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2019, 46(6): 31~39. (in Chinese with English abstract)]
- [9] 孔晓乐,王仕琴,丁飞,等.基于水化学和稳定同位素的白洋淀流域地表水和地下水硝酸盐来源[J].环境科学,2018,39(6):2624~2631. [KONG Xiaole, WANG Shiqin, DING Fei, et al. Source of nitrate in surface water and shallow groundwater around Baiyangdian lake area based on hydrochemical and stable isotopes[J]. Environmental Science, 2018, 39(6): 2624~2631. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 王蕊,王中根,夏军,等.气候变化及南水北调中线工程对白洋淀流域水文的影响[J].水力发电学报,2012,31(2):14~19. [WANG Rui, WANG Zhonggen, XIA Jun, et al. Effects of climate change and the south-north water transfer project on hydrology in Baiyangdian basin[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2012, 31(2): 14~19. (in Chinese with English abstract)]
- [11] 赵志轩.白洋淀湿地生态水文过程耦合作用机制及综合调控研究[D].天津:天津大学,2012. [ZHAO Zhixuan. Coupling mechanism of eco-hydrological processes and integrated regulation in Baiyangdian wetland[D]. Tianjin: Tianjin University, 2012. (in Chinese with English abstract)]
- [12] 吴忱,许清海.“演变阶段”与“成因”不能混为一谈——也谈白洋淀的成因[J].湖泊科学,1998,10(3):91~96. [WU Chen, XU Qinghai. Formation or development stage-A discussion on the cause of the formation of Baiyangdian lake, China[J]. Journal of Lake Science, 1998, 10(3): 91~96. (in Chinese with English abstract)]
- [13] 王凯霖,李海涛,吴爱民,等.人工补水条件下白洋淀湿地演变研究[J].地球学报,2018,39(5):549~558. [WANG Kailin, LI Haitao, WU Aimin, et al. An analysis of the evolution of Baiyangdian wetlands in Hebei

- Province with artificial recharge[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2018, 39(5): 549 – 558. (in Chinese with English abstract)]
- [14] SUZUKI S. Percolation measurements based on heat flow through soil with special reference to paddy fields[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1960, 65(9): 2883 – 2885.
- [15] BREDEHOEFT J D, PAPAOPULOS I S. Rates of vertical groundwater movement estimated from the Earth's thermal profile[J]. *Water Resources Research*, 1965, 1(2): 325 – 328.
- [16] 葛孟琰, 马瑞, 孙自永, 等. 高寒山区河水与地下水相互作用的温度示踪: 以黑河上游葫芦沟流域为例[J]. 地球科学, 2018, 43(11): 4246 – 4255. [GE Mengyan, MA Rui, SUN Ziyong, et al. Using heat tracer to estimate river water and groundwater interactions in alpine and cold regions: a case study of hulugou watershed in upper reach of Heihe river[J]. *Earth Science*, 2018, 43(11): 4246 – 4255. (in Chinese)]
- [17] WADE S C, REITER M. A hydrothermal study to estimate vertical groundwater flow in the canutillo well field, between las cruces and el paso[R]. MS: New Mexico Water Resources Research Institute, 1994.
- [18] 俞亚南, 徐坚, 冯建江. 粉性土导热系数的室内实验研究[J]. *浙江大学学报(工学版)*, 2010, 44(1): 180 – 183. [YU Yanan, XU Jian, FENG Jianjiang. Laboratory experiment on thermal conductivity of silty clay[J]. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 2010, 44(1): 180 – 183. (in Chinese with English abstract)]
- [19] BRIGGS M A, BUCKLEY S F, BAGTZOGLOU A C, et al. Actively heated high-resolution fiber-optic-distributed temperature sensing to quantify streambed flow dynamics in zones of strong groundwater upwelling[J]. *Water Resources Research*, 2016, 52(7): 5179 – 5194.
- [20] 陈望和. 河北地下水[M]. 北京: 地震出版社, 1999. [CHEN Wanghe. *Hebei groundwater*[M]. Beijing: Seismological Press, 1999. (in Chinese)]
- [21] 尹立河, 王晓勇, 黄金廷, 等. 大克泊湖床垂向渗透系数试验研究[J]. 盐湖研究, 2011, 19(1): 1 – 8. [YIN Lihe, WANG Xiaoyong, HUANG Jinting, et al. Estimation of lakebed vertical hydraulic conductivity through ln-situ experiments for Habor Lake[J]. *Journal of Salt Lake Research*, 2011, 19(1): 1 – 8. (in Chinese with English abstract)]
- [22] 尹立河, 李瑛, 窦妍, 等. 乞盖淖湖湖床垂向渗透系数试验研究[J]. 盐湖研究, 2009, 17(3): 23 – 28. [YIN Lihe, LI Ying, DOU Yan, et al. In-situ vertical hydraulic conductivity test for Qigainao Lake[J]. *Journal of Salt Lake Research*, 2009, 17(3): 23 – 28. (in Chinese with English abstract)]

编辑: 张若琳