

doi: 10.12029/gc20170512

肖琼, 张志诚, 谢磊, 伍坤宇, 贺捷, 郝志强, 金毅. 2017. 昌源河国家湿地公园含水层水文地质特征研究[J]. 中国地质, 44(5): 1006–1016.
Xiao Qiong, Zhang Zhicheng, Xie Lei, Wu Kunyu, He Jie, Hao Zhiqiang, Jin Yi. 2017. A study of hydrogeological characteristics of aquifers in the Changyuan River National Wetland Park[J]. Geology in China, 44(5): 1006–1016(in Chinese with English abstract).

昌源河国家湿地公园含水层水文地质特征研究

肖琼¹ 张志诚² 谢磊² 伍坤宇^{1,2} 贺捷³ 郝志强⁴ 金毅⁵

(1. 中国地质科学院岩溶地质研究所, 国土资源部/广西岩溶动力学重点实验室, 广西桂林 541004;
2. 西南石油大学地球科学与技术学院, 四川 成都 610500; 3. 西南石油大学外国语学院, 四川 成都 610500;
4. 山西省祁县昌源河国家湿地公园管委会, 山西 晋中 030999; 5. 四川芙蓉集团有限责任公司, 四川 宜宾 644000)

摘要:通过系统分析山西祁县昌源河中下游丘陵—平原地区沿河分布的 19 口钻井资料, 查明了昌源河湿地中下游地区含水层的主要岩性, 根据含/隔水层的埋深和发育特征将研究区第四系含水层划分了浅、中、深三个含水层组; 并通过连井剖面图和栅状图对比、总结了区内含水层的空间分布特征; 同时, 基于 ArcGIS 平台, 采用 Kriging 插值法对地下水埋深进行了插值分析。结果表明昌源河流域含水层的主要岩石类型为第四系砂、砾石沉积物, 在顺昌源河流向上浅部含水层为一楔状体, 在横切河流方向上各含水层组厚度变化较大, 这与研究区含水层组形成于冲/洪积扇沉积背景相符合。地下水埋深插值分析表明, 昌源河流域中、下游平原区存在大面积的浅层地下水降落漏斗, 这将会影响昌源河湿地公园及流域的生态水文过程。最后, 在以上研究的基础上对昌源河流域地下水的补排关系进行了探讨, 并建立了相应的补排模式。

关键词:湿地; 含水层; 地下水; 水文地质; 昌源河

中图分类号: P64 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3657(2017)05-1006-11

A study of hydrogeological characteristics of aquifers in the Changyuan River National Wetland Park

XIAO Qiong¹, ZHANG Zhicheng², XIE Lei², WU Kunyu^{1,2}, HE Jie², HAO Zhiqiang³, JIN Yi⁵

(1. Key Laboratory of Karst Dynamics of MLR & Guangxi, Institute of Karst Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Guilin 541004, Guangxi, China; 2. School of Geoscience and Technology, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, Sichuan, China; 3. School of Foreign Languages, Southeast Petroleum University, Chengdu 610500, Sichuan China; 4. Administration of Changyuan River National Wetland Park (CNWP), Jinzhong 030999, Shanxi, China; 5. Sichuan Furong Group Co., Ltd., Yibin 644000, Sichuan China)

Abstract: The data from 19 drill holes located in the hilly–plain region of the middle–lower reaches of the Changyuan River were systemically analyzed and, as a result, the predominant rock types of aquifers in the middle–lower reaches of the Changyuan River

收稿日期: 2016-05-12; 改回日期: 2016-08-09

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFC0502306)、中国地质科学院基本科研业务费项目(YW201639); 广西自然科学基金项目(2016GXNSFAA380064)、法国开发署“山西昌源河国家湿地公园建设项目”(J131400345K03)联合资助。

作者简介: 肖琼, 女, 1984 年生, 博士, 副研究员, 主要从事水文地质方面工作; E-mail: xiaoqiong-8423@163.com。

wetland were identified. Furthermore, based on the burial depth and development characteristics of aquifers and aquifuges, the authors divided the Quaternary aquifers in the study area into three aquifer sets, i.e., shallow, middle and deep aquifer sets. The features of spatial distribution of the aquifers in the study area were also summarized via correlation of cross sections and fence diagrams. In addition, the burial depths of groundwater tables were analyzed by using Kriging interpolation method. The results indicate that the predominant rock types of the aquifers are Quaternary sandy and gravel sediments. The profile of the shallow aquifer is like a wedged body in the downriver direction of the Changyuan River, but the thickness of the aquifer is not stable in the perpendicular direction of the river. This is in accordance with the sedimentary environment of the alluvial/fluvial fan. The results of interpolation analysis show that there are widely distributed precipitation funnels in the middle-lower reaches of the Changyuan River basin. Such a situation would impact the eco-hydrogeological process in the Changyuan River wetland park and the drainage basin. Finally, the authors discussed the recharge-discharge processes of the groundwater in the Changyuan River drainage basin and established a recharge-discharge model.

Key words: wetland; aquifer; groundwater; hydrogeology; Changyuan River

About the first author: XIAO Qiong, female, born in 1984, Ph.D, majors in hydrogeology, engages in the study of hydrogeology; E-mail: xiaoqiong-8423@163.com.

Fund support: Supported by National Key Research and Developmental Program of China (No. 2016YFC0502306), Project of Chinese Academy of Geological Sciences (No. YYWF201639), Guangxi Science Foundation (No. 2016GXNSFAA380064), French Development Agency "Construction Project of the Changyuan River National Wetland Park" (No. J131400345K03).

1 引言

地下与地表水文过程的相互作用是自然界中普遍存在的一种自然现象,也是陆地水文循环的重要组成部分(沈振荣等,1992;Chow et al.,1988)。对于季节性积水的滨河湿地而言,地下水与河水的相互作用对湿地的发育与退化有着至关重要的作用(徐华山等,2011)。地下水与地表水之间补排关系的稳定性对于维持湿地生态系统物质与能量循环的稳定,防止湿地退化均有显著影响(Schot et al.,2012)。

昌源河国家湿地公园的主体是沿昌源河两岸分布的季节性积水湿地,这类湿地的地表水与地下水的关系十分密切,两者间的水文联系是湿地物质迁移转化的重要驱动力(王磊等,2007),并且直接关系到湿地系统的水量平衡(邓伟等,2003)。但近年来,昌源河国家湿地公园所在的山西祁县地区由于社会经济的快速发展和人口的增长导致地下水开采量的剧增,地下水长期处于超采状态,截止2010年区内地下水开采量已达 $8451 \times 10^4 \text{ m}^3$,占全县总供水量的87.5%(山西地质矿产局,1989)。这已经显著地改变了区内的地下水分布格局,并且对昌源河湿地地下、地表水文循环过程产生了影响。作为地下水赋存的场所,含水层的水文地质特征对区内地

表与地下水之间的联系具有显著的约束作用。因此,研究昌源河湿地公园及其周边地区含水层水文地质特征不仅有利于区内地下水资源的可持续利用,还对保障昌源河沿岸居民的生产生活用水,满足湿地公园的景观需水量,以及维持湿地公园建设范围内生态环境稳定性与湿地生物多样性的修复与保护都具有积极意义。

2 研究区概况

昌源河国家湿地公园位于山西省祁县境内,总占地面积约为 9.48 km^2 ,从来远镇东渔沟口,沿昌源河河床,途经子洪水库,最终到达刘家堡桥北部(图1)。昌源河由南东向北西汇入汾河,其干、支流全长 88.55 km ,其中 75.00 km 位于祁县境内,流域总面积 $1.01 \times 10^3 \text{ km}^2$,其中 $7.15 \times 10^2 \text{ km}^2$ 位于祁县境内,昌源河年平均径流量为 $7.19 \times 10^7 \text{ m}^3$,水矿化度 0.2 g/L 。

构造背景上,祁县地处晋中断陷东部边缘地区(温弘,2010)和边山隆起的复合部位。自印支运动以来,区内主要经历了三期构造应力场变化(吴国强等,2001)。其中,中生代时期太平洋板块与亚洲大陆的挤压应力由板内传递,使研究区受到NW-SE向应力的挤压,奠定了其中生代的构造格局;新生代早期在印度板块与欧亚板块的碰撞以及东亚大陆裂解作用的共同影响下(Topponnier et al.,

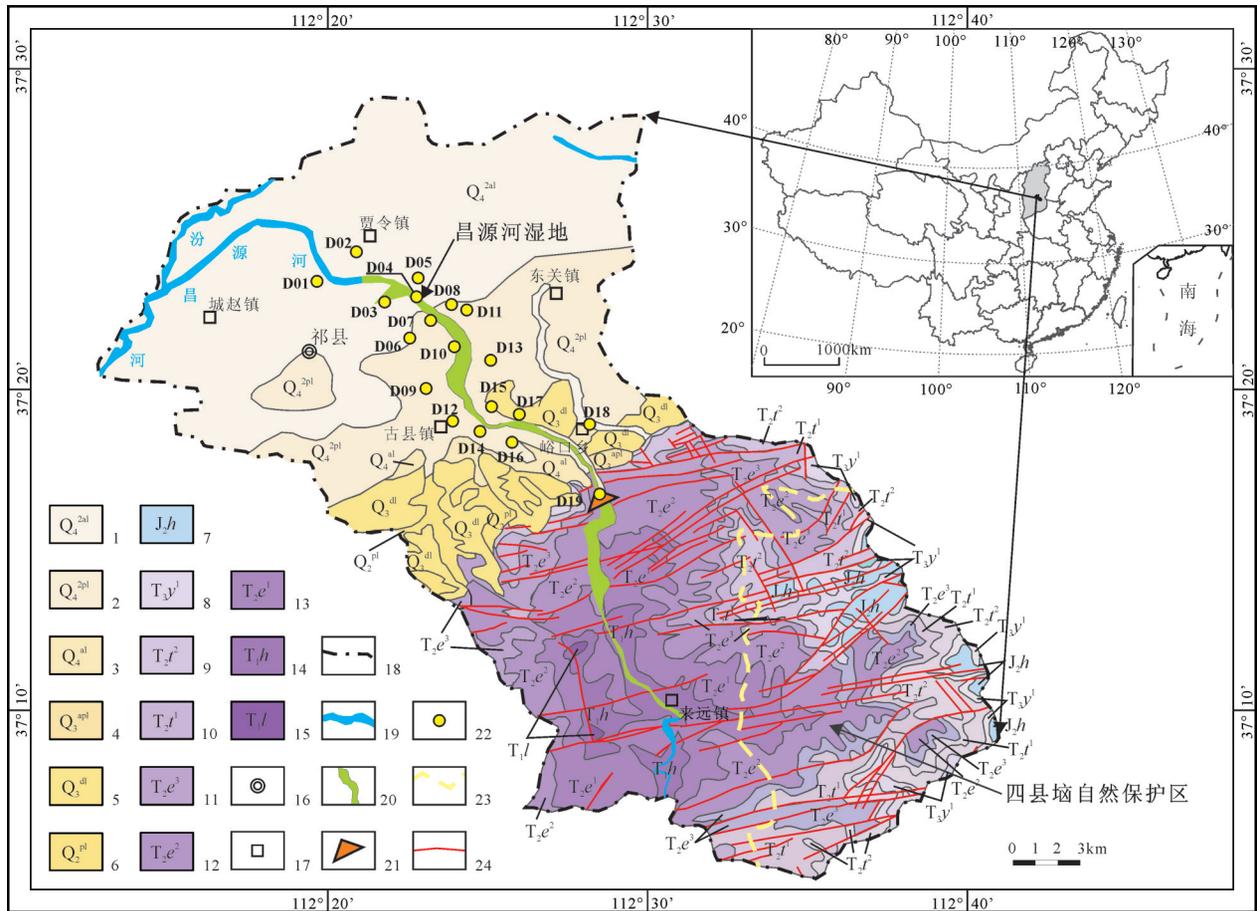


图1 祁县昌源河流域地质背景(区域地质资料据①和②)

- 1—全新统第二期冲积物; 2—全新统洪积物; 3—全新统第一期冲积物; 4—上更新统冲积物; 5—上更新统坡积物; 6—中更新统洪积物;
- 7—中侏罗统黑峰组; 8—上三叠统延长组一段; 9—中三叠统铜川组上段; 10—中三叠统铜川组下段; 11—中三叠统二马营组上段;
- 12—中三叠统二马营组中段; 13—中三叠统二马营组下段; 14—下三叠统和尚沟组; 15—下三叠统刘家沟组; 16—县城; 17—乡/镇;
- 18—祁县界; 19—河流; 20—昌源河湿地; 21—子洪水库; 22—钻井位置; 23—四县埡自然保护区; 24—断层

Fig. 1 Geological setting of Changyuan River basin in Qixian County (regional geological data modified after references ① and ②)

- 1-The second stage of Holocene alluvium; 2-Holocene diluvium; 3-The first stage of Holocene alluvium; 4-Epipleistocene alluvium- diluvium;
- 5-Epipleistocene cliff debris; 6-Middle Pleistocene diluvium; 7-Middle Jurassic Heifeng Formation; 8- The first member of Upper Triassic Yanchang Formation; 9-Upper member of Middle Triassic Tongchuan Formation; 10-Lower member of Middle Triassic Tongchuan Formation;
- 11-Upper member of Middle Triassic Ermaying Formation; 12-Middle member of Middle Triassic Ermaying Formation; 13-Lower member of Middle Triassic Ermaying Formation; 14-Lower Triassic Heshanggou Formation; 15-Lower Triassic Liujiagou Formation; 16-County;
- 17-Town; 18-Boundary of Qixian County; 19-River; 20-Changyuan wetland; 21-Zihong reservoir; 22-Location of drill hole;
- 23-Boundary of Sixiannao natural reserve; 24-Fault

1976), 区域构造应力场发生了明显变化, 应力作用方向由NW-SE向转变为NNE-SSW向, 使得区域构造格局发生了较大程度的改变, 导致地层发生右旋剪切拉张, 断层集中发育; 到新生代晚期, 由于中国大陆向东南方向扩展, 晋中地区在NNW-SSE向张应作用下形成晋中断陷(邢集善, 1991), 研究区发育的一系列SWW-NEE向断裂控制了祁县境内地貌及水文地质条件(图1)。祁县地貌由东南山区、丘陵向西北平原逐渐过渡, 平原由昌源河洪积扇和

汾河冲积平原组成(周旭明, 1988)。

研究区大致以子洪水库一线的山前为界, 形成区域性的水文地质分界线, 该界线西北部为第四系冲、洪积物含水层, 界线西南部为砂泥岩裂隙含水层。区内出露地层主要包括: (1) 全新统第二期冲积(Q₄^{2al})砂、砾、亚砂土、亚黏土; (2) 全新统(Q₄^{2pl})洪积杂色亚砂土、粉砂土、黏土, 含泥炭和砾石; (3) 全新统第一期冲积(Q₄^{al})砂土、亚砂土、粉砂土含砾石; (4) 上更新统冲-洪积(Q₃^{apl})亚砂土、亚粘土夹砾石; (5) 上

更新统坡积(Q₃^u)亚砂土、砾石;(6)中更新统洪积(Q₂^{pl})亚黏土夹古土壤及钙质结核;(7)中侏罗统黑峰组(J₂h),上部砂质页岩、页岩,下部厚层含砾中粗-粗粒石英砂岩;(8)上三叠统延长组下段(T₃y¹),浅肉红、黄绿色中-薄层、厚层中细粒长石砂岩夹灰紫、灰绿色砂质泥岩、灰色页岩;(9)中三叠统铜川组上段(T₂t¹),上部紫红色砂质泥岩、泥岩夹细粒砂岩,中部浅肉红、灰红色中细粒长石砂岩,下部灰紫、灰绿色砂质泥岩、页岩夹中细粒长石砂岩、页岩;(10)中三叠统铜川组下段(T₂t²),浅肉红、灰黄色斑状厚层中粒长石砂岩、砂质泥岩、砂质页岩;(11)中三叠统二马营组上段(T₂e³),上部紫红色泥岩、砂质泥岩夹白色长石砂岩,下部灰绿色中细粒长石砂岩夹紫红色泥岩;(12)中三叠统二马营组中段(T₂e²),上部紫红色泥岩夹灰绿色中粗粒长石砂岩,下部灰绿色中细粒长石砂岩夹紫红色泥岩、砂质泥岩;(13)中三叠统二马营组下段(T₂e¹),灰绿色中细粒长石砂岩夹紫红色泥岩及灰绿色页岩;(14)下三叠统和尚沟组(T₁h),上部紫红色细粒长石砂岩夹砂质泥岩,中下部紫红色钙质、砂质泥岩夹紫红色细粒长石砂岩;(15)下三叠统刘家沟组(T₁l),紫红色细粒长石砂岩夹紫红色页岩、砂质页岩、细砂岩、粉砂岩及砾岩。

3 昌源河湿地地下含水层结构特征

3.1 含水层平面分布

总体上祁县境内地下含水层分布范围较广,但平面上差异较大。其中,古县镇以南及来远镇全部的山前地区含水层裂隙发育,卵砾石含量高,厚度变化大,非均质性强;峪口乡、古县镇一线黄土丘陵地区含水层卵砾石含量和裂隙发育程度显著降

低,黏土和砂质含量逐渐增多,但空间差异较大;长头、贾令一带,得益于倾斜平原地区长期稳定的沉积作用,含水层黏土和砂质含量,含水层分布均较为稳定,分布范围也最广,约占整个平川面积的2/3;其余地区地层主要是冲、洪积物,含水层岩性纵向变化明显,且平面厚度差异较大。

3.2 含水层系统划分

分析昌源河湿地区域19口钻井资料,参照《山西省祁县农田供水水文地质详查报告》^⑥中的第四系含水层划分标准,结合前人的研究成果(樊景洲,1991;王勇,2006;王忠忠等,2011),将研究区第四系划分为浅、中、深三个含水层组(表1,图2)。

由图2可以看出,浅层含水层组(潜水层)底板的埋深为10~80 m,平均55 m左右,从昌源河上游(D18)到昌源河下游(D02),其厚度和底板埋深呈递增的趋势,其地层年代相当于全新统(Q₄)和上更新统(Q₃)。该含水层组由1~4个含水层组成,每个含水层的厚度变化在0.5~22 m,岩性多为粉砂、粉细砂和粉砂土等,在古河道或洪积扇轴部可为细砂,偶尔含有砾石。含水层组的总厚度、含水层的层数、含水层的岩性等均受到晚更新世以来的古河流变迁的控制,在古河道地段,表现为单个含水层较厚,层数较少,总厚度大,粒度较粗,如D13处含水层总厚度为47 m,岩性为粉细砂、粉砂,单层含水层厚度达到22 m。

中层含水层组对应的地层相当于中更新统(Q₂)。其底板的埋深为80~120 m,平均110 m左右;厚度20~70 m。该组一般由1~5个含水层组成,单层最薄不足1 m,最厚可达12 m;岩性主要为粉细砂、细砂。

表1 昌源河湿地第四系含水层组划分

Table 1 Division of the Quaternary aquifer sets in the Changyuan River wetland

地层系统		含水层组划分	
系	统	含/隔水层组	岩性组合
第 四 系	全新统一上更新统	浅层含水层组	种植土、回垫土、粉细砂、细砂、含砾石细砂、砂砾石
		第一隔水层组	黏土、亚黏土、亚砂土粉砂土
	中更新统	中层含水层组	细砂、粉细砂
		第二隔水层组	黏土、亚黏土、含砾石黏土、砂土胶结
	下更新统	深层含水层组	粉细砂、细砂
		第三隔水层组	黏土、粉砂土

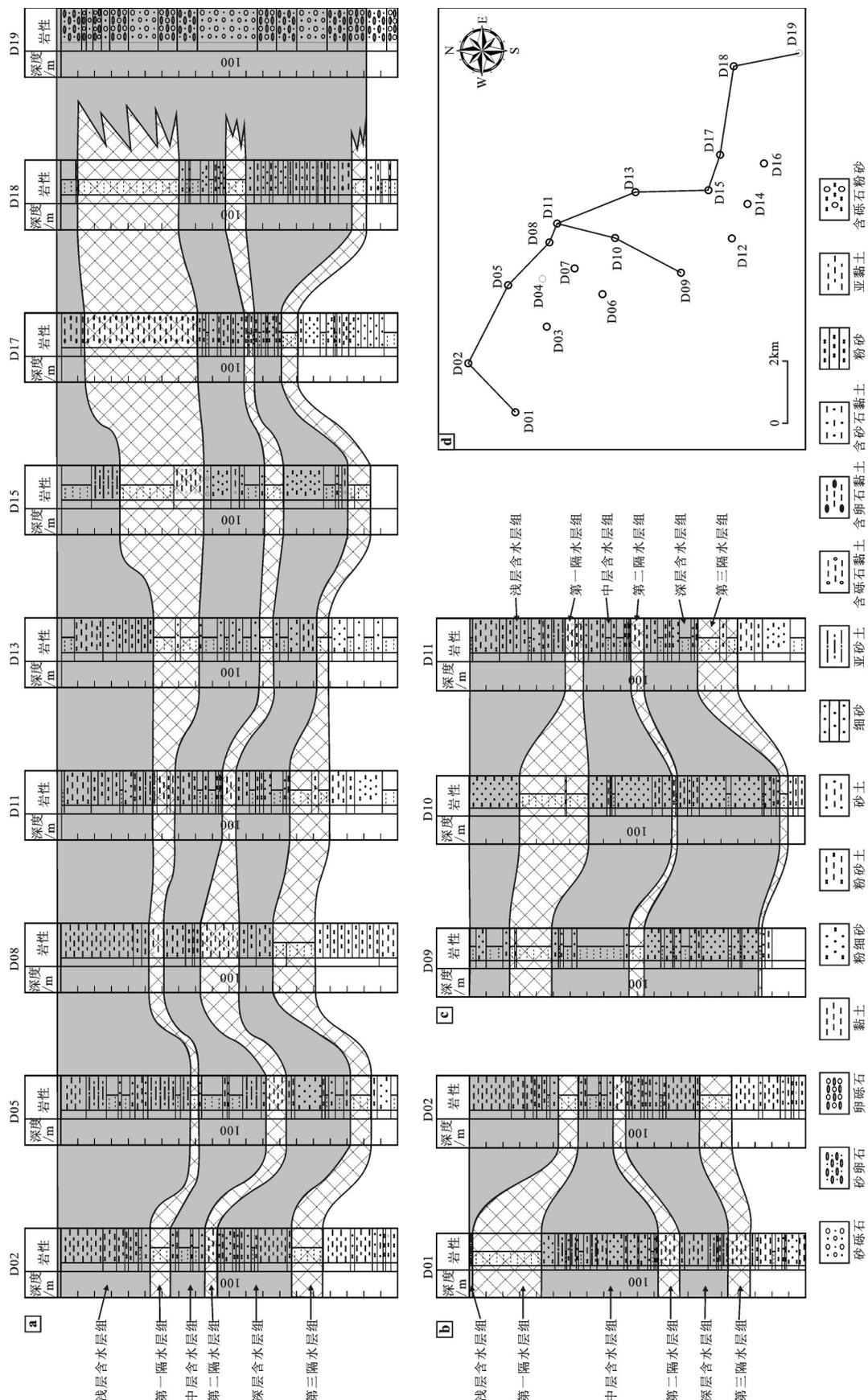


图2 昌源河湿地含水层组连井剖面图
 Fig.2 The cross sections of aquifer sets in the Changyuan River wetland

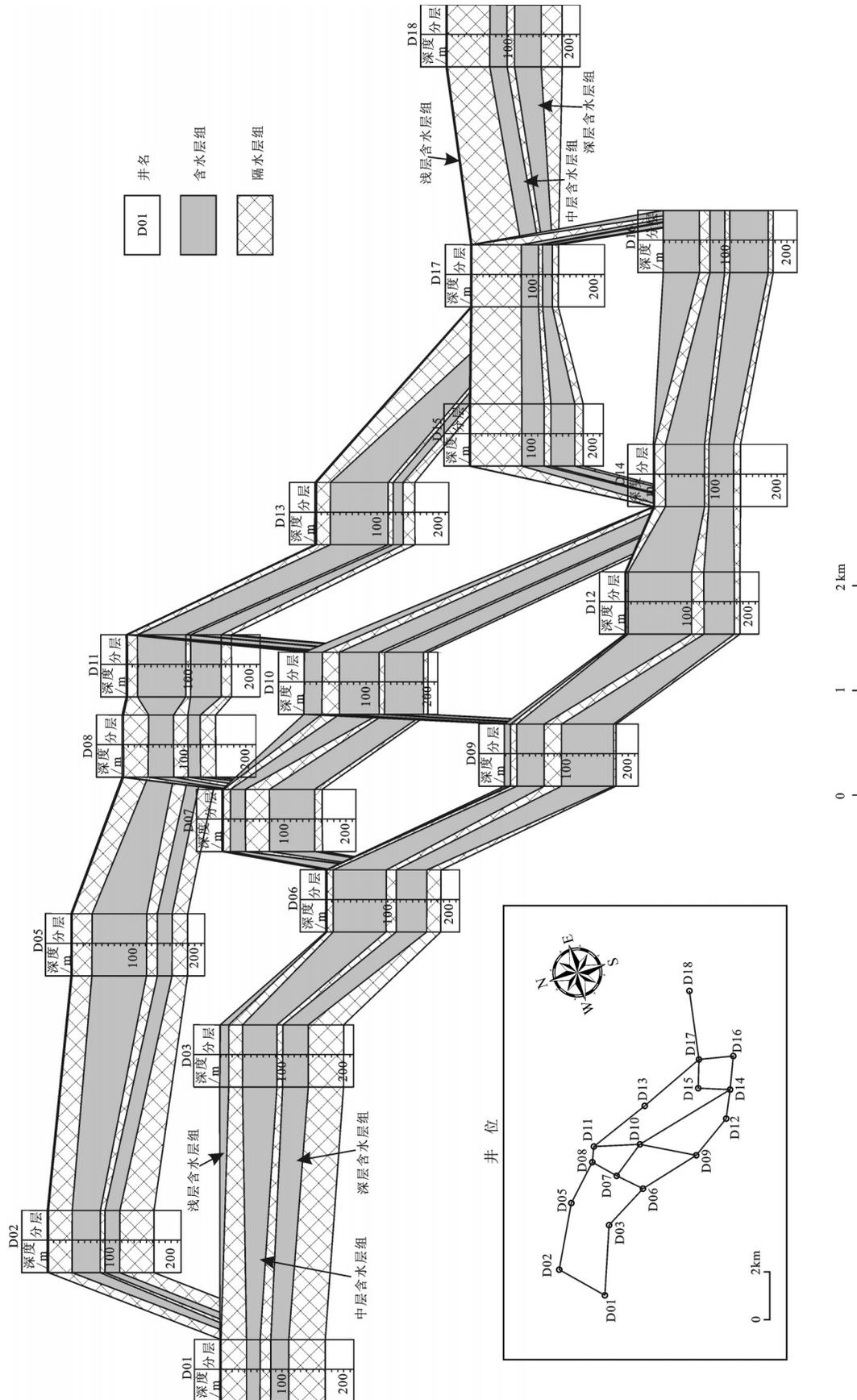


图3 昌源河湿地含水层空间展布栅状图
 Fig.3 The fence diagram of spatial distribution of aquifers in the Changyuan River wetland

深层含水层组对应的地层相当于下更新统(Q₂)。其底板的埋深为126~185 m,平均155 m左右;厚度在15~65 m。该组一般由1~4个含水层组成,单层最薄不足1 m,最厚可达49 m;岩性主要为粉细砂、细砂。

3.3 含水层空间展布特征

受冲积扇发育特征和古河道迁移的影响,研究区地下含水层总厚度变化在平面上存在明显的各向异性,且不同含水层组变化特征也存在显著差异。浅层含水层组在顺河流方向(南东—北西)总体上逐渐增厚,形态上表现为一楔状体,这与研究区全新统一上更新统为冲积扇沉积的背景是吻合的。在垂直于昌源河方向,浅层含水层组表现为南西薄而北东厚(图2,图3),表明区内全新统一上更新统冲积扇主体位于昌源河北东岸,总体上浅层含水层组最厚的地方位于昌源河湿地最下游部分,即D05—D08一带(图1~图3)。中层含水层组最厚的地方为D06—D03一带,其在顺河流方向上的变化规律不明显,在垂直于河流方向其厚度表现为南西厚北东薄的特征(图2,图3),这表明中层含水层组含水层沉积期扇的主体位于现在昌源河的南西部。深层含水层组厚度变化趋势与中层含水层组类似。从各含水层组空间展布特征可以发现,受地形、地貌和沉积微相影响在垂向上,山前砂砾岩即可作为水源径流层又可作为富水层;而平原区沉积物粒度变细、坡度变缓,黏土、亚黏土和砂岩多互层形成多含水层。

4 浅层地下水埋深

为了研究祁县境内昌源河流域的浅层地下水埋深及地下水降落漏斗的分布状况,收集了祁县昌源河流域下游地区15口地下水长期观测点在2014年3月与12月的浅层含水层(Q₃-Q₄)地下水埋深数据(图2),借助GPS获取各观测点的坐标,基于ArcGIS平台,采用地统计学中的Kriging插值法对地下水埋深进行插值分析。克里金插值法是一种广泛应用于空间分析的方法,其数学模型如下(Matheron, 1963):

$$Z(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(x_i) \quad (1)$$

式中*i* = 1, 2, 3...*n*, *Z*(*x*₀)为估计的变量值, *n*为给定范围内测量点的数量, *Z*(*x*_{*i*})是测量点的值, *λ*_{*i*}为克里金权重。

定义合适的权重值 λ_i 需要两个条件:一是在整个区域内*Z*(*x*₀)和*Z*(*x*_{*i*})必须有同样的平均值,即:

$$\sum_{i=1}^n \lambda_i = 1 \quad (2)$$

另一个条件是克里金方差的可能值必须要达到最小:

$$\sigma^2 = \sum_{i=1}^n \lambda_i \gamma(x_i, x_0) + \mu - \gamma(x_i, x_0) \quad (3)$$

式中 μ 是拉格朗日乘数, $\gamma(x_i, x_0)$ 是半变异函数,可用如下公式进行估算:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2n} \sum_{i=1}^n [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2 \quad (4)$$

式中向量*h*是*x*_{*i*}和*x*₀之间的距离。

分析结果表明,2014年地下水埋深数据的偏度系数接近于0、峰度系数接近于3(表2),表明样本数据近似服从正态分布。对GIS地统计学分析模块中的理论模型进行对比分析(汤国安等,2006),采用与变异函数拟合最优的球状模型(阮本清等,2008)对昌源河湿地的埋深数据进行插值。应用各向异性球状模型估算2014年3月和12月地下水埋深的相关参数见表3。根据区域化变量空间相关性等级标准(张仁铎,2005)可以看出,昌源河湿地周围的

表2 祁县2014年地下水埋深数据统计结果

Table 2 Statistics of groundwater burial depths in Qixian County

日期	最大值/m	最小值/m	均值/m	标准差	偏度系数	峰度系数
2014.03	39.5	11.12	27.65	8.5257	-0.5834	2.5044
2014.12	44.5	12.32	30.4	9.3701	-0.5877	2.6419

表3 祁县2014年地下水埋深球状模型参数

Table 3 Parameters of the spherical models of groundwater burial depths in Qixian County

日期	块金值	基台值	块金系数	主变程	次变程	异性比
2014.03	4.62	91.43	0.05	0.22	0.13	0.59
2014.12	1.05	113.9311	0.01	0.27	0.13	0.48

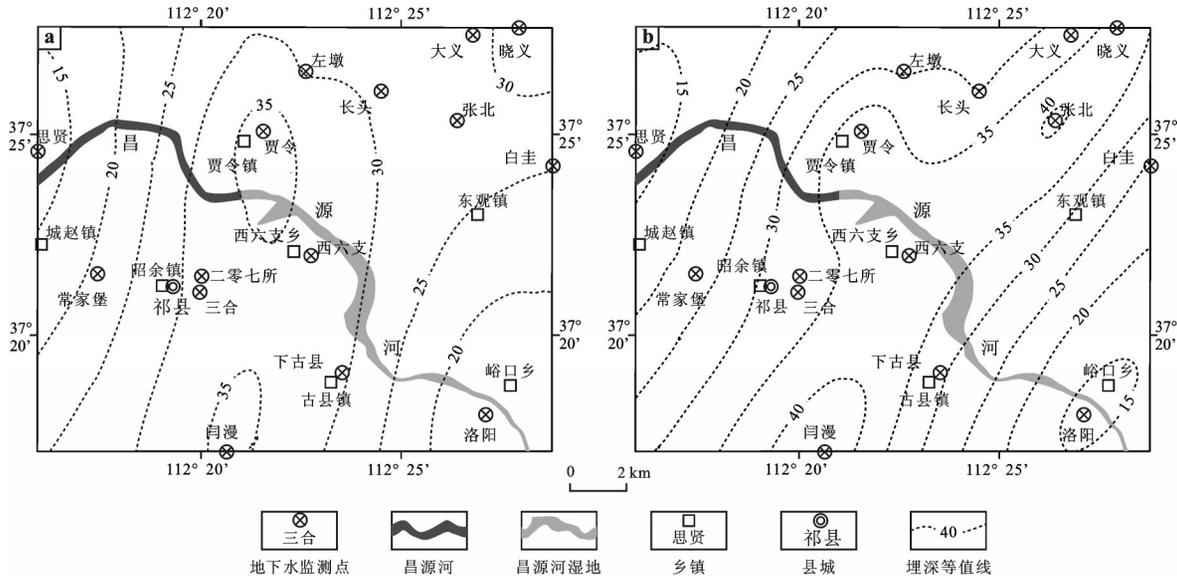


图4 2014年3月(a)、12月(b)地下水埋深等值线图
Fig.4 The contour maps of buried depths of groundwater in March and December of 2014

地下水埋深的块金系数小于0.25,说明具有较强的空间相关性。若异性比接近1,说明数据在整个区域上是各向同性,反之则各向异性(宋扬等,2015;张仁铎,2005;许义和等,2011)。

昌源河湿地地下水埋深2014年3月的异性比为0.59,2014年12月下降为0.48,说明地下水埋深空间分布各向异性增强。为了直观地展示昌源河湿地地下水埋深的空间变化,运用Kriging插值法绘制了2014年3月和2014年12月的地下水埋深等值线图(图4)。由图可以看出,昌源河流域存在大面积的降落漏斗,而昌源河湿地公园地浅层含水层组末段就处于漏斗中(图4),这对昌源河湿地公园的蓄水是不利的,若不进行处理将会影响湿地公园及流域的生态水文过程。

5 地下水补给模式探讨

5.1 地下水类型及分布规律

根据地貌、地下含水层介质条件和地下水赋存条件的不同,并参照《Environmental Proposal》^①报告中关于祁县地下水类型划分标准,将研究区内地下水划分为碎屑岩裂隙水和松散岩孔隙水两大类型,其中松散岩孔隙水按地貌和沉积相可分为黄土丘陵松散岩孔隙水、倾斜平原松散岩孔隙水和冲积平原松散岩孔隙水3个亚类(王大纯,1995;房佩贤,1996)。

5.1.1 碎屑岩裂隙水

碎屑岩含水层主要分布于峪口,古县镇的南部及来远镇全部地区。含水层多为裂隙砂岩。由于受构造和风化作用的影响,裂隙的非均质性,即发育程度、性质以及连通等情况差异明显,从而导致富水性不均匀。往往在沿断裂带分布且又被沟谷切割的地段,如来远镇的东峪沟、峪口乡的左家滩村,可见较多的地下水天然露头,可供农耕和生活用水;而在盘陀村以北的昌源河河谷内,地形比较开阔低洼,由于断裂的切割导致砂岩裂隙发育,形成裂隙含水层,其间的薄层页岩又形成隔水层;再加上南部和东西两侧的补给区地形高,故构成承压自流水的储水构造;在山前断裂带,受黄土丘陵第四纪松散沉积物的部分阻挡,砂岩裂隙和断裂破碎带构成的含水岩组,形成山前断裂带承压自流水的储水构造。

5.1.2 松散岩孔隙水

研究区内松散岩孔隙水可按地貌和沉积相分为黄土丘陵松散岩孔隙水、倾斜平原松散岩孔隙水和冲积平原松散岩孔隙水3个亚类。其中黄土丘陵松散岩孔隙水主要分布于峪口乡、古县镇境内,富水地段处于洪积扇中,多见于中层含水层组,埋藏深度大于50 m。倾斜平原松散岩孔隙水主要分布于昌源河长期沉积作用形成的倾斜平原区,多见于

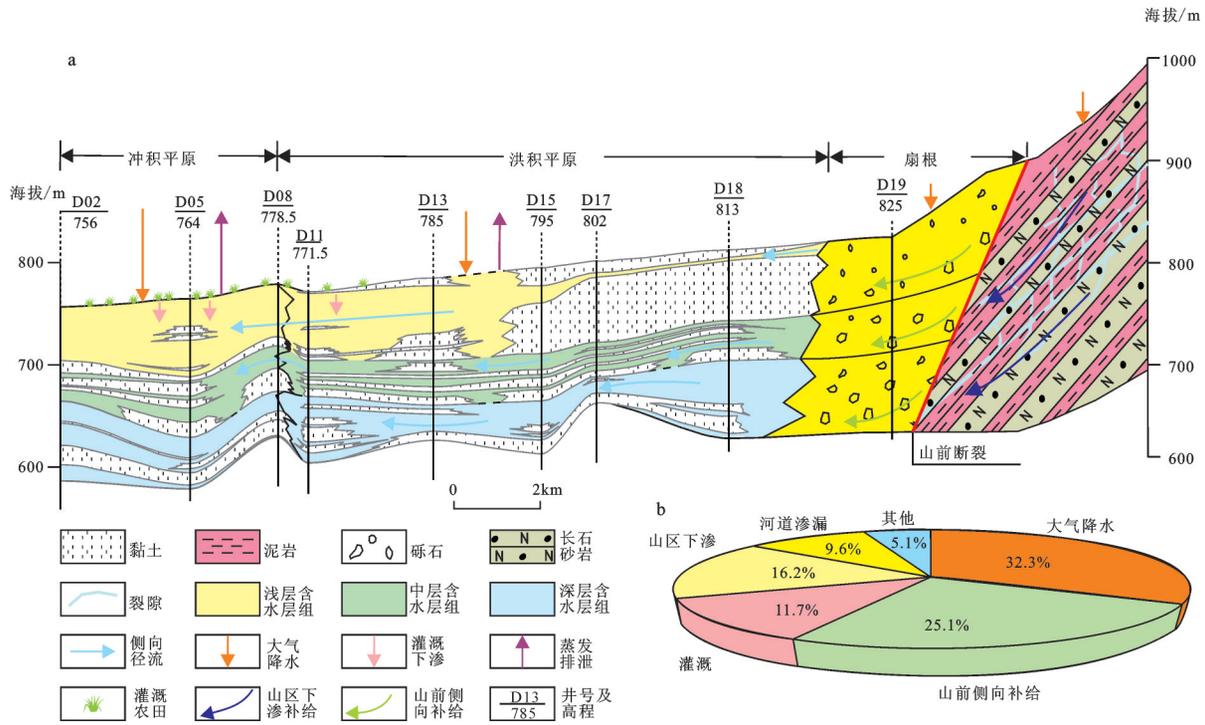


图 5 昌源河湿地含水层补—排模式
Fig.5 The recharge—discharge model of aquifers in Changyuan River wetland

浅层含水层组。它的前缘延到长头、贾令一线，占据祁县境内整个平川面积的 2/3。冲积平原松散岩孔隙水主要为乌马河和汾河的沉积作用形成，接近倾斜平原的部分与洪积物交错沉积，多见于深层含水层组，在埋深 100 m 左右。

5.2 地下水补给模式

从构造地质上看，晋中断陷是山西断陷盆地地堑系的组成部分，研究区位于晋中断陷地堑系的中东部边缘(邢集善, 1991)，受晋中断陷和边山隆起构造的共同控制，因而从沉积盆地分类的角度来看，研究区可以作为一种相对独立的地堑式构造盆地，同时这也决定了研究区内地下水补给、径流和排泄条件(图 5)。其中，子洪水库上游及四县崮保护区的中低山和丘陵区为研究区地下水的主要补给区，另外有相对较少的一部分地下水补给是由昌源河水和平原灌溉渗流作用供给(图 5b)^⑥；山前地带倾斜平原区为地下水径流区；而冲洪积至冲积平原区域为地下水汇集排泄区。由于区内大气降水与地下水存在密切的水力联系，同时昌源河水和平原灌溉水对地下水的补给不占主导地位，因此研究区形成了以降水渗流—蒸发排泄为主导的盆地水循环系统。

祁县子洪水库上游及来远镇以东的山地及丘陵区作为地下水的主要补给区，从地形学角度看，昌源河湿地山谷为开放性、广阔型山谷。该山谷被北东偏东向断层切割(图 1)，大气降水透过基岩裂隙和断裂缝渗入地下，形成砂岩裂隙和断裂含水层，山前地带顶部第四纪堆积物和局部泥岩构成隔水层，从而形成局部水资源储蓄结构，渗入地下的大气降水部分蓄积，构成昌源河和地下水的常规补给水源，而另一部分基岩山区的基岩裂隙水通过断层、裂隙与裂缝以侧向径流的方式补给山前地带和倾斜平原区。由于研究区内平原地处温带干旱—半干旱区，区内大气降水受季节性变化影响大，特别是在干旱季节，补给区的这一储水结构就成为昌源河唯一的自然补给源。

洪积平原区位于山前地带，紧邻补给区，地下水在扇缘细粒地带，部分溢出形成泉水，或蒸发排泄或供给更深层地下水。冲积平原区作为主要的工农业和生活区，区内用水超过 88.5% 都用于农业灌溉，引水灌溉的水源主要来自凿井地下承压含水层和昌源河水补给，灌溉水又可通过渗流方式注入地下水或者蒸发的形式参与到水循环系统中。

昌源河河水对湿地水土保持至关重要,同时河流底部平滑细腻且薄至中层的粘土沉积物使得河水同地下水含水层的水力联系较弱。在丰水期时,可适当增强引出的昌源河河水在用水、需水中比例,缓解地下含水层开采压力的同时也可储蓄数量可观的地下水资源;同理在枯水期时,为保障湿地生态用水,可适量增加地下水开采量,确保昌源河河水对周边湿地的生态水补给。因此,节水优先,多种水资源合理调配,充分发挥地下水和昌源河湿地水文调蓄功能,丰枯调剂,对保障地下水和地表水排补关系稳定性和积极应对未来气候变化情景下的洪涝干旱灾害有着重要意义,同时为湿地生态安全提供水资源保障。

6 结 论

结合前人的水文地质研究成果和现有的水文地质资料,研究分析认为:

(1)根据山西省祁县昌源河湿地地貌、地下水含水层介质条件和地下水赋存条件的不同,同时基于前人的划分标准,可将该地区主要地下水类型划分为碎屑岩裂隙水和松散岩孔隙水两种类型,其中松散岩孔隙水按地貌和沉积相又可分为黄土丘陵松散岩孔隙水、倾斜平原松散岩孔隙水和冲积平原松散岩孔隙水3个亚类。

(2)昌源河流域地下水埋藏较浅,主要补给来源为大气降水和断裂缝中汇集泉水的常规补给。研究区第四系松散沉积物主要存在3个含水层:浅层含水层组、中层含水层组和深层含水层组,3个含水层组分布普遍,厚度和粒度呈3个区域变化明显,即黄土丘陵边缘区、洪积平原区和冲积平原区。

(3)昌源河湿地下游部分存在大面积的降落漏斗,这将会导致地表水入渗增加;因此,为保障湿地生态和景观需水量,需做好相应的防渗措施;同时,推行节水政策,合理调配水资源,以充分发挥地下水和昌源河湿地水文调蓄功能。

致谢:笔者在野外考察、数据收集以及论文撰写过程中得到了山西省祁县昌源河国家湿地公园管委会领导及员工的大力支持,作者在此表示感谢。

注释

- ①全国地质资料馆. 1:20万区域地质图榆次幅J-49-23,2013.
- ②全国地质资料馆. 1:20万区域地质图平遥幅J-49-29,2013.

③山西省地质局水文地质队. 山西省祁县农田供水水文地质详查报告,1979.

④法国开发署(AFD). Environmental Proposal, 2016.

⑤山西省祁县昌源河国家湿地公园管委会.统计数据,2016.

References

- Chow V T, Maidment D R, Mays L W. 1988. Applied hydrology[M]. New York: McGraw-Hill, Inc., 1-17.
- Deng Wei, Hu Jinming. 2003. Development of wetland hydrology research and key scientific issues[J]. Wetland Science, 01: 12-20 (in Chinese with English abstract).
- Fan Jingzhou. 1991. The division and calibration of aquifers in thick geological units[J]. Coal Geology of China, 03: 55-56 (in Chinese).
- Fang Peixian. 1996. Specialized hydrogeology[M]. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese).
- Matheron G. 1963. Principles of Geostatistics[J]. Economic Geology, 58: 1246-1266.
- Ruan Benqing, Xu Fengran, Jiang Renfei. 2008. Analysis on spatial and temporal variability of groundwater level based on spherical sampling model[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2008, 05: 573-579 (in Chinese with English abstract).
- Schot P P, Pieber S M. 2012. Spatial and temporal variations in shallow wetland groundwater quality[J]. Journal of Hydrology, 422-423:43-52.
- Shanxi Provincial Bureau of Geology and Mineral Resources. 1989. Geological annals of Shanxi Province[M]. Beijing: Geological Publishing House(in Chinese).
- Shen Zhenrong, Zhang Yufang, Yang Shixiu. 1992. Scientific Experiment and Research of Water Resources[M]. Beijing: China Science and Technology Press, 1992: 415-418 (in Chinese).
- Song Yang, Zhou Weibo, Ma Cong, Li Hui, Liu Boyang. 2015. Analysis of spatial variability of groundwater depth in Xi'an downtown area[J]. Yellow River, 08:56-59 (in Chinese with English abstract).
- Tang Guoan, Yang xin. 2006. ArcGIS Geographic Information System Spatial Analysis Experiment Course (Second Edition) [M]. Beijing: Science Press, 419-420 (in Chinese).
- Topponnier P, Molnar P. 1976. Slip line field theory and large-scale continental tectonics[J]. Nature, 264: 319-324.
- Wang Dachun. 1995. Fundamentals of Hydrogeology[M]. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese).
- Wang Lei, Zhang Guangxin. 2007. Hydrochemical interaction between surface water and groundwater in Zhalong Wetland[J]. Wetland Science, 5(2): 166-173 (in Chinese with English abstract).
- Wang Yong. 2006. Vulnerability assessment to Dongguan Town in Qixian ground water resources based on GIS[D]. Taiyuan University of Technology. (in Chinese with English abstract).
- Wang Zhongzhong, 2011. Liu Hua. Analysis on structures and hydrogeological characteristics of aquifers in the Southern

- Guangzhou City[J]. *Underground Water*, 04: 79–81 (in Chinese with English abstract).
- Wen Hong. 2010. Talking about the present situation of water environment in Qixian County and the protection countermeasures[J]. *Sci-Tech Information Development & Economy*, 20(8): 124–126 (in Chinese).
- Wu Guoqiang, Zhu Yanming, Wang Zhongping, Cao Aiguo, Wang Gang. 2001. Tectonic characteristics of Fanwang exploration area in Jinzhong Fault depression[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 05: 41–44 (in Chinese with English abstract).
- Xing Jishan, Ye Zhiguang, Sun Zhenguo, Wu Hongwu, Chen Changwu, Li Jinhua, Song Hong. 1991. Preliminary discussions on intraplate structural features and their evolution in Shanxi province [J]. *Shanxi Geology*, 6(1): 3–15 (in Chinese with English abstract).
- Xu Huashan, Zhao Tongqian, Meng Hongqi, Xu Zongxue, Ma Chaohong. 2011. Relationship between groundwater level in Riparian Wetlands and water level in the river[J]. *Environmental Science*, 32(2): 362–367 (in Chinese with English abstract).
- Xu Yihe, Wei Xiaomei, Cai Mingke, Hu Guojie, Xu Wanlin. 2011. Geostatistics-based study of spatial variability of groundwater level in Baoji urban area[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 18(2):213–214 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Renduo. 2005. *Spatial Variability Theory and Applications*[M]. Beijing: Science Press, (in Chinese).
- Zhou Xuming. 1988. The application of groundwater management model in the Qixian County, Shanxi Province[J]. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 2: 30–34 (in Chinese with English abstract).
- 附中文参考文献:**
- 邓伟, 胡金明. 2003. 湿地水文学研究进展及科学前沿问题[J]. *湿地科学*, 01: 12–20.
- 樊景洲. 1991. 厚地层单元含水层的划分和定厚[J]. *中国煤田地质*, 03: 55–56.
- 房佩贤. 1996. 专门水文地质学[M]. 北京: 地质出版社.
- 阮本清, 许凤冉, 蒋任飞. 2008. 基于球状模型参数的地下水水位空间变异特性及其演化规律分析[J]. *水利学报*, 05: 573–579.
- 山西省地质矿产局. 1989. 山西省区域地质志[M]. 北京: 地质出版社.
- 沈振荣, 张瑜芳, 杨诗秀. 1992. 水资源科学实验与研究[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 415–418.
- 宋扬, 周维博, 马聪, 李惠, 刘博洋. 2015. 西安主城区地下水埋深空间变异性分析[J]. *人民黄河*, 08:56–59.
- 汤国安, 杨昕. 2006. *ArcGIS地理信息系统空间分析实验教程(第二版)*[M]. 北京: 科学出版社, 419–420.
- 王大纯. 1995. 水文地质学基础[M]. 北京: 地质出版社.
- 王磊, 章光新. 2007. 扎龙湿地地表水与浅层地下水的水化学联系研究[J]. *湿地科学*, 5(2): 166–173.
- 王勇. 2006. 基于GIS对祁县东观地下水资源脆弱性评价[D]. 太原理工大学.
- 王忠忠, 刘华. 2011. 广州南部地区水文地质特征及含水层结构分析[J]. *地下水*, 04: 79–81.
- 温弘. 2010. 祁县水环境现状及保护对策[J]. *科技情报开发与经济*, 20(8): 124–126.
- 吴国强, 朱炎铭, 王仲平, 曹爱国, 王刚. 2001. 晋中断陷樊王普查区的构造特征研究[J]. *中国矿业大学学报*, 05: 41–44.
- 邢集善, 叶志光, 孙振国, 吴洪武, 陈昌武, 李金花, 宋虹. 1991. 山西板内构造及其演化特征初探[J]. *山西地质*, 6(1): 3–15.
- 徐华山, 赵同谦, 孟红旗, 徐宗学, 马朝红. 2011. 滨河湿地地下水水位变化及其与河水响应关系研究[J]. *环境科学*, 32(2): 362–367.
- 许义和, 魏晓妹, 蔡明科, 胡国杰, 徐万林. 2011. 基于地统计学的宝鸡市区地下水位空间变异特性研究[J]. *水土保持研究*, 18(2):213–214.
- 张仁铎. 2005. 空间变异理论及应用[M]. 北京: 科学出版社.
- 周旭明. 1988. 地下水管理模型在山西省祁县的应用[J]. *水文地质与工程地质*, 2: 30–34.