

黄河中游汾河入黄口湿地水源组成与地表—地下水转化关系*

许秀丽¹, 李云良^{2,3**}, 高 博¹, 张永波¹

(1: 太原理工大学水利科学与工程学院, 太原 030024)

(2: 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 流域地理学重点实验室, 南京 210008)

(3: 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 南京 210098)

摘 要: 水源动态补给和转化是影响湿地水文过程及其生态效应的重要机制, 在黄河流域生态保护和高质量发展的战略背景下, 开展沿黄湿地多水源组成分析及转化关系研究, 是揭示干旱半干旱区水量转化及湿地生态系统演变机制的关键。本文根据山西省汾河入黄口湿地水文节律变化特征, 选择 2019 年旱季(5 月)、主汛期(7 月)和汛末(9 月)作为典型时期, 分析了降雨、土壤水、地下水与河水氢氧同位素组成, 研究了湿地水分的补给来源, 并结合端元混合模型揭示了不同时期地表水与地下水的转化关系。结果发现, 不同水体¹⁸O 和 D 组成存在明显差异, 均值总体表现为降雨>土壤水>汾河水>汾河流域地下水>黄河水的变化特征, 表明黄河和流域地下水的侧向排泄对汾河下游径流和河口湿地水源补给具有重要贡献作用。进一步研究得出, 旱季湿地地下水在近岸带主要受汾河水补给影响, 随着远离汾河水体, 主要受流域浅层地下水补给, 并向黄河水转化, 主汛期和汛末期, 黄河水又侧向补给湿地地下水, 并向汾河水转化, 而湿地土壤水主要受降雨入渗和毛细上升水的影响。入黄口湿地的地表水—地下水存在季节变化的作用关系, 旱季主要为汾河流域浅层地下水侧向补给汾河, 补给贡献约为 72%, 然而主汛期, 由于黄河倒灌补给导致汾河水位抬高, 进而渗漏补给流域浅层地下水, 补给比例约为 69%, 至于汛末期, 黄河和流域地下水均向汾河排泄。本文研究结果对促进黄河流域生态保护和自然湿地生态建设具有重要的意义, 可强化对河口湿地水资源组成和演变机制的深入理解。

关键词: 地下水; 汾河; 黄河; 水源补给; 转化关系; 氢氧同位素

Composition of water sources and transformation relationship between surface water and groundwater in the Fenhe River estuarine wetland of the middle Yellow River*

Xu Xiuli¹, Li Yunliang^{2,3**}, Gao Bo¹ & Zhang Yongbo¹

(1: College of Water Resources Science and Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, P.R.China)

(2: Key Laboratory of Watershed Geographic Sciences, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, P.R.China)

(3: State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, P.R. China)

Abstract: Water supply and the conversion relationship among different water sources play an important role in affecting wetland hydrological processes and the associated ecological functions. Under the guidance of the national strategy of ecological protection and high-quality development of the Yellow River, exploring the conversion relationship among rainfall, surface water, and groundwater in the estuarine wetland of the Yellow River Basin is the key to reveal the mechanism of regional wetland system evolution and the water conversion processes in the arid and semi-arid area. In this study, we aim to investigate the characteristics of hydrogen and oxygen isotopes of rainfall, river water, groundwater, soil water in the Fenhe River estuarine wetland (the Yellow River) in May, July, and September during 2019. To achieve these objectives, the water sources composition of wetland in different hydro-

* 2021-04-28 收稿; 2021-06-11 收修改稿。

国家重点研发计划项目(2019YFC0409002)、山西省应用基础研究项目(201801D221052)、国家自然科学基金项目(42071036, 41771037)、河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室“一带一路”水与可持续发展科技基金项目(2020491311)和中国科学院青年创新促进会项目(Y9CJH01001)联合资助。

** 通信作者; E-mail: yunliangli@niglas.ac.cn.

logical periods was analyzed. In addition, the transformation relationship among rainfall, surface water, and groundwater was quantified using a mixed source model. The results show that the isotope composition of various water sources is distinctly different. The mean values of δD and $\delta^{18}O$ for different water sources are in the order of rainfall, soil water, Fenhe River water, watershed groundwater, and the Yellow River water, demonstrating that the discharge of the Yellow River water and the watershed groundwater plays a prominent role in maintaining the downstream runoffs of Fenhe River and the wetland water sources. During the drought season, the wetland groundwater in the riparian zone is mainly supplied by Fenhe River. Because of the increased distance to Fenhe River, the wetland is mainly recharged by the shallow groundwater from the Fenhe River basin, and then discharges to the Yellow River. While the Yellow River water transformed to the wetland groundwater in high water level season. The wetland soil water is mainly recharged by the local rainfall and the wetland groundwater. The transformation relationship among rainfall, river water, and groundwater varies between different seasons. During the drought season, the shallow groundwater in Fenhe River basin discharges into the Fenhe River, with a contribution proportion of 78%. During the flood period, the Yellow River acts to restrict discharge from the Fenhe River, and the flow reversals occur as the Yellow River's strong blocking effect. Consequently, the watershed shallow groundwater is generally replenished by the Fenhe River water at high water level stage, and the proportions can reach up to approximately 69%. However, the Yellow River water, wetland groundwater, and the shallow watershed groundwater discharge to the surrounding Fenhe River channel during the falling water period. The outcomes of this paper are of great significance for national ecological conservation of the Yellow River Basin and the restoration of natural wetland, contributing to further understanding water resources composition and evolution mechanism in other similar estuarine wetlands.

Keywords: Groundwater; Fenhe River; Yellow River; water sources; transformation relationship; hydrogen and oxygen stable isotope

湿地是介于水生与陆生生态系统之间的典型交错地带,水分输入—输出的动态变化对湿地生态系统发育和演变起着至关重要的作用^[1],直接决定湿地水量平衡及生物地球化学循环过程^[2],影响湿地下垫面的景观格局^[3]. 从学科发展和研究内涵两个角度而言,探明湿地系统水分补给来源的特征与性质,揭示湿地地表水与地下水之间的转化关系和机制,不仅是整个陆地水循环过程研究的重要组成部分,更是探索变化环境下湿地生态系统发育和演变机理的关键与核心问题^[1,3].

由于同时涉及陆地与水域,湿地水源补给与转化受复杂自然条件和传统监测手段等因素限制,相比于其他水文过程,完全掌握湿地多水源的组成及其变化规律尤为复杂^[1,4]. 针对这一问题,在诸多研究方法中,氢氧稳定同位素凭借其是自然界中理想示踪剂的优势,基于不同水体氢氧同位素组成的差异,使得同位素技术成为湿地水体溯源和水源转化关系研究的有效手段^[4]. 针对湿地水源动态研究,已有研究发现河流湿地的补给水源受降水的季节分配影响较大,雨季以降水集中补给为主,但旱季以地下水和地表水交互补给为主^[5-6]. 同时,不少研究表明大气降水对内陆湖泊湿地补给强度较弱,受区域和局地二元地下水循环过程的影响,湿地地下水主要来自河湖等地表水体的补给^[7-9]. 更为重要的是,降水—地下水—地表水之间的转化关系和补给贡献大多存在明显的地域差异,如澳大利亚东南部的河口湿地地下水主要来自地表淡水和残余海水的混合补给^[10],而闽江河口区湿地地下水与河水的作用关系却始终表现为地下水对河水的单向补给,且枯水期地下水的补给贡献更大^[11]. 上述研究表明,湿地水体的转化关系在时间和空间上均具有差异性,受湿地类型、地质条件、气候和水文情势变化等的共同控制.

事实上,水文过程是湿地形成与发展机理研究的基础,更是湿地生态保护和修复的关键^[1]. 近年来,针对我国典型的干旱半干旱地区,黄河流域生态保护和高质量发展上升为重大国家战略^[12],开展好湿地生态保护是黄河流域生态保护的重要一环,对推进沿黄各省区生态保护健康发展、维护区域自然生态平衡、支撑经济社会可持续发展有重要意义和价值^[13-14]. 国内已经在黄河流域湿地研究方面开展了较多工作,主要集中于黄河三角洲湿地^[15-17]、黄河源区高寒湿地^[18]和黄河上游生态脆弱区等^[19-20],主要研究包括黄河三角洲湿地水分传输机制及景观格局变化^[15-17]、黄河上游湿地演变规律以及生态环境脆弱性评估等方面^[18-20]. 然而,针对黄河中游湿地的研究相对较少,随着沿黄地区经济社会的不断发展,流域内用水矛盾突出,自然湿地生态环境功能面临严重挑战^[21]. 上官铁梁课题组采用数量生态学方法系统调查了黄河中游连伯滩湿地资源组成^[22],李帅等^[23]和郭东昱等^[24]研究了1990—2005年连伯滩湿地植物多样性与景观格局变化,发现湿地面积明显减少,景观破碎化程度增加. 郝晓慧等^[25-26]研究发现,黄河花园口湿地1999—2011年间植被

覆盖度减少了 20%。由此可知,以往研究虽然明晰了黄河中游湿地植被的区系组成及变化趋势,但这种基于景观和群落尺度的湿地植物研究,主要强调植被的生态学特征,对沿黄湿地植被系统演变的关键要素——水文过程仍以定性认识为主,尤其是对于水资源问题严重和敏感的黄河流域,缺乏对湿地系统水源补给与转化关系的完整理解和评估,尚无法为黄河流域生态保护与高质量发展提供充分的科学支撑。

鉴于上述背景,本文以山西省汾河入黄口湿地为研究区,旨在为探求汾河下游乃至整个黄河中游沿黄湿地生态系统的演变机理提供重要的理论参考。黄河流域由于地处干旱半干旱地区,少量降雨和地表径流限制了湿地的大面积分布,只有较大流量才能在干支流及其沿岸地区形成一些季节性湿地。汾河入黄沿岸湿地是黄河中游最重要的湿地之一,也是天鹅、灰鹤在我国北方的主要越冬停歇地^[23]。汾河、黄河、流域地下水作为湿地生境的主要水环境因子,其相互作用和转化关系直接影响湿地的水源补给以及与之依赖的下垫面植被生态系统的结构和稳定^[24]。因此,迫切需要探明汾河入黄口湿地水分的来源,揭示湿地与汾河、黄河干流、流域地下水等不同水源之间的复杂转化关系,这对剖析湿地生态系统演变的驱动机制,促进自然湿地恢复、维护区域湿地生态系统健康有重要的理论和实际意义。

本文主要研究目标为:(1)根据湿地水分输入和输出关系,分析区内降水、土壤水、地下水、地表水的氢氧稳定同位素组成特征和变化规律;(2)针对湿地多水源的复杂性,研究湿地系统地下水和土壤水分的补给来源和原因;(3)依托同位素示踪技术,揭示不同时期湿地系统降水、地下水与地表水之间的动态转化关系。研究结果对山西省全面践行黄河流域生态保护国家战略具有重要的实际意义。

1 材料与方法

1.1 自然地理与环境概况

汾河为黄河的第二大支流,干流由北向南纵贯山西省,流经最下游的山西省河津市后,与黄河并排同行向南流淌,最终从运城市万荣县庙前村汇入黄河左岸(图1),多年平均径流量 $2.56 \times 10^6 \text{ m}^3$ 。本文研究区为万荣县汾河入黄口湿地(35°21'5"N, 110°28'27"E),是指由汾河入黄段和黄河形成的自然冲积湿地,湿地地势平缓,东西宽约 1.4~3 km,南北长约 4 km(图1)。该区属于暖温带大陆性季风气候区,夏季高温多雨,冬季寒冷干旱,雨热同期。运城盐湖站 1980—2019 年多年平均降雨量为 515 mm,季节分配不均,年内降雨主要集中在 6—9 月,占全年降雨量的 63%,11 月至次年 3 月降雨量最小,占年降雨总量的 10%。多年平均气温 14.3℃,月平均最高温 27.6℃,出现在 7 月份,最低温 -0.7℃,出现在 1 月份,霜冻期为 10 中下旬—次年 4 月。

汾河入黄口湿地是黄河中游受流域—汾河—黄河共同作用影响的狭长型三角洲湿地,包括浅滩、河漫滩、沼泽和洪泛湿地,地处 1993 年成立的山西省运城湿地自然保护区范围^[22-23]。湿地地表水主要为黄河和汾河水,旱季湿地出露,植被生长,而每年汛期的 7—9 月是集中补给期,两河洪水泛滥,越过漫滩陡坎淹没沿岸湿地,同时渗漏补给地下水,低洼区则形成沼泽,地面积水深度 20~50 cm。这种频繁的洪水干扰增加了河流与两岸湿地的水文连通性,使得研究区湿地呈现季节性干湿交替特征。此外,研究区湿地蕴含了丰富的植物资源^[22],主要包含:(1)水生草本植物群落,分布在近岸及低洼地带,主要有芦苇(*Phragmites communis*)、香蒲(*Typha orientalis*)群落。(2)湿生草本植物群落,分布在河流两岸地下水位较高的地带,汛期会有季节性积水,优势种为小香蒲(*Typha minima*)、水莎草(*Juncellus serotinus*)群落。(3)木本群落,以黄河和汾河两岸人工种植的怪柳(*Tamarix chinensis*)、杨(*Populus* spp.)林为主。(4)中生草本植物群落,主要分布在离河岸带较远的高位河漫滩地带,以中生植物种稗草(*Echinochloa crusgalli*)、假苇拂子茅(*Calamagrostis pseudophragmites*)群落为主。湿地土壤主要为粉砂质壤土,黏粒占比 5.3%~18.1%(表1)。

1.2 样品采集与测试分析

为了查明不同时期湿地水分的补给来源以及降水、地表水与地下水之间的转化关系,考虑到湿地动态主要取决于周边地表水体的水情变化,因此本研究基于完整水文过程的变化特点,选择旱季(5月初)、主汛期(7月中)、汛末(9月末)分别进行氢氧同位素样品采集。降水样品依托万荣县气象局,自 2019 年 3—10 月在降雨期间进行收集,共收集降雨样品 21 个。汾河水样品取自河津市至万荣段,黄河水样取自河津市至万荣县黄河主流线附近,河水均为常年流动水体,采样位置为水面 0.5 m 以下,采样前先用原水充分润洗采样瓶。流域内地下水样品取自研究区周边居民农用浅层地下水井,采集前先行 10 min 抽水洗井,以保证收集

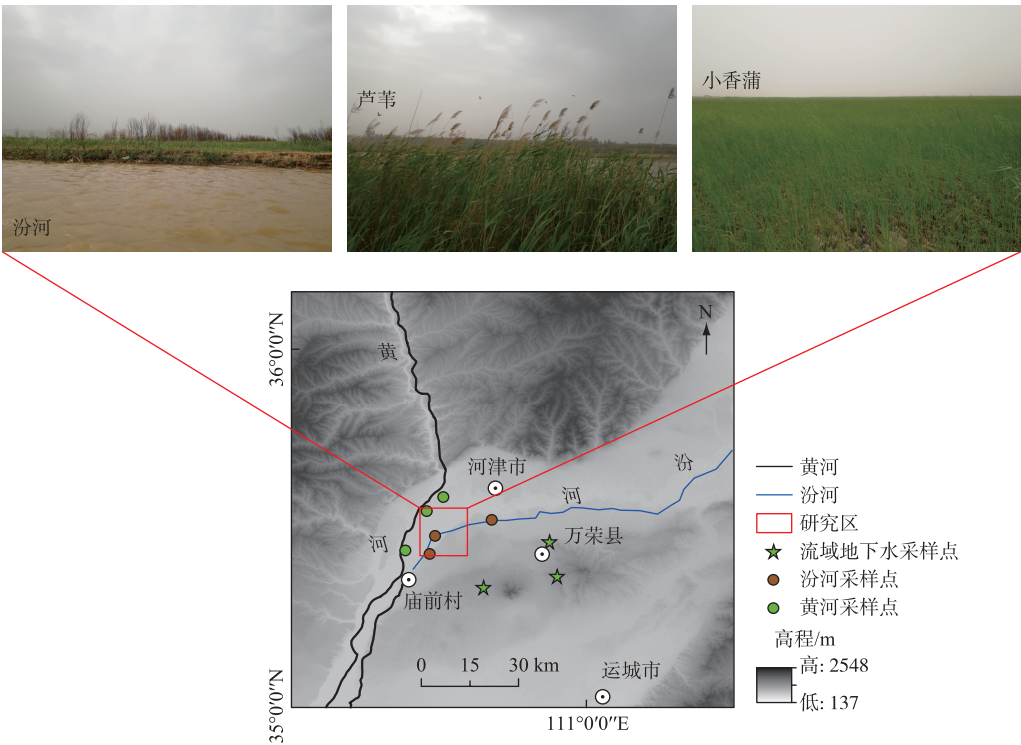


图 1 黄河流域和本文研究区概况

Fig.1 Location of the Yellow River Basin and the study area

表 1 湿地土壤理化性质

Tab.1 Physical and chemical properties in the studied wetland soil

植被类型	总有机碳/ (g/kg)	全氮/ (g/kg)	有效磷/ (mg/kg)	机械组成/%			土壤质地
				0.05~2 mm	0.002~0.05 mm	<0.002 mm	
小香蒲	4.21±0.6	0.36±0.08	5.4±2.1	15.9	67.6	16.5	粉砂壤土
芦苇	3.05±0.9	0.24±0.04	2.2±0.5	35.2	59.5	5.3	粉砂壤土
怪柳	2.59±1.1	0.28±0.02	7.9±1.4	10.1	79.7	10.2	粉砂壤土
水莎草	2.25±1.0	0.30±0.05	2.2±0.6	25.6	63.8	10.6	粉砂壤土
假苇拂子茅	11.5±0.2	0.87±0.03	2.4±0.3	20.1	61.8	18.1	粉砂壤土

到新鲜地下水样. 湿地地下水样品取自研究区庙前村至大兴村之间的河漫滩及洪泛湿地, 采样点设置于湿地优势植物长势良好且分布面积较大的地带, 整体沿黄、汾河道东西断面走向. 旱季采样点距离汾河右岸 100~800 m 不等, 汛期因地下水位埋深较浅, 低洼处地面淹水, 采样点靠近汾河, 距离岸边约 200~300 m. 通过挖掘法直至地下水出露, 收集过滤后的无泥沙的水样, 挖掘深度约 100~130 cm. 所有地表、地下水样每次均设置 3 个重复样, 水样采集后迅速装于 30 mL 塑料瓶中, 尽量装满, 确保不留气泡, 共采集水样 36 个. 湿地土壤样品于地下水采样点附近 1 m 内同步采集, 采用槽型钻分别获取 0~20、20~40、40~60、60~80 cm 的土壤, 将各层土壤样品分别装于 8 mL 玻璃瓶内, 共采集土壤样品 74 组. 所有样品采集后立即用封口膜密封, 放于冷藏箱内运回实验室冷藏保存.

土壤样品在清华大学研究院稳定同位素分析实验室先低温真空抽提水分, 抽提设备为 LI-2100 全自动真空冷凝抽提系统(理加联合科技有限公司), 每个样品均保证完全抽提, 抽提率在 98% 以上. 所有水样采用

同位素比率质谱仪(MAT253, USA)测定水样中 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 的含量,同一个样品采用多次重复进样测试,重复测定的外精度分别为 $\pm 0.5\text{‰}$ 和 $\pm 2\text{‰}$ 。所有水样测定结果以 V-SMOW(维也纳标准海洋水)为标准的千分差表示:

$$\delta R(\text{‰}) = (R_{\text{sam}}/R_{\text{sta}} - 1) \times 1000 \quad (1)$$

式中, R_{sam} 代表样品中 D/H 或 $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ 的比值, R_{sta} 为 V-SMOW 标准物质中 D/H 或 $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ 的比值。

1.3 数据分析方法

测试数据在 Excel 中分析,采用直观比较法,通过对比不同水源的 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 值,判断不同时期湿地地下水的补给来源及各类水源之间的转化关系^[11]。采用基于同位素质量平衡原理的端元混合模型法计算不同补给来源的贡献比例,端元混合模型是计算混合水体中不同水源贡献比例的常用方法^[27]。

当补给水源组成为 2 种时(二端元混合):

$$\delta_s = f_1 \cdot \delta_1 + f_2 \cdot \delta_2 \quad (2)$$

$$\lambda_s = f_1 \cdot \lambda_1 + f_2 \cdot \lambda_2 \quad (3)$$

$$f_1 + f_2 = 1 \quad (4)$$

当补给水源组成为 3 种时(三端元混合):

$$\delta_s = f_1 \cdot \delta_1 + f_2 \cdot \delta_2 + f_3 \cdot \delta_3 \quad (5)$$

$$\lambda_s = f_1 \cdot \lambda_1 + f_2 \cdot \lambda_2 + f_3 \cdot \lambda_3 \quad (6)$$

$$f_1 + f_2 + f_3 = 1 \quad (7)$$

式中, δ_s 、 λ_s 分别为混合后目标水体中的氢、氧同位素值, δ_1 、 δ_2 、 δ_3 分别为不同补给水源的氢同位素值, λ_1 、 λ_2 、 λ_3 分别为不同补给水源的氧同位素值, f_1 、 f_2 、 f_3 分别为不同补给水源的贡献比例。

2 结果与分析

2.1 大气降雨氢氧同位素组成特征

研究区大气降雨 $\delta^{18}\text{O}$ 介于 -13.01‰ ~ 0.38‰ 之间,均值为 -6.24‰ , δD 介于 -88.7‰ ~ 13.6‰ 之间,均值为 -36.5‰ (图 2)。降雨同位素值与 GNIP(全球降雨同位素监测网)太原站降雨数据($\delta^{18}\text{O}$: -13.83‰ ~ -1.09‰ ,均值: -7.24‰ ; δD : -94.3‰ ~ -10.4‰ ,均值: -51.2‰)相近^[28],也落在中国大气降水同位素值($\delta^{18}\text{O}$: -24‰ ~ 2‰ ; δD : -210‰ ~ 20‰)变化范围之内^[29]。个别降雨事件中降雨同位素出现正值,主要原因为该时段降雨小,雨滴受到云下二次蒸发作用的影响。根据雨水样品 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 的分析结果,得出汾河入黄口地区当地大气雨水线方程(LMWL)为: $\delta\text{D} = 7.73 \delta^{18}\text{O} + 11.73$ ($n = 21$, $R^2 = 0.94$)(图 2)。该雨水线方程与全球大气雨水线($\delta\text{D} = 8 \delta^{18}\text{O} + 10$)和中国大气雨水线($\delta\text{D} = 7.9 \delta^{18}\text{O} + 8.2$)相比^[29],斜率偏小。这与研究区地处华北内陆地区,次降雨量较小,空气湿度低,雨滴在降落过程中易受到蒸发分馏影响有关。而且,研究区氡盈余值具有较大的波动性,波动范围为 -2.1‰ ~ 24.8‰ ,平均值为 13.4‰ ,氡盈余平均值大于全球范围内氡盈余平均值 10‰ ,这也说明研究区蒸发快,不平衡蒸发非常强烈。

本文汾河入黄口降水同位素样品采集时段虽然不足 1 年,但基本涵盖了全年有雨时段,与 GNPI 太原站年内观测时段一致。而且,研究区降雨同位素表现出明显的季节差异(图 3), $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 值 3 月最小,5 月最大,6—7 月同位素值明显减小,8—10 月居中波动,差异较小。降雨同位素的季节变化特征与 GNPI 太原站、陕西长武黄土原区^[30]及北京地区的降水同位素季节变化规律基本一致^[31],这可能与区域水汽来源、气温、降雨类型和降雨过程中的蒸发分馏有关。首先,3 月份北方地区气温较低,受温度效应影响,蒸发分馏作用弱,相对较轻的同位素分子优先分馏,故而降雨同位素表现出随温度降低而减小的特征, $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 值最小。4—5 月份气温逐渐回升,然而降雨量较少,空气湿度低,降雨过程中同位素易受到强烈蒸发分馏而富集,这与以往研究发现的降雨强度小、雨量小时,雨滴下降过程中会经历蒸发分馏而导致同位素偏高一致^[32]。6、7 月份,研究区开始进入雨季,降雨量逐渐增大(图 3),且由于水汽团在向内陆长距离迁移过程中经历了频繁降水冷凝^[29],故而降雨重同位素严重贫化。8 月份气温达到全年最高,存在强烈的蒸发分馏,同时还可能与汾河、黄河等地表水体蒸发水汽作为局地水汽源有关,导致降雨同位素值再次增大。总之,研究区降雨样品的氢氧同位素值变化范围较大,降雨同位素组成的这种较大差异为后续进一步利用同位素示踪研究入黄口

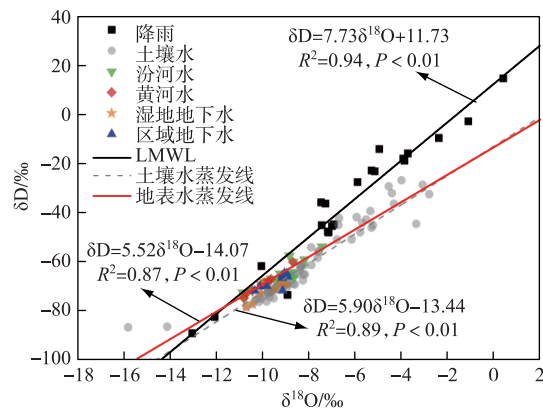


图2 降雨、土壤水、地下水和地表水 $\delta^{18}\text{O}$ - δD 组成关系

Fig.2 Relationship between $\delta^{18}\text{O}$ and δD for rainfall, soil water, groundwater and river water in the study area

湿地水文循环过程奠定了理论基础. 然而,考虑到 GNPI 太原站地理位置距离研究区较远,且降雨同位素数据距离当前年份较远(15 年以上),地形、气候条件和降雨过程可能会有较大差异. 因此,本文没有采用 GNPI 太原站降雨观测数据作为补充.

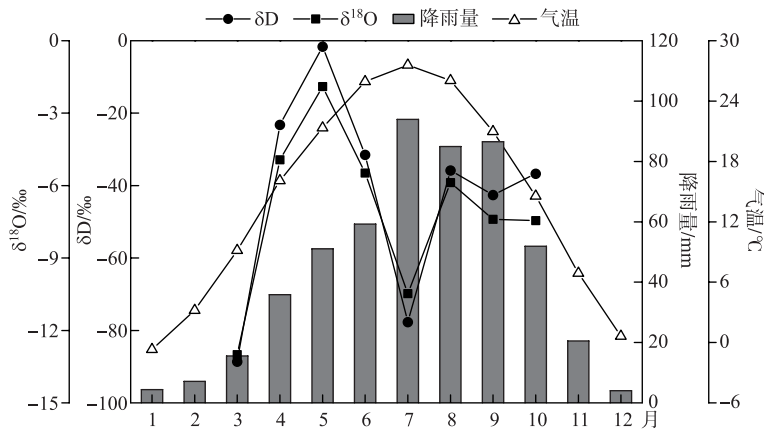


图3 2019 年大气降雨同位素平均值与多年平均降雨量和气温的月变化关系

Fig.3 Monthly variations of the average values of rainfall isotopes, the annual average values of rainfall amount and the temperature in 2019

2.2 河水和地下水氢氧同位素组成特征

进一步分析河水和地下水的同位素组成和分布(图2),可以看出几个特征,(1)河水和地下水 $\delta^{18}\text{O}$ - δD 关系点都分布在当地大气雨水线的附近,且靠近左下角,表明地下、地表水的初始来源均为大气降水入渗补给,而且以雨季较贫化的降水补给为主.(2)黄河、汾河水地表水 $\delta^{18}\text{O}$ 、 δD 值具有良好的线性关系,地表水蒸发线方程为: $\delta\text{D}=5.52\delta^{18}\text{O}-14.07$ ($n=18$, $R^2=0.87$),但蒸发线斜率远小于当地大气雨水线的斜率,说明地表水体蒸发较为强烈.(3)流域浅层地下水、湿地地下水同位素点紧靠地表水蒸发线分布,且部分时期同位素点分布接近,这明确说明地下水与地表水之间存在密切的水力联系.

区域范围内不同水样中 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 组成存在较大差异(表2),从 $\delta^{18}\text{O}$ 、 δD 均值排序看,降水>土壤水>汾河水>流域浅层地下水>黄河水. 汾河水同位素介于大气降水与流域浅层地下水和黄河水同位素之间,表明在维持汾河河道径流方面,除了大气降水的补给,黄河地表水和流域内浅层地下水向河排泄的调节作用

也至关重要. 黄河水同位素与流域浅层地下水和湿地地下水同位素差异较小,这可能是受特定地质地貌条件影响,在区域尺度上,黄河中游河段大多排泄流域浅层地下水^[33]. 此外,各类水体 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 标准差显示,降水同位素变化幅度最大,其次为土壤水、地表水,地下水(区域/湿地地下水)变化最小(表2). 这与水体的补给来源和蒸发分馏效应在各类水体中影响程度的衰减规律相似. 汾河、黄河水同位素值变化幅度小于降水同位素,说明地表水除了受到大气降水的直接补给,还应该受到更稳定的流域地下水的基流调节. 而流域浅层地下水 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 的变化最小,主要因为研究区内浅层地下水平均埋深约为 4.7 m^[34],地下水受到蒸发分馏的影响较小,相对较为稳定.

表2 各类水样中 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 的统计值
Tab.2 Statistics of $\delta^{18}\text{O}$ and δD for different water sources

水样类型	$\delta^{18}\text{O}/\text{‰}$			$\delta\text{D}/\text{‰}$		
	变化范围	均值	标准差	变化范围	均值	标准差
降水	-13.01~0.38	-6.25	3.19	-88.7~13.6	-36.6	25.4
土壤水	-15.77~-2.81	-8.26	2.23	-86.3~-27.3	-62.2	13.9
汾河水	-10.83~-7.42	-9.02	0.99	-72.4~-54.0	-64.0	5.9
黄河水	-10.78~-8.67	-9.88	0.70	-74.1~-60.1	-68.6	4.3
湿地地下水	-10.67~-8.97	-9.84	0.55	-78.2~-68.8	-71.7	3.6
流域浅层地下水	-10.32~-8.90	-9.38	0.53	-71.6~-64.5	-67.8	2.9

2.3 土壤水氢氧同位素组成特征

湿地土壤水氢氧同位素变化范围较大, $\delta^{18}\text{O}$ 、 δD 的变化范围分别为 $-15.77\text{‰} \sim -2.81\text{‰}$ 和 $-86.3\text{‰} \sim -27.3\text{‰}$,均值分别为 -8.26‰ 和 -62.2‰ (图2,表2). 从土壤水 $\delta^{18}\text{O}$ 、 δD 变化范围可知,土壤水同位素与降雨同位素存在较大范围重合,说明土壤水主要来源于大气降雨补给. 然而,土壤水同位素超出了当地大气降水同位素组成的变化范围,部分土壤水点与湿地地下水、汾河水同位素点很接近(图2),这说明土壤水可能还受到其他补给水源的影响. 土壤水蒸发线方程为: $\delta\text{D}=5.90 \delta^{18}\text{O}-13.44$ ($n=74$, $R^2=0.89$)(图2),蒸发线位于当地大气雨水线的右下方,斜率和截距均小于当地大气雨水线的斜率和截距,说明土壤水受到蒸发作用的影响.

研究区土壤水 $\delta^{18}\text{O}$ 、 δD 值不存在显著的季节性差异($\delta^{18}\text{O}:P=0.78$, $\delta\text{D}:P=0.48$)(图4),不同季节土壤水同位素的剖面变化规律一致,均表现为随土壤深度的增加而逐渐减小(图4). 表层 0~20 cm 土壤水 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 值极显著高于深层同位素值($P<0.01$),而 20 cm 以下各层土壤水同位素差异不显著($P>0.05$). 土壤水同位素值的垂向变化规律与不同深度土壤经历的蒸发作用强度有关,表层土壤蒸发最为强烈,致使重同位素更为富集. 此外,标准差显示,不同深度土壤水同位素的变异程度不同(图4). 旱季,表层 20 cm 土壤水同位素变异程度最高,深层 60~80 cm 土壤水同位素变异性最小,而且 60~80 cm 土壤水同位素值与地下水同位素(平均埋深为 115 cm)基本相等(图4a). 这是因为表层易受蒸发分馏和降雨入渗的影响,而深层土壤水主要受地下水的稳定向上补给. 雨季,深层 60~80 cm 土壤水同位素变异程度最高(图4b),这可能是因为深层土壤水除了受到毛细水的补给,还兼有其他水源的混合补给.

研究区不同深度土壤水氢氧同位素的分布呈现出两个明显不同的分区(图5a),表层 0~20 cm 土壤水同位素点分散分布于右上侧区,其他各层土壤水同位素聚集分布于左下侧区,同位素更为贫化. 对比发现,表层 0~20 cm 土壤水同位素明显富集于同期降雨同位素(图4),且 $\delta^{18}\text{O}$ - δD 线性关系较为松散(图5a),这说明浅层土壤水受降水入渗和蒸发分馏作用影响较大. 40、60、80 cm 各层土壤水同位素组成却低于前期降雨氢氧同位素值(图4),与地下水同位素分布范围较为一致,说明 40 cm 及以下深层土壤水主要受到贫化的地下水的向上补给,而且土壤水 $\delta^{18}\text{O}$ - δD 线性关系紧密(图5b~d). 这表明,随着土壤深度的增加,土壤水受降水入渗和蒸发作用的影响越来越弱,强蒸发作用在该区的影响深度约 20、40 cm 及以下更深层的土壤水同位素变化主要由混合作用引起. 野外采样期间监测发现,湿地地下水平均埋深为 105~115 cm,上述分析近似得出该区地下水毛细作用至少可以影响到 40 cm 深度的土壤水,进而估算出地下水毛细上升高度为 75 cm.

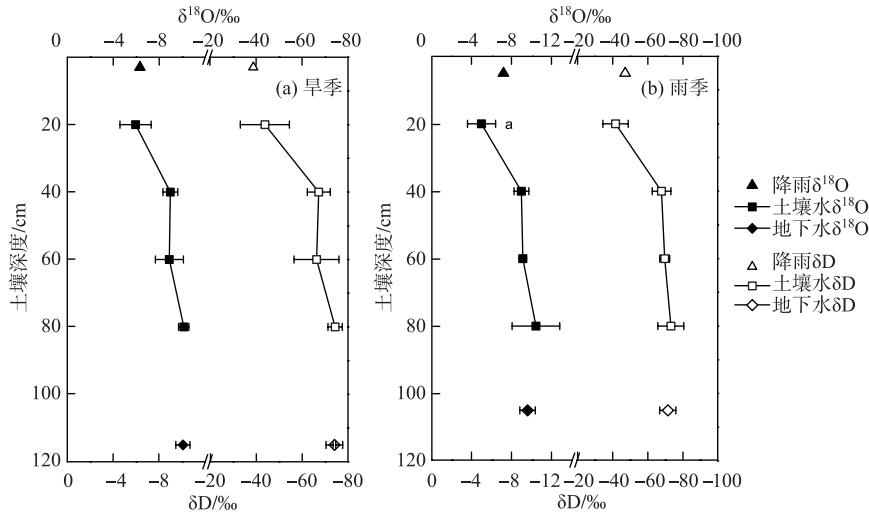


图4 不同季节土壤水和各水源氢、氧同位素组成(旱季和雨季降雨统计时段分别为3—5月和7—9月)

Fig.4 $\delta^{18}\text{O}$ and δD values in soil water and the various water sources for different seasons

2.4 降雨、地表水与地下水转化关系研究

汾河流域地处北方干旱半干旱地区,降雨主要依靠夏季风,每年7—9月为雨季,降水集中(图3),11月一次年5月降水较少,整体为春季干旱期。而且,由汾河河津站1956—2000年的流量季节变化可知,汛期和枯水期界限明显,10月一次年5月,汾河流量最小且变化平缓,自6月份开始流量迅速增大,7、8月达到峰值,同时,黄河的年最大流量也多出现在7、8月份^[35-36]。综合考虑到降水分布和水文情势对水体转化比例的影响,本文将5、7、9月分别划分为旱季、主汛期、汛末期3个典型时期,分析不同时期的水体转化规律。此外,应用同位素质量平衡模型估算地下水与地表水相互转化比例时(见1.3节),必须要保证不同水源之间氢氧同位素差异大于 $\delta^{18}\text{O}$ 、 δD 的测试精度^[4,11],本文的计算兼遵循此原则。

旱季(5月)汾河水、黄河水、汾河流域浅层地下水和湿地地下水的 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 的均值分别为 -9.17‰ 、 -63.3‰ 、 -9.72‰ 、 -67.5‰ 、 -10.07‰ 、 -70.4‰ 、 -10.06‰ 、 -74.1‰ ,各类水体的氢氧同位素值变化规律为:汾河水>黄河水>汾河流域浅层地下水>湿地地下水。湿地地下水同位素整体最为贫化,但距离汾河右岸不同距离的采样点同位素存在差异。近岸带(100~200 m)芦苇和小香蒲群落地下水 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 均值分别为 -9.25‰ 和 -69.3‰ , $\delta^{18}\text{O}$ 值体现出了汾河水的同位素信号,且介于汾河水与流域浅层地下水同位素之间,而离岸较远处(500~800 m)的地下水 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 均值为 -10.37‰ 和 -75.5‰ ,与流域浅层地下水 $\delta^{18}\text{O}$ 同位素值接近。根据野外调查发现,湿地地下水平均埋深为105~115 cm,水力梯度较小,河岸边没有明显的水流运动。综合推断,旱季近岸带湿地地下水主要受汾河水渗入和流域浅层地下水共同补给,但随着远离汾河水体,湿地地下水受汾河地表水的影响减弱,主要受流域地下水补给(图6a)。此外,黄河水 $\delta^{18}\text{O}$ 与流域浅层地下水和湿地地下水 $\delta^{18}\text{O}$ 同位素之间均没有明显差异(<测试精度),但略富集重同位素,考虑到此时段为旱季,北方地区降雨较少,地面径流补给有限,这说明从大尺度来看,旱季黄河干流很可能主要接受湿地和汾河流域浅层地下水的基流补给,并受到蒸发分馏影响(图6a)。比较而言,汾河水同位素值最大,且明显比前期3—5月降雨同位素均值($\delta^{18}\text{O}$: -6.61‰ , δD : -37.8‰)偏负,说明汾河水除了接受大气降水补给,并兼有其他更贫化的水体补给,如流域地下水,计算结果显示,降水和流域浅层地下水对汾河水的补给贡献分别为28%和72%(表3)。

主汛期(7月)汾河水、黄河水、流域浅层地下水和湿地地下水的 $\delta^{18}\text{O}$ 、 δD 均值分别为 -9.83‰ 、 -68.7‰ 、 -10.02‰ 、 -69.3‰ 、 -9.05‰ 、 -66.0‰ 、 -9.95‰ 、 -69.3‰ ,各类水体的氢氧同位素值变化规律为:浅层地下水>汾河水>湿地地下水>黄河水。湿地地下水同位素介于黄河与汾河水同位素之间,但3种水体的同位素组

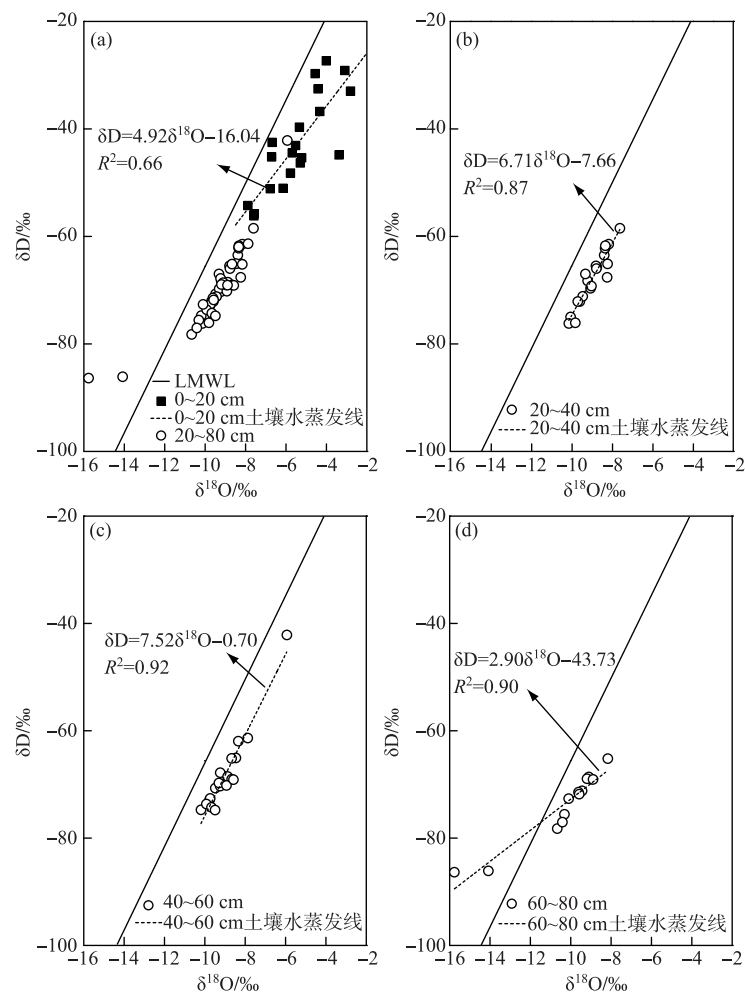


图 5 不同深度土壤水同位素组成及土壤水蒸发线

Fig.5 Stable isotopes of soil water at different depths and the associated soil water evaporation line

表 3 降雨、地下水和地表水转化关系及贡献比例 *

Tab.3 The transformation relationship among rainfall, groundwater and river water and the associated contribution rate

水源类型	贡献比例/%								
	旱季			主汛期			汛末期		
	据 $\delta^{18}\text{O}$ 算	据 δD 算	平均值	据 $\delta^{18}\text{O}$ 算	据 δD 算	平均值	据 $\delta^{18}\text{O}$ 算	据 δD 算	平均值
汾河				58	81	69±16			
降水	26	30	28±3	42	19	31±16	28	50	39±15
流域地下水	74	70	72±3				38	30	34±6
黄河							34	20	27±10

* 灰色表示目标水体或混合水体.

成不存在明显差异($\delta^{18}\text{O}$ 差值: $0.12\text{‰}\sim 0.19\text{‰}<0.5\text{‰}$; δD 差值: $0.6\text{‰}<2\text{‰}$),说明汛期地下水与地表水的水力联系非常密切,水量交换频繁,水体混合充分. 根据 2019—2020 年黄河龙门站和汾河河津站水位数据(黄河水情信息网 <http://www.yrcc.gov.cn/>)进一步发现,6—10 月黄河水位平均高出汾河水位约 7~9 m,说明主汛期黄河水整体向汾河排泄,同时侧向补给三角洲湿地地下水,湿地地下水向汾河径流(图 6b). 当然,在汾河洪水过程的影响下,近岸带湿地地下水与汾河水的水力交互作用更加强烈,湿地地下水位也受到汾河水补给而波动响应. 然而,此阶段流域浅层地下水同位素最为富集, $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 值介于雨季前期 6—7 月降水同位素均值(-7.97‰ 和 -54.6‰)与汾河水同位素之间,考虑到汛期汾河下游水位抬升,推断此阶段汾河水渗漏补给流域浅层地下水. 二端元同位素质量平衡模型计算结果显示,汾河水补给流域浅层地下水的比例约占 69%(表 3,图 6b).

汛末期(9 月)汾河水、黄河水、流域浅层地下水和湿地地下水的 $\delta^{18}\text{O}$ 、 δD 均值分别为 -8.07‰ 、 -59.9‰ 、 -9.89‰ 、 -69.1‰ 、 -9.03‰ 、 -66.9‰ 、 -9.53‰ 、 -71.6‰ ,各类水体 $\delta^{18}\text{O}$ 同位素值排序为:汾河水>浅层地下水>湿地地下水>黄河水, δD 同位素值排序为:汾河水>浅层地下水>黄河水>湿地地下水. 此阶段,湿地地下水 $\delta^{18}\text{O}$ 、 δD 与黄河水同位素值非常接近,两者不存在明显差异(\leq 测试精度),而且黄河龙门水位高于汾河河津水位 4~6 m,说明汛末期湿地地下水仍主要受黄河水侧向补给. 此外,汾河水氢和氧同位素介于 8—9 月降雨同位素(-6.75‰ 和 -39.7‰)与黄河、湿地和流域浅层地下水同位素之间,考虑到河岸带地下水位的波动具有不对称性,水位上升快,而下降期存在明显滞后性^[37],综合推断此阶段黄河和周边地下水均向汾河河道排泄. 三端元同位素质量平衡模型估算显示,各水体对汾河的补给贡献相差不大(表 3,图 6c).

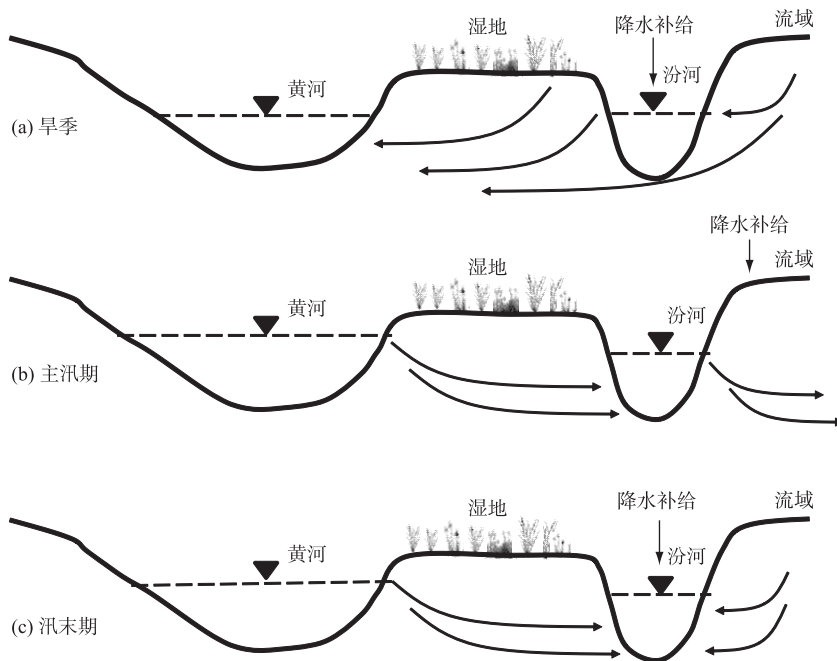


图 6 汾河入黄口湿地降水-地表水-地下水转化关系一般性示意图

Fig.6 Schematic diagram of the conversion relationship between rainfall, surface water and groundwater for different hydrological phases in the Fenhe River estuarine wetland

3 讨论与展望

汾河入黄口湿地水源众多,降雨、土壤水、地下水、地表水转化过程复杂. 考虑到研究区湿地地下水位埋深较浅,且相比重同位素富集的汾河地表水和土壤水,湿地地下水同位素反而贫化(表 2),并没有表现出明

显的富集信号. 因此可以认为,虽然沿着大气降雨→土壤水→湿地地下水的途径,降水通过土壤水入渗补给地下水的行为存在,但是水量转化较小. 这是因为地下水同位素分布于大气雨水线的左下方(同位素偏负,图2),水中保留了更多贫化同位素的信号,说明降雨对地下水的直接补给时段主要发生在雨季的集中降雨期间,旱季降雨量小,土壤质量含水量较低(0.18~0.35),加之湿地植被覆盖度大,降雨以补充包气带水分损失为主,土壤水难以下渗对地下水形成有效补给. 此外,结合土壤水同位素的剖面变化规律,推断雨后在蒸发作用下,土壤水分的传输路径仍以湿地地下水→土壤水→大气水为主. 同理,从各水体同位素均值(表2)来看,黄河水<湿地地下水<汾河流域地下水<汾河水,汾河水同位素最富集,而湿地地下水同位素明显贫化,这说明湿地地下水主要受黄河水、汾河水和流域地下水等多水源混合补给作用的影响,汾河水蒸发补给湿地地下水的影响范围和作用时段有限,这可能与不同水体间水力梯度和采样点空间位置的差异性有关.

受地形地貌、区域水文情势变化和空间位置的影响,汾河入黄口湿地地表—地下水的作用关系和强度表现出时段差异性和空间尺度异质性. 黄河出禹门口后,河床突然变宽,形成巨厚层的砂砾石冲积三角洲,汾河入黄口湿地位于冲洪积扇的下缘地带,这为湿地地下水的赋存提供了良好的条件. 由于汾河在天然地形上整体低于黄河河床^[33],大部分时期黄河地表水存在对汾河径流和三角洲湿地的侧向补给作用. 这与本文主汛期和汛末期的研究结果吻合,而且6—10月黄河龙门水位高于汾河水位约4~9 m,黄河流量(2200 m³/s)数十倍于汾河流量(35 m³/s)^[34-35],这导致黄河地表水对湿地地下水和汾河的作用关系进一步增强,黄河水大量侧向补给湿地地下水,地下水整体向东南方向径流,向汾河水不断转化. 有研究发现,在黄河的顶托、倒灌作用下,汛期汾河下游会出现“水位雍高”现象^[38]. 因此,主汛期的汾河水位高于流域浅层地下水位,进而渗漏补给浅层地下水. 随着汛末期洪水衰退,汾河水位降低,这无疑会加大汾河与两岸地下水之间的水头差,致使地下水向河排泄,而且整个雨季降雨对河水的直接补给增加,所以降雨、黄河水和流域地下水对汾河径流的补给贡献相差不大. 然而,旱季湿地地下水与地表水转化关系发生了明显改变,区域尺度上,湿地地下水主要接受汾河流域浅层地下水的补给,向西径流,并且不断向黄河地表水排泄转化. 这与以往研究结果一致,即从黄河中游尺度看,总体上旱季以流域地下水补给黄河水为主^[39]. 然而,在局部尺度上,补给关系表现出差异,汾河右岸近岸带的湿地地下水主要受汾河水补给影响. 运城水文水资源勘测局曾对研究区湿地地下水水质开展调查,评价结果显示,靠近汾河区一侧的地下水水质全部为Ⅴ类水,氨氮、矿化度、硫酸盐等超标区均主要集中于汾河沿岸,而在西部、北部等靠近黄河区域的地下水水质变好^[40]. 这也从侧面说明,汾河对湿地地下水的影响主要在近岸带,随着远离汾河,湿地地下水与河水之间的水量和物质交换作用减弱.

汾河流域地下水—湿地系统水源—黄河水是不可分割的一个整体,研究不同季节地表水—地下水转化关系对区域水资源开发利用和生态保护有重要的指导意义. 旱季,汾河流域浅层地下水的侧向排泄是湿地系统和黄河基流的主要补给水源,在汾河流域内实施退矿保水、关井压采,保护流域地下水资源,是维持入黄口湿地生态平衡以及黄河细水长流的重要保障. 而汛期黄河地表水对湿地系统和汾河存在明显的水量补给与转化,所以从水质保护的角度而言,加强汛期汾河下游水质的监管,对黄河中下游水环境保护有重要的意义. 有学者研究发现,黄河中游湿地生态系统的物种丰富度与均匀度主要受湿地地下水埋深与土壤含水量的影响^[41]. 结合本文研究结果,可以认为,北方地区干旱导致的黄河径流量显著减少^[42],以及人类活动导致的汾河流域浅层地下水补给的减少^[21],可能是2000年以来汾河入黄段自然湿地退化的根本原因. 黄河径流的减少,特别是汛期流量的减少,无疑会直接影响入黄口湿地生态系统的水源补给及其稳定性. 此外,汾河入黄口湿地地下水资源还是区域农灌和工业用水的重要水源^[33],考虑到黄河与湿地地下水的作用关系存在丰枯变化,可以在旱季3—5月加大傍河地下水开采,适当降低洲滩湿地地下水位,这一方面可以缓解旱季地表水资源的供水压力,另一方面腾出储水空间,更好地促进汛期黄河地表水向地下水的充分转化,从而实现黄河中游地表水—地下水资源联合开发利用. 综上,加强汾河流域生态保护和山区地下水的涵养工作,同时做好黄河径流保护,是保证入黄口湿地水资源补给、维护河流及湿地生态系统健康的关键.

4 结论

本文以黄河中游汾河入黄口湿地为研究区,基于氢氧稳定同位素技术,研究湿地系统地下水和土壤水

分的补给来源及其季节变化,揭示不同时期河口湿地降雨、地表水、地下水之间的转化关系,可为干旱半干旱地区湿地生态系统演变预测和水资源保护提供参考. 主要得出以下结论:

1) 不同水体同位素组成特征不同,降雨同位素组成存在明显季节变化,地下水同位素较为稳定,季节差异很小,不同水源 $\delta^{18}\text{O}$ 、 δD 均值总体表现为降水>土壤水>汾河水>汾河流域浅层地下水>黄河水,说明黄河地表水和流域地下水都对三角洲湿地及汾河有水源补给贡献.

2) 湿地土壤水同位素表现为随深度的增加而减小的规律,浅层 0~20 cm 土壤水主要受降雨入渗补给,并在蒸发作用的影响下重同位素富集;40 cm 及以下深层土壤水同位素差异不显著,主要受地下水毛细上升水的补给,毛细水上升高度约为 75 cm.

3) 湿地地下水受大气降雨直接补给较弱,主要集中于雨季. 地下水与地表水的转化关系存在时空差异,在靠近汾河的近岸区,旱季湿地地下水主要受汾河水补给影响,随着远离汾河,汾河的影响减弱,湿地地下水主要受汾河流域浅层地下水补给,并向黄河水地表水转化,而主汛期和汛末期,湿地地下水均主要受黄河水的侧向补给.

4) 汾河入黄段地表一地下水的转化关系存在季节变化,区域尺度上,旱季表现为汾河流域浅层地下水向汾河排泄,补给贡献占 72%;主汛期,黄河倒灌补给汾河,汾河水位雍高后进而渗漏补给流域浅层地下水;汛末期,黄河和地下水均向汾河河道侧向排泄.

5) 黄河水和汾河流域浅层地下水是汾河径流和河口湿地水分的主要补给来源,加强汾河流域山区地下水资源的涵养和黄河干流水量的保护,是维持黄河中游河流及湿地生态系统健康的重要保障.

本文重点依据氢氧同位素技术探求了汾河、黄河交汇区湿地的多水源转化关系,研究结果阐释了不同水文时期黄河中游湿地的水循环过程与路径,对汾河流域及黄河中游水资源开发利用和保护有重要的指导意义. 然而,湿地水源转化过程尤为复杂,本研究受监测条件和时空尺度的限制,还不能充分反映不同地形地貌区水源转化关系的空间差异性,以及刻画完整的年内、年际变化规律,未来工作将通过地下水位空间观测、水化学以及数值模拟等手段,系统揭示整个黄河中游沿黄湿地水循环变化特征及过程机理. 同时,本文目前仅将湿地系统作为一个整体,尚没有定量计算土壤水分的补给比例和下垫面不同植物的水分利用来源,后续研究将利用贝叶斯混合模型,研究湿地多水源转化关系及不同生态型植物种的生长用水规律,该研究对于诠释干旱半干旱地区的生态水文效应及其内涵具有切实的深远意义.

5 参考文献

- [1] Zhang GX, Yin XR, Feng XQ. Review of the issues related to wetland hydrology research. *Wetland Science*, 2008, **6**(2): 105-115. [章光新, 尹雄锐, 冯夏清. 湿地水文研究的若干热点问题. 湿地科学, 2008, **6**(2): 105-115.]
- [2] Liu JS. Wetland biogeochemistry research. *Wetland Science*, 2005, **3**(4): 302-309. [刘景双. 湿地生物地球化学研究. 湿地科学, 2005, **3**(4): 302-309.]
- [3] Fan W, Zhang GX, Li RR. Review of groundwater-surface water interactions in wetland. *Advances in Earth Science*, 2012, **27**(4): 413-423. [范伟, 章光新, 李然然. 湿地地表水——地下水交互作用的研究综述. 地球科学进展, 2012, **27**(4): 413-423.]
- [4] Wei JM, Cui LJ, Li W *et al.* Present status and perspectives of application of stable isotopes in wetland hydrology research. *Wetland Science & Management*, 2016, **12**(1): 62-65. [魏佳明, 崔丽娟, 李伟等. 稳定同位素在湿地水文研究中的应用现状与前景. 湿地科学与管理, 2016, **12**(1): 62-65.]
- [5] Nyarko BK, Essumang KD, Eghan MJ *et al.* Use of isotopes to study floodplain wetland and river flow interaction in the White Volta River basin, Ghana. *Isotopes in Environmental and Health Studies*, 2010, **46**(1): 91-106. DOI: 10.1080/10256010903388543.
- [6] Steinbruch F, Weise SM. Analysis of water stable isotopes fingerprinting to inform conservation management: Lake Urema Wetland System, Mozambique. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 2014, **72/73/74/75**: 13-23. DOI: 10.1016/j.pce.2014.09.007.
- [7] Chen JS, Peng J, Zhan LC *et al.* Analysis of isotopes characteristics of river water, lake water and groundwater in Poyang Lake Basin. *Water Resources Protection*, 2015, **31**(4): 1-7. [陈建生, 彭靖, 詹沪成等. 鄱阳湖流域河水、湖水及地下水同位素特征分析. 水资源保护, 2015, **31**(4): 1-7.]

- [8] Li J, Wu HW, Li YL *et al.* Variations of stable water isotopes from the channel connecting the Lake Poyang and the Yangtze River and their factors. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2020, **29**(1): 164-173. DOI:10.11870/cj-lyzyyhj202001015. [李静, 吴华武, 李云良等. 基于环境同位素的鄱阳湖与长江关系变化解析. 长江流域资源与环境, 2020, **29**(1): 164-173.]
- [9] Wang L, Zhang GX. Hydro-chemical interaction between surface water and groundwater in Zhalong wetland. *Wetland Science*, 2007, **5**(2): 166-173. [王磊, 章光新. 扎龙湿地地表水与浅层地下水的水文化学联系研究. 湿地科学, 2007, **5**(2): 166-173.]
- [10] Currell MJ, Dahlhaus P, Li H. Stable isotopes as indicators of water and salinity sources in a southeast Australian coastal wetland; Identifying relict marine water, and implications for future change. *Hydrogeology Journal*, 2015, **23**(2): 235-248. DOI:10.1007/s10040-014-1199-9.
- [11] Zhang B, Guo ZR, Gao AG *et al.* An analysis of the interaction between river water, groundwater and seawater in Minjiang river estuary region, Fujian Province, based on stable isotopes D and ^{18}O . *Acta Geoscientica Sinica*, 2013, **34**(2): 213-222. [章斌, 郭占荣, 高爱国等. 用氢氧稳定同位素揭示闽江河口区河水、地下水和海水的相互作用. 地球学报, 2013, **34**(2): 213-222.]
- [12] The Yellow River Hydrology Website. Xi Jinping: Remarks at the symposium on ecological protection and high-quality development of the Yellow River Basin. <http://www.hwsj.com.cn/news/show-172111.html>, 2019-10-15. [黄河水文网. 习近平:在黄河流域生态保护和高质量发展座谈会上的讲话.]
- [13] Dong PP, Xiu YJ, Zhang ZM *et al.* Conservation and high quality development of wetlands in the Yellow River basin. *Wetland Science*, 2020, **18**(3): 350-355. [董盼盼, 修玉娇, 张振明等. 黄河流域湿地保护与高质量发展. 湿地科学, 2020, **18**(3): 350-355.]
- [14] National Forestry and Grassland Administration website. Proposal on comprehensively strengthening the protection and management of wetlands in the Yellow River Basin. <http://www.forestry.gov.cn/main/4862/20191107/102004036323617.html>, 2019-11-07. [国家林业和草原局政府网. “关于全面加强黄河流域湿地保护管理的提案”复文, <http://www.forestry.gov.cn/main/4862/20191107/102004036323617.html>, 2019-11-07.]
- [15] Hong J, Lu XN, Wang LL. Quantitative analysis of the factors driving evolution in the Yellow River Delta Wetland in the past 40 years. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, **36**(4): 924-935. [洪佳, 卢晓宁, 王玲玲. 1973—2013年黄河三角洲湿地景观演变驱动力. 生态学报, 2016, **36**(4): 924-935.]
- [16] Wang P, Liu JT, Zhu JF *et al.* Water use strategy of *Tamarix chinensis* during a drought year in the coastal wetlands of the Yellow River Delta, China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2017, **28**(6): 1801-1807. DOI:10.13287/j.1001-9332.201706.018. [王平, 刘京涛, 朱金方等. 黄河三角洲海岸带湿地怪柳在干旱年份的水分利用策略. 应用生态学报, 2017, **28**(6): 1801-1807.]
- [17] Xie T, Liu XH, Sun T. The effects of groundwater table and flood irrigation strategies on soil water and salt dynamics and reed water use in the Yellow River Delta, China. *Ecological Modelling*, 2011, **222**(2): 241-252. DOI:10.1016/j.ecolmodel.2010.01.012.
- [18] Zhang ZD, Pan N, Liang C. Assessment of ecological vulnerability in the source region of the Yangtze and the Yellow River based on the Improved TOPSIS Model. *Yangtze River*, 2009, **40**(16): 81-84. [张振东, 潘妮, 梁川. 基于改进 TOPSIS 的长江黄河源区生态脆弱性评价. 人民长江, 2009, **40**(16): 81-84.]
- [19] Xarapat Ablat, Liu GH, Liu QS *et al.* Assessment of ecological vulnerability of the riverine wetlands in the upstream reach of the Yellow River based on RS and GIS technology. *Remote Sensing Technology and Application*, 2019, **34**(4): 874-885. [夏热帕提·阿不来提, 刘高焕, 刘庆生等. 基于遥感与 GIS 技术的黄河宁蒙河段洪泛湿地生态环境脆弱性定量评价. 遥感技术与应用, 2019, **34**(4): 874-885.]
- [20] Xarapat Ablat, Liu GH, Liu QS *et al.* Channel wetlands evolution analysis from Liujiaxia to Togtoh County of Inner Mongolia in the last three decades. *Journal of Geo-Information Science*, 2017, **19**(8): 1116-1131. [夏热帕提·阿不来提, 刘高焕, 刘庆生等. 近 30 年刘家峡以下黄河上游河道湿地演变规律与驱动力分析. 地球信息科学学报, 2017, **19**(8): 1116-1131.]
- [21] Wang RL, Lian Y, Wang XG *et al.* Study on the overall framework of water ecological protection and restoration of the Yellow River Basin. *Yellow River*, 2013, **35**(10): 107-110, 114. [王瑞玲, 连煜, 王新功等. 黄河流域水生态保护与修复总体框架研究. 人民黄河, 2013, **35**(10): 107-110, 114.]

- [22] Shangguan TL, Song BW, Zhu J *et al.* A study on the wetland resources of the mid-Yellow River and their sustainable utilization. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2005, **19**(1): 7-13. [上官铁梁, 宋伯为, 朱军等. 黄河中游湿地资源及可持续利用研究. 干旱区资源与环境, 2005, **19**(1): 7-13.]
- [23] Li S, Zhang J, Shangguan TL *et al.* Wetland plant taxonomic diversity in the middle reaches of the Yellow River. *Plant Science Journal*, 2015, **33**(6): 775-783. DOI:10.11913/PSJ.2095-0837.2015.60775. [李帅, 张婕, 上官铁梁等. 黄河中游湿地植物分类学多样性研究. 植物科学学报, 2015, **33**(6): 775-783.]
- [24] Guo DG, Shangguan TL, Bai ZK *et al.* Wetland landscape transition pattern of Lianbo Beach along the Middle Yellow River. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, **31**(18): 5192-5198. [郭东罡, 上官铁梁, 白中科等. 黄河中游连伯滩湿地景观格局变化. 生态学报, 2011, **31**(18): 5192-5198.]
- [25] He XH, Zheng DD, Guo HL *et al.* The vegetation species diversity and its response to the human activities in Zhengzhou Yellow River wetland reserve. *Wetland Science*, 2014, **12**(4): 459-463. [赫晓慧, 郑东东, 郭恒亮等. 郑州黄河湿地自然保护区植物物种多样性对人类活动的响应. 湿地科学, 2014, **12**(4): 459-463.]
- [26] He XH, Niu JX, Zheng DD *et al.* A study of vegetation coverage changes in Yellow River wetland of Zhengzhou city based on remote sensing. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2014, **34**(1): 334-337. [赫晓慧, 牛金星, 郑东东等. 基于遥感的郑州市黄河湿地植被覆盖度变化研究. 水土保持通报, 2014, **34**(1): 334-337.]
- [27] Rice KC, Hornberger GM. Comparison of hydro-chemical tracers to estimate source contributions to peak flow in a small, forested, headwater catchment. *Water Resources Research*, 1998, **34**(7): 1755-1766. DOI:10.1029/98wr00917.
- [28] Jia ZX, Zang HF, Zheng XQ *et al.* Research on characteristics of hydrogen and oxygen isotopes of precipitation in Taiyuan area. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2015, **26**(2): 22-25. [贾振兴, 臧红飞, 郑秀清等. 太原地区大气降雨的氢氧同位素特征研究. 水资源与水工程学报, 2015, **26**(2): 22-25.]
- [29] Zheng SH, Hou FG, Ni BL. Study on hydrogen and oxygen stable isotopes in precipitation in China. *Chinese Science Bulletin*, 1983, **28**(13): 801-806. [郑淑蕙, 侯发高, 倪葆龄. 我国大气降水的氢氧稳定同位素研究. 科学通报, 1983, **28**(13): 801-806.]
- [30] Cheng LP, Liu WZ. Characteristics of stable isotopes in soil water under several typical land use patterns on Loess Tableland. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2012, **23**(3): 651-658. DOI:10.13287/j.1001-9332.2012.0088. [程立平, 刘文兆. 黄土塬区几种典型土地利用类型的土壤水稳定同位素特征. 应用生态学报, 2012, **23**(3): 651-658.]
- [31] Zhai YZ, Wang JS, Teng YG *et al.* Variations of δD and $\delta^{18}O$ in water in Beijing and their implications for the local water cycle. *Resources Science*, 2011, **33**(1): 92-97. [翟远征, 王金生, 滕彦国等. 北京市不同水体中 D 和 ^{18}O 组成的变化及其区域水循环指示意义. 资源科学, 2011, **33**(1): 92-97.]
- [32] Meng YC, Liu GD. Effect of below-cloud secondary evaporation on the stable isotopes in precipitation over the Yangtze River basin. *Advances in Water Science*, 2010, **21**(3): 327-334. [孟玉川, 刘国东. 长江流域降水稳定同位素的云下二次蒸发效应. 水科学进展, 2010, **21**(3): 327-334.]
- [33] Li XL, Hao JQ, Wang YL. Discuss on three-type water transformation relations and patterns in the Huanghe River Basin. *Arid Land Geography*, 2010, **33**(4): 607-614. [李孝廉, 郝俊卿, 王雁林. 黄河流域三水转化关系及其模式探讨. 干旱区地理, 2010, **33**(4): 607-614.]
- [34] Li L. Analyzing groundwater regime and evaluating groundwater quality for Yumenkou alluvium fan water resources field. *Shanxi Hydrotechnics*, 2011, (2): 85-87. [李玲. 河津禹门口冲洪积扇水源地下水动态分析与水质评价. 山西水利科技, 2011, (2): 85-87.]
- [35] Wu R, Chen GF, Zhang JX. Changes of runoff and sediments in Hekou-Longmen section of the middle Yellow River. *Journal of Desert Research*, 2010, **30**(1): 210-216. [武荣, 陈高峰, 张建兴. 黄河中游河口龙门区间水沙变化特征分析. 中国沙漠, 2010, **30**(1): 210-216.]
- [36] Wang GQ, Zhang JY, He RM. Impacts of environmental change on runoff in Fenhe River basin of the middle Yellow River. *Advances in Water Science*, 2006, **17**(6): 853-858. [王国庆, 张建云, 贺瑞敏. 环境变化对黄河中游汾河径流情势的影响研究. 水科学进展, 2006, **17**(6): 853-858.]
- [37] Zhang ZY, Yu XY, Xin P. Impact of flood process on groundwater level fluctuation in a riparian zone. *Water Resources Protection*, 2017, **33**(2): 22-30. [张泽宇, 余夏杨, 辛沛. 洪水过程对河岸带地下水水位波动的影响. 水资源保护, 2017, **33**(2): 22-30.]
- [38] Nan YH. Probe into the lockup of Fen River's outlet into Yellow River. *Shanxi Water Resources*, 2009, **25**(3): 35-36, 40.

- [南阳红. 汾河入黄口顶托问题分析研究. 山西水利, 2009, **25**(3): 35-36, 40.]
- [39] Wang WK, Kong JL, Duan L *et al.* Study on transformation relationship between river water and groundwater in the Yellow River basin. *Science in China: Series E: Technological Sciences*, 2004, **34**(S1): 23-33. [王文科, 孔金玲, 段磊等. 黄河流域河水与地下水转化关系研究. 中国科学: E 辑: 技术科学, 2004, **34**(S1): 23-33.]
- [40] Lu LL. Water environmental quality assessment and protection countermeasures of groundwater in Fen River estuary. *Shanxi Water Resources*, 2015, **3**: 12-13. [卢莉莉. 汾河口地下水源地水环境质量评价及保护对策. 山西水利, 2015, **3**: 12-13.]
- [41] Jia HJ, Li S, Hao J *et al.* Study on the relationship between water factors and plant diversity of wetland in the middle reaches of the Yellow River (Longmen-Fenhe River into the Yellow River entrance). *Journal of Shanxi Agricultural Sciences*, 2017, **45**(8): 1325-1330. [贾蕙君, 李帅, 郝婧等. 黄河中游(龙门—汾河入黄口)水分因子与湿地植物多样性的相关关系研究. 山西农业科学, 2017, **45**(8): 1325-1330.]
- [42] Xia L, Song XY, Fu N *et al.* Impacts of precipitation variation and soil and water conservation measures on runoff and sediment yield in the Loess Plateau Gully Region, China. *Journal of Mountain Science*, 2017, **14**(10): 2028-2041. DOI:10.1007/s11629-016-4173-2.