

河水-地下水交换对河水来源组成的影响

丁兰芳, 张志远, 蒋小伟, 王旭升, 万 力

Impact of stream-groundwater interaction on stream water source composition: A case study of the Dosit River

DING Lanfang, ZHANG Zhiyuan, JIANG Xiaowei, WANG Xusheng, and WAN Li

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202401053>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

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

塔城盆地地下水“三氮”污染特征及成因

Distribution and source of nitrogen pollution in groundwater in the Tacheng Basin

吕晓立, 刘景涛, 周冰, 朱亮 水文地质工程地质. 2019, 46(2): 42-42

招远金矿区水体中硫同位素特征及其对污染来源的指示

Characteristics of sulfur isotope in water bodies near the Zhaoyuan gold mine area and its indicative function of pollution sources

贾晓岑, 周建伟, 朱恒华, 余露, 张秋霞, 朱越 水文地质工程地质. 2020, 47(5): 179-188

玛曲高原区潜水水化学和氢氧同位素特征

Hydrochemical and hydrogen and oxygen isotope characteristics of subsurface water in the Maqu Plateau

王振, 郭华明, 刘海燕, 赵威光, 刘帅, 王娇, 沈萌萌 水文地质工程地质. 2021, 48(1): 18-26

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

白洋淀湖岸带地表水与地下水垂向交换研究

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

李刚, 马佰衡, 周仰效, 赵凯, 尤冰, 李木子, 董会军, 李海涛 水文地质工程地质. 2021, 48(4): 48-54



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202401053

丁兰芳, 张志远, 蒋小伟, 等. 河水-地下水交换对河水来源组成的影响——以都思兔河为例 [J]. 水文地质工程地质, 2025, 52(1): 42-52.

DING Lanfang, ZHANG Zhiyuan, JIANG Xiaowei, et al. Impact of stream-groundwater interaction on stream water source composition: A case study of the Dosit River[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2025, 52(1): 42-52.

河水-地下水交换对河水来源组成的影响 ——以都思兔河为例

丁兰芳^{1,2}, 张志远^{1,2}, 蒋小伟^{1,2}, 王旭升², 万 力²

(1. 中国地质大学(北京)地下水循环与环境演化教育部重点实验室, 北京 100083;

2. 中国地质大学(北京)水资源与环境学院, 北京 100083)

摘要: 盈水河段和渗失河段交替出现是河水-地下水交换的常见形式, 以盈水河段所在位置为来源的河水来源组成研究是近年来河流水质研究的热点之一。然而, 干旱半干旱地区河水来源组成的演变特征规律尚不清晰。本研究以鄂尔多斯盆地都思兔河为例, 基于河水-地下水耦合数值模型, 分析了丰水年、平水年和枯水年 3 种年降水条件下都思兔河的河水-地下水交换特征及其对河流沿程河水来源组成的影响。结果表明: (1) 都思兔河整条河流以接收地下水排泄为主, 但河段尺度上的河水-地下水补排关系具有空间非均匀性, 渗失河段总长度占比不低于 40%; (2) 河道断面上河水的来源组成具有集中效应, 以下游苦水沟断面为例, 丰水年、平水年和枯水年 3 种降水情景下河流流量的 80% 分别来自于河流总长度的 12.3%、9.2%、18.6%; (3) 河流断面处河水来源组成的集中效应与断面流量具有良好的相关性, 流量越小, 河水来源的位置越集中。本研究首次探究了干旱半干旱地区河水的来源组成沿程变化规律, 强调了关键河段对维持河流流量的重要作用。研究结果可为干旱半干旱区水资源管理、河流污染防治提供参考。

关键词: 河流污染防治; 水文周转; 河水来源组成; 盈水河段; 渗失河段

中图分类号: P641.8

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2025)01-0042-11

Impact of stream-groundwater interaction on stream water source composition: A case study of the Dosit River

DING Lanfang^{1,2}, ZHANG Zhiyuan^{1,2}, JIANG Xiaowei^{1,2}, WANG Xusheng², WAN Li²

(1. Key Laboratory of Groundwater Circulation and Environmental Evolution of Ministry of Education, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China; 2. School of Water Resources and Environment, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China)

Abstract: The alternation of gaining and losing reaches is a common manifestation of stream-groundwater exchange, and studies on the stream water source composition where source means the location of gaining reaches have become one of the frontiers in stream water quality research. However, the characteristics of stream water source compositions in arid and semi-arid areas or at large watershed scales remain unclear. By taking the Dosit River in the Ordos Plateau as an example, this study built a coupled stream-groundwater numerical model and

收稿日期: 2024-01-14; 修订日期: 2024-03-19

投稿网址: www.swd zgcdz.com

基金项目: 国家自然科学基金项目(42172270; 42402251); 中央高校基本科研业务费项目(2-9-2021-005)

第一作者: 丁兰芳(1998—), 女, 硕士研究生, 主要从事河水-地下水交换研究。E-mail: dlfuse@163.com

通讯作者: 张志远(1990—), 男, 博士, 讲师, 主要从事水文地质研究工作。E-mail: zhiyuan.zhang@cugb.edu.cn

analyzed the characteristics of stream-groundwater exchange in the Dosit River under three annual precipitation scenarios as well as their impact on the stream water source composition along the river. The results show that the Dosit River predominantly receives groundwater discharge, but the stream-groundwater exchange patterns on reach scale are heterogeneous, with a percentage of losing reaches of more than 40%. There is a concentration effect on the stream water source composition, e.g., in the Kushuigou section, 80% of the stream discharge under the three precipitation scenarios originates from only 12.3%, 9.2%, and 18.6% of the total river length, respectively. The concentration effect of stream water source composition correlates well with stream discharge, with the location of stream water sources becoming more concentrated as discharge decreases. This study is the first to investigate the characteristics of stream water source compositions in arid and semi-arid regions, highlighting the crucial role of key reaches in maintaining stream discharge. These findings can provide guidance for the rational management of water resources and effective prevention of river pollution in arid and semi-arid regions.

Keywords: stream pollution prevention; hydrologic turnover; stream water source composition; gaining reach; losing reach

河水和地下水是流域水文循环系统的重要组成部分,二者的交换不仅影响着河流的流量变化,也对河流的水质演变和生态功能产生重要影响^[1-4]。随着农业面源污染问题日益突出,受污染的地下水逐渐成为地表水体污染的重要来源之一^[5-7],因此,量化地下水对河流水量和水质的贡献至关重要^[8-9]。近年来,一些学者基于地下水补给河水的位置研究河水的来源组成,为研究河流的水质演化机理提供了新的思路^[10-13]。

河水-地下水交换关系在流域尺度上通常表现为河流受地下水补给,但在河段尺度或河床尺度上,河水-地下水交换通常具有非均匀分布特征^[14-16]。为了探究流域内河水-地下水交换特征如何影响流域出口处水文信号的变化,Covino等^[10]首次将河网尺度上盈水河段与渗失河段的交替(或同时)出现这一过程命名为水文周转(hydrologic turnover),并以河水进入河床的位置为来源,讨论了水文周转对河流水量来源组成的影响。在其基础上,Mallard等^[11]探讨了流域结构和河网形态对河水来源组成的影响;Zhang等^[12]研究了流域出口处河流水量来源组成和溶质来源组成的差异;Jähkel等^[13]聚焦不同地貌,探讨了上游森林地貌和下游农业地貌条件下水文周转特征的异同。然而,当前国内在水文周转与河水来源组成方面的研究仍属空白,干旱半干旱地区和大流域尺度上的河水来源组成研究尚未见报道。

都思兔河流域位于我国鄂尔多斯盆地西北部,面积约为 $1.1 \times 10^4 \text{ km}^2$ ^[17],流域内都思兔河的径流量从上游至下游具有先增大后减小的特点^[18],是研究干旱半

干旱地区河流水文周转过程的理想区域。本研究根据都思兔河流域的实际水文及水文地质条件,建立河水-地下水耦合数值模型,探究干旱半干旱地区河水-地下水交换的空间分布特征及其影响因素,从河段角度揭示河水的主要来源组成及其对年降水量变化的响应规律,为干旱半干旱地区的河流污染防治提供理论依据。

1 研究区概况

研究区位于鄂尔多斯盆地中西部都思兔河流域,东部为四十里梁分水岭,南部为哈达图分水岭,北部为新召分水岭,西部为桌子山断裂带(图1)。研究区多年平均降水量为275 mm,多年平均蒸发量为2465 mm^[17-18]。在勘探深度内,地层从老至新依次为:侏罗系安定组,白垩系洛河组、环河组、罗汉洞组,第四系^[19]。其中白垩系环河组和洛河组地层是研究区主要的含水层,岩性为砂岩,总厚度为800~900 m(图2);第四系分布较广,但厚度较薄且不均匀,约1 m^[20]。都思兔河为研究区的主要河流,也是黄河的一级支流,发源于鄂托克旗察汗淖尔,自东向西流动,最终在乌海市巴音陶亥镇南侧汇入黄河,全长约166 km。为方便研究,前人一般将布隆湖水库作为都思兔河上下游的分界点^[21-24]。河流上游修建了多座水库,自上而下主要有包乐浩晓水库、赛乌素水库、布隆湖水库等;下游在鄂尔多斯市和乌海市交界附近建有一个小型水文站——苦水沟水文站,用以监测流量、水位、水质等指标。监测数据显示,苦水沟水文站的断面水质主要为Ⅲ类到劣Ⅴ类,并不满足水质管理目标^[25-28]。因

此,研究都思兔河河水的水质变化机理具有重要的理论价值与现实意义。地下水是都思兔河流域水资源的重要赋存形式,也是河水和水库储水的重要来源。

研究区潜水面高程、地下水埋深与地形高程之间存在良好的相关性,在河谷附近,地下水埋深不到 3 m^[19];但在分水岭附近,地下水埋深可达上百米。

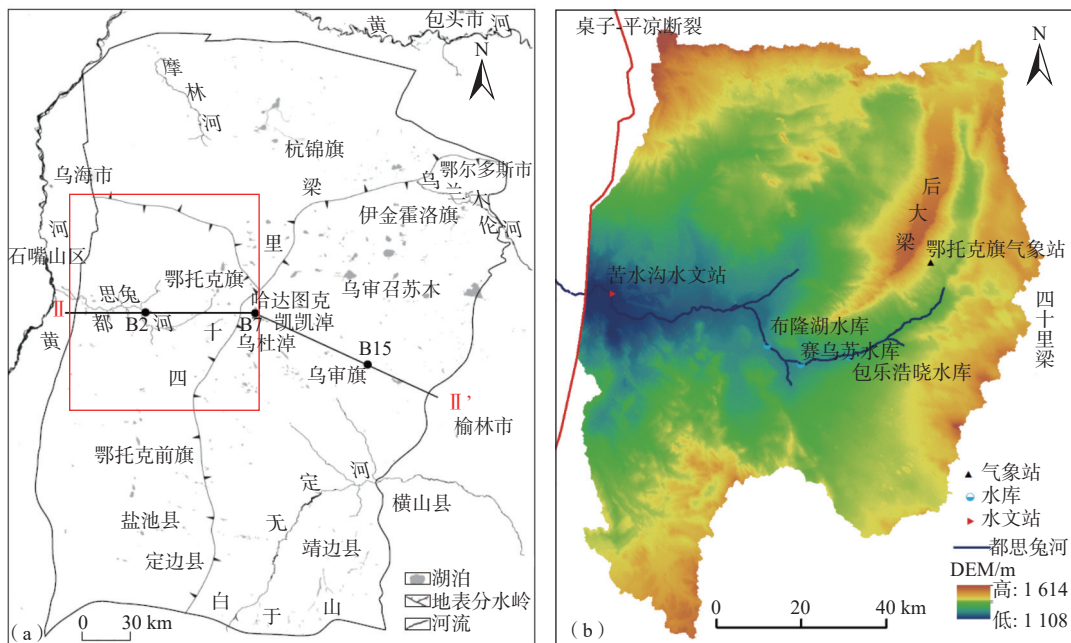


图 1 研究区位置及地形 (据文献 [21] 修改)

Fig. 1 Location and topography of the study area (modified after Ref. [21])

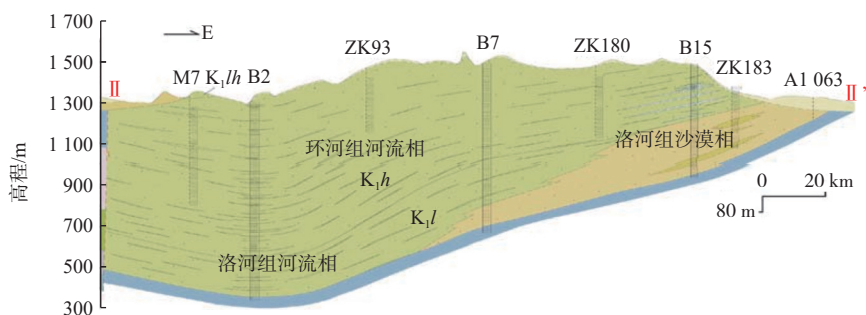


图 2 II 号剖面地层岩相分布图 (据文献 [20] 修改)

Fig. 2 Stratum and lithofacies in profile II-II' (modified after Ref. [20])

2 河水-地下水耦合模拟

2.1 水文地质概念模型

根据当地水文地质条件,将研究区四周的分水岭或断层概化为隔水边界;将地表概化为通量边界;将白垩系底板概化为隔水边界;河流上游 3 座水库概化为定水头边界,水头值参照水库正常蓄水位设置,其中包乐浩晓水库为 1 246.58 m,赛乌素水库为 1 215.94 m,布隆湖水库为 1 199.80 m。模型东西宽约 100 km,南北长约 144 km,垂向厚度约 1 000 m。

参考研究区地层条件和前人研究^[17],在垂向上将

模型概化为 2 个含水岩组,其中环河组及以上地层为第一含水岩组,洛河组为第二含水岩组。地表高程采用 DEM 90 m 分辨率数字高程产品。环河组和洛河组底板数据采用《鄂尔多斯盆地地下水勘查》项目成果。降水量参照鄂托克旗气象站 2005—2022 年降水数据设置,降水入渗系数、含水层渗透系数和蒸发相关参数参照前人研究设置,具体见表 1。

2.2 河水-地下水流数值模型

本研究采用地下水数值模拟软件 GMS 中的 MODFLOW 构建流域地下水流模型。为了兼顾地下水循环特征和模型计算量,参考前人研究^[17],将网格剖分的

表 1 模型参数设置

Table 1 Model parameter settings

参数	取值
年均降水量/mm	131(枯水年情景)
	275(平水年情景)
	468(丰水年情景)
降水入渗系数	0.25
水面蒸发量/(mm·a ⁻¹)	1 171.3 ^[17]
蒸发极限埋深/m	2.8 ^[17]
环河组水平渗透系数/(m·d ⁻¹)	0.55 ^[29]
洛河组水平渗透系数/(m·d ⁻¹)	0.45 ^[29]
垂向各向异性比	100 ^[17]
水平各向异性比	1

水平间距设置为 500 m。垂向分层方面,鉴于第一含水岩组较厚(平均深度约为 700 m),而当前搜集到的大多数观测孔(91 口,占比 88%)深度不到 70 m,故将模型上部的第一含水岩组均分为 10 层,第二含水岩组均分为 5 层。尽管这一处理可能导致网格的水平尺寸与垂向尺寸比例约为 7:1,但经过验证,观测孔拟合效果(决定系数为 0.997)略优于两层模拟结果(决定系数为 0.969)。

模型处理方面,采用 RCH 程序包处理降水, EVT 程序包处理蒸发,使用 SFR2 程序包模拟都思兔河干流,使用 Drain 程序包处理支流。SFR2 程序包可以兼顾河流流向与流量变化,基于曼宁公式计算河流水深,基于达西公式计算河水-地下水交换量^[29-30]。基于野外调查获得的河流部分断面处的河流宽度、河床高程、河床渗透系数、河床厚度等参数,将都思兔河划分为 16 个区段。每个区段与多个模型网格相交,每个网格内的交线即视为一个河段,每个河段上的河水-地下水交换量可直接由 SFR2 模块导出。鉴于都思兔河支流年均流量较小且河水主要来源于地下水补给,为简化模型计算,本研究参考前人设置忽略其对干流流量的影响^[17],将其设置为 Drain 边界,其中排泄基准面为地表高程,导水系数为 10⁵ m²/d。

2.3 河水来源组成计算

河床是地下水的水分和溶质组分进入河流的必经之路,为了研究河流中溶质的来源位置,本研究参照前人研究^[10-12],将河水来源位置定义为水分通过河床进入河道的位置,典型断面处河水的来源组成即为该断面上游所有河段对该断面处流量的贡献组成。为方便描述,参照余钟波等^[31],将接收地下水补给的河段称为盈水河段,对应的流量增加量称为盈水量;将河水补给地下水的河段称为渗失河段,对应的流量

减少量称为渗失量。

沿河流流向,任一河流断面上的河水均来自于该断面上游的盈水河段。例如对于任一河段 i ,其河水来源组成为河段 1 至河段 i 之间所有盈水河段的盈水量贡献于河段 i 中的水量之和:

$$Q_i = \sum_{j=1}^i Q_{i,j} \quad (1)$$

式中: $Q_{i,j}$ ——河段 i 的末端水量中来自河段 j 的部分水量,即河段 j 上的盈水量最终保留在河段 i 的部分/(L·s⁻¹)。

$$Q_{i,j} = \begin{cases} 0 & Q_{j,\text{gain}} \leq 0 \\ Q_{j,\text{gain}} \times \prod_{k=j}^i R_k & Q_{j,\text{gain}} > 0, j = 1, 2, \dots, i \end{cases} \quad (2)$$

式中: $Q_{j,\text{gain}}$ ——河段 j 上的盈水量/(L·s⁻¹)。

若 $Q_{j,\text{gain}} > 0$,河段为盈水河段;若 $Q_{j,\text{gain}} < 0$,河段为渗失河段。在河段 k 中,起点处的水分在终点处河水中所占的比例(R_k):

$$R_k = \begin{cases} 1 & Q_{k,\text{gain}} \geq 0 \\ \frac{Q_k}{Q_{k-1}} & Q_{k,\text{gain}} < 0 \end{cases} \quad (3)$$

式中: Q_k 、 Q_{k-1} ——河段 k 、上游相邻河段 $k-1$ 末端处的流量/(L·s⁻¹);

$Q_{k,\text{gain}}$ ——河段 k 获得地下水补给的量/(L·s⁻¹),正值代表盈水量,负值代表渗失量。

2.4 情景设置及模型验证

本文旨在探究干旱半干旱地区的河水-地下水交换对河水来源组成的影响机理,模型的关键在于提供一个相对合理的、具有代表性的河水-地下水交换关系,因此本文首先基于多年平均降水量(275 mm)构建了一个稳定流模型并将其设置为基准情景。此外,为了探究降水量变化的影响,本文参考鄂托克旗气象站 2005—2022 年的气象监测数据,基于年降水量最小值(131 mm)和最大值(468 mm)分别设置了另外 2 种情景。为了避免其他参数的影响,3 种模型除了降水量之外的参数全都一致,因此本文只对基准情景进行了验证,另外 2 种情景不做验证。

由于研究区的地下水位动态观测资料十分有限,大多为地下水位统测资料,而统测多在水位较低的 7 月份开展,因此本文选择年降水量略大于多年平均降水量的 2012 年(318 mm)对应的地下水位统测数据作为校准数据,假设其大致反映了多年平均条件下的地下水位分布。通过对比河流附近 103 口观测井的数

据,发现计算水头与观测水头基本一致(图 3),其中计算水头与观测水头差值为 0.5 m 之内的观测井占 14.7%,差值为 0.5~1.0 m 的观测井占 11.8%,差值为 1.0~2.0 m 的观测井占 26.5%,差值为 2.0~3.0 m 的观测井占 20.6%,差值大于 3 m 的观测井占 26.4%。此外,上游 3 个水库出口处的模拟流量也与现场实测值(2023 年 5 月)较为接近,差值均在 0.1 m³/s 以内。因此,认为当前的模型较为合理地反映了都思兔河流域多年平均降水条件下的河水-地下水交换特征。

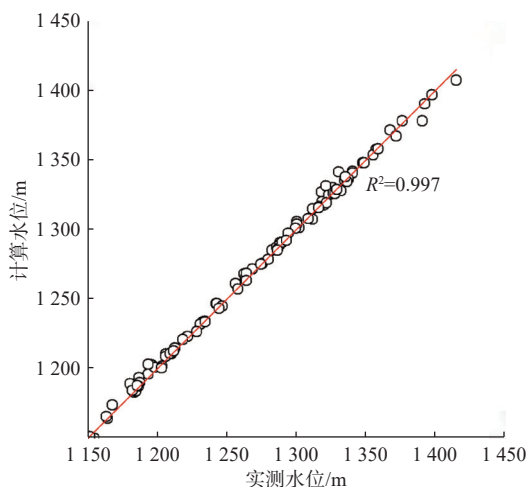


图 3 观测井中观测水头与计算水头的比较

Fig. 3 Relationship between the observation water levels and the computed hydraulic head

需要注意的是,由于河水-地下水交换的影响因素众多而研究区资料有限,本研究采取了一些假设以简化建模过程,例如采用稳定流模拟、忽略抽水、灌溉等人类活动的影响、忽略包气带的影响等,导致模型结果可能存在不确定性。但就本研究的目标“揭示干旱半干旱地区的河水-地下水交换对河水来源组成的影响机理和降水量的影响规律”而言,当前的模型是合理且有参考价值的。

3 结果

3.1 基准情况下的河流水文周转特征

3.1.1 河水-地下水交换量的沿程分布特征

基准情况下(降水量 $P=275$ mm/a)都思兔河干流水与地下水交换量的沿程分布情况见图 4(a)。由图可知,沿都思兔河流向盈水河段与渗失河段交替分布,河水-地下水交换量呈现明显的非均匀分布特征,河道渗失量变化范围为 0~11.8 L/s,河道盈水量变化范围为 0~14.9 L/s。研究区内都思兔河盈水河段总长度为 69.8 km(长度占比约 56.3%),河道盈水量总计 951.4 L/s;渗失河段总长度为 54.1 km,河道渗失量总计 866.4 L/s;都思兔河流量净增量为 85 L/s。若以布隆湖断面为上下游的分界,上游总长 47.9 km,以盈水河段为主(长度占比约 71.3%),其中盈水量总计 604.4 L/s,渗失量总计 520.9 L/s,河道流量净增量 83.5 L/s;下游总长 76.1 km,

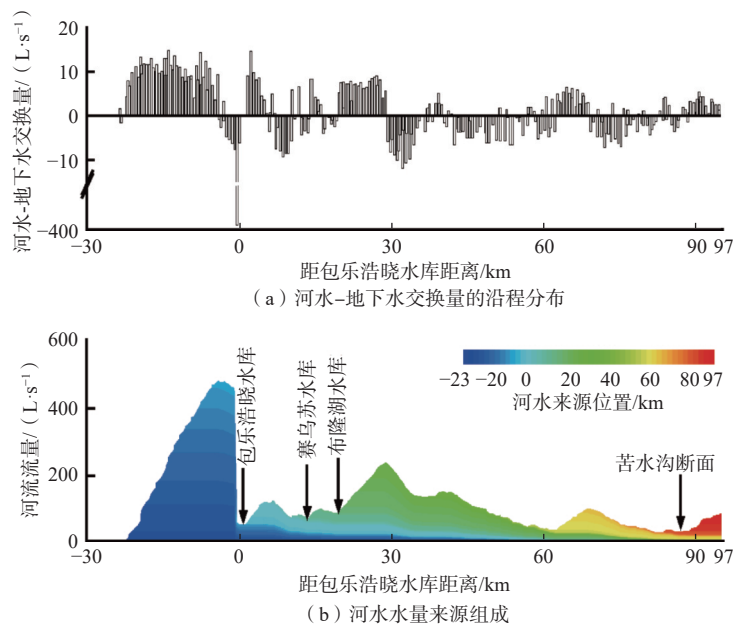


图 4 河水-地下水交换量的沿程分布及河水水量来源组成

Fig. 4 Magnitude of water flux from groundwater to stream and source composition of stream discharge along the Dosit River

注: (a)图中正值代表河段盈水量,即地下水补给河水量;负值代表河段渗失量,即河水补给地下水量。

以渗失河段为主(长度占比约 53.1%),但总盈水量与总渗失量基本相当,其中盈水量总计 347.0 L/s,渗失量总计 345.5 L/s,河道流量净增量为 1.5 L/s。

需要注意的是,河流在水库附近流量显著减小,尤其是包乐浩晓水库上游 1.0 km 处河道渗失量可达 398.9 L/s。但实际上此处流量损失并非是河道渗漏引起的,而是受水库的蓄水作用控制,因此严格意义上并不能称为渗失河段。但考虑到这部分河段长度有限,而其他水库出口的流量变化量又较小,因此,本研究忽略水库所在位置处引起的统计误差。此外,鉴于都思兔河上游容易发生干涸导致河流起点位置不定,而下游苦水沟水文站所在断面为本研究的典型断面,为了便于对比,将包乐浩晓水库溢洪道出水断面处设为 0 km,后文将仅展示包乐浩晓水库至苦水沟断面(86.16 km)之间的河水-地下水交换过程。

3.1.2 河水来源组成的沿程变化特征

基准情况下,河水来源组成的沿程变化见图 4(b),其中轮廓线反映了河流流量的沿程变化。由图可知,自上游至下游,河流流量整体上先升高后降低,其中在包乐浩晓水库上游附近(-3.1 km)达到最大(482.2 L/s),在苦水沟断面上游附近(81.8 km)降至最小(25.5 L/s)。由于水库的拦截作用,都思兔河 3 个水库溢洪道附近均出现流量下降的趋势;但是在水库上游均出现流量增大的趋势,表明存在地下水补给河流。自布隆湖水水库向下游,河流流量逐渐增大,于包乐浩晓水库下游约 30 km 处达到局部最大值(238.7 L/s),后逐渐减小,于包乐浩晓水库下游 62 km 处达到局部最小值(33.2 L/s);而后再次经历增大—减小—增大的变化,分别在 68.5,

86.9, 95.1 km 处达到 98.5, 27.0, 85.0 L/s。

沿河流流向,由于河水-地下水交换,河水的来源组成也在不断发生变化。在河流上游,河水的来源组成相对简单,来源较为集中。但由于包乐浩晓水库拦截,河道流量急剧下降,由水库上游的 482.2 L/s 骤减至 49.7 L/s。随着包乐浩晓水库至赛乌素水库之间地下水向河道的再次补给,河水的流量逐渐增大,但由于地下水的来源河段不同,河水的来源组成逐渐变得复杂。如图 4(b)所示,以包乐浩晓水库上游河段盈水量为例(图 4b 所示的蓝色色带),其在河水中的含量及其相对比例沿河流流向逐渐降低,至模型中河流的出口处时保留量几乎为零。

3.1.3 典型断面处的河水来源组成特征

为了进一步探究河道断面上河水的来源组成特征,本研究以都思兔河的鄂尔多斯市出境控制断面——苦水沟水文站断面为例进一步开展分析。苦水沟上游各盈水河段的地下水流入量对苦水沟流量的贡献见图 5,基准情景下水量来源主要位于断面上游 20 km 范围内。部分河段(如包乐浩晓水库下游 2.3 km 附近)虽然具有较高的河水-地下水交换量(15 L/s),但仅有少量(0.04 L/s)水分抵达苦水沟断面(图 5a)。

由于 SFR2 模块中河段的长度取决于模型单元格与河流的交集,因此图 5(a)中各个河段的长度并不相同。为了进一步确认苦水沟断面流量的主要来源位置,基于各盈水河段盈水量在苦水沟断面处的保留量与盈水河段长度的比值,绘制了各盈水河段对应的单位长度贡献量,如图 5(b)所示。基于该比值自大至小重新排序,发现苦水沟断面处约 93% 的流量仅来自于

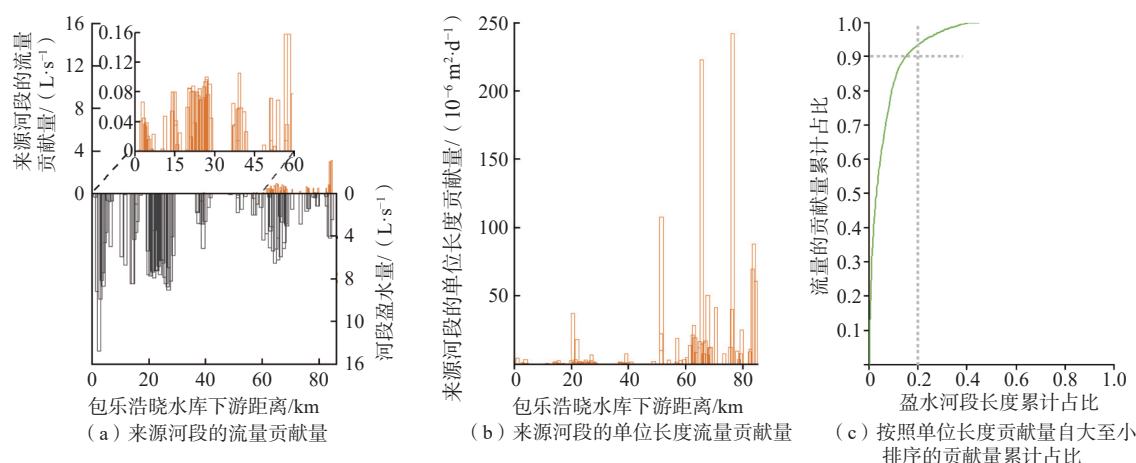


图 5 苦水沟断面处河道相关流量及来源贡献占比

Fig. 5 Proportion of stream related flux and source contribution at Kushuigou Section

注: (a)图中同时绘制了各盈水河段上的河水-地下水交换量以作参考。

长度占比为河流总长 20% 的河段(图 5c)。

3.2 降水量对河流水文周转特征的影响

3.2.1 对河水-地下水交换的影响

3 种不同降水情景的模拟结果表明, 河水-地下水的交换量与降水量的关系较为复杂: 整个河流尺度上, 总盈水量和渗失量均随降水量增大而增大, 但盈水量增幅大于渗失量; 在局部河段尺度上, 随降水量增大, 河水-地下水交换量可能增大, 也可能减小。例如,

随年降水量从 131 mm 增大到 468 mm, 整个河流尺度上的总盈水量由 790.6 L/s 升至 1 053.9 L/s、总渗漏量由 701.3 L/s 升至 900.3 L/s; 局部河段尺度上, 27.6 km 处河段盈水量由 6.9 L/s 增大至 9.4 L/s, 21 km 处河段盈水量由 7.3 L/s 减小至 7.1 L/s, 18.6 km 处河段渗漏量由 1.8 L/s 增大至 3.0 L/s, 30.9 km 处河道渗漏量由 10.6 L/s 减小至 9.3 L/s(图 6)。

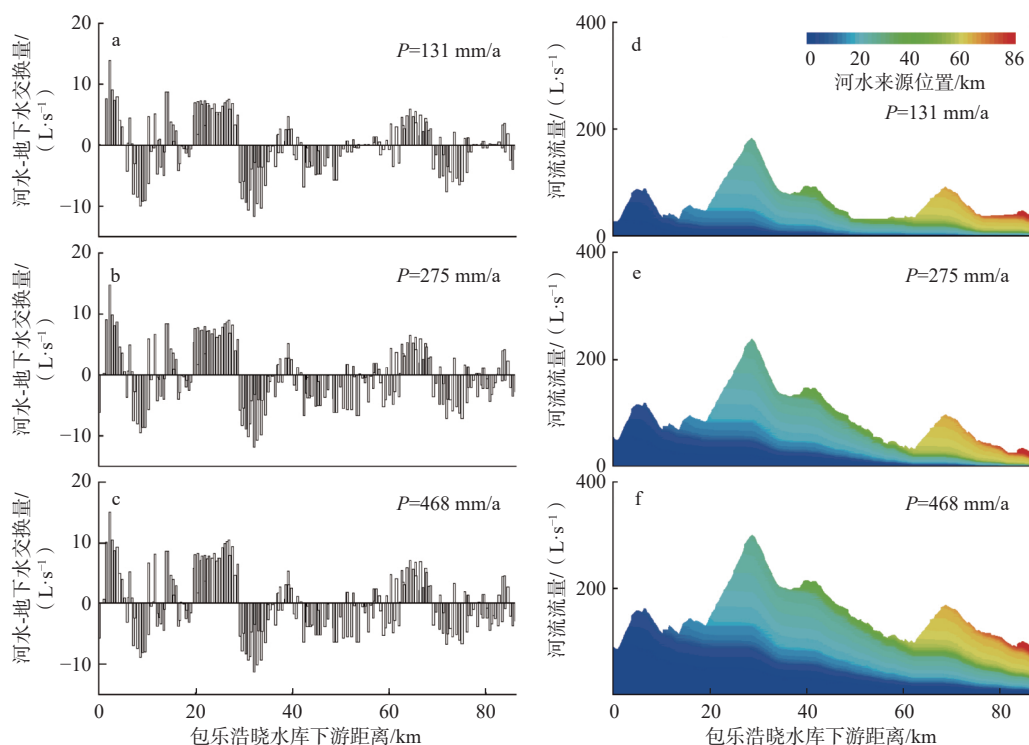


图 6 不同年降水量情景下河水-地下水交换量的空间分布和河水的来源组成演化

Fig. 6 Magnitude of water flux from groundwater to stream and source composition of stream discharge along the Dosit River under different scenarios

注: 河水-地下水交换量中, 正值代表河段盈水量, 负值代表河段渗失量。

无论降水量如何变化, 研究区的河水-地下水交换关系始终以盈水条件为主, 盈水河段长度总占比始终在 55% 以上, 河道的总盈水量始终大于总渗漏量, 表明都思兔河为地下水补给型河流。但具体分段上, 河流上游始终以盈水河段为主(3 种情景下, 随年降水量增大盈水河段占比分别为 73.0%、71.3%、71.5%), 河流下游主要以渗失河段为主(3 种情景下, 随年降水量增大, 渗失河段占比分别为 43.6%、53.1%、54.7%)。

3.2.2 对河水来源组成的影响

由于河水-地下水的交换量决定了河水的来源组成, 年降水量的改变也将导致河水的径流量及其来源组成的改变。包乐浩晓水库至苦水沟断面之间河流

流量的变化及其对于降水量的响应见图 7。年降水量由 131 mm 上升到 468 mm 时, 河流流量整体增大, 例

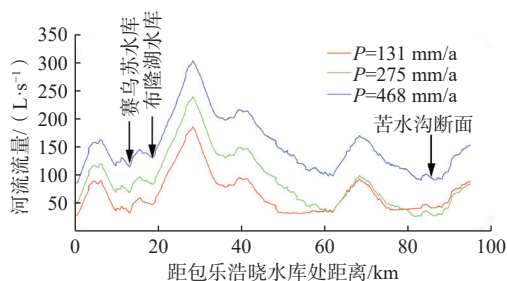


图 7 河流流量沿程变化图

Fig. 7 Change in river discharge moving downstream under different precipitation scenarios

如包乐浩晓水库出水口(0 km)流量由 27.7 L/s 升至 85.8 L/s, 苦水沟断面处流量由 89.3 L/s 升至 153.6 L/s, 河流中最大流量由 184.9 L/s 升至 302.3 L/s。但值得注意的是, 河道断面流量与降水量并不总呈现正相关。以包乐浩晓水库下游 60 km 至苦水沟断面为例, 年降水量从 275 mm 降至 131 mm, 60~80 km 之间的流量几乎不变, 而 80 km 至苦水沟断面之间反而出现了径流量增大的情况。

包乐浩晓水库至苦水沟断面之间河水的来源组成沿程变化及其对降水量的响应, 见图 6(d)~(f)。尽管随年降水量增大, 河段总盈水量和河段总渗失量都出现增大的趋势, 但上游盈水河段来源的地下水在下游河水中的贡献量明显增大。例如以 2.3 km 处的流量为例, 随年降水量由 131 mm 上升到 468 mm, 其在 20, 40, 60, 80 km 4 个断面处的保留量由 1.53, 0.62,

0.17, 0.05 L/s 依次变为 5.60, 3.58, 1.49, 0.77 L/s, 对应地在 4 个断面处流量中的相对占比由 2.31%、0.66%、0.49%、0.12% 依次变为 3.67%、1.67%、1.48%、0.71%。

3.2.3 对典型断面处河水来源组成的影响

对于都思兔河流域下游苦水沟断面处的河水来源组成而言, 当年降水量从 275 mm 减小至 131 mm 时, 贡献量最高的前 20% 长度的河段提供的流量占比由 93% 下降至 89%; 当年降水量升高至 468 mm 时, 这一比例下降至约 83%(图 8a)。这表明无论年降水量如何变化, 苦水沟断面处 80% 的基流量都来自于长度占比不到 20% 的河段。这一现象与前人在湿润半湿润地区的研究结论基本一致^[12]。然而, 不同的是, 前人研究发现集中补给现象随降水量增大而减弱, 而本研究中平水年条件下苦水沟断面的水量来源最为集中, 随年降水量增大或减小, 集中补给现象均有减弱(图 8a)。

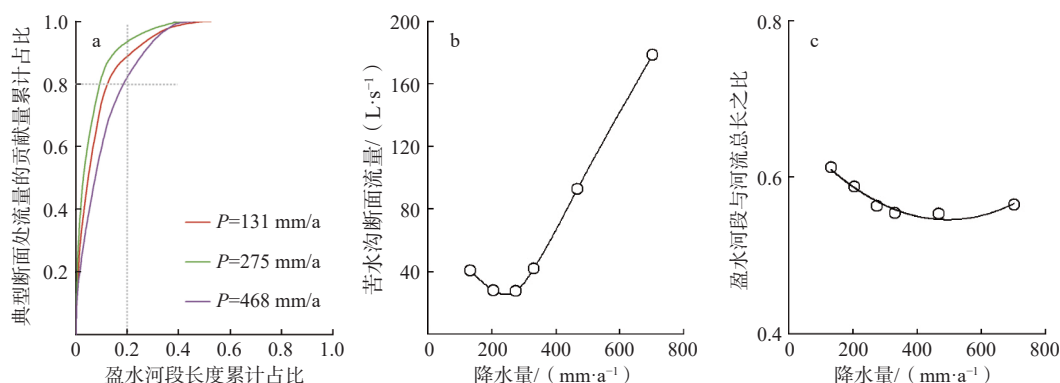


图 8 典型断面流量贡献、盈水河段比例、降水量之间的关系

Fig. 8 Relationship between flux contribution of typical section, proportion of gaining reaches, and precipitation

进一步分析表明, 当年降水量从 131 mm 升高至 275 mm 时, 苦水沟断面处的流量和整条河流中盈水河段的占比都降低; 当降水量从 275 mm/a 增大至 468 mm/a 时, 苦水沟断面处的流量增大而盈水河段长度占比几乎不变。这表明集中补给效应与降水量大小和盈水河段长度占比关系不大, 而与断面处流量具有较好的相关性(图 8)。综上所述, 河流断面处的流量越小, 其来源组成中的集中补给效应越明显。

4 讨论

4.1 干旱半干旱地区河流中的水文周转

与资金周转的概念类似, 水文周转反映了河流中水分的流入与流出过程, 表现为盈水河段和渗失河段交替出现。这一过程不仅决定了河流流量变化, 也直接控制着河流水质的沿程变化特征。由于这一概念

最初基于天然流域的河水-地下水交换研究提出, 并未考虑河网系统内降水、蒸发、人工调水等因素的直接影响, 因此一般用于描述河水-地下水交换引起的水分交换^[10]。然而, 相比于传统的河水-地下水交换研究, 水文周转研究更加关注河道内部河水与地下水补排关系的转变及其影响。

由于湿润半湿润地区降水充沛, 河水与地下水交换频繁, 河道中的水文周转现象被广泛报道^[10-13]。相比之下, 干旱半干旱地区降水稀少、蒸发强烈, 地下水通常被认为是河水的主要来源^[23-25]。尽管在一些高海拔地区, 由于冰雪融水补给河道, 脱节型河流和河水渗漏现象也常有发生^[32], 胡汝骥等^[33]认为地表水与地下水的多次转化是我国西北干旱区内陆盆地水资源循环的基本方式, 但前人研究大多仅关注单一的河水-地下水补排关系, 对于干旱半干旱地区水文周转过

程及其影响研究尚不多见。本研究以鄂尔多斯高原西北部都思兔河为例,发现在年降水量为 131, 275, 468 mm 3 种情景下,流域河道内均普遍存在水文周转现象,且渗失河段的长度占比至少为 38%。

由于河水-地下水补排关系的影响因素众多,降水量并非河水-地下水补排关系的决定性因素,因此,即便在干旱半干旱地区,盈水河段与渗失河段交替出现的水文周转现象依然普遍存在,水文周转对河流流量和水质的影响有必要深入研究。

4.2 河水来源的集中补给特征

对于河水来源而言,盈水河段所在位置是地下水进入河流的必经之路,渗失河段上虽无地下水流入但会削减上游来水在河道中的保留量,因此分析河水-地下水交换量有助于识别河流典型断面处河水水量或溶质的主要来源。由于河流普遍具有水文周转特征,来自各盈水河段的水分在沿程运动中遇到渗失河段后水量减少但相对占比不变,遇到盈水河段后水量不变但相对占比降低,最终导致上游来水在河水中的水量和相对占比沿程逐渐减低(图 5、图 6)。

除了河水-地下水补排关系具有空间差异性之外,图 5—6 也表明河水-地下水交换量具有空间差异性,这与前人在河段尺度上的研究结论是一致的^[14-15]。当河水-地下水补排关系固定时,对于盈水河段而言,河段内的地下水流入量越大,对下游监测断面的流量贡献越大,反之亦然;对于渗失河段而言,河段内的河水渗漏量越大,对上游盈水河段地下水流入量的削弱作用越强,上游盈水河段来水对河流监测断面处的流量贡献越小。

综上所述,河流典型断面处的河水来源组成取决于其上游所有河段的河水-地下水补排关系及河水-地下水交换量。由于河水-地下水补排关系和交换量普遍具有空间差异性,河流断面的河水来源组成普遍具有集中补给特征。例如,在本研究 3 种降水量情景下、苦水沟断面处上游长度占比约 20% 的盈水河段为苦水沟断面贡献了 80%~90% 的流量,这与前人在湿润半湿润地区研究发现的“二八现象”基本一致^[12]。

4.3 降水量对河流断面河水来源集中补给效应的影响

降水作为河水和地下水的根本来源,对河流水位和地下水位有直接的控制作用,因此,降水量变化是驱动河水-地下水交换动态变化的重要因素^[25-26]。前人研究发现,随降水量减少,流域出口处河水来源组成中的集中补给效应增加^[12]。然而,本研究通过模拟发现,随降水量减小,集中补给效应先增大后减小,表

明降水量与典型断面河水来源的集中补给效应并非直接相关。

进一步分析发现,前人研究中随降水量减小,流域出口断面流量相应减小,二者之间有较好的一致性;但在本研究中,苦水沟断面的流量随降水量减小,呈现处先减小后增大的特征。究其原因,随降水量减小,河水和地下水位都在减小,但二者的减小幅度却并不一定同步,导致不同河段尺度上的河水-地下水交换量变化趋势并不一致。例如,图 7 中 80 km 至苦水沟断面之间的河段在平水年情景下,相比于枯水年情景流量下降更快,表明此时河水与地下水位之间的水位差较大。

尽管本研究发现降水量与典型断面河水来源的集中补给效应不直接相关,但在当前研究和前人研究^[12]中均存在典型断面处流量的变化趋势与集中补给效应趋势一致的现象,表明相比于降水量,断面处的流量与集中补给效应具有更好的相关性。

5 结论

(1)沿都思兔河流向,盈水河段与渗失河段交替出现,上游以盈水河段为主,下游以渗失河段为主。当前研究中 3 种年降水量情景(枯水年、平水年、丰水年)下上游盈水河段占分别为 73.0%、71.3%、71.5%,下游渗失河段占比分别为 43.6%、53.1%、54.7%。

(2)无论在盈水河段还是渗失河段,都思兔河沿程的河水-地下水交换量均具有空间差异性,导致下游苦水沟水文站所在监测断面处河水径流量的 80% 来自于长度占比不到 20% 的河段。当前研究中 3 种年降水量情景(枯水年、平水年、丰水年)下苦水沟断面处河流流量的 80% 分别来自于河流总长度的 12.3%、9.2%、18.6%。

(3)河流断面处河水来源组成的集中补给效应与断面流量具有良好的相关性,流量越小,集中补给效应越明显。

参考文献 (References) :

- [1] WINTER T C, HARVEY J W, FRANKE O L, et al. Ground water and surface water: A single resource[J]. United States Geological Survey Circular, 1998, 1139: 1-79.
- [2] FERGUSON C, MCINTOSH J C, JASECHKO S, et al. Groundwater deeper than 500 m contributes less than 0.1% of global river discharge[J]. Communications Earth &

- Environment, 2023, 4(1): 1 – 8.
- [3] 韩鹏飞,王旭升,蒋小伟,等. 氢氧同位素在地下水流系统的重分布: 从高程效应到深度效应 [J]. 水文地质工程地质, 2023, 50(2): 1 – 12. [HAN Pengfei, WANG Xusheng, JIANG Xiaowei, et al. Redistribution of hydrogen and oxygen isotopes in groundwater flow systems: From altitude effect to depth effect[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2023, 50(2): 1 – 12. (in Chinese with English abstract)]
- [4] 杜尧,马腾,邓娅敏,等. 潜流带水文-生物地球化学: 原理、方法及其生态意义 [J]. 地球科学, 2017, 42(5): 661 – 673. [DU yao, MA Teng, DENG Yamin, et al. Hydro-biogeochemistry of hyporheic zone: Principles, methods and ecological significance[J]. Earth Science, 2017, 42(5): 661 – 673. (in Chinese with English abstract)]
- [5] 杨滨键,尚杰,于法稳. 农业面源污染防治的难点、问题及对策 [J]. 中国生态农业学报(中英文), 2019, 27(2): 236 – 245. [YANG Bingjian, SHANG Jie, YU Fawen. Difficulty, problems and countermeasures of agricultural non-point sources pollution control in China[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2019, 27(2): 236 – 245. (in Chinese with English abstract)]
- [6] 杜新强,方敏,冶雪艳. 地下水“三氮”污染来源及其识别方法研究进展 [J]. 环境科学, 2018, 39(11): 5266 – 5275. [DU Xinqiang, FANG Min, YE Xueyan. Research progress on the sources of inorganic nitrogen pollution in groundwater and identification methods[J]. Environmental Science, 2018, 39(11): 5266 – 5275. (in Chinese with English abstract)]
- [7] 涂春霖,陈庆松,尹林虎,等. 我国地下水硝酸盐污染及源解析研究进展 [J]. 环境科学, 2024, 45(6): 3129 – 3141. [TU Chunlin, CHEN Qingsong, YIN Linhu, et al. Research advances of groundwater nitrate pollution and source apportionment in China[J]. Environmental Science, 2024, 45(6): 3129 – 3141. (in Chinese with English abstract)]
- [8] JOHNSON H M, STETS E G. Nitrate in streams during winter low-flow conditions as an indicator of legacy nitrate[J]. *Water Resources Research*, 2020, 56(11): e2019wr026996.
- [9] 薛禹群,张幼宽. 地下水污染防治在我国水体污染控制与治理中的双重意义 [J]. 环境科学学报, 2009, 29(3): 474 – 481. [XUE Yuqun, ZHANG Youkuan. Twofold significance of ground water pollution prevention in China's water pollution control[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2009, 29(3): 474 – 481. (in Chinese with English abstract)]
- [10] COVINO T, MCGLYNN B, MALLARD J. Stream-groundwater exchange and hydrologic turnover at the network scale[J]. *Water Resources Research*, 2011, 47(12): e2011wr010942.
- [11] MALLARD J, MCGLYNN B, COVINO T. Lateral inflows, stream-groundwater exchange, and network geometry influence stream water composition[J]. *Water Resources Research*, 2014, 50(6): 4603 – 4623.
- [12] ZHANG Zhiyuan, SCHMIDT C, NIXDORF E, et al. Effects of heterogeneous stream-groundwater exchange on the source composition of stream discharge and solute load[J]. *Water Resources Research*, 2021, 57(8): 1 – 19.
- [13] JÄHKEL A, GRAEBER D, FLECKENSTEIN J H, et al. Hydrologic turnover matters—gross gains and losses of six first-order streams across contrasting landscapes and flow regimes[J]. *Water Resources Research*, 2022, 58(7): e2022wr032129.
- [14] CONANT B, CHERRY J A, GILLHAM R W. A PCE groundwater plume discharging to a river: Influence of the streambed and near-river zone on contaminant distributions[J]. *Journal of Contaminant Hydrology*, 2004, 73(1/2/3/4): 249 – 279.
- [15] SCHMIDT C, BAYER-RAICH M, SCHIRMER M. Characterization of spatial heterogeneity of groundwater-stream water interactions using multiple depth streambed temperature measurements at the reach scale[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2006, 10(6): 849 – 859.
- [16] BATLLE-AGUILAR J, HARRINGTON G A, LEBLANC M, et al. Chemistry of groundwater discharge inferred from longitudinal river sampling[J]. *Water Resources Research*, 2014, 50(2): 1550 – 1568.
- [17] 王俊智. 盆地多级次地下水流系统识别方法研究 [D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2015. [WANG Junzhi. A methodological study on the identification of hierarchically nested groundwater flow systems in Drainage Basins[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2015. (in Chinese with English abstract)]
- [18] 钱会,窦妍,李西建,等. 都思兔河氢氧稳定同位素沿流程的变化及其对河水蒸发的指示 [J]. 水文地质工程地质, 2007, 34(1): 107 – 112. [QIAN Hui, DOU Yan, LI Xijian, et al. Changes of $\delta^{18}\text{O}$ and δD along Dousitu River and its indication of river water evaporation[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2007, 34(1): 107 – 112. (in Chinese with English abstract)]

- abstract)]
- [19] 孙芳强. 鄂尔多斯盆地都思兔河流域地下水循环及生态环境效应研究 [D]. 西安: 长安大学, 2010. [SUN Fangqiang. Research on groundwater circulation and environment effect of Dusitu river in Ordos Basin[D]. Xi'an: Chang'an University, 2010. (in Chinese with English abstract)]
- [20] 侯光才, 张茂省, 刘方, 等. 鄂尔多斯盆地地下水勘查研究 [M]. 北京: 地质出版社, 2008. [HOU Guangcai, ZHANG Maosheng, LIU Fang, et al. Study on groundwater exploration in Ordos basin[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2008. (in Chinese)]
- [21] 蒋小伟, 万力, 王旭升. 区域地下水流理论进展 [M]. 北京: 地质出版社, 2013. [JIANG Xiaowei, WAN Li, WANG Xusheng. Advances in the theory of regional groundwater flow[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2013. (in Chinese)]
- [22] 王恒. 基于水化学演化规律的盆地地下水循环研究 [D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2016. [WANG Heng. A methodological study on the hydrogeochemical characterization of hierarchically nested groundwater flow systems[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2016. (in Chinese with English abstract)]
- [23] 庞忠和, 黄天明, 杨硕, 等. 包气带在干旱半干旱地区地下水补给研究中的应用 [J]. 工程地质学报, 2018, 26(1): 51 – 61. [PANG Zhonghe, HUANG Tianming, YANG Shuo, et al. The potential of the unsturated zone in groundwater recharge in arid and semiarid areas[J]. Journal of Engineering Geology, 2018, 26(1): 51 – 61. (in Chinese with English abstract)]
- [24] 陈飞, 徐翔宇, 羊艳, 等. 中国地下水资源演变趋势及影响因素分析 [J]. 水科学进展, 2020, 31(6): 811 – 818. [CHEN Fei, XU Xiangyu, YANG Yan, et al. Investigation on the evolution trends and influencing factors of groundwater resources in China[J]. Advances In Water Science, 2020, 31(6): 811 – 818. (in Chinese with English abstract)]
- [25] 赵芳, 田质胜, 冯一鸣, 等. 变化环境下的地下水动态响应研究进展 [J]. 济南大学学报(自然科学版), 2020, 34(1): 69 – 75. [ZHAO Fang, TIAN Zhisheng, FENG Yiming, et al. Research progress on groundwater dynamic response under changing environments[J]. Journal of University of Jinan (Science and Technology), 2020, 34(1): 69 – 75. (in Chinese with English abstract)]
- [26] 王平. 西北干旱区间歇性河流与含水层水量交换研究进展与展望 [J]. 地理科学进展, 2018, 37(2): 183 – 197. [WANG Ping. Progress and prospect of research on water exchange between intermittent rivers and aquifers in arid regions of northwestern China[J]. Progress in Geography, 2018, 37(2): 183 – 197. (in Chinese with English abstract)]
- [27] 孙金, 王怡璇, 杨璐, 等. 锡林河上游雨季降水、河水和地下水转化关系 [J]. 环境科学, 2023, 44(12): 6754 – 6766. [SUN Jin, WANG Yixuan, YANG Lu, et al. Relationship Between precipitation, river water, and groundwater conversion in the upper reaches of Xilin River during the rainy season[J]. Environmental Science, 2023, 44(12): 6754 – 6766. (in Chinese with English abstract)]
- [28] 刘荣. 都思兔河水环境现状调查分析 [D]. 呼和浩特: 内蒙古大学, 2019. [LIU Rong. Investigation and analysis of water environment of Dustu River[D]. Hohhot: Inner Mongolia University, 2019. (in Chinese with English abstract)]
- [29] 张志远. 巨厚潜水含水层自流井的水动力特征研究 [D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2018. [ZHANG Zhiyuan. A study on hydrodynamic characteristic of flowing wells in thick unconfined aquifers[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2018. (in Chinese with English abstract)]
- [30] NISWONGER R G, PRUDIC D E. Documentation of the streamflow-routing (SFR2) package to include unsaturated flow beneath streams - A modification to SFR1[J]. Techniques and Methods, 2005, 6(A13): 1 – 50.
- [31] 余忠波, 黄勇, FRANKLIN W S. 地下水水文学原理 [M]. 北京: 科学出版社, 2008. [YU Zhongbo, HUANG Yong, FRANKLIN W S. Principles of groundwater hydrology[M]. Beijing: Science Press, 2008. (in Chinese)].
- [32] 靳孟贵, 鲜阳, 刘延锋. 脱节型河流与地下水相互作用研究进展 [J]. 水科学进展, 2017, 28(1): 149 – 160. [JIN Menggui, XIAN Yang, LIU Yanfeng. Disconnected stream and groundwater interaction: A review[J]. Advances in Water Science, 2017, 28(1): 149 – 160. (in Chinese with English abstract)]
- [33] 胡汝骥, 樊自立, 王亚俊, 等. 中国西北干旱区的地下水资源及其特征 [J]. 自然资源学报, 2002, 17(3): 321 – 326. [HU Ruji, FAN Zili, WANG Yajun, et al. Groundwater resources and their characteristics in arid lands of NorthWestern China[J]. Journal of Natural Resources, 2002, 17(3): 321 – 326. (in Chinese with English abstract)]