

基于氧同位素($\delta^{18}\text{O}$)的塔里木河下游 河水向地下水的转化研究

王希义^{1,2}, 徐海量², 闫俊杰², 凌红波², 赵新风²

(1. 新疆农业大学, 新疆 乌鲁木齐 830052; 2. 中国科学院 新疆生态与地理研究所, 新疆 乌鲁木齐 830011)

摘要: 中国西北属于干旱区, 区域内发育有很多内陆河。在内陆河流域, 地表水与地下水之间的转化十分明显。为探索干旱区地表水对地下水的转化特征, 以便为有效开发利用水资源和预测地下水环境变化提供理论依据, 本研究以塔里木河下游为研究区, 对不同河段的河水与地下水进行了取样, 并利用同位素技术研究了地表水对地下水的转化比率。结果表明: 在塔里木河下游地区, 河水向地下水的转化明显, 阿拉干断面河水向地下水转化率最高; 总体而言, 沿河道向下游, 河水向地下水的补给量呈减少趋势; 本文运用质量守恒原理, 并通过定量分析, 得出塔里木河下游河水向地下水的平均转化率为 43.36%。这对于合理利用区域内的水资源、正确评价生态输水效益具有重要意义。

关键词: 稳定同位素; 质量守恒原理; 河水与地下水转化; 塔里木河下游

中图分类号: P339

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2018)02-0084-06

Conversion of river water to groundwater based on oxygen isotope ($\delta^{18}\text{O}$) in the lower reaches of Tarim River

WANG Xiyi^{1,2}, XU Hailiang², YAN Junjie², LING Hongbo², ZHAO Xinfeng²

(1. Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China; 2. Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, China)

Abstract: Northwest China belongs to the arid region, and there are many inland rivers in the region. There were frequent conversion relationships between surface water and groundwater in inland river basin. In order to explore the characteristics of transformation between surface water and groundwater, so as to provide theoretical basis for effective development and utilization of water resources and prediction of groundwater environment changes, the lower reaches of Tarim River was taken as the study area, and the river water and groundwater in different sections were sampled. What's more, conversion ratio of surface water to groundwater has been studied using isotope technology. Results show that: in the lower reaches of the Tarim River, conversion of river water to groundwater was remarkable, and the conversion ratio at Alagan section was the highest. In general, recharge of river water to groundwater presented a decrease trend along the river from upstream to downstream. Based on principle of mass balance and according to quantitative analysis, the average conversion ratio of river water to groundwater was 43.36%. This provides the foundation for evaluating ecological water conveyance efficiency correctly and is also helpful for rational utilization of water resources.

Key words: stable isotope; principle of mass balance; river water and groundwater conversion; lower reaches of Tarim River

收稿日期: 2017-08-02; 修回日期: 2017-12-03

基金项目: 国家自然科学基金项目(31370551, 41471099, 31400466); 中国科学院“西部之光”人才培养计划(XBBS-2014-13)

作者简介: 王希义(1987-) 男, 山东滨州人, 博士研究生, 主要从事生态需水与恢复生态学研究。

通讯作者: 闫俊杰(1984-) 男, 河南林州人, 博士研究生, 主要从事生态恢复相关研究。

1 研究背景

中国西北内陆河地区气候干旱,河流形成于山区,下游逐渐干涸或流入内陆湖。当河水从源头进入盆地或是平原区时,流速减缓,河水与地下水间转换十分频繁^[1-2]。研究地表水与地下水相互作用的途径、方式、转化量等具有重要价值,对水资源合理利用以及水资源变化预测具有重要意义。在干旱区,河水是重要的地表水资源。因此,干旱区地表水与地下水间转化的研究重点集中在河水与地下水之间。目前,河水与地下水之间转换关系的研究主要有4种方法:解析解法、数值解法、野外测试与水化学分析法^[3-4],其中数值解法与水化学分析相结合是定量研究河水与地下水转化的最有效方法^[5]。在河水与地下水转化的研究中,同位素技术的应用越来越广泛^[6-7]。在常温状态下,以水分子形式存在的D和 ^{18}O 的性质非常稳定,不易与其接触到的物质发生化学反应,同位素含量也不会发生变化^[8-9]。因此,在同位素技术的研究中,D和 ^{18}O 的研究倍受关注。

在国外,Reberski等^[10]利用氢氧同位素技术对地表水和地下水之间的关系进行了分析,Brenot等^[11]运用氢氧同位素技术研究了冲击含水层区域地表水与地下水的相互作用,其他一些学者也利用稳定同位素技术探讨了地表水与地下水之间的转换问题^[12-13]。在国内,同位素技术被应用到不同水样之间的转化关系方面。曾巧等^[14]利用同位素技术研究了植物的水分来源,Li Peiyue等^[15]研究了渭河流域华县段石堤河的地下水与地表水转换,杨玉忠等^[16]研究了北麓河流域降水与河水的同位素特征。在新疆塔里木河流域,周天河等^[17]运用同位素对塔里木河上游胡杨、柽柳的水分来源进行了研究,孙从建^[18]应用同位素技术结合水化学特性定量分析了各源流区的径流组成及贡献率,徐梦辰等^[19]在利用环境同位素技术与多年径流量数据分析塔里木河中游的水文过程基础上,采用聚集度指标与种群结构动态量化法研究了胡杨种群结构与时空变化特征。然而,有关地表水与地下水之间关系的研究大都集中在湿润地区,针对塔里木河流域地表水与地下水相互作用的研究较为少见。

塔里木河下游从1972年起持续断流,地下水位不断下降,以胡杨、柽柳为代表的两岸植被几近消亡^[20]。从2000年5月起至2016年底,由水利部会同新疆维吾尔自治区人民政府及新疆生产建设兵团

等部门共进行了17次间歇性的应急生态输水,旨在抢救下游濒危植被,以实现区域经济、社会和生态的协调发展。本文的目的是在分析塔里木河下游水文地质条件的基础上,对河水与地下水进行取样,然后在室内对 $\delta^{18}\text{O}$ 同位素进行分析测定,之后依据质量守恒原理,确定塔里木河下游生态输水过程中河水对地下水的转化比率,以便为生态输水的效益评估提供研究基础和理论依据。

2 研究区概况

塔里木河下游是指从大西海子水库到台特玛湖之间的区域(图1),西依塔克拉玛干沙漠,东连库鲁克沙漠,属温带大陆性干旱荒漠气候,年降水量仅为17.4~42.0 mm,而潜在年均蒸发量却高达2500~3000 mm^[21]。自2000年开展生态输水以来,大量死亡或濒临死亡的植被又开始复苏,盖度和多样性有所回升^[22]。

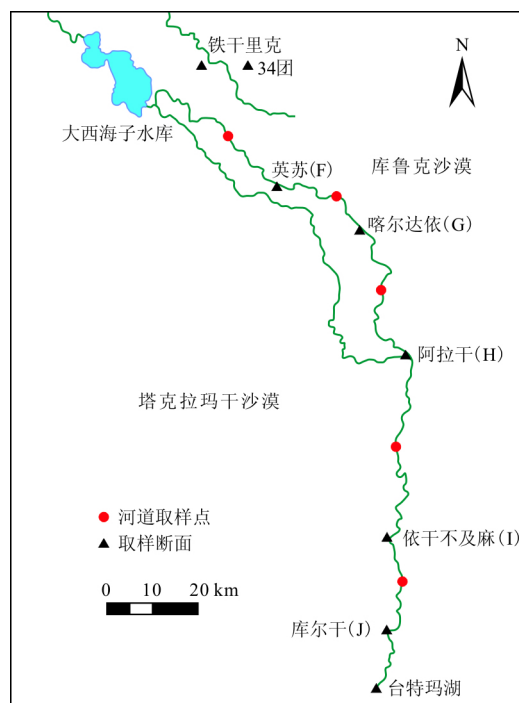


图1 塔里木河下游各取样断面及取样点示意图

塔里木河下游为宽约10~20 km的冲积平原,海拔位于780~840 m之间。地形总体上由西北向东南倾斜,最低点位于台特玛湖。塔里木河下游河道宽30~50 m,河床下切2~7 m,两岸分布有胡杨、柽柳、骆驼刺、盐生草、花花柴等乔灌木以及固定、半固定沙丘,并在低洼地带带有盐土和盐壳分布^[23]。在构造上,塔里木河下游是一个长时期的缓慢沉积带,具有较厚的第四系松散堆积层。在漫长的地质时

期,河流改道频繁,河水携带的大量泥沙经过沉积或淤积形成了以细砂和粉砂为主的带状冲积湖积层,这十分有利于地下水的储存和运动。塔里木河下游含水层岩性单一,主要为河湖相细砂和粉细砂,属于典型的孔隙含水层。按地下水埋藏条件,含水层可分为潜水含水层和承压含水层。其中潜层地下水与河水联系密切,对于河道两侧植被维持生命活动具有重要作用,也是本文研究的重点。

塔里木河下游干旱少雨,但蒸发强烈,少量的大气降水很容易蒸发殆尽。因此,大气降水对地下水补给几乎无作用,区域内地下水主要受到河水的补给。地下水径流从径流特性方面可以分为纵向与横向两种形式。在纵向上,影响地下水径流的因素主要是地形,地下水径流在纵向上与河流的流向基本相同。由于水力坡度小,含水层的透水性较差,导致地下水径流速度小。因此,在纵向上,地下水径流不

明显,有些区域甚至处于停滞状态。在横向上,即垂直于河道方向上,地下水径流受河水水位的影响十分显著。在生态输水的过程中,地下水位低于河水水位,这导致河水向河道两侧渗透,因此横向径流较为活跃。

3 数据来源与研究方法

3.1 $\delta^{18}\text{O}$ 的现场采样与室内测量

依据塔里木河下游所设立的5个断面,取断面上的河水样,在主流河水面30 cm以下取地表水样,用待取水样将水样瓶清洗3次后再取样。塔里木河下游自大西海子水库以下分为两条支流,一条为其文阔尔河,另一条现称为老塔里木河,两河在阿拉干处汇合后流至台特玛湖。在本次研究中,于河流汇合点上游,沿着其文阔尔河所布设的监测井取地下水样,取样井点如表1所示。

表1 生态输水工程区各断面监测井分布

序号	断面	流向	河段	监测井					
				J1	J2	J3	J4	J5	J6
5	库尔干	↑	塔里木河	◎	◎	◎	◎	◎	◎
				50	150	300	500	750	1050
4	依干不及麻	↑	塔里木河	◎	◎	◎	◎	◎	◎
				50	150	300	500	750	1050
3	阿拉干	↑	其文阔尔河	◎	◎	◎	◎	◎	◎
				50	150	300	500	750	1050
2	喀尔达依	↑	其文阔尔河	◎	◎	◎	◎	◎	◎
				50	150	300	500	750	1050
1	英苏	↑	其文阔尔河		◎	◎	◎	◎	◎
					150	300	500	700	1050

注:图表中每一生态监测断面上排为遥测站编号,下排数据为遥测站至近侧河道河岸的距离。

除英苏断面只有5口监测井以外,其他每一个断面的监测井均分布在离河道50、150、300、500、750、1050 m的位置上。对于每一个监测断面,采取每一口监测井的水样。然而,喀尔达依断面G6井由于设备损坏而没有取到地下水样,库尔干J4、J5、J6井中没有地下水,也许因为地下水位过低或是无地下水补给而致。其余的监测井中均可取到水样。取得河水与地下水样品后,立即密封样品瓶,避免样品与空气之间进行同位素交换以及样品因蒸发而导

致的同位素分馏。每一个断面的监测井水样 $\delta^{18}\text{O}$ 的平均值记为该断面地下水的 $\delta^{18}\text{O}$ 值。另外,依据计算的需要,需要在监测断面的上游取水样,依据张应华等^[24]的研究方法,上游取水样约距离监测断面15~30 km,因此在英苏断面上游15 km处取一次水样;研究区相邻两个断面间距离在30~40 km之间,因此在每两个相邻断面中间的位置取一次河水水样(图1)。

水样中 $\delta^{18}\text{O}$ 的室内分析是在中国科学院新疆

生态与地理研究所荒漠与绿洲国家重点实验室进行,用 MAT-252 气体质谱仪分析,测得的氧同位素比率的结果为与“标准平均海洋水(SMOW)”的千分差 $\delta^{18}\text{O}$,测量精度在 $\pm 0.2\%$ 之内。

3.2 研究方法

3.2.1 $\delta^{18}\text{O}$ 的特性 在氧的同位素当中,以 ^{16}O 和 ^{18}O 的丰度较高,彼此间的质量差也较大,因此在地学中大都使用 $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ 比值,通常用 $\delta^{18}\text{O}$ 来表示:

$$\delta^{18}\text{O}(\text{‰}) = \frac{(^{18}\text{O}/^{16}\text{O})_m - (^{18}\text{O}/^{16}\text{O})_s}{(^{18}\text{O}/^{16}\text{O})_s} \times 1000/\text{‰} \quad (1)$$

式中: m 为样品; s 为标准样,其国际标准样品是“标准平均海水”代号为 SMOW(Standard Mean Ocean Water)。

3.2.2 $\delta^{18}\text{O}$ 在水体转化中的质量守恒方程 质量守恒方程为:

$$C_s Q_s = C_g Q_g + C_b(Q_s - Q_g) \quad (2)$$

式中: C_s 为取样点河水的 $\delta^{18}\text{O}$ 值; C_g 为取样点地下水的 $\delta^{18}\text{O}$ 值; C_b 为取样点上游来水中 $\delta^{18}\text{O}$ 值; Q_s 为取样点的河水流量; Q_g 为向地下水的排泄量。则由公式(2)可以导出,河水向地下水的排泄量占河水流量的百分比:

$$f = (Q_g/Q_s) \times 100\% = \frac{C_s - C_b}{C_g - C_b} \times 100\% \quad (3)$$

当仅靠一种示踪剂无法计算出其中一种混合来源的百分比时,必须还要借助另外一种示踪剂,即分析水中另外一种同位素或水化学离子等。本研究借助氢同位素(δD)按照三相混合来计算^[25],将公式(2)扩展成三相混合质量均衡方程:

$$C_s Q_s = C_g Q_g + C_a Q_a + C_c(Q_s - Q_g - Q_a) \quad (4)$$

4 结果与分析

4.1 各取样点 $\delta^{18}\text{O}$ 值(‰)测定结果

经过实验室的处理与分析,得出了所采取水样中河水与地下水的 $\delta^{18}\text{O}$ 值(表2)。

表2 地下水和河水的 $\delta^{18}\text{O}$ 值(‰)测定结果

取样点	河水	地下水	上游河水
	$\delta^{18}\text{O}$ 值	$\delta^{18}\text{O}$ 值	$\delta^{18}\text{O}$ 值
英苏	-8.40489	-8.070884	-8.71251
喀尔达依	-7.84908	-7.301915	-8.27423
阿拉干	-7.72468	-7.817403	-7.92755
依干不及麻	-7.51640	-7.244601	-7.71298
库尔干	-7.27435	-6.929014	-7.49425

4.2 各断面河水对地下水的转化比例

依据公式(2)和(3),以 C_s 表示取样点地表水 $\delta^{18}\text{O}$ 值、 C_g 表示取样点地下水 $\delta^{18}\text{O}$ 值、 C_b 表示取样点上游河水 $\delta^{18}\text{O}$ 值,可以得出各测点上河水对地下水的贡献百分比(表3)。

表3 塔里木河下游各断面河水对地下水的转化率

取样断面	C_s /‰	C_g /‰	C_b /‰	f /%
英苏	-8.40489	-8.070884	-8.71251	47.94
喀尔达依	-7.84908	-7.301915	-8.27423	43.73
阿拉干	-7.72468	-7.817403	-7.92755	54.29
依干不及麻	-7.51640	-7.244601	-7.71298	41.97
库尔干	-7.27435	-6.929014	-7.49425	38.90

可见,阿拉干断面上河水对地下水的转化率最高。从图1中可以看出,阿拉干断面为两条支流的汇合处,但是依据公式(3)仅考虑了其文阔尔河一条支流。本研究中,阿拉干断面河水对地下水的转化率高达54.29%,这是因为阿拉干断面是其文阔尔河与老塔里木河的交汇点,而本研究在计算河水对地下水的转化率时,仅考虑其文阔尔河水对地下水的转化率,将老塔里木河的河水当成地下水进行计算。然而仅靠一种示踪剂无法计算出其中一种混合来源的百分比,必须还要借助另外一种示踪剂,即分析水中另外一种同位素或水化学离子等。本研究利用公式(4),借助氢同位素(δD)按照三相混合来计算。在公式(4)中, C_s 、 C_g 和 Q_s 、 Q_g 与式(2)中意义相同, C_a 表示阿拉干断面上游其文阔尔河水样中氢同位素值, C_c 表示断面上游老塔里木河水样中氢同位素值。将氢同位素值代入公式(4)得出阿拉干断面实际地表水对地下水的转化率为44.28%,明显小于按两项混合计算的54.29%。因此可以得出,在整个塔里木河下游地区,河水对地下水的平均转化比例为43.36%,即河水对地下水的补给量占总量的近一半。

5 讨论

塔里木河的自然漫溢孕育了植被,而一定的地下水位维持了植被的生存。因此,长期输水后植被的恢复程度及范围与地下水特征具有很大的相关性,而河水对地下水的转化特征在很大程度上决定着河畔植被的种类及分布梯度。在实施生态输水的过程中,沿河道向下游,河水流量逐渐减少,水位降低,河水对河床的压强也降低,对地下水的转化率也

有所减少,这与本研究的结果基本一致。另外,在两个支流交汇处,如果只分析一条支流对地下水的转化率,结果明显偏高;然而利用另一种同位素示踪,借鉴三相混合质量均衡方程,得出的结果比较接近正常范围^[24],这也与本研究的结果相吻合,证明本研究的方法合理,结果可信。

在干旱地区,天然植被生长和繁育更新所需水分主要依靠地表水转换成地下水进行补给。塔里木河下游生态输水工程已经实施了近17年,随着输水的进行,河水对地下水的补给十分显著,河道两侧的地下水位处在不断的恢复之中^[26]。通常情况下,河水水面蒸发一般不足渗漏损失的5%,另有一部分存储于包气带中,还有一部分通过土壤蒸发和植物蒸腾而消耗,很大一部分补给地下水^[27],这正与本研究的结果相一致。在本研究中,河水对地下水的转化量约占河水总水量的1/2。杨鹏年等^[28]运用Modflow模型模拟的塔里木河下游河水对地下水的转化率平均为42.19%;邓铭江等^[29]综合2000-2013年输水资料,指出河水对地下水的转化率平均为46.2%,这都与本研究的结果接近,造成微小差异的原因也许与研究的时间长度不同以及输水特征不同有关,需要进一步的讨论。

在塔里木河下游地区,为了扩大生态输水效应,从第5次输水开始,实施其文阔尔河和老塔里木河双河道输水。这种输水方式扩大了植被受水面积,但是同时也加大了河水的蒸发消耗量。目前,国内有关河道水损失量的研究很少,首先,塔里木河下游断流河道输水损失量有待深入探讨。另外,随着输水后地下水位的不断抬升,潜水蒸发量逐渐增多,输水对地下水的补给作用逐渐减弱并趋于动态稳定。再者,输水量和持续时间是决定生态输水效益大小的关键因素。为扩大生态输水的效益,应坚持采用双河道输水和地表漫溢的方式,并在可能的区域实施多河道输水。最后,充分利用其文阔尔河在塔里木河下游形成的天然湖泊进行集中生态供水,对更加科学高效用水、促进生态恢复进行积极探索。

6 结 论

(1) 在塔里木河下游地区,从上游到下游,地表水向地下水的转化比例呈现降低的趋势。英苏断面地表水对地下水的转化率最高为47.94%,其次为阿拉干断面44.28%,最小的为库尔干断面38.9%。在生态输水过程中,英苏断面的过水量最大,持续时间长,阿拉干断面次之;库尔干断面过水量小,持续时间

短。因此,河道的水量越大,持续时间越长,则河水对地下水的转化率越高。今后,应加强河水对地下水转化率与过水量、过水持续时间之间关系的研究。

(2) 在整个塔里木河下游地区,河水对地下水的转化率约为43.36%,即河水对地下水的转化比率近1/2。在生态输水的过程中,大量的河水转化为地下水,使得河道附近的植被得以存活并生长。植被具有调节气候、涵养水源、维持生物多样性等生态功能。因此,开展生态输水工程,保持河水向地下水的转化,可以促进沿岸植被的生长,对于区域内的环境保护和经济可持续发展具有重要作用。

(3) 本研究重点讨论了河水对地下水的转化特征,但是河水转化为地下水以后,地下水又有一部分转化为土壤水供植物吸收。因此,在以后的研究中,应开展地下水对土壤水的转化研究。另外,植物体内也含有水分,主要来自于土壤水和地下水。因此,开展植物水分的来源及转化比例也十分必要,这对于区域内水资源的合理开发利用、生态环境评价以及水环境预测等具有重要意义。

参考文献:

- [1] ZHANG Bing, SONG Xianfang, ZHANG Yinghua, et al. Hydrochemical characteristics and water quality assessment of surface water and groundwater in Songnen plain, North-east China. [J]. *Water Research*, 2012, 46(8): 2737 - 2748.
- [2] LASAGNA M, LUCA D A D, FRANCHINO E. Nitrate contamination of groundwater in the western Po Plain (Italy): the effects of groundwater and surface water interactions [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2016, 75(3): 1 - 16.
- [3] 叶人源. 新疆伊犁-巩乃斯河谷地表水与地下水转化关系研究[D]. 西安:长安大学, 2015.
- [4] HOUSE A R, THOMPSON J R, SORENSEN J P R, et al. Modelling groundwater/surface water interaction in a managed riparian chalk valley wetland [J]. *Hydrological Processes*, 2016, 30(3): 447 - 462.
- [5] DINKA M O, LOISKANDL W, NDAMBUKI J M. Hydrochemical characterization of various surface water and groundwater resources available in Matahara areas, Fantalle Woreda of Oromiya region [J]. *Journal of Hydrology Regional Studies*, 2015, 3(C): 444 - 456.
- [6] TAKEDA Y. A geochemical and stable isotope investigation of groundwater/surface - water interactions in the Velenje Basin, Slovenia [J]. *Hydrogeology Journal*, 2014, 22(4): 971 - 984.

- [7] TSUCHIHARA T, YOSHIMOTO S, SHIRAHATA K, et al. ^{17}O - excess and stable isotope compositions of rainwater, surface water and groundwater in Paddy Areas in Ibaraki, Japan [J]. Transactions of the Japanese Society of Irrigation Drainage & Rural Engineering, 2016, 302(84): 185 - 194.
- [8] ANDREEVA D B, ZECH M, GLASER B, et al. Stable isotope ($\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{15}\text{N}$, $\delta^{18}\text{O}$) record of soils in Buryatia, southern Siberia: Implications for biogeochemical and paleoclimatic interpretations [J]. Quaternary International, 2013, 290 - 291: 82 - 94.
- [9] GÁZQUEZ F, CALAFORRA J M, EVANS N, et al. Using stable isotopes ($\delta^{18}\text{O}$ and δD) of gypsum hydration water to unravel the mode of gypsum speleothem formation in semi - arid caves [C]// European Geoscience Union General Assembly. 2016.
- [10] REBERSKI J L, TERZIĆ J, FRANGEN T, et al. Analysis of stable isotopes $\delta^{18}\text{O}$ and δD in groundwater and surface water in the spring Prud catchment area [C]// Sarajevo: Gamond 2016: 38 - 39.
- [11] BRENOT A, PETELET - GIRAUD E, COPPO N, et al. Surface water - groundwater interactions in an alluvial valley: combining tools for a better understanding of the recharge capacity of the Isere River alluvial aquifer for the neighborhood of Albertville city [C]// I. S. RIVERS, Lyon, France 2015.
- [12] GIBRILLA A, OSAE S, AKITI T T, et al. Origin of dissolve ions in groundwaters in the northern Densu river basin of Ghana using stable isotopes of ^{18}O and ^2H [J]. Journal of Water Resource & Protection, 2010, 2(12): 1010 - 1019.
- [13] ADOMAKO D, GIBRILLA A, MALOSZEWSKI P, et al. Tracing stable isotopes ($\delta^2\text{H}$ and $\delta^{18}\text{O}$) from meteoric water to groundwater in the Densu River basin of Ghana [J]. Environmental Monitoring & Assessment, 2015, 187(5): 264 - 271.
- [14] 曾巧, 马剑英. 黑河流域不同生境植物水分来源及环境指示意义 [J]. 冰川冻土, 2013, 35(1): 148 - 155.
- [15] LI Peiyue, WU Jianhua, QIAN Hui. Preliminary assessment of hydraulic connectivity between river water and shallow groundwater and estimation of their transfer rate during dry season in the Shidi River, China [J]. Environmental Earth Sciences, 2016, 75(2): 1 - 16.
- [16] 杨玉忠, 吴青柏, 贲汉伯. 北麓河多年冻土区降水及河水稳定同位素特征分析 [J]. 水科学进展, 2013, 24(6): 778 - 785.
- [17] 周天河, 赵成义, 吴桂林, 等. 塔里木河上游胡杨 (*Populus euphratica*)、柽柳 (*Tamarix ramosissima*) 水分来源的稳定同位素示踪 [J]. 中国沙漠, 2017, 37(1): 124 - 131.
- [18] 孙从建. 塔里木河流域典型山区径流组分特征及其水汽来源研究 [D]. 北京: 中国科学院大学, 2015.
- [19] 徐梦辰, 陈永金, 刘加珍, 等. 塔里木河中游水文影响下的胡杨种群格局动态 [J]. 生态学报, 2016, 36(9): 2646 - 2655.
- [20] 陈亚宁, 张小雷, 祝向民, 等. 新疆塔里木河下游断流河道输水的生态效应分析 [J]. 中国科学 (D 辑: 地球科学), 2004, 34(5): 475 - 482.
- [21] 徐海量, 宋郁东, 王强, 等. 塔里木河中下游地区不同地下水位对植被的影响 [J]. 植物生态学报, 2004, 28(3): 400 - 405.
- [22] YAN Hu, WANG Yujie, WANG Yunqi. The influence of 10 years of water conveyances on groundwater and juvenile *Populus euphratica* of the lower Tarim River [J]. Environmental Earth Sciences, 2014, 71(9): 4091 - 4096.
- [23] 朱绪超, 袁国富, 邵明安, 等. 塔里木河下游河岸带植被的空间结构特征 [J]. 植物生态学报, 2015, 39(11): 1053 - 1061.
- [24] 张应华, 仵彦卿, 丁建强, 等. 运用氧稳定同位素研究黑河中游盆地地下水与河水转化 [J]. 冰川冻土, 2005, 27(1): 106 - 110.
- [25] BUTTLE J M. Isotope hydrograph separations and rapid delivery of pre - event water from drainage basins [J]. Progress in Physical Geography, 1994, 18(1): 16 - 41.
- [26] 白玉锋, 陈超群, 徐海量, 等. 塔里木河下游荒漠植被地上生物量空间分布与地下水埋深关系 [J]. 林业科学, 2016, 52(11): 1 - 10.
- [27] 班胭胭. 河道三维水流数学模型研究与应用 [D]. 大连: 大连理工大学, 2013.
- [28] 杨鹏年, 张胜江, 董新光. 塔里木河干流下游生态输水后水量转化特征 [J]. 干旱区研究, 2007, 24(2): 174 - 178.
- [29] 邓铭江, 周海鹰, 徐海量, 等. 塔里木河下游生态输水与生态调度研究 [J]. 中国科学 (技术科学), 2016, 46(8): 864 - 876.