

那仁郭勒河流域地表水与地下水储量变化响应研究

王玥 王易初 倪晋仁[†]

北京大学环境工程系, 水沙科学教育部重点实验室, 北京 100871; [†] 通信作者, E-mail: jinrenni@pku.edu.cn

摘要 基于2001—2016年的地表水和地下水储量数据, 分别从年尺度和季节尺度研究那仁郭勒河流域地表水与地下水资源变化趋势, 分析地表水与地下水的响应关系及其影响因素。结果表明, 那仁郭勒河流域地表水储量和地下水储量变化趋势分布不均匀, 季节差异明显。地表水-地下水储量变化响应在流域北部集中呈现“地表水稳定-地下水减少”的趋势, 在庫拉克阿拉干河段呈现“地表水减少-地下水增加”的趋势, 在尾间地区东西台吉乃尔湖分别呈现“地表水稳定-地下水增加”和“地表水减少-地下水减少”的趋势。水储量变化的主要影响因素包括温度、土壤断面厚度、灌溉面积及人口密度。流域内不同区域的地表水与地下水储量变化响应特征具有很大的差异, 对二者之间的典型非一致性响应关系的深入认识有助于实现流域地表水与地下水联合管理及生态环境保护。

关键词 那仁郭勒河; 地表水; 地下水; 趋势; 响应

Changes of Surface and Groundwater Reserves in the Narenguole River Basin

WANG Yue, WANG Yichu, NI Jinren[†]

Key Laboratory of Water and Sediment Sciences (MOE), Department of Environmental Engineering, Peking University, Beijing 100871; [†] Corresponding author, E-mail: jinrenni@pku.edu.cn

Abstract Based on the data from 2001–2016, we investigated the variation trends in surface water and groundwater reserves of the Narenguole River, their response relationship and influencing factors. The trend distribution of groundwater reserves is uneven and the seasonal variation is obvious. The co-varying change of surface water and groundwater reserves presents a “stable-decrease” trend in the northern part of the basin. In the part of the Tulagt Ar Gol River, the surface water decreases but the groundwater increases, while the “stable-increase” and the “decrease-decrease” co-varying trends are observed respectively in the West and East Taijinar Lakes of the rump area. The main factors influencing the change of water reserve include temperature, soil section thickness, irrigation factors and population factors. Based on the response characteristics of surface water and groundwater changes in different areas of the basin, we get insights into the typical non-consistent response relationship between them, which is very helpful to realize the integrated management of surface water and groundwater and the protection of ecological environment in the basin.

Key words Narenguole River; surface water; groundwater; trend; response

地表水和地下水资源是淡水资源的重要组成部分^[1]。在我国西北干旱地区, 大部分河流的水源来自山区融雪和降水补给, 由于降水量有限, 蒸发潜力大, 河流蓄水容易受全球变暖和人类活动影响。干旱区内陆河众多, 水生态系统脆弱, 水资源分布空间异质性强, 河流在尾间地区往往形成湖泊, 甚

至消失。水生态系统需要通过降水、蒸发和地下水交换保持平衡来维持相对稳定的水储量^[2]。然而, 近年来全球气候变化对许多干旱半干旱区内陆河水平衡的影响显著, 加上筑坝和灌溉等人类活动加剧, 使地表水与地下水之间的关系复杂化, 大大增加了水资源优化配置的难度^[3], 对生产、生活和生态产

国家自然科学基金(51539001)资助

收稿日期: 2020-03-06; 修回日期: 2020-04-02

生深刻的影响,并引发河湖萎缩、地面沉降、地下水漏斗和地面裂缝等地貌变化和地质灾害^[4-5]。

鉴于上述背景,本文选择柴达木盆地的那仁郭勒河流域开展地表水与地下水储量变化趋势、响应关系和影响因素研究,剖析流域内典型响应关系的分区特征,以期为区域水资源管理提供科学依据。

1 资料与方法

1.1 研究区域

那仁郭勒河(以下简称那河),也称那棱格勒河或那陵郭勒河,位于柴达木盆地西南缘,青藏高寒区和西北干旱区交接处(图 1),是柴达木盆地流域面积和水量最大的河流^[6]。那河干流全长 435 km,发源于昆仑山脉的青新峰,由红水河自南向北流,纳最大支流库拉克阿干河后折向北东,最终注入东台吉乃尔湖^[7]。那河流域面积为 4.5 万 km²,河水主要由冰川融水补给,属高原内陆高寒干旱气候,以强蒸发、少雨、多风、长冬短夏和昼夜温差悬殊为特征^[8]。流域内的土地利用以草地、裸地与稀疏植被为主,居民总人口约 0.2 万。经济发展较滞后,山前滩地以牧业生产为主,尾间地区的东、西台吉乃尔湖蕴含丰富的盐湖资源,柴达木盆地的卤水锂储量约有一半以上分布于西台吉乃尔湖^[9]。

1.2 数据来源

本研究采用的基础数据为 WGHM 水文模型的地表水和地下水储量数据以及其他辅助数据。

1.2.1 WGHM 水文模型数据

WGHM 水文模型(WaterGAP Global Hydrology Model)由 Döll 等^[10-11]于 2003 年开发,主要结合水文过程来模拟大陆水循环过程,可用于大陆尺度的水资源可利用性研究^[12]。模型提供的地表水、地下水和土壤湿度等水储量数据,可用于全球水储量变化及动态水文过程研究^[13-14],也可作为与其他研究方法相比较的基础^[15]。该模型基于水文测站的年平均流量,采用多目标校准法,对敏感参数进行校准^[12]。本研究采用 WGHM 模型最新版本 2.2d 模拟地表水和地下水储量 0.5°×0.5°格网数据,数据涵盖时间范围为 2001 年 12 月至 2016 年 11 月。选取 WGHM 水文模型数据中那河河网处格点进行验证,其地表水储量均值为 47.86 mm,与那河多年平均径流深 49.5 mm^[16]结果相近,准确性良好。

1.2.2 自然地理数据

由于那河流域位于柴达木盆地腹地,气象站点和水文站点稀少,气象水文监测数据不能满足与水储量格网数据相同的分辨率。出于站点覆盖度的考虑,自然地理数据多选择遥感模拟数据。那河河网数据来源于寒区旱区科学数据中心(<http://westdc.westgis.ac.cn>)根据地形图及 TM 遥感影像修订的柴达木河流域河流数据集。流域边界数据来自流域水文数据集(<https://hydrosheds.cr.usgs.gov/>)^[17]。土壤数据来自寒区旱区科学数据中心的面向陆面模拟的中国土壤数据集^[18]。降水和气温数据来源于东安

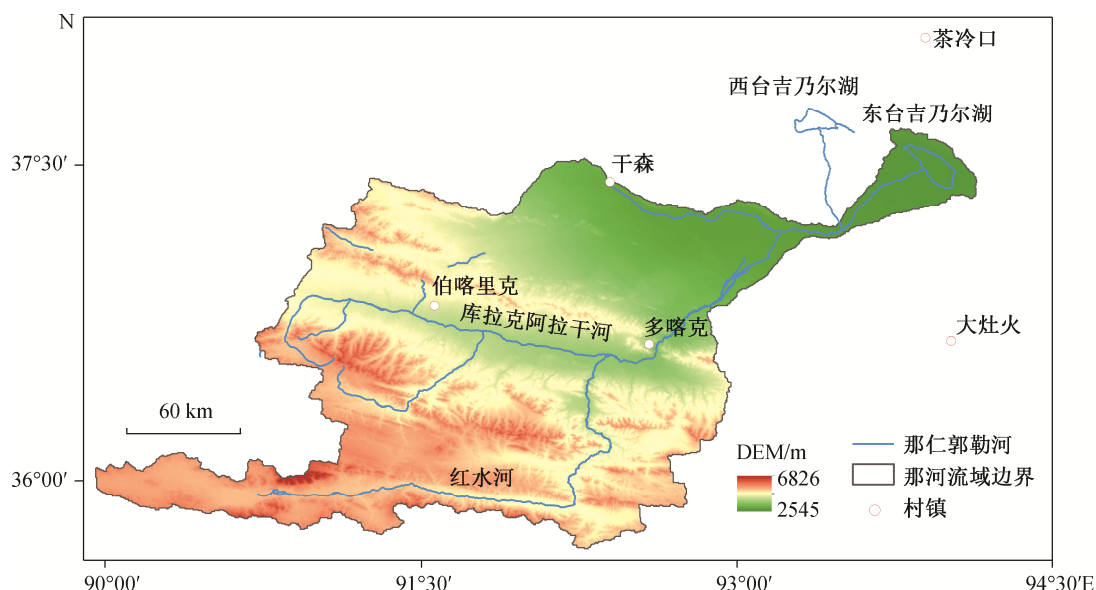


图 1 那仁郭勒河流域
Fig. 1 Narenguole River basin

格利亚大学气候研究中心(Climatic Research Unit, CRU)^[19], 时间范围为2001—2016年。在原始数据的基础上, 我们以2009年为分界线, 计算那河流域气温和降水在研究时段内的相对变化值。干燥度数据来自全球干旱指数数据库^[20]。

1.2.3 人类活动数据

人类活动数据包括人口密度数据和灌溉面积数据。由于当地统计年鉴的数据多以省区为单位, 为满足对流域各区域进行细化分析的要求, 本文选择荷兰环境评估署HYDE人口数据库的人口密度数据^[21]和世界粮农组织的灌溉面积数据^[22]。

1.3 研究方法

目前常用的水文时间序列分析方法有滑动平均法、线性趋势的回归检验、Spearman秩相关检验、Mann-Kendall(M-K)统计检验和累计距平等^[23]。

基于秩的非参数Mann-Kendall(M-K)统计检验法多用于研究水文气象时间序列资料的明显变化趋势。该方法的优点是适用范围广, 定量化程度高^[24], 不需要样本遵从一定的分布规律, 也不受少数异常值的干扰, 更适用于类型变量和顺序变量^[25]。因此, 本文选用M-K统计检验法来分析地表水和地下水储量的变化趋势。

M-K统计检验法的基本原理为: 用具有 n 个样本量的时间序列 $x=x_1, x_2, \dots, x_n$, 构造秩序列

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n \text{sgn}(x_j - x_k), \quad (1)$$

$$\text{sgn}(x_j - x_k) = \begin{cases} 1, & x_j - x_k > 0, \\ 0, & x_j - x_k = 0, \\ -1, & x_j - x_k < 0, \end{cases} \quad (2)$$

式中, n 是样本量数目, x_j 和 x_k 为第 j 个和第 k 个观测样本(此处 $j > k$), S 为序列内各数值大于其之前时刻数值所有个数的累计数。

当 $n > 10$ 时, 统计量 S 近似地服从正态分布, 其方差表示为

$$\text{Var}(S) = \left[n(n-1)(2n+5) - \sum_{p=1}^q t_p(t_p-1)(2t_p+5) \right] / 18, \quad (3)$$

式中, q 是样本中相同数值的个数, t_p 是第 p 组相同数值的样本数。正态分布检验统计量 Z 可表示为

$$Z = \begin{cases} (S-1) / \sqrt{\text{Var}(S)}, & S > 0, \\ 0, & S = 0, \\ (S+1) / \sqrt{\text{Var}(S)}, & S < 0. \end{cases} \quad (4)$$

当 Z 为正数(或负数)时, 样本呈现增加(或减少)的趋势。当 $-Z_{1-\alpha/2} \leq Z \leq Z_{1-\alpha/2}$ 时, 无趋势假设(H_0)通过显著性水平 α 下的双边检验。

Kendall倾斜度可表示单调变化范围, 其计算公式为

$$\text{Slope} = \text{Median} \left(\frac{x_j - x_i}{j - i} \right), \forall i < j (1 < i < j < n). \quad (5)$$

需要注意的是, 由于实际的水储量数据往往具有一定的自相关性, 使用M-K统计检验方法会使趋势计算的显著性被放大, 因此使用TFPW方法对数据的自相关性进行削弱^[26]。本研究趋势计算的置信水平为95%。

2 结果与讨论

2.1 地表水储量变化分析

2002—2016年的地表水储量数据表明, 地表水储量未发生显著变化的区域约占流域总面积的56.61%, 主要分布在河流上游和流域北部地区; 地表水储量显著减少区域的面积约占流域总面积的43.39%, 集中分布于河流干流及尾间地区(图2)。

进一步分析地表水储量的月度数据, 可以得到那河流域地表水储量的季节变化特征(图3)。在夏秋季节, 流域中下游地区的地表水储量显著减少, 说明流域中下游的地表水储量在夏秋季节呈现更为严重的偏枯形势。春季地表水储量变化的分布形势与冬季相似。

2.2 地下水储量变化分析

2002—2016年地下水储量数据(图4)表明, 那河流域地下水储量未发生显著变化的区域约占流域总面积的38.18%, 主要分布在上游和中游地区。地下水储量显著减少区域约占流域总面积的49.03%, 集中分布于流域北部、红水河段和东台吉乃尔湖地区。地下水储量显著增加的区域约占流域总面积的12.79%, 主要位于库拉克阿拉干河段。

进一步分析地下水储量的月度数据, 可以得到那河流域地下水储量的季节变化特征(图5)。春季流域大部分地区地下水储量未发生显著变化。夏季地下水储量变化的分布形势与秋冬季相似。在冬季, 流域大部分地区地下水储量发生显著变化, 其中红水河段和东台吉乃尔湖地区地下水储量显著减少, 而库拉克阿拉干河段及其上游地区地下水储量显著增加, 表明那河流域地下水储量变化在冬季呈现更强的空间异质性。

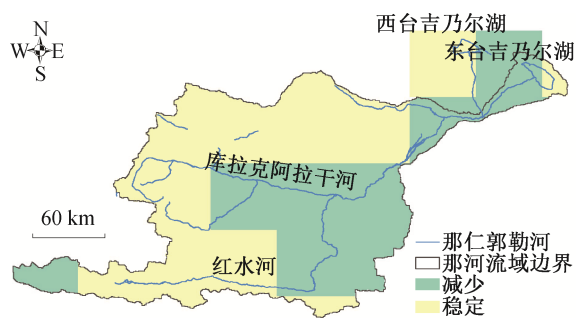


图 2 那河流域地表水储量变化趋势分布
Fig. 2 Trend distribution of surface water reserves in the Narenguole River basin

2.3 地表水与地下水储量变化响应

2.3.1 地表水与地下水储量变化响应分布特征

根据不同的地表水-地下水储量变化趋势,那河流域所有格网单元可划分为6种基本模式的矩阵,如表1所示。每个模式根据地表水和地下水储量分别处于稳定、减少或增加的状态来确定。将6种地表水-地下水储量变化模式作为两者之间的响应类型,可概括为:类型I,地表水和地下水储量均未发生显著变化,即稳定-稳定型;类型II,地表水储量未发生显著变化而地下水储量显著减少,即稳定-减少型;类型III,地表水储量未发生显著变化而地

下水储量显著增加,即稳定-增加型;依此类推^[27]。

如图6所示,在那河流域中,地表水-地下水储量变化响应类型为II类的区域面积最大,约占流域总面积的32.51%。此外,属于类型I,IV和V的区域面积也较大,分别占流域总面积的18.45%,19.16%和17.16%。

那河流域地表水-地下水储量变化响应类型在空间分布上具有显著特点:流域北部地区的地下水储量显著减少(类型II);流域中下游地区的地表水储量显著减少(类型IV, V和VI);中游河段的地表水储量显著减少而地下水无显著变化(类型IV)。这一结果与其他相关研究的结果较为符合。Su等^[28]的研究表明,那河河段频繁发生地表水与地下水转化,地下水与河水水力联系密切。中游河段为季节性河流,河水多入渗补给地下水导致地表水储量减少而地下水储量变化不大。

值得注意的是,库拉克阿拉干河段和尾间地区呈现分布较少的特殊类型,其中库拉克阿拉干河段呈现地表水储量显著减少而地下水储量显著增加的趋势(类型VI),尾间地区相近的东西台吉乃尔湖则分别呈现地下水储量显著增加的趋势(类型III)和地表水及地下水储量显著减少的趋势(类型V)。

由图7可以看出,2002—2016年期间,在秋冬

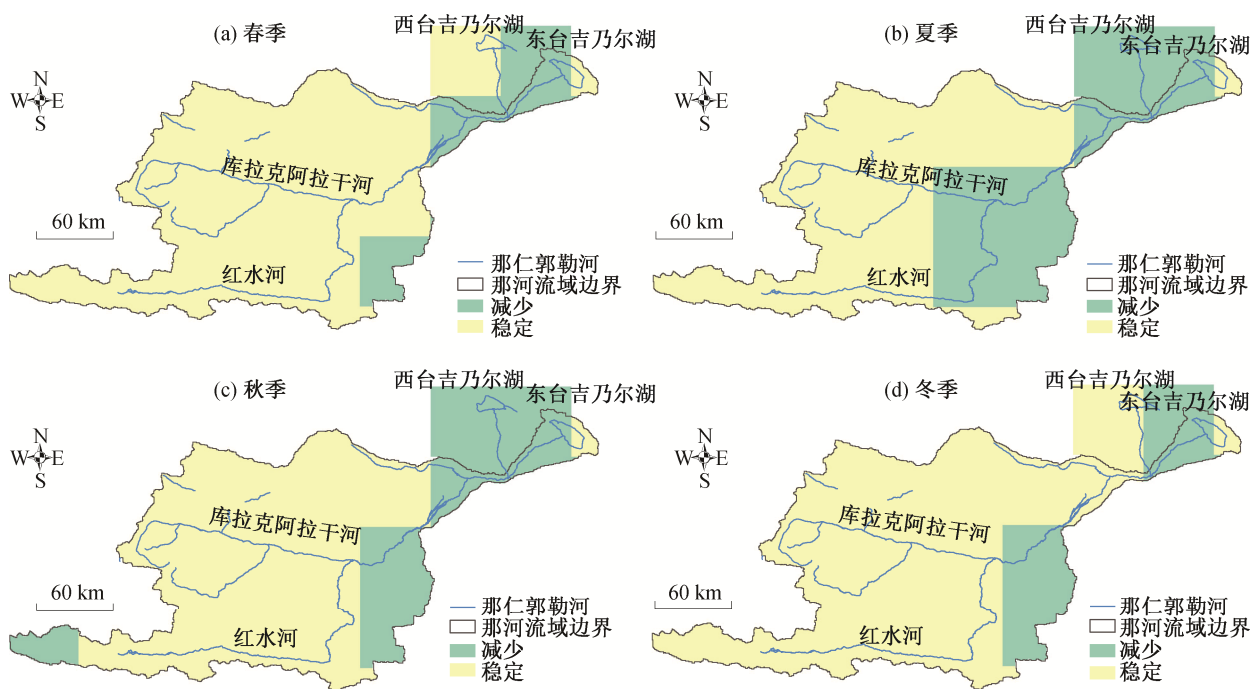


图 3 那河流域地表水储量季节变化趋势
Fig. 3 Seasonal variation of surface water reserves in the Narenguole River basin

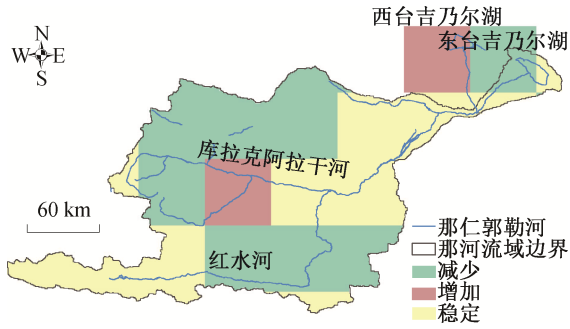


图 4 那河流域地下水储量变化趋势分布
Fig. 4 Trend distribution of groundwater reserves in the Narenguole River basin

季, 类型 III(地下水储量显著增加)多出现在支流库拉克阿拉干河段; 在夏季, 类型 VI(地表水储量显著减少, 地下水储量显著增加)出现在支流库拉克阿拉干河段; 在冬春季节, 类型 V(地表水和地下水储量显著减少)多出现在东西台吉乃尔湖之间。

2.3.2 地表水与地下水储量变化典型响应区分析

基于地表水-地下水储量变化响应类型的空间分布, 选取水储量变化呈非一致性响应的典型地理区为研究对象, 展现典型响应区的地表水和地下水储量的时间序列变化, 同时详细地分析每个典型响应区中地表水和地下水储量变化的原因。

2002—2016年期间, 那河流域北部地区的水储

量呈 S-D 型响应, 地表水储量未发生显著变化, 地下水储量显著减少。陈宗颜等^[8]通过实地调查, 发现工业用水是那河流域的主要耗水部门, 随着格尔木市的生产建设发展, 流域北部地区目前已建设野马泉取水水源地, 开采地下水用于多金属铁矿的采选。从地表水和地下水储量的时间序列(图 8(a))可以发现, 该地区地下水储量呈持续下降趋势。对水储量响应的季节变化分析表明, 该地区地下水储量在 2002—2016 年的各个季节均呈显著减少趋势。该地区的地下水储量周期波动和季节差异不明显, 说明水储量受气候变化影响较小, 结合当地用水现状, 我们认为人为取水是导致地下水储量持续显著减少的主要原因。地下水储量的持续减少极易导致地下水枯竭, 造成地下水降落漏斗和地面塌陷等地质灾害^[4,29]。

2002—2016 年期间, 支流库拉克阿拉干河段的水储量呈 D-I 型响应, 地表水储量显著减少而地下水储量显著增加(图 8(b))。库拉克阿拉干河的源头布喀达坂峰分布大面积的冰川, 河流由冰雪融水补给^[30]。同时, 根据小灶火气象站的观测资料, 那河流域的蒸发量是降水量的 56 倍^[8]。党学亚等^[31]的研究表明, 2000—2016 年格尔木地区气温明显上升。由于气候变暖, 冰川融化加快, 增加了对库拉

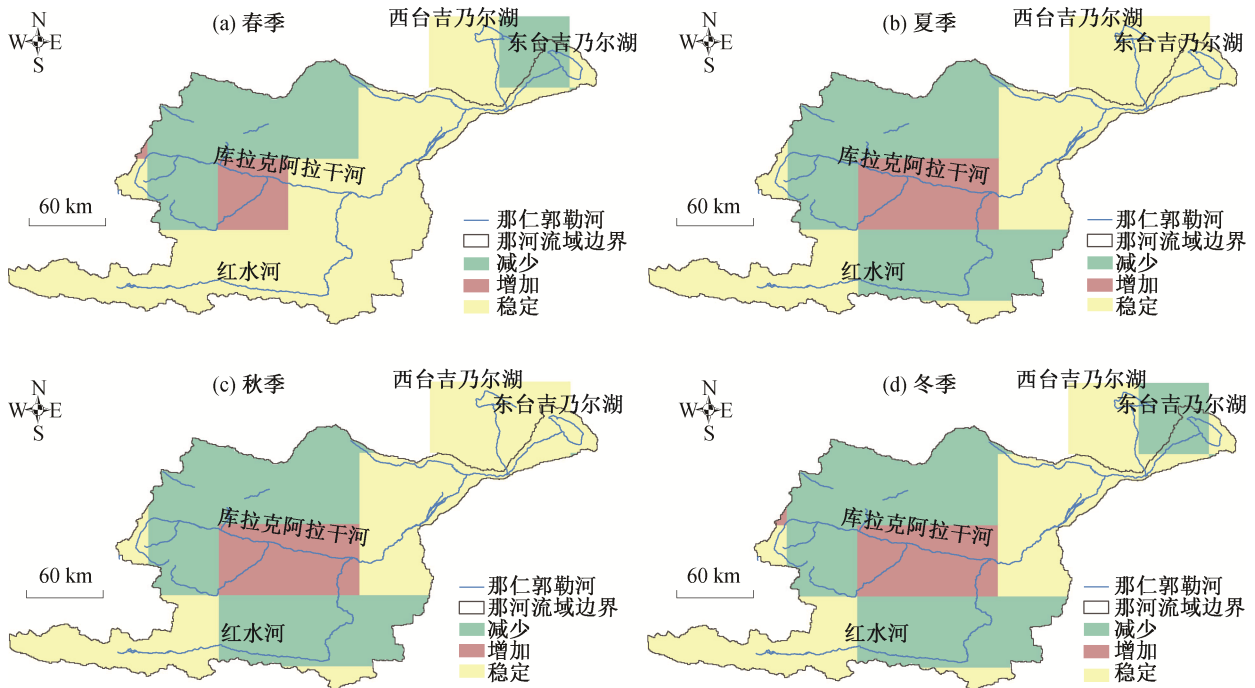


图 5 那河流域地下水储量季节变化趋势
Fig. 5 Seasonal variation of groundwater reserves in the Narenguole River basin

表 1 那河流域呈现的 6 种地表水-地下水储量变化响应
Table 1 Matrix of six basic surface water-groundwater responses in the Nalenggele River basin

地下水	地表水	
	稳定	减少
稳定	类型 I (S-S)	类型 IV (D-S)
减少	类型 II (S-D)	类型 V (D-D)
增加	类型 III (S-I)	类型 VI (D-I)

克阿拉干河段水储量的补给。然而,气温上升加剧地表蒸发作用,导致地表水储量呈减少趋势。

2002—2016 年期间,西台吉乃尔湖水储量呈 S-I 型响应,地表水储量未发生显著变化,地下水储量显著增加(图 8(c))。与西台吉乃尔湖相邻的东台吉乃尔湖水储量呈 D-D 型响应,地表水和地下水储量均显著减少(图 8(d))。

大坝兴建和引水工程是造成两湖水储量呈现不同响应类型的主要原因。在台吉乃尔湖地区早期开发过程中,由于缺少统一的可持续的开发规划,造成各自为政的局面。2008 年,于东台吉乃尔湖西南部修建一条 33 km 的防洪堤,截断两湖的水力联系^[9]。近几年,为了开发盐湖资源,厂矿通过给干涸的盐田注水来溶解固体矿产,解决卤水短缺和固

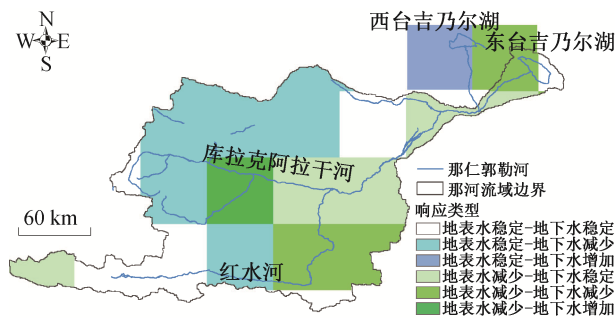


图 6 那河流域水储量变化响应分布
Fig. 6 Response distribution of water reserves in the Narenguole River basin

体资源开采等一系列问题。东台吉乃尔湖水被逐渐引入西台吉乃尔湖西侧的一里坪,导致东台吉乃尔湖泊水储量减少而原本的干盐湖一里坪逐渐扩大^[16],进而使东台吉乃尔湖地表水和地下水储量显著减少,而西台吉乃尔湖地表水储量未发生显著变化,且地下水储量呈现显著增加。

此外,东西台吉乃尔湖地区降水相对丰沛,暖湿化带来融雪和降水的增加是使水储量增加的自然因素^[32]。同时,东西台吉乃尔湖地区是盐湖开采的重点地区^[9],当地采用渠引地表水的方式为盐化工业供水^[8]。此外,工业生产引起西台吉乃尔湖附近

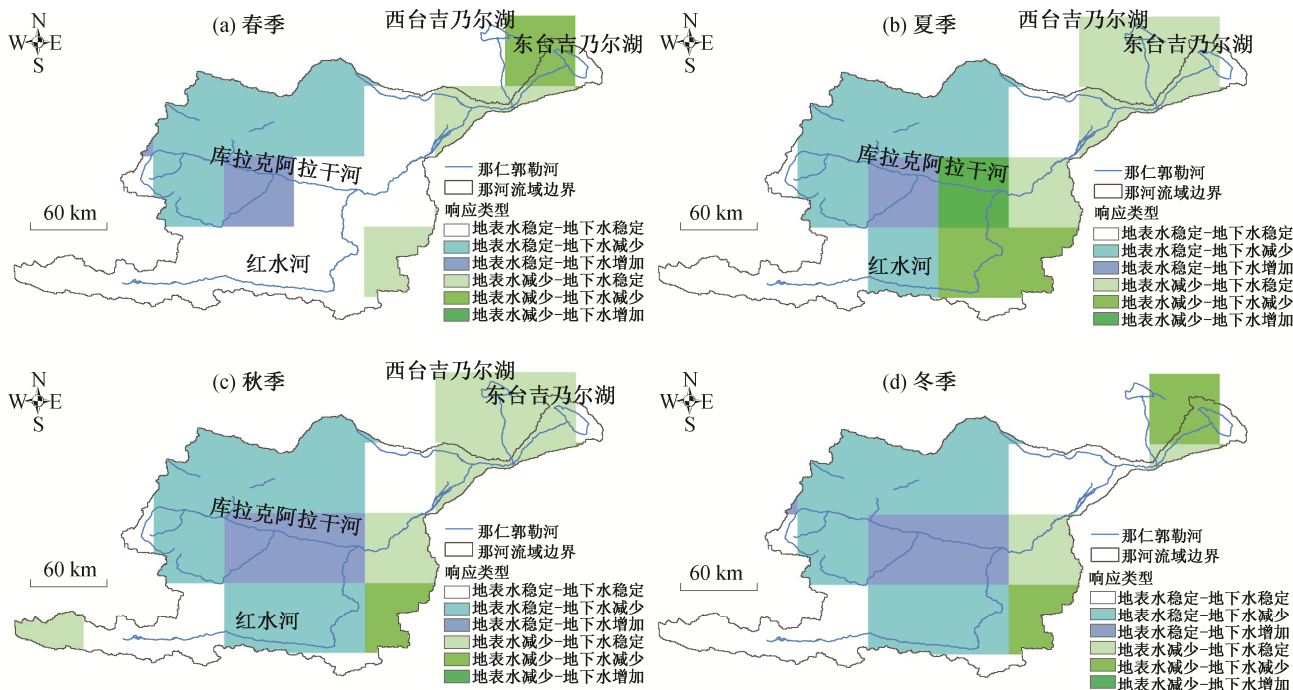


图 7 那河流域水储量季节变化响应分布
Fig. 7 Seasonal response distribution of water reserves in the Narenguole River basin

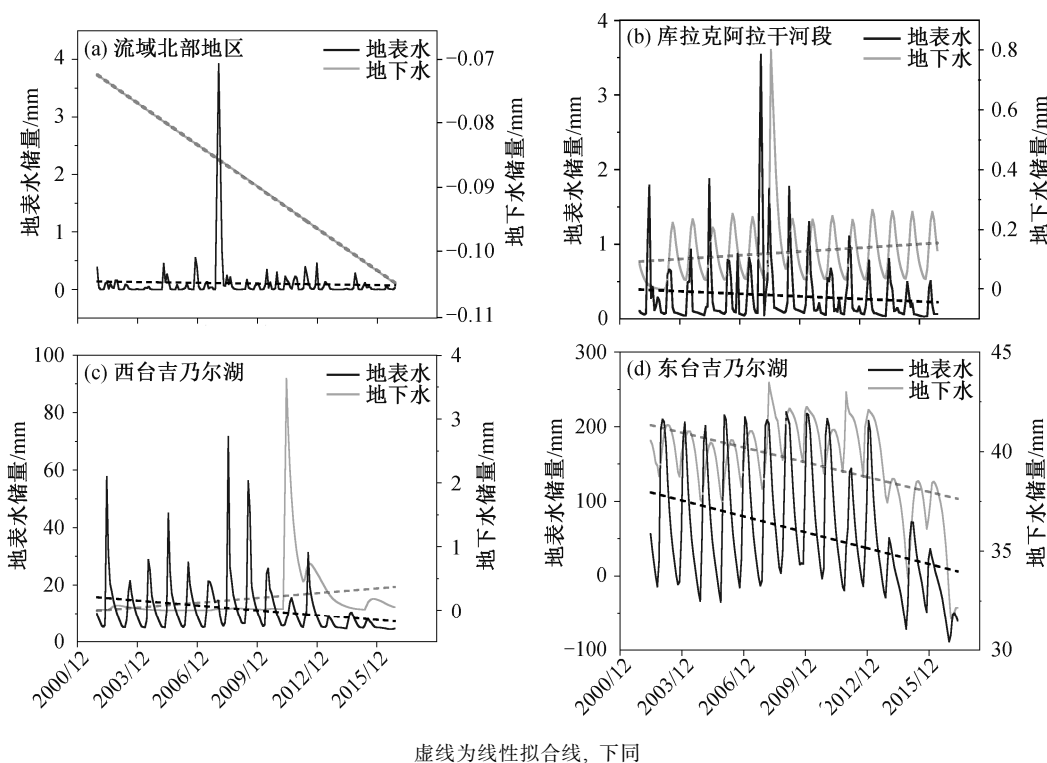


图 8 那河流域水储量变化典型响应区

Fig. 8 Typical response area of the change of water reserves in Narenguole River basin

人口密集,耗水量增加,在一定程度上抵消了自然因素引起的地表水增加,这从另一个角度解释了该地区地表水储量未发生显著变化的可能原因。由此可见,气候暖湿化、工农业生产、建坝引水、人口增加和耗水量增加等综合因素导致东西台吉乃尔湖分别呈现“地表水稳定-地下水增加”和“地表水减少-地下水减少”趋势。

由于湖泊之间的水力联系被人为阻隔,当来水量在短期急增时,台吉乃尔湖区会遭受一定程度的防洪压力^[32]。另外,那河流域尾间地区的景观以稀疏草地和荒漠为主,自然生产力等级低,生态系统

抗干扰能力差,极易发生退化与沙化^[33-34]。对于生态脆弱地区,工业活动的规划需更加谨慎。

2.4 影响因素分析

2.4.1 自然因素

由图 9 可见,温度变化对区域地表水、地下水储量变化具有不同的影响。对温度变化值与地表水变化率进行相关性分析,发现两者之间存在负相关关系($R^2=-0.395, P=0.05$)。从整体上看,地表水储量随着温度的升高而减少(图 9(a))。对温度变化值与地下水变化率进行相关性分析,发现两者之间存在正相关关系($R^2=0.385, P=0.05$),地下水储量总体

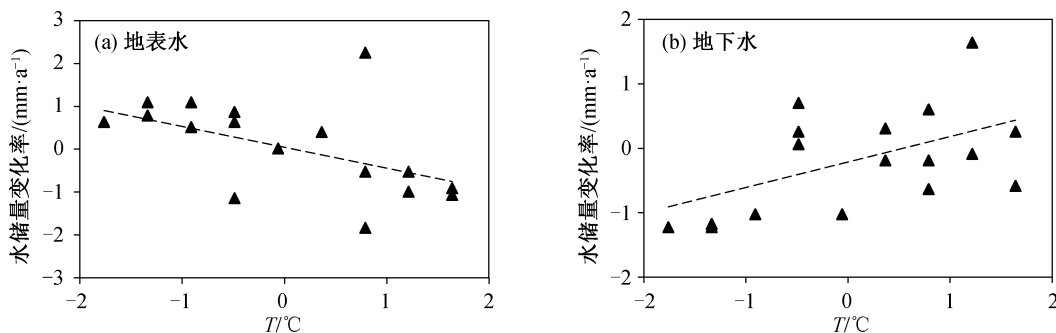


图 9 温度变化对地表水、地下水储量变化率的影响

Fig. 9 Effects of temperature on the change rates of surface and groundwater reserves

上随温度的升高而增加(图 9(b))。

那河流域地处高寒区与干旱区之间, 河水来源主要是冰雪融水, 大气降水量极小^[6]。温度的上升或许加速了那河源头冰川积雪的融化, 增加了对那河流域水储量的补给, 进而导致地下水增加。同时, 那河流域蒸发剧烈, 温度升高导致地表蒸发量增加, 抵消了冰雪融水对地表水的补给效应, 进而导致地表水储量减少。与那河流域相似, 由于蒸发量的增加效应超过降水等的补给, 青藏高原周围地区的湖泊发生萎缩^[35-36]。焦世晖等^[37]发现, 如果未来气温持续升高, 那河等干旱区内陆河的发源地——柴达木盆地南缘和昆仑山南麓的冰川将发生退化, 冻土范围将进一步收缩, 由于冰雪融水是干旱区内陆河的主要补给, 因此将对干旱区内陆河流域的水资源和水生态产生影响。

通过对各响应类型地理区的土壤断面厚度进行统计分析(图 10), 发现地下水储量显著增加的 III 类和 VI 类两种典型响应地区的土壤断面厚度较小。土壤断面厚度越小, 水分在土壤中留存量越少, 留存时间越短, 越有利于地表水对地下水进行补给。

通过对流域降水量变化值、干燥度与水储量变化率进行相关性分析, 发现降水量的变化值和干燥度与地表水及地下水储量变化率的相关性均不显著, 这主要是由于那河流域位于干旱的柴达木盆地, 降水稀少, 流域主要受冰川融水补给, 而上述两个因子对以降水补给为主的流域的影响更为显著^[38]。

2.4.2 人为因素

灌溉因素对区域地表水和地下水储量变化具有不同的影响。通过对灌区的灌溉面积与地表水储量变化率进行相关性分析, 发现两者之间存在负相关关系($R^2=-0.828, P=0.01$), 随着灌溉比重的增加, 地表水储量总体上呈减少趋势(图 11(a))。

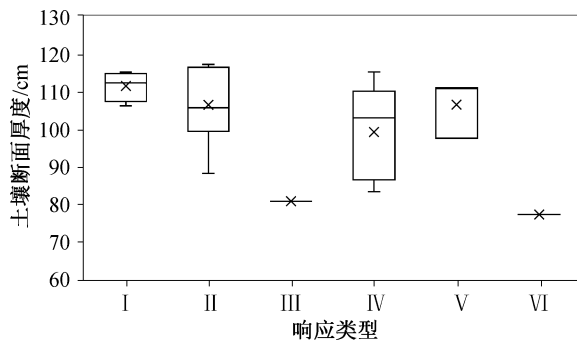


图 10 土壤断面厚度与响应类型的关系
Fig. 10 Relationship between soil profile depth and response patterns

通过对流域的灌溉面积与地下水储量变化率进行相关性分析, 发现两者之间存在正相关关系($R^2=0.452, P=0.05$), 随着灌溉比例的增加, 地下水储量整体上呈增加趋势(图 11(b))。库拉克阿拉干河段是那河流域灌溉较集中的地区, 主要依赖地表水进行灌溉, 或许增加了对地下水的补给。Döll 等^[39]发现, 对于以地表水为主要水源的灌溉地区, 灌溉水流向地下水, 增加了地表水对地下水的补给机会, 导致水储量呈现地表水减少而地下水增加的趋势。

对各响应类型地理区人口密度的统计分析结果(图 12)表明, 地下水储量显著增加的 III 类响应对应地区的人口密度较大。结合那河流域水储量变化响应分布结果, III 类响应多出现在西台吉乃尔湖附近地区。部分原因是西台吉乃尔湖为盐湖工业较集中的地区之一, 工业生产需求导致人口相对密集。结合前面对西台吉乃尔湖地区变化响应的分析可知, 建坝引水、工业和生活耗水增加可能是导致地下水储量增加而地表水储量未发生明显变化的主要原因^[16,32]。

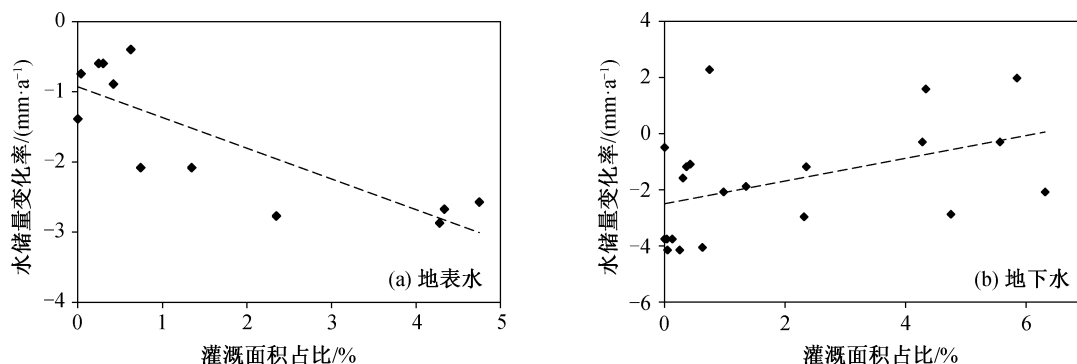


图 11 灌溉面积对地表、地下水储量变化率的影响
Fig. 11 Effects of irrigation on the change rate of surface and groundwater reserves

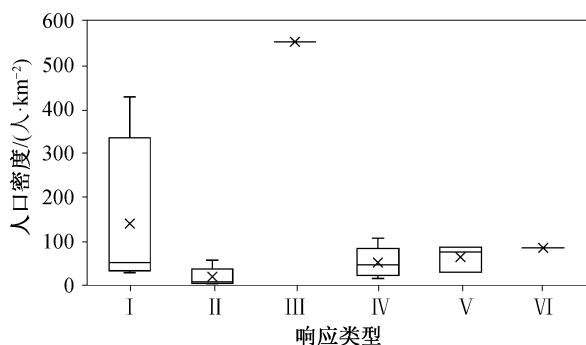


图 12 人口密度与响应类型的关系

Fig. 12 Relationship between population density and response patterns

3 结论

本文通过对那河流域 2001—2016 年地表水和地下水储量变化趋势、响应关系和影响因素的系统分析,发现那河流域地表水和地下水储量分布不均,季节差异明显。那河流域不同区域的地表水与地下水储量变化响应特征差异较大,流域北部呈现“地表水稳定-地下水减少”趋势,库拉克阿拉克干河段呈现“地表水减少-地下水增加”趋势,东西台吉乃尔湖分别呈现“地表水稳定-地下水增加”和“地表水减少-地下水减少”趋势。温度、土壤断面厚度、灌溉因素、建坝引水及人口密度是影响水储量变化的主要因素。自然和人为因素的扰动造成地表水和地下水系统内部与外部之间水资源转化,加剧地表水与地下水储量之间响应关系的非一致性,改变了水资源结构的配置平衡。本文以那河流域为例的地表水和地下水变化响应机制研究结果对寒区、旱区内陆河流域地表水与地下水联合管理及生态环境保护具有借鉴意义。

参考文献

[1] Zhou T, Nijssen B, Gao H, et al. The contribution of reservoirs to global land surface water storage variations. *Journal of Hydrometeorology*, 2016, 17(1): 309–325

[2] Wang J, Song C, Reager J T, et al. Recent global decline in endorheic basin water storages. *Nature Geoscience*, 2018, 11(12): 926–932

[3] Rodell M, Famiglietti J S, Wiese D N, et al. Emerging trends in global freshwater availability. *Nature*, 2018, 557: 651–659

[4] Famiglietti J S. The global groundwater crisis. *Nature Climate Change*, 2014, 4(11): 945–948

[5] Döll P, Mueller Schmied H, Schuh C, et al. Global-scale assessment of groundwater depletion and related groundwater abstractions: combining hydrological modeling with information from well observations and GRACE satellites. *Water Resources Research*, 2014, 50(7): 5698–5720

[6] 朱谱成, 苏小四, 张世广, 等. 那陵郭勒河冲洪积扇地表水-地下水转化关系. *人民黄河*, 2014, 36(7): 60–64

[7] 张磊, 田成成, 张盛生, 等. 那陵郭勒河流域洪积扇中部含水层结构研究. *青海科技*, 2011(6): 42–44

[8] 陈宗颜, 黄勇, 鄂崇毅. 那陵格勒河流域地下水资源开发利用方案分析. *青海师范大学学报(自然科学版)*, 2018, 34(2): 48–54

[9] 王俊响, 刘娟, 潘明强. 青海省那陵格勒河尾间地区应急防洪方案探讨. *人民黄河*, 2018, 40(11): 53–55

[10] Döll P, Kaspar F, Lehner B. A global hydrological model for deriving water availability indicators: model tuning and validation. *Journal of Hydrology*, 2003, 270(1/2): 105–134

[11] Alcamo J, Döll P, Henrichs T, et al. Development and testing of the WaterGAP 2 global model of water use and availability. *Hydrological Sciences Journal*, 2003, 48(3): 317–337

[12] Werth S, Güntner A. Calibration analysis for water storage variability of the global hydrological model WGHM. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2010, 14(1): 59–78

[13] Papa F, Güntner A, Frappart F, et al. Variations of surface water extent and water storage in large river basins: a comparison of different global data sources. *Geophysical Research Letters*, 2008, 35(11): L11401

[14] Döll P, Fiedler K. Global-scale modeling of groundwater recharge. *Hydrology and Earth System Sciences*, 12(3): 863–885

[15] Schmidt R, Petrovic S, Güntner A, et al. Periodic components of water storage changes from GRACE and global hydrology models. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2008, 113: B08419

[16] 王涛. 柴达木盆地那陵格勒河流域水文情况研究[D]. 西宁: 中国科学院青海盐湖研究所, 2007

[17] Lehner B, Verdin K, Jarvis A. New global hydrography derived from spaceborne elevation data. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 2008, 89(10): 93–94

- [18] Shangguan W, Dai Y, Liu B, et al. A China data set of soil properties for land surface modeling. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 2013, 5(2): 212–224
- [19] Harris I C, Jones P D. CRU TS4. 01: Climatic Research Unit (CRU) Time-Series (TS) version 4. 01 of high-resolution gridded data of month-by-month variation in climate (Jan. 1901–Dec. 2016). Centre for Environmental Data Analysis [DB/OL]. (2017) [2019–06–01]. <https://iridl.ldeo.columbia.edu/SOURCES/UEA/CRU/TS4p01/>
- [20] Trabucco A, Zomer R J. Global Aridity Index and Potential Evapo-Transpiration (ET0) Climate Database v2. CGIAR Consortium for Spatial Information (CGIAR-CSI) [DB/OL]. (2018) [2019–06–01]. <https://cgiarcsi.community>
- [21] Goldewijk K K, Beusen A, Doelman J, et al. Anthropogenic land use estimates for the Holocene — HYDE 3. 2. *Earth Syst Sci Data*, 2017, 9(2): 927–953
- [22] Siebert S, Henrich V, Frenken K, et al. Global map of irrigation areas version 5 [EB/OL]. Rheinische Friedrich-Wilhelms-University, Bonn, Germany/Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, Italy, 2013: 1299–1327 [2019–06–01]. https://storage.googleapis.com/fao-maps-catalog-data/geonetwork/aquamaps/gmia_v5_highres.pdf
- [23] 徐宗学, 和宛琳. 黄河流域近 40 年蒸发皿蒸发量变化趋势分析. *水文*, 2005, 25(6): 6–11
- [24] 秦年秀, 姜彤, 许崇育. 长江流域径流趋势变化及突变分析. *长江流域资源与环境*, 2005, 14(5): 589–594
- [25] Yue S, Pilon P, Cavadias G. Power of the Mann-Kendall and Spearman's rho tests for detecting monotonic trends in hydrological series. *Journal of Hydrology*, 2002, 259: 254–271
- [26] Yue S, Wang C. The Mann-Kendall test modified by effective sample size to detect trend in serially correlated hydrological series. *Water Resources Management*, 2004, 18(3): 201–218
- [27] Li L, Ni J, Chang F, et al. Global trends in water and sediment fluxes of the world's large rivers. *Science Bulletin*, 2020, 65(1): 62–69
- [28] Su X, Xu W, Yang F, et al. Using new mass balance methods to estimate gross surface water and groundwater exchange with naturally occurring tracer ^{222}Rn in data poor regions: a case study in northwest China. *Hydrological Processes*, 2015, 29(6): 979–990
- [29] 雷鸣, 孔祥斌, 张雪靓, 等. 黄淮海平原区土地利用变化对地下水资源量变化的影响. *资源科学*, 2017, 39(6): 1099–1116
- [30] Xu W, Zhu P, Yang F. Evaluation of groundwater recharge sources based on environmental tracers in an arid alluvial fan, NW China. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 2019, 319(1): 123–133
- [31] 党学亚, 常亮, 卢娜. 青藏高原暖湿化对柴达木水资源与环境的影响. *中国地质*, 2019, 46(2): 359–368
- [32] 魏善蓉, 金晓媚, 王凯霖, 等. 基于遥感的柴达木盆地湖泊面积变化与气候响应分析. *地学前缘*, 2017, 24(5): 427–433
- [33] 范亚宁, 刘康, 古超. 青海省那棱格勒河下游绿洲区生态环境现状评价. *环境监测管理与技术*, 2017, 29(4): 42–45
- [34] Fan Y, Li H, Miguez-Macho G. Global patterns of groundwater table depth. *Science*, 2013, 339: 940–943
- [35] 姜永见, 李世杰, 沈德福, 等. 青藏高原近 40 年来气候变化特征及湖泊环境响应. *地理科学*, 2012, 32(12): 1503–1512
- [36] 万玮, 肖鹏峰, 冯学智, 等. 卫星遥感监测近 30 年来青藏高原湖泊变化. *科学通报*, 2014, 59(8): 701–714
- [37] 焦世晖, 王凌越, 刘耕年. 全球变暖背景下青藏高原多年冻土分布变化预测. *北京大学学报(自然科学版)*, 2016, 52(2): 249–256
- [38] Wang Y C, Ni J R, Yue Y, et al. Solving the mystery of vanishing rivers in China. *National Science Review*, 2019, 6(6): 1239–1246
- [39] Döll P, Hoffmann-Dobrev H, Portmann F T, et al. Impact of water withdrawals from groundwater and surface water on continental water storage variations. *Journal of Geodynamics*, 2012, 59: 143–156