

DOI: 10. 20040/j. cnki. 1000-7709. 2023. 20221012

青海湖流域基流演变规律及影响因素研究

姬海娟^{1,2}, 李晓东^{1,2}, 汪清旭³

(1. 青海省气象科学研究所, 青海 西宁 810001; 2. 青海省防灾减灾重点实验室, 青海 西宁 810001;
3. 青海省水文水资源测报中心, 青海 西宁 810099)

摘要: 为揭示青海湖流域的基流演变和时空变化规律, 基于青海湖布哈河流域和沙柳河流域的径流资料, 利用滤波平滑最小值法计算每年的基流指数, 采用 TFPW-MK 法分析该流域基流时空变化和基流演变规律, 并分析了基流的影响因素。结果表明, 布哈河流域的基流指数呈增大—减小—增大的变化, 5月达到了最大值, 8月达到了最小值; 沙柳河流域的基流指数呈减小—增大的变化, 4月达到最小值。布哈河流域和沙柳河流域的年均径流量呈显著增加趋势, 年均基流量和基流指数均呈不显著增加趋势; 布哈河流域基流倾向率是沙柳河流域的2倍。布哈河流域和沙柳河流域的基流序列受到降水、流量、干旱指数和蒸发的影响较大, 沙柳河流域受到蒸发的影响更为显著。

关键词: 青海湖; 布哈河流域; 沙柳河流域; 基流; 基流指数

中图分类号: TV121; P333

文献标志码: A

文章编号: 1000-7709(2023)07-0019-04

1 概况

青海湖位于我国青藏高原高寒高山区、西北干旱区和东部季风区三大自然区的交汇处, 具有极为重要的生态地位。作为青海湖流域内长度最长、流域面积最大的河流, 布哈河流域面积为 14 500 km²^[1], 布哈河多年平均年径流量约占青海湖流域总径流量的 53.6%^[2], 河流位于青海省天峻县境内, 最终在鸟岛附近注入青海湖。沙柳河是青海湖流域第二大河流, 流域面积占青海湖流域的 1/12, 年径流量占 1/5^[3,4], 发源于刚察县境内^[5], 最终汇入青海湖。作为青海湖两大支流, 流域内植被类型齐全, 相对高差较大, 整个流域较周边地区相对封闭和完整^[4], 是研究基流演变规律的典型流域(图 1)。本文通过采用布哈河流域和沙柳河流域长时间序列的水文和气象资料, 采用滤波平滑最小值法计算流域基流并结合统计的方式, 分析两河流基流的时空变化规律并探讨影响河流基流变化的因素, 对青海湖流域维持河流

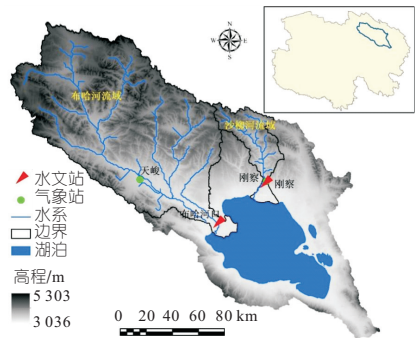


图 1 青海湖流域概况及观测站点分布情况
Fig. 1 Overview of the Qinghai Lake Basin and distribution of observation sites

生态等问题具有重要的理论价值和现实意义。

2 数据与方法

2.1 数据来源

水文数据包括布哈河流域(1961~2020年)和沙柳河流域(1976~2020年)的逐日径流数据, 来源于青海省水文水资源勘测中心。气象数据为流域内天峻站(1961~2020年)和刚察站(1976~2020年)的降水数据及 5、10、15、20 cm 的地温数

收稿日期: 2022-05-14, 修回日期: 2022-08-08

基金项目: 青海省科技厅创新平台建设专项(2022-ZJ-Y11); 国家自然科学基金项目(41961012); 第二次青藏高原综合科学考察研究项目(2019QZKK0106); 青海省气象局面上项目(QXMS2022-45)

作者简介: 姬海娟(1992-), 女, 助理工程师, 研究方向为生态水文气象, E-mail: Hhu201510@163.com

通讯作者: 李晓东(1985-), 男, 高级工程师, 研究方向为生态水文气象, E-mail: 5503811xd@163.com

据和蒸发数据,来源于青海省气象局。干旱指数数据(1961~2020年)的元数据为CRU高分辨率月降水和温度值与观测值同化出的scPDSI值地表气候数据集CRU TS 2.1^[6],空间分辨率为 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$,来源于欧洲气候中心。

2.2 研究方法

利用滤波平滑最小值法分割基流,首先按照时间步长法将布哈河流域和沙柳河流域的连续逐日径流序列划分为不重叠的新序列,再将新序列中的最小值 Q_i 作为研究序列, Q_i 为基流过程线的拐点,并利用插值法计算出其他拐点,连线得到基流过程线。布哈河和沙柳河流域面积较大,划分步长不宜过短,取步长为5d^[7]。

在基流分割中,认为基流的变化幅度较小且相对稳定,因此将逐日径流量作为高频信号和低频信号的叠加,从而得到基流值^[7]。再者滤波算法由于参数少,操作简单,在基流分割中运用广泛^[8],滤波公式为:

$$Q_{k,t} = \alpha Q_{k,t-1} - (\alpha + 1)(Q_t - Q_{t-1})/2 \quad (1)$$

式中, $Q_{k,t}$ 、 $Q_{k,t-1}$ 分别为 t 、 $t-1$ 时刻的流量; α 为基流衰退系数。

为剔除受到异常值的干扰,TFPW-MK方法(Trend-Free Pre-Whitening)相较于传统的MK检验方法,剔除了数据序列的自相关性对数据序列趋势变化的影响,分为去趋势和预置白两个过程,在分析基流的空间分布时利用TFPW-MK方法避免了自相关系数的计算偏差。主要过程如下。

(1)计算基流序列的倾斜度 β ,若 β 接近于零,则认为待检序列是独立数据,可直接使用Mann-Kendall的非参数检验方法,否则需计算倾斜度 β :

$$\beta = \text{Median} \frac{x_j - x_i}{j - i} \quad \forall j > i; i, j = 1, 2, \dots, n \quad (2)$$

式中, x_i 、 x_j 均为系列样本值; n 为序列值。

(2)计算去趋势项后的一阶自相关系数,新生成的序列需要保留原序列的趋势变化且剔除了自相关性的影响,并对 r_1 进行显著性检验($\alpha=0.1$):

$$r_1 = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} (x_i - \bar{x}_i)(x_{i+1} - \bar{x}_{i+1})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n-1} (x_i - \bar{x}_i)^2 \sum_{i=1}^{n-1} (x_{i+1} - \bar{x}_{i+1})^2}} \quad (3)$$

$$r_a = 1.676 / [\sqrt{(n-2)} + 1.676^2] \quad (4)$$

式中, r_1 为去趋势项后的一阶自相关系数; r_a 为显著性检验值; \bar{x}_i 、 \bar{x}_{i+1} 均为样本均值。

(3)对新生成的时间序列项利用Mann-

Kendall的非参数检验方法估计单调趋势的显著性,计算统计量 Z 值:

$$Z = \begin{cases} (s_k + 1) / \sqrt{\text{Var}(s_k)} & s_k < 0 \\ 0 & s_k = 0 \\ (s_k - 1) / \sqrt{\text{Var}(s_k)} & s_k > 0 \end{cases} \quad (5)$$

其中

$$s_k = \sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(x_j - x_i)$$

$$\text{Var}(s_k) = n(n-1)(2n+5)/18$$

$$\text{sgn}(x_j - x_i) = \begin{cases} 1 & x_j > x_i \\ 0 & x_j = x_i \\ -1 & x_j < x_i \end{cases}$$

式中, Z 为统计量; $\text{Var}(s_k)$ 为方差; sgn 为符号函数。

3 结果与分析

3.1 基流量和基流指数时间变化特征

通常将单位时间内的基流量与总径流的比值称为基流指数^[1,3]。布哈河流域的年内径流量集中在汛期的6~9月,占全年的81.3%,流量自6月明显增多,7月达到流量峰值,自10月起流量缓慢回落。布哈河流域的基流指数变化形式呈增大—减小—增大变化,5月达到最大值0.46,8月达到最小值0.43(图2(a))。

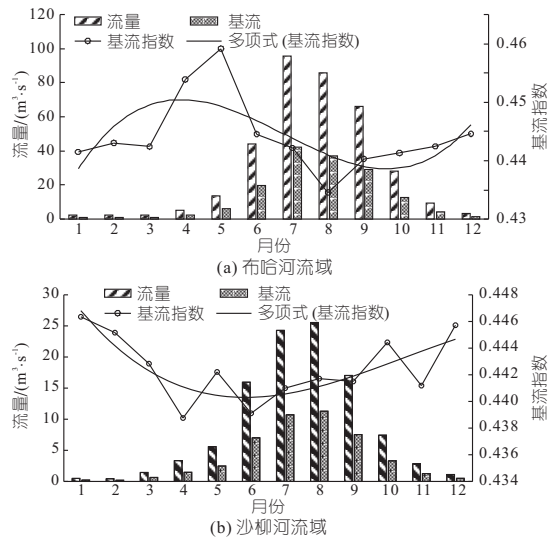


图2 布哈河流域、沙柳河流域多年径流量、基流量和基流指数年内变化

Fig. 2 Annual changes of runoff, base flow and BFI in the Buha River Basin and Shaliu River Basin

沙柳河流域的年内径流量集中在汛期6~9月,占全年的78.5%,且6、9月的径流量值相当,沙柳河流域流量自3月呈缓慢增多趋势,8月达到流量峰值,自10月起流量缓慢回落。沙柳河流域的基流指数呈先减小后增加的趋势,1~4月呈减小趋势,4月达到最小值为0.43,5月开始增加

(图 2(b))。

对径流量、基流和基流指数序列进行线性回归趋势分析。1961~2020 年,布哈河流域年均径流量为 359 m³/s,呈显著增加趋势,年均基流量为 158 m³/s,基流指数为 0.44,均呈不显著上涨趋势(图 3(a))。1976~2020 年沙柳河年均径流量为 105 m³/s,呈显著增加趋势,年均基流量为 47 m³/s,基流指数为 0.44,均呈不显著上涨趋势(图 3(b))。径流量变化趋势比基流变化趋势显著,基流变化受到包气带调蓄作用和下渗过程影响,说明布哈河流域和沙柳河流域受人类活动和下垫面变化的影响较小,不会对河道产汇流产生较大影响。

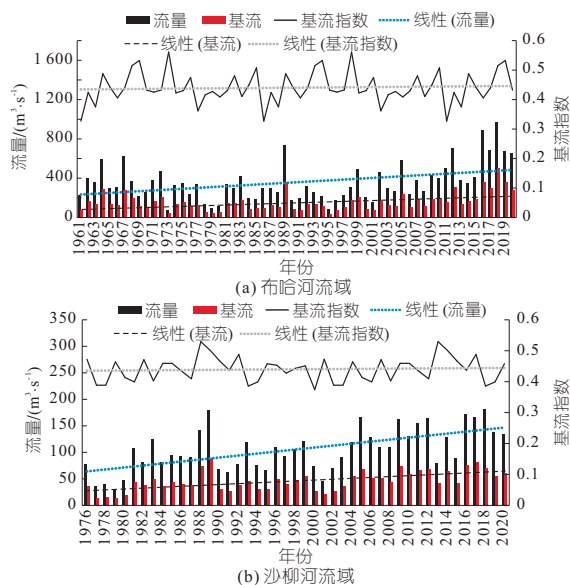


图 3 布哈河流域、沙柳河流域多年径流量、基流量和基流指数年际变化

Fig. 3 Multi-year runoff, base flow and interannual variation of BFI in the Buha River Basin and Shaliu River Basin

3.2 基流量和 BFI 空间变化特征

采用 TFPW 法分别计算布哈河和沙柳河的一阶自相关系数 r_1 ,布哈河流域序列长度为 60,沙柳河流域序列长度为 45,进行显著性检查得到的布哈河流域、沙柳河流域 r_a 值分别为 0.215、0.248,均为 $\alpha=0.1$ 的水平。两流域的一阶自相关系数分别为 0.337、0.321。可以看出,流域间存在不同程度的自相关性,年均序列中两流域的自相关性达到了 $\alpha=0.1$ 的显著性水平,即 $r_1 > r_a$,进而对径流序列进行趋势分析。

对布哈河流域和沙柳河流域进行趋势检验,根据公式计算得到布哈河流域基流量的统计量 Z 值为 4.14,沙柳河的 Z 值为 2.37,均达到了 $\alpha=0.1$ 的显著水平,基流呈增加趋势,布哈河流域的基流增加趋势明显高于沙柳河流域的增加趋势。从倾斜角度看,布哈河流域、沙柳河流域的 β 值分

别为 0.12、0.07,明显布哈河流域基流量的上升速率高于沙柳河流域基流量的上升速率,计算得到布哈河流域、沙柳河流域基流的气候倾向率分别为 19.8、8.2 m³/(s·10a),布哈河流域基流变化率是沙柳河流域的两倍,首先认为布哈河流域的数据时间序列较长,能更好地反映基流的年际变化情况,再者布哈河流域面积较沙柳河流域面积大,流域内下垫面条件不同导致布哈河流域径流调蓄作用较沙柳河流域径流调蓄作用强烈。

3.3 基流量的影响因素分析

为探讨基流对气候因子的敏感程度,选取降水、帕默尔干旱指数、5 cm 地温、10 cm 地温、15 cm 地温、20 cm 地温和蒸发等关键因子进行相关性分析(表 1)。布哈河流域基流与降水、流量和帕默尔干旱指数均呈正相关关系,其值分别为 0.7、1.0、0.5,与蒸发呈负相关,其值为 -0.5;沙柳河流域的基流同样受到降水、流量、帕默尔干旱指数和蒸发的影响,其值分别为 0.7、0.1、0.6、-0.8。沙柳河地处青海湖流域东部,流域面积小且土壤结构以砂质土壤为主导致基流受蒸发的影响较大。

表 1 布哈河流域、沙柳河流域因子相关系数矩阵
Tab. 1 Factor correlation coefficient matrix of Buha River Basin and Shaliu River Basin

流域	指标	帕默尔干旱指数								
		干旱指数	流量	基流	降水	5 cm 地温	10 cm 地温	15 cm 地温	20 cm 地温	蒸发
布哈	帕默尔干旱指数	1.0								
柳	流量	0.5	1.0							
柳	河基流	0.5	1.0	1.0						
柳	降水	0.6	0.7	0.7	1.0					
柳	5 cm 地温	0.4	0.1	0.1	0.3	1.0				
柳	10 cm 地温	0.4	0.1	0.1	0.3	1.0	1.0			
柳	15 cm 地温	0.4	0.1	0.1	0.2	1.0	1.0	1.0		
柳	20 cm 地温	0.4	0.1	0.1	0.3	0.9	1.0	1.0	1.0	
柳	蒸发	-0.7	-0.5	-0.5	-0.6	-0.2	-0.2	-0.2	-0.2	1.0
沙	帕默尔干旱指数	1.0								
柳	流量	0.6	1.0							
柳	河基流	0.6	1.0	1.0						
柳	降水	0.5	0.7	0.7	1.0					
柳	5 cm 地温	0.0	0.0	0.0	-0.1	1.0				
柳	10 cm 地温	0.0	-0.1	-0.1	-0.2	1.0	1.0			
柳	15 cm 地温	-0.1	0.0	0.0	-0.1	0.9	1.0	1.0		
柳	20 cm 地温	0.0	-0.1	-0.1	-0.2	0.9	1.0	1.0	1.0	
柳	蒸发	-0.5	-0.8	-0.8	-0.5	0.3	0.3	0.3	0.3	1.0

综上所述,本文利用统计方法探讨了气象因子对基流的影响,其他气象因子均未涉及。但流域下垫面条件复杂、湖泊调蓄作用较大及近年来人类活动频繁,会导致河流水量平衡和水循环发生显著变化。因此,对于高原上流域的基流演变规律和影响因素,未来应考虑气候变化和人类活动对流域基流的影响,需深入研究。

4 结论

a. 布哈河流域的基流指数呈增大—减小—增大变化,沙柳河流域的基流指数呈减小—增加的趋势。布哈河流域年均径流量为 359 m³/s,年

均基流量为 $158 \text{ m}^3/\text{s}$,基流指数为 0.44;沙柳河年均径流量为 $105 \text{ m}^3/\text{s}$,年均基流量为 $47 \text{ m}^3/\text{s}$,基流指数为 0.44。布哈河流域和沙柳河流域的径流量均呈显著增加趋势,基流和基流指数均呈不显著增加趋势,且根据气候倾向率得布哈河流域基流的变化率大于沙柳河流域的变化率,可能与流域下垫面和流域面积相关。

b. 布哈河流域和沙柳河流域的基流序列与降水、流量、干旱指数均呈正相关关系,与蒸发序列呈负相关关系,沙柳河流域的基流序列更容易受到蒸发的影响。

c. 青海湖流域是高原上重要的水体,主要讨论了气象因子对流域基流的影响,未来应考虑气候变化和人类活动对流域基流的影响,引入多要素进行研究。

参考文献:

[1] 周一飞,陈慧颖,张淑兰,等. 基于 SWIM 模型模拟气候变化对青海湖布哈河流域水文过程的影响[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2017, 53(2):208-214.

[2] 王欢,刘九夫,谢自银,等. 青海湖流域径流变化趋势及归因分析[J]. 水电能源科学, 2018, 36(8): 18-21,32.

[3] CUI B L, LI X Y. Stable isotopes reveal sources of precipitation in the Qinghai Lake Basin of the north-eastern Tibetan Plateau[J]. Science of the total environment, 2015, 527-528:26-37.

[4] 雷义珍,曹生奎,曹广超,等. 青海湖沙柳河流域不同时期地表水与地下水的相互作用[J]. 自然资源学报, 2020(10):2528-2538.

[5] 王志刚,曹生奎,曹广超,等. 气候异常年份青海湖沙柳河流域降水水汽来源对比研究[J]. 高原气象, 2022,41(5):1153-1160.

[6] MITCHELL T D, JONES P D. An improved method of constructing a database of monthly climate observations and associated high-resolution grids [J]. International journal of climatology, 2005, 25(6):693-712.

[7] 张泳华,刘祖发,赵钢铁,等. 东江流域基流变化特征及影响因素[J]. 水资源保护, 2020, 36(4): 75-81.

[8] ECKHARDT K. A comparison of baseflow indices, which were calculated with seven different baseflow separation methods [J]. Journal of hydrology, 2008, 352(1/2):168-173.

Study on Base-flow Evolution Law and Its Causes of Qinghai Lake Basin

JI Hai-juan^{1,2}, LI Xiao-dong^{1,2}, WANG Qing-xu³

(1. Qinghai Institute of Meteorological Sciences, Xining 810001, China; 2. Qinghai Key Laboratory of Disaster Prevention and Reduction, Xining 810001, China; 3. Qinghai Hydrological and Water Resources Measurement and Reporting Center, Xining 810099, China)

Abstract: Based on the runoff data of Buha River Basin and Shaliu River Basin in Qinghai Lake Basin, the annual base-flow index was obtained by using the filter smoothing minimum method. The temporal and spatial variation of precipitation and the evolution law of base flow in this basin were analyzed by TFPW-MK method, and the influencing factors of base flow were analyzed. The results show that the base-flow index of Buha River Basin first increases, then decreases and increases, reaching the maximum in May and the minimum in August; The base flow index of Shaliu River Basin fluctuates and reaches the minimum in April. The annual average runoff in the Buha River Basin and the Shaliu River Basin showed a significant increasing trend, and both the annual average base flow and base flow index showed an insignificant increasing trend; The base flow inclination rate of the Buha River Basin is twice that of the Shaliu River Basin. The base flow sequence of the Buha River Basin and the Shaliu River Basin is greatly affected by precipitation, flow, drought index and evaporation, and the Shaliu River Basin is more significantly affected by evaporation.

Key words: Qinghai Lake; Buha River; Shaliu River Basin; base flow; base flow index

(上接第 67 页)

Comprehensive Evaluation and Analysis of Water Environment

Quality of Main Water System in Chengde Area

ZHANG Wei^{a,b,c}, GU Jin-yang^{a,b,c}, SUN Ye^{a,b,c}, DAI Meng-de^{a,b,c},
ZHANG Xing-chen^{a,b,c}, YUN Qian^{a,b,c}, LI Si-min^{a,b,c}

(a. Hebei Technology Innovation Center for Water Pollution Control and Water Ecological Remediation;

b. Hebei Engineering Research Center of Sewage Treatment and Resource Utilization;

c. Handan Key Laboratory of Water Utilization Technology, Hebei University of Engineering, Handan 056038, China)

Abstract: In order to explore the water quality and pollution characteristics of the main water system in Chengde area, the monitoring data of 29 sections of Chengde surface water quality monitoring station from 2017 to 2020 were selected, and the water environment quality of the main water system in Chengde area was comprehensively evaluated by single factor evaluation, comprehensive pollution index and principal component analysis. The evaluation results show that generally speaking, the overall water quality of the main water system in Chengde is good from 2017 to 2020; From the perspective of time, the water quality of the main water system in Chengde in 2019 and 2020 was significantly improved compared with 2017 and 2018; From the perspective of space, the section pollution of Gonghou and Chenggang bridges is relatively serious. The water quality of the main water system in Chengde is mainly affected by the total phosphorus, COD and permanganate index.

Key words: Chengde City; water quality evaluation; single factor evaluation method; comprehensive pollution index method; principal component analysis method