

# 变化环境下“中华水塔”水资源及产流 规律变化分析研究

孙永寿<sup>1</sup>, 李燕<sup>1</sup>, 杨芳<sup>1</sup>, 刘义花<sup>2</sup>

(1. 青海省水文水资源测报中心, 青海 西宁 810001; 2. 青海省气候中心, 青海 西宁 810001)

**摘要:** 受全球气候变暖的影响,“中华水塔”地区正面临着以“变暖变湿”为主的气候变化。受气候及下垫面条件的综合影响,区域水资源显著增加,各流域产流机理在空间上呈现出明显的地区差异特征。基于“中华水塔”区域1956—2020年水文气象资料,通过趋势、突变、距平等分析方法,分析其水文要素和产流规律的变化趋势、特征及相互之间影响关系。结果表明:近年来“中华水塔”区域气温显著升高,蒸发能力总体增强,区域进入丰水期,降水、径流显著增加,在同等降水径流尺度下,黄河源区产流能力有所降低,长江、澜沧江源区产流能力明显增强;气温升高、降水量持续偏丰以及流域前期影响雨量(蓄水量)增加、枯季径流比例提高、下垫面生态持水能力增强是引起区域产流规律变化、水资源量增加的主要原因。

**关键词:** 水资源; 环境变化; 产流规律; 水文气象要素; 中华水塔

中图分类号:TV121

文献标识码:A

文章编号:1672-643X(2023)03-0055-09

## Corresponding changes of water resources and runoff generation mechanism in “China Water Tower” under changing environment

SUN Yongshou<sup>1</sup>, LI Yan<sup>1</sup>, YANG Fang<sup>1</sup>, LIU Yihua<sup>2</sup>

(1. Hydrological and Water Resources Forecast Center of Qinghai Province, Xining 810001, China;

2. Qinghai Climate Center, Xining 810001, China)

**Abstract:** Under the impact of global warming, China Water Tower is undergoing warming and wetting dominated climate change. Affected by the influence of climate and underlying surface conditions, the water resources increased significantly in this area, and the runoff mechanism showed obvious regional differences. Based on the data of hydrometeorological elements in China Water Tower from 1956 to 2020, we analyzed the hydrological elements, the change and trend characteristics of runoff capacity, as well as the mutual influencing mechanism among them, using trend, abrupt change and anomaly analysis methods. The results show that during the study period, the air temperature and evaporation capacity have all increased, resulting in a significant increase in precipitation and runoff, which indicates that the study area has entered the wet season. At the same precipitation and runoff scale, the runoff capacity decreased in the source area of the Yellow River, but increased in that of the Yangtze River and Lancang River. The increased temperature, continuously abundant rainfall, initial rainfall increase of the basin, increased runoff in dry season and enhanced ecological water holding capacity of the underlying surface are the main reasons for the change of runoff capacity and the increase of water resources in China Water Tower area.

**Key words:** water resources; environmental change; runoff generation mechanism; hydrometeorological element; China Water Tower

收稿日期:2022-08-29; 修回日期:2022-11-23

基金项目:青海省科技厅基础研究计划项目(2021-ZJ-757);青海省“高端创新人才千人计划”项目;第二次青藏高原综合科学考察研究项目(2019QZKK0203-07)

作者简介:孙永寿(1979—),男,青海平安人,本科,高级工程师,研究方向为水文、水资源。

通讯作者:杨芳(1984—),女,河南新野人,学士,工程师,研究方向为水文、水资源。

## 1 研究背景

“中华水塔”位于世界“第三极”青藏高原腹地,是长江、黄河、澜沧江的发源地,是我国重要的水源地,是维系青藏高原生态系统和周边地区生态平衡的重要安全屏障。其特殊的地理位置、丰富的自然资源使其成为我国重要的生态功能区,生态地位极为重要。

受全球气候变暖的影响,青藏高原“三江源”地区正在面临着以“变暖变湿”为主的气候变化<sup>[1]</sup>。20世纪90年代至今,青海省及“中华水塔”区域水资源经历了由枯转丰的显著变化,以2005年青海湖水位由下降转为上升<sup>[2]</sup>为界,源区进入丰水周期,水资源情势呈现出新的变化。据资料显示,青海“三江源”地区2005—2020年平均水资源量较1956—2004年增加了20.8%<sup>[3]</sup>。“中华水塔”区域地势高峻,气候干寒,自然条件恶劣,是我国乃至亚洲气候变化的“敏感区”和“指示器”,区域内人口稀少,人类活动对水资源的影响轻微,气候变化是影响“中华水塔”区域水资源情势变化的重要驱动因子。目前国内外学者已有对该区域的研究成果,主要对部分流域水文气象要素变化特征、变化趋势、气候变化对径流响应等<sup>[4-14]</sup>方面进行了研究。本文引进不同频率同等尺度,以“中华水塔”区域为研究区,分析了不同流域各水文要素和产流规律的变化特征、演变趋势及相互之间的影响机理,重点分析2005年以来的变化情况。气候暖湿化导致区域内冰川融化、水循环过程加快,进而影响了流域的水文过程,使流域产流机理及水资源时空分布均发生了改变,分析气候变化所带来各水循环要素的变异特征、演变规律及相互之间的影响关系,对保护“中华水塔”具有十分重要的科学意义。

## 2 资料来源及方法

### 2.1 研究区概况

“中华水塔”位于青藏高原东北部,青海省南部的“三江源”地区,地理位置为东经 $89^{\circ}24' \sim 102^{\circ}59'$ ,北纬 $31^{\circ}39' \sim 37^{\circ}10'$ ,流域范围涉及青海省境内黄河、长江、澜沧江和部分西北内陆区,行政区包括青海省玉树、果洛、海南、黄南州及格尔木市的唐古拉山镇,面积为 $38.87 \times 10^4 \text{ km}^2$ ,占青海省总面积的52.9%。源区地势高耸,地形复杂,海拔在3335~6564 m之间,以山原和峡谷地貌为主,区内水系发育,湖泊、湿地、冰川众多,河流具有河网密度大、流

程长、径流量大的特点。

### 2.2 数据来源

本文主要采用“中华水塔”区域1956—2020年共65 a系列的气温、降水、蒸发、径流等水文气象资料进行分析。受资料条件限制,气温资料采用1960—2020年61 a系列。为保证资料系列的同步性,对部分缺测数据,选取邻近的参证站建立相关关系进行了插补。气温、降水、蒸发选取各流域面上分布较均匀且资料条件好的代表站,径流选取“中华水塔”区域黄河唐乃亥、长江直门达、澜沧江香达等源区主要河流控制水文站。

### 2.3 研究方法

主要采用Kendall检验法、Spearman检验法、线性趋势回归检验法、Mann-Kendall(M-K)突变检验、距平分析等分析方法<sup>[15]</sup>。通过Kendall、Spearman、线性趋势回归检验3种方法对各水文气象要素年际变化进行线性趋势显著性检验,在给定的显著性水平下,若其中有两种方法判断为显著,即判定为趋势显著;采用Mann-Kendall(M-K)非线性趋势检验法进一步检验水文序列的突变性,反映各水文要素在时间上的异变规律;通过数理统计的方法,引进同等降水、径流尺度,采用距平法分析量化前后时期各水文要素和产流规律变化特征,从而揭示“中华水塔”各要素、产流机理在区域上的差异特征、变化趋势及相互之间的影响关系。“中华水塔”区域水系及采用的水文、气象站点分布见图1。

## 3 水文气象要素变化分析

### 3.1 气温变化分析

将研究区1960—2020年各气象站年平均气温取平均值,分析各源区及整个区域的气温变化趋势,并进行区域M-K突变检验,结果见图2和表1。由图2和表1可知,1960—2020年黄河、长江、澜沧江源区多年平均气温分别为 $-0.2$ 、 $-2.1$ 、 $2.7$  °C,从线性变化趋势来看,1960—2020年期间各源区平均气温分别上升了 $2.3$ 、 $2.1$ 、 $2.3$  °C,上升倾向率分别为 $0.373$ 、 $0.348$ 、 $0.372$  °C/10a。经趋势检验分析,在显著性水平 $\alpha = 0.05$ 下,平均气温均呈显著上升趋势(表1)。经M-K突变检验,整个区域气温突变年份发生在2000年。

对研究区各季节气温变化的分析表明,春、夏、秋、冬四季平均气温也呈现出显著的上升趋势,倾向率分别为 $0.24$ 、 $0.33$ 、 $0.42$ 、 $0.50$  °C/10a,其中冬季升温最为显著。



图 1 “中华水塔”区域河流水系及采用的水文、气象站点分布

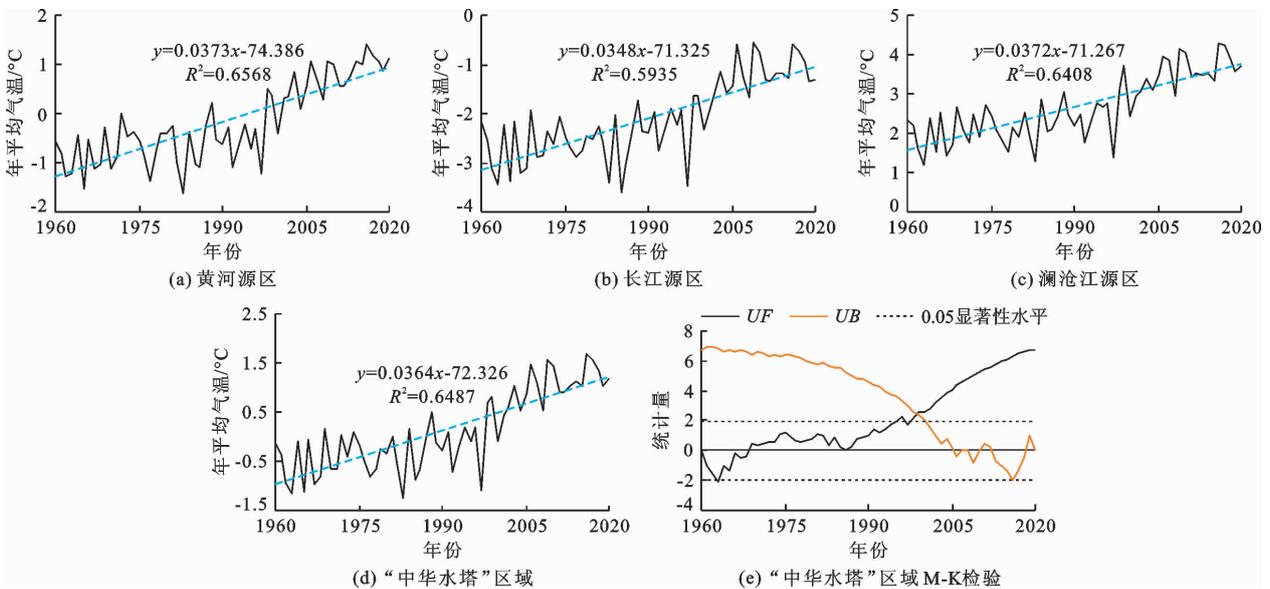


图 2 1960—2020 年研究区年均气温变化趋势及 M - K 检验

表 1 1960—2020 年研究区气温变化及趋势检验分析

分区	多年平均气温/°C	倾向率/(°·(10a) <sup>-1</sup> )	Kendall 检验 U (1.960)	Spearman 检验 T (2.004)	线性趋势回归检验 T (2.004)
黄河源区	-0.2	0.373	6.37 *	10.34 *	10.64 *
长江源区	-2.1	0.348	6.32 *	9.860 *	9.339 *
澜沧江源区	2.7	0.372	6.48 *	10.35 *	10.22 *
“中华水塔”区域	0.1	0.364	6.48 *	10.53 *	10.39 *

注：“\*”表示在显著性水平  $\alpha = 0.05$  下趋势显著，下同。

### 3.2 蒸发量变化分析

选取黄河 7 处、长江 6 处、澜沧江 2 处气象站、

水文站 1956—2020 年蒸发量数据进行年际变化趋势分析,结果见图 3 和表 2。

由图3可知,在空间上,黄河上游站点蒸发量呈基本持平或增加趋势,下游大多数站点蒸发量呈减小趋势;而长江、澜沧江则相反,上游站点蒸发量呈减小趋势,下游站点呈基本持平或增加趋势。经趋势检验分析(表2),在显著性水平 $\alpha = 0.05$ 下,黄河源区达日、久治、同德站蒸发量呈显著增大趋势,泽库站蒸发量呈显著减小趋势;长江源区沱沱河、五道梁站蒸发量呈显著减小趋势,曲麻莱站呈显著增大趋势,其他站点变化趋势不显著。2005—2020年

研究区平均蒸发量与1956—2004年相比,15个站点中有9个站点蒸发量增加,增加率在1.7%~11.9%之间,其余6个站点蒸发量均有所减小,减小率在0.6%~7.2%之间,但总体上呈增加趋势。蒸发量变化的主要原因与源区气温升高、降水增加等因素有关。气温升高引起水面蒸发量增大,但源区部分测站实测蒸发量有所减小,存在诸如“蒸发悖论”等不确定性问题<sup>[16]</sup>,其相互之间的关系有待进一步研究。

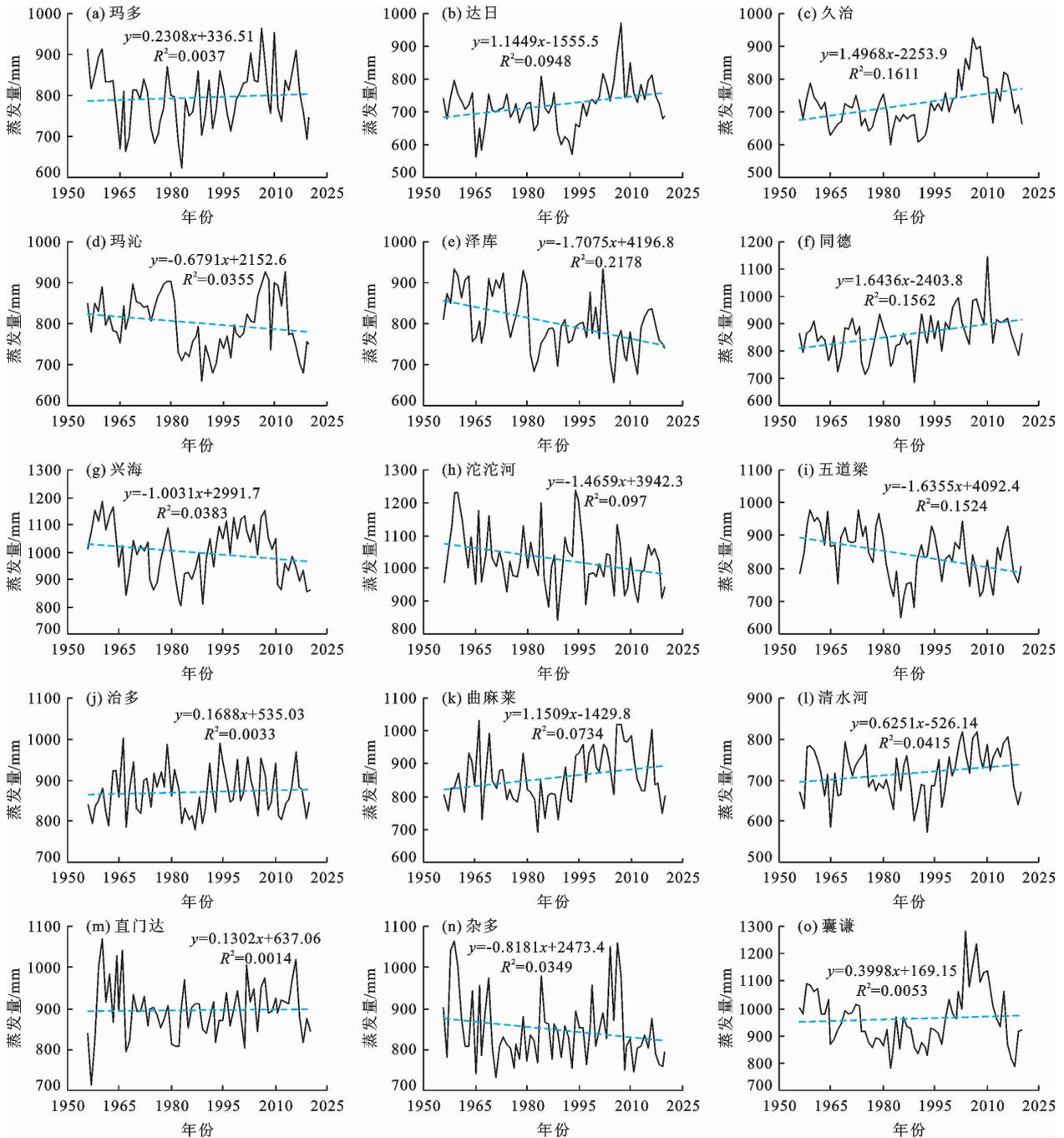


图3 1956—2020年研究区所选气象站、水文站年蒸发量变化

表 2 1956—2020 年研究区所选气象站、水文站蒸发量变化及趋势检验分析

分区	站点	平均蒸发量/mm		变幅/ %	Kendall 检验 <i>U</i> (1.96)	Spearman 检验 <i>T</i> (1.995)	线性趋势回归 检验 <i>T</i> (1.995)
		1956—2004 年	2005—2020 年				
黄河 源区	玛多	787.9	818.1	3.8	0.22	0.117	0.485
	达日	701.9	778.1	10.9	2.31*	2.433*	2.569*
	久治	701.1	784.8	11.9	2.72*	3.019*	3.478*
	玛沁	797.5	817.5	2.5	1.38	1.771	1.523
	泽库	816.7	758.1	-7.2	3.40*	3.909*	4.188*
	同德	847.5	913.4	7.8	2.97*	3.200*	3.416*
	兴海	1007.7	967.0	-4.0	1.49	1.580	1.585
长江 源区	沱沱河	1040.0	991.5	-4.7	2.11*	2.203*	2.600*
	五道梁	854.0	801.4	-6.2	3.11*	3.549*	3.365*
	治多	872.0	866.7	-0.6	0.50	0.554	0.452
	曲麻莱	847.5	891.8	5.2	2.05*	2.116*	2.234*
	清水河	706.5	748.5	5.9	1.74	1.819	1.652
澜沧江 源区	直门达	892.1	907.2	1.7	0.61	0.561	0.302
	杂多	852.9	829.4	-2.8	1.42	1.337	1.510
	囊谦	947.6	1013.8	7.0	0.22	0.006	0.579

3.3 降水量变化分析

为便于进行源区产流系数分析,以黄河唐乃亥、长江直门达、澜沧江香达水文站 1956—2020 年系列面降水分析区域降水量变化趋势。各水文站面降水量采用泰森多边形面积权重法计算,选用气象、水文站点及权重见表 3。控制水文站降水量年际变化及 5 a 滑动均值过程线见图 4, M - K 突变检验见图 5, 降水量变化及显著性检验见表 4。分析结果表明,各站降水量均通过了显著性水平  $\alpha = 0.05$  的线性趋势显著性检验(表 4);黄河、长江源区分别于 2016、2003 年发生由少变多的突变,澜沧江突变趋势不明显(图 5)。2005—2020 年平均降水量与 1956—2004 年相比,黄河、长江、澜沧江源区分别增加了 11.9%、19.5%、6.2%(表 4)。

3.4 径流量变化分析

黄河唐乃亥站、长江直门达站、澜沧江香达站

1956—2020 年径流量变化及 5 a 滑动均值过程线见图 6, M - K 突变检验见图 7, 径流量变化及显著性检验见表 5。由图 6 中 5 a 滑动均值过程线可以看出,黄河唐乃亥站在 2003 年后径流量由减小趋势转为增大趋势;长江直门达站、澜沧江香达站在 1997 年前径流量基本平稳,1997 年后转为持续增大趋势,尤其是直门达站径流量增加明显。经趋势检验分析,在显著性水平  $\alpha = 0.05$  下,1956—2020 年期间,长江直门达站径流量呈显著增大趋势,黄河唐乃亥站、澜沧江香达站径流量呈增大趋势,但趋势不显著(图 7、表 5)。经 M - K 突变检验,黄河唐乃亥站年径流量 1989 年发生由多变少的突变,长江直门达站径流量 2008 年发生由少变多的突变,澜沧江突变趋势不明显(图 7)。2005—2020 年平均径流量与 1956—2004 年相比,唐乃亥、直门达、香达站分别增加了 10.7%、36.3%、10.5%(表 5)。

表 3 研究区流域控制站点降水量计算权重

水文站	控制面积/km <sup>2</sup>	选用气象站点(权重)
唐乃亥	121972	曲麻莱(0.04)、清水河(0.07)、玛多(0.17)、达日(0.15)、久治(0.12)、玛曲(0.14)、玛沁(0.12)、泽库(0.07)、同德(0.04)、兴海(0.08)
直门达	137704	沱沱河(0.44)、五道梁(0.18)、杂多(0.06)、治多(0.12)、曲麻莱(0.13)、清水河(0.04)、直门达(0.03)
香达	16959	杂多(0.83)、囊谦(0.17)

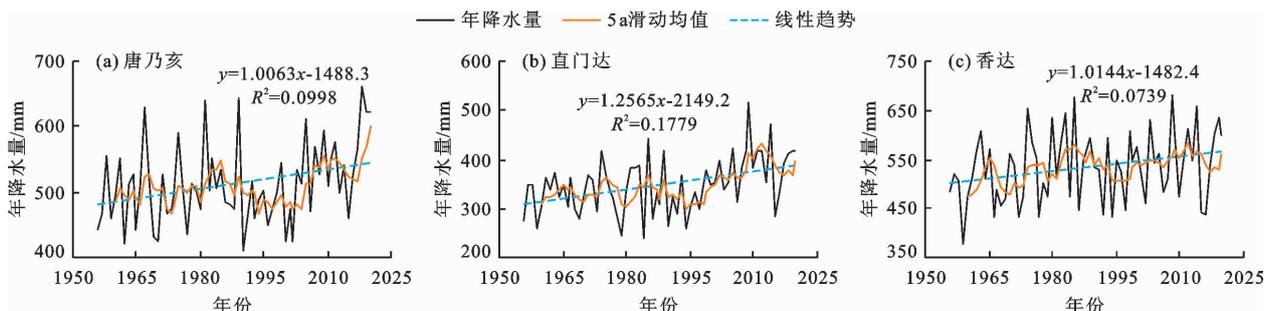


图4 1956—2020 年研究区流域控制水文站降水量年际变化及 5 a 滑动均值过程线

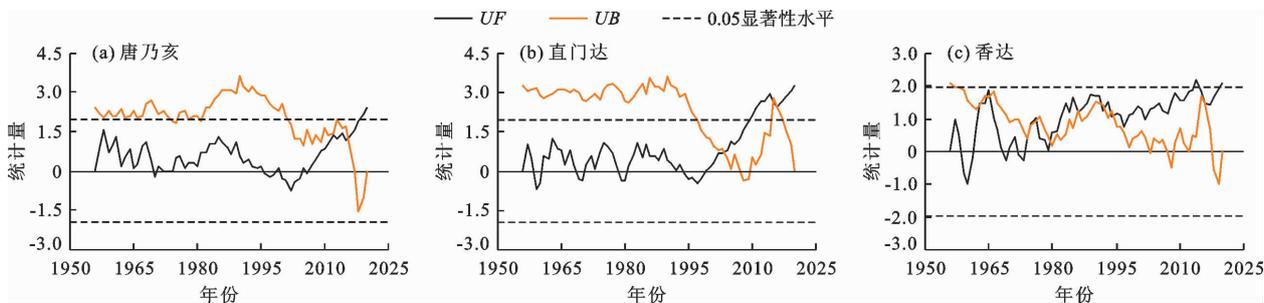


图5 1956—2020 年研究区流域控制水文站年降水量 M - K 突变检验

表4 1956—2020 年研究区流域控制水文站降水量变化及显著性检验

水文站	不同时段平均值/mm		增加比例/ %	Kendall 检验 $U(1.96)$	Spearman 检验 $T(1.995)$	线性趋势回归检验 $T(1.995)$
	1956—2004 年	2005—2020 年				
唐乃亥	497.6	556.6	11.9	2.41*	2.502*	2.643*
直门达	332.8	397.6	19.5	3.28*	3.487*	3.693*
香达	526.3	558.9	6.2	2.08*	2.180*	2.242*

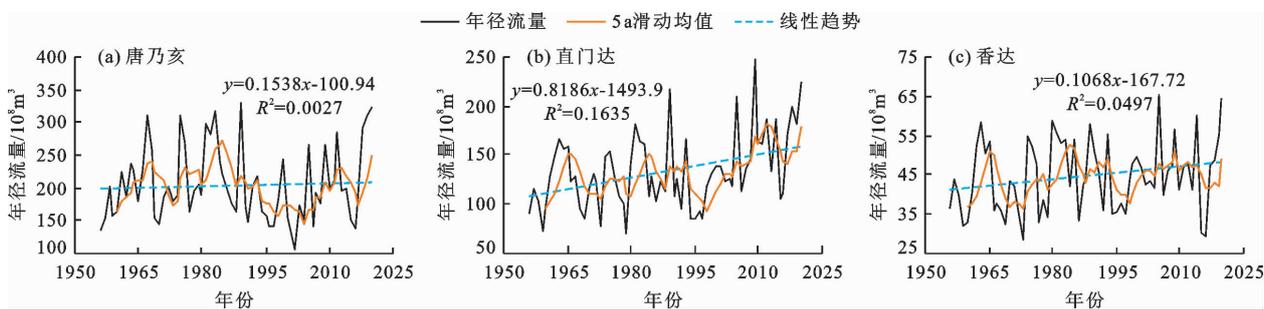


图6 1956—2020 年研究区流域控制水文站径流量年际变化及 5 a 滑动均值过程线

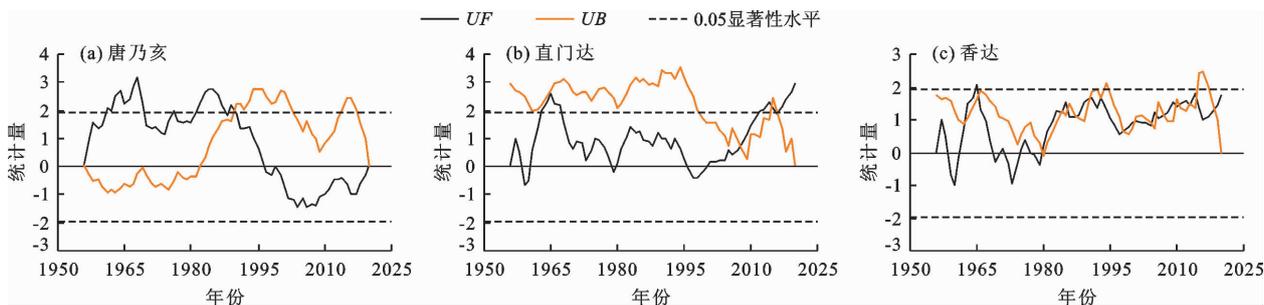


图7 1956—2020 年研究区流域控制水文站年径流量 M - K 突变检验

表 5 1956—2020 年研究区流域控制水文站径流量变化及显著性检验

水文站	不同时段平均值/ $10^8 \text{ m}^3$		增加比例/ %	Kendall 检验 $U(1.96)$	Spearman 检验 $T(1.995)$	线性趋势回归检验 $T(1.995)$
	1956—2004 年	2005—2020 年				
唐乃亥	199.5	220.8	10.7	0.01	0.040	0.395
直门达	122.5	167.0	36.3	2.94*	3.078*	3.510*
香达	43.52	48.1	10.5	1.85	1.761	1.988

### 3.5 降水径流一致性分析

分析研究区 2005—2020 年与 1956—2004 年水文站各年降水量、径流量距平变化,如图 8 所示。由图 8 可以看出,其总体趋势是径流量随降水量的增大而增大。当降水量距平较小(小于 10%)且下垫面持水量较小时,降水量虽大但产流量相对较小,降水径流距平基本一致或相差不大;当降水量增大到一定程度且下垫面持水量达到或接近饱和状态时,降水量全部产流,径流量距平相对降水量距平增加较大。图 8 中两线交汇后径流量距平最大可达到降水量距平的 2 倍甚至更高,下垫面持水量决定着降水产生径流的比例。2005—2020 年研究区降水总体处于偏丰或持续偏丰的状态,降水量的增加使源区植被覆盖条件好转<sup>[17]</sup>,下垫面含水量增加、生态持水能力增强是导致研究区降水与径流距平产生差异的主要原因。

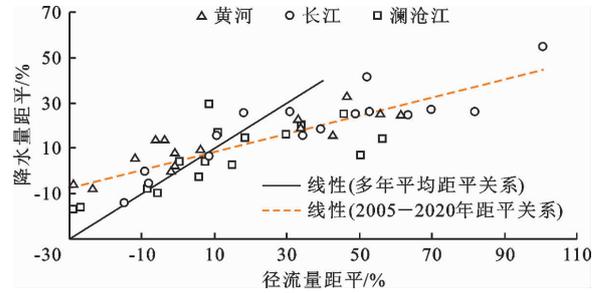


图 8 2005—2020 年研究区降水量、径流量距平分析

## 4 产流规律研究分析

### 4.1 产流系数变化分析

以黄河唐乃亥站、长江直门达站、澜沧江香达站 1956—2020 年面降水量( $P$ )、径流量( $R$ )分析 2005 年前后时段不同水平年产流系数( $R/P$ )的变化情况,结果见表 6。

表 6 1956—2020 年研究区流域控制水文站同等降水尺度下产流系数分析

水平年	系列年份	唐乃亥				直门达				香达			
		$P/\text{mm}$	$R/\text{mm}$	$R/P$	变化值	$P/\text{mm}$	$R/\text{mm}$	$R/P$	变化值	$P/\text{mm}$	$R/\text{mm}$	$R/P$	变化值
特枯年	1956—2004	424.6	126.4	0.30		261.8	65.7	0.25		429.6	192.3	0.45	
	2005—2020									439.0	175.4	0.40	-0.05
偏枯年	1956—2004	466.3	138.3	0.30		306.4	77.0	0.25		475.5	201.7	0.42	
	2005—2020	464.8	120.7	0.26	-0.04	299.4	78.8	0.26	0.01	478.7	226.2	0.47	0.05
平水年	1956—2004	505.6	170.8	0.34		345.6	92.1	0.27		528.5	247.4	0.47	
	2005—2020	511.1	155.4	0.30	-0.04	343.3	88.7	0.26	-0.01	536.6	260.7	0.49	0.02
偏丰年	1956—2004	546.7	191.8	0.35		380.5	109.1	0.29		579.8	284.2	0.49	
	2005—2020	554.6	165.4	0.30	-0.05	406.2	125.5	0.31	0.02	597.4	324	0.54	0.05
特丰年	1956—2004	637.1	256.3	0.40		431.2	125.6	0.29		647.6	295.6	0.46	
	2005—2020	623.0	239.2	0.38	-0.02	456.8	150.3	0.33	0.04	658.0	314.9	0.48	0.02

由表 6 可以看出,2005—2020 年与 1956—2004 年相比,在偏枯、平水、偏丰、特丰年同等降水尺度下,黄河唐乃亥站产流系数均有所减小,平均减小了 0.02~0.05(5%~14%);长江直门达站除平水年产流系数减小 0.01 之外,其余水平年产流系数均有

所提高,平均提高 0.01~0.04(4%~14%);澜沧江香达站除特枯年份产流系数减小 0.05 之外,其余水平年产流系数均有所提高,平均提高了 0.02~0.05(4%~12%)。说明 2005 年以来黄河源区产流能力有所下降,长江、澜沧江源区产流能力有所提高。

分析其原因:气温升高、降水持续偏丰以及流域前期影响雨量增加是长江、澜沧江源区产流系数提高、水资源量增加的主要原因,另一方面,气温升高使冰川积雪融水增多<sup>[18]</sup>是导致源区径流增加的又一因素;黄河源区湖泊众多,降水持续偏丰导致整个黄河源区湖泊、湿地面积大幅增加,气温升高使蒸散发能力增强、流域耗损量增加<sup>[19-20]</sup>,从而导致黄河源区产流系数降低。

#### 4.2 枯季径流变化分析

将枯季定义为10月—翌年3月,分析黄河唐乃

亥站、长江直门达站、澜沧江香达站1956—2020年枯季径流量占全年径流量的百分比变化情况,结果见表7。由表7可知,在不同频率同等径流尺度下,黄河唐乃亥站特丰年、澜沧江香达站平水年、特丰年2005—2020年枯季径流量占比较1956—2004年均有所减小,减小幅度为0.2%~2.2%,其余各站不同水平年枯季径流量占比均有所增加,平均增加了0.4%~6.6%。说明2005—2020年研究区下垫面生态持水能力和生态系统径流调节功能较1956—2004年有所提高。

表7 1956—2020年研究区流域控制水文站同等径流尺度下枯季径流变化分析

水平年	系列年份	唐乃亥			直门达			香达		
		平均径流量 /10 <sup>8</sup> m <sup>3</sup>	枯季径流 占比/%	变化值/ %	平均径流量 /10 <sup>8</sup> m <sup>3</sup>	枯季径流 占比/%	变化值/ %	平均径流量 /10 <sup>8</sup> m <sup>3</sup>	枯季径流 占比/%	变化值/ %
特枯年	1956—2004	134.4	29.5	6.3	80.29	21.8		32.38	28.1	0.4
	2005—2020	139.7	35.8		29.75	28.5				
偏枯年	1956—2004	161.2	29.7	6.6	107.5	19.6	2.9	36.82	27.1	2.3
	2005—2020	163.9	36.3		109.5	22.5		39.93	29.4	
平水年	1956—2004	192.2	29.6	1.5	133.8	18.3	0.5	43.19	25.3	-1.3
	2005—2020	197.0	31.1		134.4	18.8		42.84	24.0	
偏丰年	1956—2004	236.9	28.5	1.6	160.2	16.7	4.7	51.81	23.1	2.2
	2005—2020	266.5	30.1		164.7	21.4		49.04	25.3	
特丰年	1956—2004	307.8	28.6	-2.2	216.7	16.4	2.1	58.33	23.3	-0.2
	2005—2020	302.7	26.4		208.6	18.5		61.65	23.1	

## 5 讨论

变化环境下水资源情势演变受气候及下垫面等多种因素综合影响,是一个复杂的系统过程,年际间不同降水、径流尺度下,各水文要素之间存在着明显的差异特征。赵建华等<sup>[4]</sup>分析了黄河流域近60 a来气温、降水及径流的演变特征,探讨了不同阶段的降水-径流响应关系;伍云华等<sup>[5]</sup>通过57 a长江黄河源区径流量变化异同特征分析,表明两源径流季节及年变化趋势、突变特征及周期特征存在异同;刘光生等<sup>[6]</sup>研究表明,“三江源”地区气温对径流过程起主导作用,径流对气温变化较降水变化更为敏感;强安丰等<sup>[9]</sup>分析表明,“三江源”地区降水量、气温年际间呈增大和上升趋势,降水季节性差异明显,不同区域气温突变时间不同步;王珂等<sup>[11]</sup>分析了澜沧江源区降水量和气温对径流量变化的影响,表明径流量的主控因素是降水量,气温上升对径流量的改

变存在一定的影响,冬季和初春季节气温的贡献率要比降水的贡献率大。目前,多数研究成果<sup>[4-11]</sup>从气温、降水时空演变规律和未来变化趋势方面揭示气温与降水对径流的影响、径流演变及其对气候变化的响应等,但未考虑尺度问题。本文深化了水文变化规律的认识,引进不同频率同等尺度,分析了“中华水塔”地区各流域水文要素、产流机理及水资源情势变化空间差异特征及发生变化的原因,推动了水文分析方法的进步。本次仅从水文、气象要素变化规律及趋势方面进行了分析,有关下垫面如土壤植被、湿地、冰川、冻土等变化对水资源情势的影响分析,是今后研究的主要方向。

## 6 结论

(1)1960—2020年期间,“中华水塔”地区年平均气温呈显著上升趋势,黄河、长江、澜沧江源区多年平均气温分别上升了2.3、2.1、2.3℃,上升倾向

率分别为0.373、0.348、0.372 °C/10a,气温突变年份发生在2000年。四季平均气温以冬季升温最为明显,上升倾向率为0.50 °C/10a;受气温升高的影响,区域蒸发能力总体呈增加趋势。

(2)经趋势检验分析,1956—2020年期间,“中华水塔”地区各流域降水量呈显著增大趋势;长江直门达站径流量呈显著增大趋势,黄河唐乃亥站和澜沧江香达站径流量呈不显著增大趋势;2005—2020年与1956—2004年相比,黄河唐乃亥站、长江直门达站、澜沧江香达站降水量分别增多11.9%、19.5%、6.2%,径流量分别增大10.7%、36.3%、10.5%。

(3)2005年以来“中华水塔”地区产流规律明显改变,同等降水尺度下2005—2020年与1956—2004年相比,黄河源区产流能力有所降低,长江、澜沧江源区产流能力明显增强;同等径流尺度下,2005—2020年整个区域枯水期径流占全年的百分比明显提高,下垫面生态持水能力明显增强。

(4)气温升高、降水持续偏丰以及流域前期影响雨量增加、枯季径流量比例增大是长江、澜沧江源区产流能力增强的主要原因;黄河源区湖泊众多、降水量增大导致湖泊、湿地面积持续增加,气温升高使蒸散发能力增强、流域耗损量增大是黄河源区产流能力有所下降的主要原因。

#### 参考文献:

- [1] 靳铮,游庆龙,吴芳营,等. 青藏高原三江源地区近60a气候与极端气候变化特征分析[J]. 大气科学学报, 2020,43(6):1042-1055.
- [2] 孙永寿,李其江,刘 玟,等. 青海湖1956—2019年水位变化原因及水量平衡分析研究[J]. 水文,2021,41(5):91-96.
- [3] 青海省水文水资源测报中心. 青海三江源生态保护和建设工程生态监测项目水资源评价报告[R]. 西宁:青海省水文水资源测报中心,2005-2020.
- [4] 赵建华,刘翠善,王国庆,等. 近60年来黄河流域气候变化及河川径流演变与响应[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版),2018,39(3):1-5+12.
- [5] 伍云华,秦宁生,彭晓滨. 近57a长江黄河源区径流量变化异同特征分析[J]. 高原山地气象研究,2021,41(4):43-47.
- [6] 刘光生,王根绪,张 伟. 三江源区气候及水文变化特征研究[J]. 长江流域资源与环境,2012,21(3):302-309.
- [7] 蔡宜晴,李文辉,于泽兴,等. 长江源区降水时空演变规律[J]. 长江科学院院报,2022,39(5):28-35.
- [8] 李海川,王国庆,郝振纯,等. 澜沧江流域水文气象要素变化特征分析[J]. 水资源与水工程学报,2017,28(4):21-27+34.
- [9] 强安丰,魏加华,解宏伟. 青海三江源地区气温与降水变化趋势分析[J]. 水电能源科学,2018,36(2):10-14.
- [10] 蔡永祥,罗少辉,王 军,等. 三江源地区1961-2019年降水量时空变化特征[J]. 草业科学,2022,39(1):10-20.
- [11] 王 珂,蒲 焘,史晓宜,等. 澜沧江源区气温与降水对径流变化的影响[J]. 气候变化研究进展,2020,16(3):306-315.
- [12] 杜嘉妮,蔡宜晴,王 岗. 长江源区径流变化归因分析[J]. 水文,2021,41(6):73-78.
- [13] 王国庆,乔翠平,刘铭璐,等. 气候变化下黄河流域未来水资源趋势分析[J]. 水利水运工程学报,2020(2):1-8.
- [14] 王道席,田世民,蒋思奇,等. 黄河源区径流演变研究进展[J]. 人民黄河,2020,42(9):90-95.
- [15] 谢 平,陈广才,等. 变化环境下地表水资源评价方法[M]. 北京:科学出版社,2009.
- [16] 刘昌明,魏豪杉,张永强,等. 黄河干流径流变化归因分析与有关问题商榷[J]. 人民黄河,2021,43(10):1-6+16.
- [17] 青海省水文水资源勘测局. 青海三江源生态保护和建设工程生态监测项目2005—2015年水资源监测专题成效评估报告[R]. 西宁:青海省水文水资源勘测局,2016.
- [18] 白路遥,荣艳淑. 气候变化对长江、黄河源区水资源的影响[J]. 水资源保护,2012,28(1):46-50+70.
- [19] 黄河水文水资源科学研究院. 黄河河源区径流情势变化研究[R]. 郑州:黄河水文水资源科学研究院,2018.
- [20] 孙永寿,刘 玟,李 燕. 黄河源区降水径流一致性及其影响因素分析[J]. 人民黄河,2021,43(10):51-55+101.