

DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2023.04.001

# 青藏高原东部流域径流偶极子时空变化规律

田富强<sup>1</sup>, 李琨彪<sup>1</sup>, 韩松俊<sup>2</sup>, 南熠<sup>1</sup>, 杨龙<sup>3</sup>

(1. 清华大学水沙科学与水利水电工程国家重点实验室, 北京 100084; 2. 中国水利水电科学研究院水利研究所, 北京 100048;  
3. 南京大学地理与海洋科学学院, 江苏 南京 210023)

**摘要:** 青藏高原是典型的高山寒区, 其陆地水循环包括冰雪融水、土壤冻融、降雨径流等复杂过程。近年来, 青藏高原的主要河川径流在全球气候变化的影响下发生了显著变化, 深刻影响下游水资源利用和生态系统, 厘清其变化规律具有重要意义。本文对1980—2015年间青藏高原东部区域的6条主要外流河12个干流水文站的实测年径流以及该区域5种降水产品进行了区域分时段归类分析, 发现其径流变化存在偶极子型的时空变化规律, 即径流在某时间点和空间点两侧的变化趋势相反; 站点径流在1999年发生了趋势转折, 以昌都水文站和嘉玉桥水文站为分界的南北站点径流趋势相反, 其中北部站点径流呈先减小后增加的趋势, 南部站点则趋势相反; 降水变化和径流变化具有相同的偶极子时空特征, 并且识别了32°N为变化趋势的南北分界线。上述结论有助于理解青藏高原东部河流的径流变化机理, 并可为预估径流变化趋势、科学开展水资源管理提供依据。

**关键词:** 径流变化; 偶极子; 时间转折; 空间分界; 青藏高原

**中图分类号:** P332      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1001-6791(2023)04-0481-09

水资源是区域社会经济可持续发展及生态环境稳定的关键要素, 河川径流是水资源的主要存在形式。青藏高原是诸多亚洲主要大河的发源地, 该地区年出境水量约占中国年用水总量的80%; 水电蕴藏量为4.5亿kW, 占全国总量的68%, 是中国重要的水能水资源战略储备区; 国家级自然保护区面积占全国总面积的70%, 是中国的重要生态屏障<sup>[1]</sup>。主要分布在高原东部区域的澜沧江、怒江、雅鲁藏布江均为跨境河流, 水资源量的变化和洪水灾害关系到下游多个国家。该区域是中国水资源的战略储备区, 在中国水资源供需日益紧张的形势下, 厘清气候变化下径流的变化规律是战略储备区水资源合理开发利用的基础, 也是国家“十四五”规划确定的雅鲁藏布江下游水电工程规划设计的重要科学依据, 对中国长期的水安全保障具有战略意义<sup>[2]</sup>。

全球气候变化对自然生态系统和水资源造成了重要影响, 青藏高原区域经历了明显的气候变化, 大气和水文循环都发生了改变, 进而重塑了当地自然环境<sup>[3]</sup>。已有研究显示, 青藏高原主要河流的径流自1950年以来整体呈显著增加趋势, 年径流量平均每10 a增加5.06%, 并且在1995年之后加速增加<sup>[4]</sup>。其中, 除黄河源区径流呈减少趋势外, 长江、澜沧江、怒江、雅鲁藏布江的源区径流都在增加<sup>[5]</sup>。有研究对发源于青藏高原的10条主要河流进行分析, 发现在1980—2018年期间流域出口的年径流发生了较大变化, 其中4条河流的径流量在统计上显著增加, 2条河流的径流量不显著减少, 其余4条河流的径流量基本保持不变<sup>[6-9]</sup>, 这种空间异质性反映了青藏高原外流区和内流区之间的差异<sup>[10]</sup>。徐宗学等<sup>[11]</sup>分析了青藏高原东部多个主要流域的径流变化规律, 结果表明在过去50 a中径流发生了明显变化, 但表现出极大的空间变异性。例如, 三江源地区年径流为增加趋势, 其中年径流量增速最大的是长江源流域的直门达水文站, 而相比之下, 雅鲁

收稿日期: 2023-03-31; 网络出版日期: 2023-08-08

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/32.1309.P.20230808.1700.002>

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(92047301)

作者简介: 田富强(1975—), 男, 河南叶县人, 教授, 博士, 主要从事水文水资源方面研究。E-mail: tianfq@tsinghua.edu.cn

藏布江流域绝大部分区域的年径流量都呈不显著减小趋势,但自 20 世纪 90 年代以来,这些流域呈现出先增加后减小的阶段性变化趋势,并且存在一定的周期变化特征。已有研究表明由于气候条件的巨大差异和复杂的地形,该区域径流的变化具有较大的空间多样性。

根据长江源沱沱河和直门达水文站 1956—2012 年的径流数据统计显示,2 个站点年径流呈现出显著的增加趋势,其中,沱沱河水文站年径流在 1997 年发生了突变,显示出 20~28 a 和 12 a 的显著周期,直门达水文站年径流在 1961 年和 1967 年分别发生了突变,显示出 8 a 和 24~28 a 的显著周期<sup>[12]</sup>。张献志等<sup>[13]</sup>利用多种统计方法,对黄河源区控制站唐乃亥水文站 1956—2019 年的年径流量进行了分析,结果表明该站的年径流发生了 2 次显著突变,分别在 1989 年和 2017 年,其中 1989 年为平均值减小的突变,2017 年则是平均值增大的突变。澜沧江上游流域 1960—2012 年年径流量在昌都水文站呈现减小趋势,在旧州水文站呈现增加趋势,变化趋势均不显著,但在昌都至旧州的区间径流呈现显著增加趋势,此外昌都站突变点出现在 1966 年,旧州站突变点出现在 1966 年、1987 年和 1996 年<sup>[14]</sup>。1960—2009 年,怒江流域道街坝水文站冬春 2 个季节平均流量都呈现显著的增加趋势,在 1990s 和 2000s,怒江流域枯季极值径流量和枯水径流特征值都远高于其他年代,这可能与冬春季节的气温和降水增加有关系<sup>[15]</sup>。据研究分析,雅鲁藏布江流域奴下水文站在 1961—2015 年期间的年径流量呈先减少后增加的变化过程,转折点出现在 1992 年,在转折点前年径流量呈现显著的下降趋势,湿润季节的径流量占全年总径流量的 70% 以上,主导着流域年径流量的变化过程,但在转折点后呈现出不显著的上升趋势,旱季径流的变化也成为导致年径流呈现增长趋势的重要原因之一<sup>[16]</sup>。李秋菊等<sup>[17]</sup>对黑河上游流域出口站莺落峡 1960—2015 年年径流序列分析,发现其呈现显著上升趋势,径流序列突变点位置在 2004 年和 1997 年。

综合以上结果,径流变化规律研究一般依赖于数理统计方法,对所收集的径流序列进行趋势估计或者突变点检验。这种分析方法忽略了径流周期性、非单调的变化规律,一方面当研究时段不同时,统计得到的趋势很可能不一致,甚至结论相反,另一方面长时间序列统计的趋势大多并不显著,基于这些统计结果在研究区很难得到规律性的结论。因此,基于对径流变化规律周期性的考虑,本文收集了 1980—2015 年间青藏高原东部区域的 6 条主要外流河 12 个干流水文站的实测年径流,以及该区域 5 种降水产品,对径流和降水进行了区域分时段归类分析,以揭示其径流变化的偶极子时空规律。

## 1 数据资料

本文研究对象包括位于青藏高原东部的黑河、黄河、长江、澜沧江、怒江和雅鲁藏布江这 6 条主要河流的源区(图 1),这些河流的径流极易受到气候和环境变化的影响<sup>[18]</sup>。本研究收集了这 6 条河流干流上 12 个水文站的年径流数据,时间范围为 1980—2015 年,具体包括:长江源流域的直门达水文站,黄河源流域的吉迈水文站、玛曲水文站和唐乃亥水文站,黑河上游流域的莺落峡水文站,澜沧江上游流域的昌都水文站和旧州水文站,怒江上游流域的嘉玉桥水文站和道街坝水文站,雅鲁藏布江上游流域的奴各沙水文站、羊村水文站和奴下水文站。

降水变化通常被认为是径流变化的主要驱动因素,青藏高原河流虽然水源组成复杂,但降水仍然发挥着主要的作用,因此流域降水的变化也是研究重点。由于青藏高原上地面观测非常稀疏,降水产品之间不确定性较大。为了避免降水产品偏差影响,研究使用了 5 个广泛应用的降水数据产品,包括 CGDPA、CN05.1、CMFD、WFD 和 MSWEP,其中 CGDPA、CN05.1 由地面观测数据插值制作,CMFD、WFD 和 MSWEP 都是融合了多源信息的再分析降水产品。研究区域 1980—2015 年主要流域年降水量如表 1 所示,不同的降水产品年降水量差异较大。例如,流域年降水差异最大的在雅鲁藏布江奴各沙以上流域,CN05.1 只有 230 mm,而

WFD 达到了 499 mm,二者之间相差超过 200 mm,即便是同样由地面站点监测数据制作的 CGDPA,该区域年均降水也达到了 378 mm,二者之间的差异超过 150 mm。

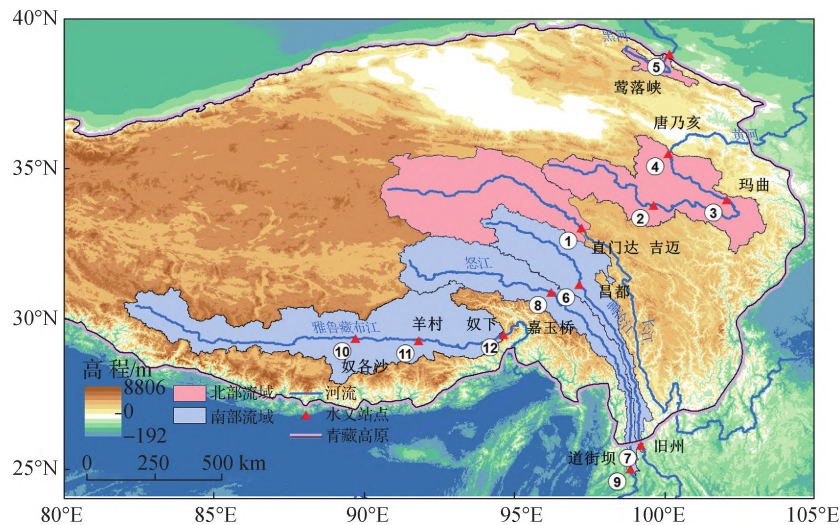


图1 研究区地形、河流与水文站分布

Fig. 1 Topography, main rivers and hydrological stations of the study area

表1 1980—2015年研究区主要流域年降水量

Table 1 Annual basin average precipitation in the study area(1980—2015)

单位:mm

控制站点	CGDPA	CN05.1	CMFD	WFD	MSWEP	控制站点	CGDPA	CN05.1	CMFD	WFD	MSWEP
直门达	422	417	394	385	434	旧州	608	685	603	605	659
吉迈	462	451	443	430	428	嘉玉桥	606	655	597	564	623
玛曲	562	585	549	534	560	道街坝	636	695	658	641	694
唐乃亥	527	571	530	518	536	奴各沙	378	230	399	499	306
莺落峡	468	472	398	272	461	羊村	425	480	421	499	355
昌都	578	654	556	552	616	奴下	467	535	461	523	400

## 2 研究方法

对于径流演变规律的研究方法主要包括两部分内容:

(1) 趋势分析。本研究对径流等水文气象变量序列线性趋势的估计采用 Sen's Slope<sup>[19]</sup>方法,将所有可能的2个变量数据之间变化斜率的中位数认为是线性趋势的估计值,同时通过 Mann-Kendall(MK)方法检验线性趋势的显著性。

(2) 转折点(分界线)识别。研究基于趋势分析来进行确定时间上的转折点和空间上的分界线,在变量序列中假设某个点(线)为转折点(分界线),通过移动该点(线)使得被分割出来的两部分差异最大化,即认为此处为转折点(分界线)。例如,假定某一个年份为转折点,所有年份序列被分为两部分,一部分为从起始年到该点,另一部分为从该点到终止年,每移动一次该假定的转折点都能得到前后两部分年份序列的MK检验Z值,当移动到某个年份这2个MK检验Z值之差的绝对值最大时,同时2个MK检验Z值正负相反,



即判定该年份为转折点。对于分界线的确定也是同样的,例如,在某一条经线上估计南北的分界点,假定其中某一点为分界点,这一条经线就被分为南北两部分,通过统计北部部分显示正值(负值)的格点数和南部部分显示负值(正值)的格点数,当移动到某一点时二者格点数之和最大,该点就被认为是这一条经线上的南北分界点,将多条经线上的分界点相连成线,即为南北部分的分界线。

### 3 结果分析与讨论

#### 3.1 径流时空演变规律

研究对1980—2015年所有的水文站点实测年径流数据进行了标准化,避免年径流量大的流域覆盖年径流量小的流域的径流变化信息。如图2所示,很显然大多数水文站的径流过程线经历了先增加后减少或者先减少后增加的转折变化过程,因此,如果直接统计1980—2015年的整体变化趋势,变化过程当中的重要信息容易被忽视,而得到的整体变化趋势并不显著,如果选取不同时段或能得到完全相反的趋势。

根据该转折变化过程,研究进一步将站点分为2组:一组包括长江源的直门达水文站,黄河源的吉迈水文站、玛曲水文站和唐乃亥水文站,黑河的莺落峡水文站以及澜沧江的昌都水文站,这一组的径流都是先减少后增加的变化过程(图2(a));另一组包括澜沧江下游的旧州水文站,怒江的嘉玉桥水文站和道街坝水文站以及雅鲁藏布江的奴各沙水文站、羊村水文站和奴下水文站,这一组的径流变化特点都是呈现先增加后减少的变化过程(图2(b))。这样的分类结果在空间上以昌都和嘉玉桥水文站为界分为了南北2组,特点是昌都和嘉玉桥水文站都位于 $32^{\circ}\text{N}$ 左右的同一纬度上。其次,研究对径流标准化,再计算2组流域出口水文站的径流平均值,即长江直门达水文站、黄河唐乃亥水文站和黑河莺落峡水文站归为一组,澜沧江旧州水文站、怒江道街坝水文站和雅鲁藏布江奴下水文站归为一组,将2组的平均值进行10 a窗口滑动平均处理,南北流域径流的平均变化过程如图2实线所示,径流在北部先减少后增加,在南部先增加后减少的变化过程更为显著。

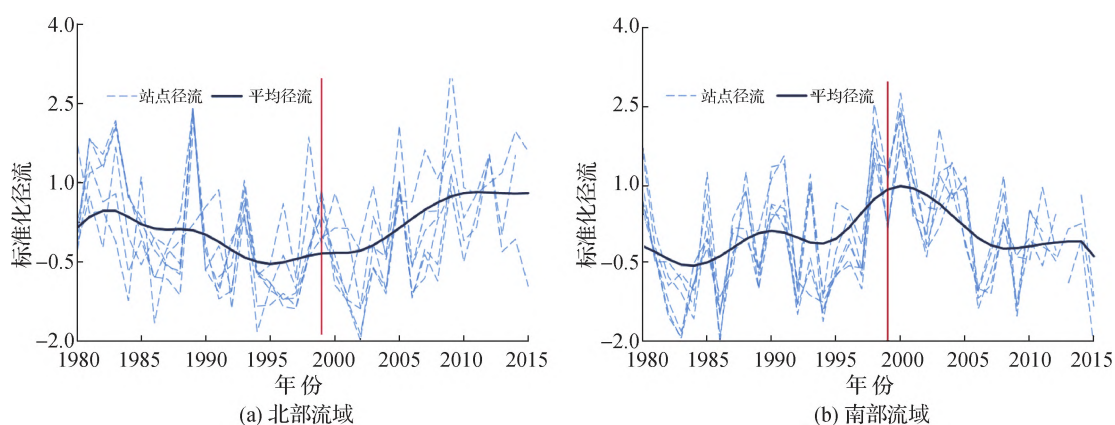


图2 研究区主要流域标准化径流及其10 a滑动多流域平均

Fig. 2 Normalized river runoff in the study area and its 10-year moving average

在本研究将该变化过程总结为径流偶极子型时空变化规律。偶极子在物理学中原指符号相反但距离很近的2个电荷或电磁荷,在本研究中借用其概念,具体指青藏高原东部南北部分流域径流相反的时空变化格局,即北部流域径流呈现先减少后增加的变化过程,南部流域径流与之相反,呈现先增加后减少的变化过程,在时间维度上各自前后时期的变化趋势相反,在空间维度上南北部分的变化趋势相反。

为进一步地证实这种变化过程以及确认发生趋势转折的具体时间点, 研究通过假设 1989—2004 年期间 (由于 MK 检验一般需要至少 10 个数据) 某一年为转折点, 计算该年前后 2 段径流序列的 MK 趋势检验 Z 值, 其中能够使得前后 2 段径流序列 MK 趋势检验的 Z 值差的绝对值最大的年份, 即认为是变化趋势差异最为显著的转折点。

研究区主要流域径流转折点检验结果如图 3 所示, 可以看出, 北部径流统计结果均为正值, 即表示后半期增加的趋势大于前半期; 南部径流的统计结果均为负值, 即表示后半期减小的趋势大于前半期。当选取前后 2 个时期增减趋势差异最大的年份作为转折点, 南部流域和北部流域大部分都落在了 1999 年附近 (图中的虚线位置), 仅有长江源流域直门达站、黑河流域莺落峡站和澜沧江流域昌都站拐点在 1995—1997 年, 相比大部分流域站点略有提前。因此, 研究认为 1999 年为研究区径流整体较为显著的转折点。后续的研究也将据此划分 2 个时期, 分别为 1980—1999 年和 2000—2015 年。

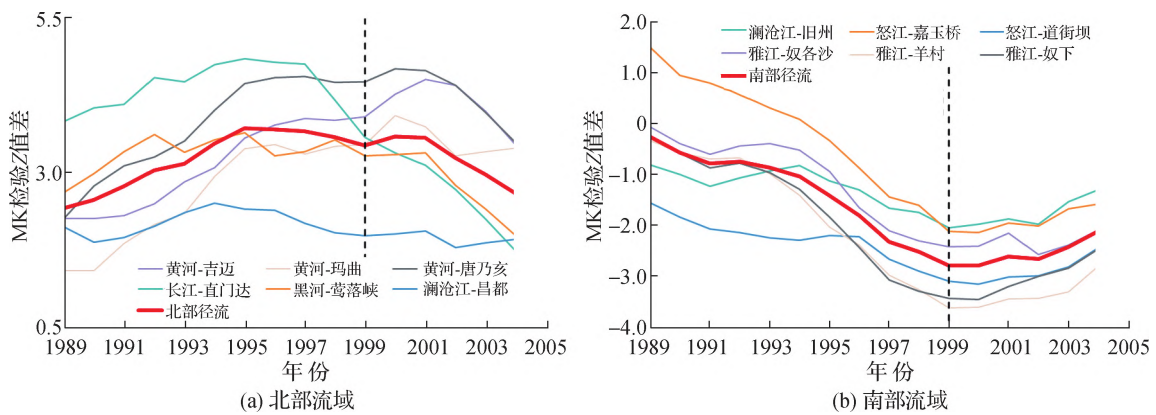


图 3 研究区主要流域径流转折点检验

Fig. 3 Turning point test of annual river runoff in the study area

### 3.2 降水时空演变规律

研究基于对径流演变规律的认识, 进一步针对流域年降水的变化展开分析。尽管这些降水数据集在流域年降水绝对数值上表现出很大的不确定性, 但是本文研究的重点是关注流域年降水的相对变化趋势。各降水产品的降水异常如图 4 所示, 从结果可以看出, 对于所有降水产品, 年降水的变化都和年径流的变化有着非

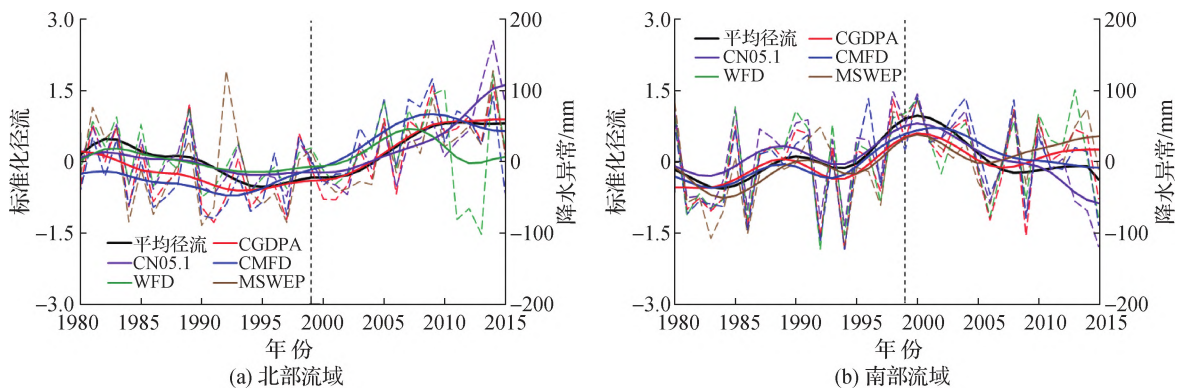


图 4 研究区主要流域标准化径流、多流域平均年降水异常及其 10 a 滑动平均值

Fig. 4 Normalized river runoff and precipitation anomaly in the study area and its 10-year moving average

常强的一致性, 相关系数都超过 0.60, 最高达到 0.93, 最低为北部流域的 WFD 数据, 从图中也可以看出该数据集在 2011—2013 年存在明显的异常。但总体来看, 流域年降水和年径流一致表现出了同样的偶极子型变化规律的特点。

研究将降水数据以 1999 年为转折点划分为 2 个时期, 分别计算各流域上前后两部分年降水量的变化趋势。统计结果如表 2 所示, 可以看出不同数据集都显示了和径流极为相似的变化趋势时空格局。也就是说, 在 1980—1999 年研究区北部流域年降水增加导致年径流增加, 因而变得更加湿润, 而南部流域年降水减少导致年径流减少, 因而变得更加干旱, 但南北流域的这种变化趋势在 2000 年都发生了反转。

表 2 1980—2015 年研究区主要流域径流和降水变化率

Table 2 Trend of annual basin average river runoff and precipitation in the study area(1980—2015)

单位: mm/a<sup>2</sup>

站点	1980—1999 年						2000—2015 年					
	径流	CGDPA	CN05.1	CMFD	WFD	MSWEP	径流	CGDPA	CN05.1	CMFD	WFD	MSWEP
直门达	-1.98	-2.60	-2.25	0.34	-1.78	-1.55	2.59	6.21	-0.07	2.86	-4.74	5.97
吉迈	-2.41	-1.72	-2.69	-1.29	-1.53	-0.82	9.31	8.89	8.44	6.89	1.83	9.16
玛曲	-3.98	-2.64	-4.37	-1.86	-1.44	-1.90	6.45	8.63	13.96	6.34	2.66	8.43
唐乃亥	-4.23	-2.81	-3.81	-1.00	-2.27	-1.90	3.39	10.29	13.10	6.15	2.61	7.98
莺落峡	-0.27	-1.06	-0.10	-0.65	-1.28	-0.82	4.66	9.24	10.64	5.35	7.66	6.54
昌都	-2.32	-0.82	0.28	0.88	0.10	-0.90	4.01	6.19	0.98	0.43	-7.27	5.06
旧州	1.97	1.74	0.83	3.85	2.11	3.39	-5.93	-0.05	-5.47	-4.40	-7.07	1.29
嘉玉桥	1.55	-0.14	1.04	0.01	0.37	2.37	-8.97	-2.24	-8.26	-6.62	-9.49	-1.25
道街坝	2.47	1.18	1.13	-0.24	3.66	4.03	-10.10	-4.53	-10.88	-8.69	-12.26	-3.33
奴各沙	1.36	1.94	1.19	-0.08	2.01	2.30	-10.94	-1.63	-5.34	-0.59	5.28	-0.51
羊村	2.10	3.37	3.03	2.40	2.41	3.65	-7.79	-3.29	-11.56	-4.82	7.82	-0.91
奴下	3.17	4.33	3.04	5.28	3.00	3.49	-6.77	-4.31	-12.14	-6.00	6.52	-0.72

径流更大程度上表示流域整体尺度的时间变化, 而空间分布细节无法通过径流体现, 但降水数据可以充分地展现空间上的特点, 并且流域整体尺度上降水和径流变化规律一致也保证了降水变化在空间上的分析结果是可靠的。对于降水变化趋势在空间上的分布, 研究同样以 1999 年为转折点, 分别计算 CGDPA、CN05.1、CMFD、WFD 和 MSWEP 5 个降水数据集在前后 2 个时间段的变化趋势。如图 5 所示, 图 5(a) 为 1980—1999 年期间 5 种降水数据的变化趋势, 图 5(b) 为 2000—2015 年期间 5 种降水数据的变化趋势, 红色表示降水减少, 蓝色表示降水增加, 黄色线为识别的南北空间分界线。从结果可以看出, 研究区的降水呈现显著的南北差异, 在 1980—1999 年, 北部降水增加, 南部降水减少, 而在 2000—2015 年这种变化趋势的空间模态发生反转。与时间转折点的判断类似, 研究对 91°E—101°E、29°N—35°N 范围内的南北分界线进行判断。结果如图 5 所示, 尽管不同降水数据集的分界线在空间上会有所波动, 但大部分分界线都位于 32°N 附近, 而昌都水文站和嘉玉桥水文站也都位于 32°N 附近, 这表明降水和径流变化趋势的空间分界也保持一致。

因此, 综合研究区径流和降水的变化可以发现, 二者演变规律保持较高的一致性, 在 1980—2015 年期间都以 1999 年为转折点, 北部流域表现出先减少后增加的变化过程, 南部流域则恰好相反, 表现出先增加后减少的变化过程, 并且南北在空间上的分界线大概位于 32°N, 同样是昌都水文站和嘉玉桥水文站附近。



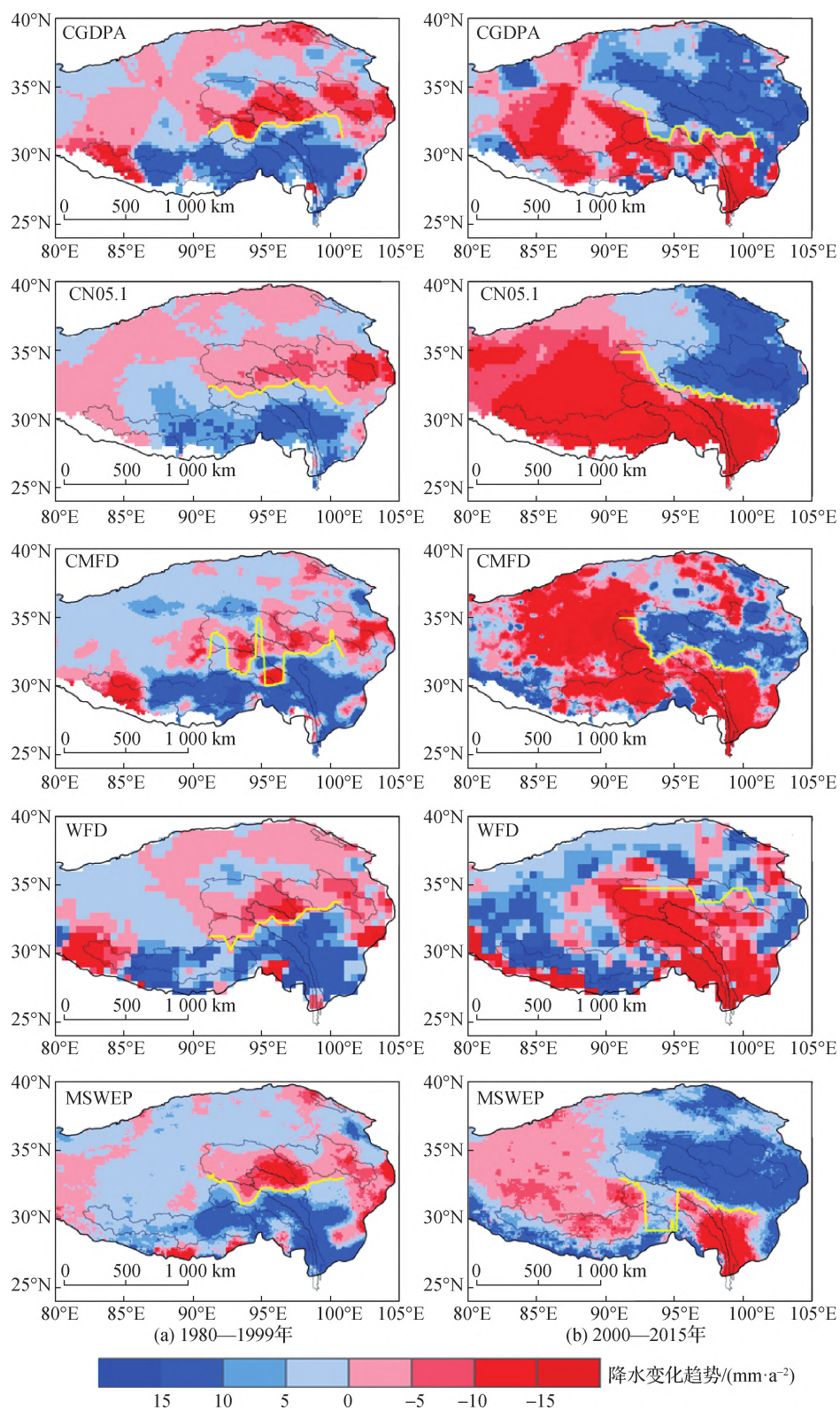


图 5 研究区降水变化趋势空间分布

Fig. 5 Trend pattern of annual precipitation in the study area

## 4 结 论

研究对青藏高原东部区域主要外流河的年径流演变规律不明这一问题展开分析, 基于详实数据揭示了年径流偶极子变化规律, 主要结论如下:

(1) 对实测径流资料进行了分类统计, 发现长江源的直门达水文站, 黄河源的吉迈水文站、玛曲水文站和唐乃亥水文站, 黑河的莺落峡水文站以及澜沧江的昌都水文站都存在先减少后增加的变化过程; 而澜沧江下游的旧州水文站, 怒江的嘉玉桥水文站和道街坝水文站以及雅鲁藏布江的奴各沙水文站、羊村水文站和奴下水文站都存在先增加后减少的变化过程。

(2) 研究区径流的变化在时间上以 1999 年为转折点, 在空间上以昌都水文站、嘉玉桥水文站为分界线, 南北流域的径流分别呈相反变化趋势, 即偶极子时空变化规律。

(3) 5 种降水资料统计结果显示, 降水和径流的变化都显示出较强的一致性, 并且变化趋势在空间上以 32°N 为南北分界线, 同样存在南北变化相反的偶极子变化规律。

### 参考文献:

- [1] 李志斐. 气候变化对青藏高原水资源安全的影响[J]. 国际安全研究, 2018, 36(3): 42-63. (LI Z F. Analysis of the effects of climate change on water resources security in Qinghai-Tibet Plateau[J]. Journal of International Security Studies, 2018, 36(3): 42-63. (in Chinese))
- [2] 胡春宏, 郑春苗, 王光谦, 等. “西南河流源区径流变化和适应性利用”重大研究计划进展综述[J]. 水科学进展, 2022, 33(3): 337-359. (HU C H, ZHENG C M, WANG G Q, et al. Reviews of the major research plan “runoff change and its adaptive management in the source region of major rivers in Southwestern China”[J]. Advances in Water Science, 2022, 33(3): 337-359. (in Chinese))
- [3] YANG K, WU H, QIN J, et al. Recent climate changes over the Tibetan Plateau and their impacts on energy and water cycle: a review[J]. Global and Planetary Change, 2014, 112: 79-91.
- [4] LI D F, LU X X, OVEREEM I, et al. Exceptional increases in fluvial sediment fluxes in a warmer and wetter High Mountain Asia [J]. Science, 2021, 374(6567): 599-603.
- [5] 汤秋鸿, 兰措, 苏凤阁, 等. 青藏高原河川径流变化及其影响研究进展[J]. 科学通报, 2019, 64(27): 2807-2821. (TANG Q H, LAN C, SU F G, et al. Streamflow change on the Qinghai-Tibet Plateau and its impacts[J]. Chinese Science Bulletin, 2019, 64(27): 2807-2821. (in Chinese))
- [6] CUO L, ZHANG Y X, ZHU F X, et al. Characteristics and changes of streamflow on the Tibetan Plateau: a review[J]. Journal of Hydrology: Regional Studies, 2014, 2: 49-68.
- [7] LATIF Y, MA Y M, MA W Q. Climatic trends variability and concerning flow regime of Upper Indus basin, Jehlum, and Kabul river basins Pakistan[J]. Theoretical and Applied Climatology, 2021, 144(1): 447-468.
- [8] ZHANG Z X, CAPINHA C, USIO N, et al. Impacts of climate change on the global potential distribution of two notorious invasive crayfishes[J]. Freshwater Biology, 2020, 65(3): 353-365.
- [9] ZHONG D Y, DONG Z C, FU G B, et al. Trend and change points of streamflow in the Yellow River and their attributions[J]. Journal of Water and Climate Change, 2021, 12(1): 136-151.
- [10] YAO T D, BOLCH T, CHEN D L, et al. The imbalance of the Asian water tower[J]. Nature Reviews Earth & Environment, 2022, 3(10): 618-632.
- [11] 徐宗学, 周祖昊, 姜瑶, 等. 西南河流源区径流量变化规律及其未来演变趋势[J]. 水科学进展, 2022, 33(3): 360-374. (XU Z X, ZHOU Z H, JIANG Y, et al. Variation laws and future evolution trends of runoff in the headwaters region of Southwestern rivers[J]. Advances in Water Science, 2022, 33(3): 360-374. (in Chinese))
- [12] 朱海涛. 长江源区长序列径流变化规律及其与气象要素的关系分析[J]. 中国农学通报, 2019, 35(22): 123-129. (ZHU H T. Long sequence runoff in the source of the Yangtze River: variation law and its relationship with meteorological elements[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2019, 35(22): 123-129. (in Chinese))



- [13] 张献志, 汪向兰, 王春青, 等. 黄河源区气象水文序列突变点诊断[J]. 人民黄河, 2020, 42(11): 22-26. (ZHANG X Z, WANG X L, WANG C Q, et al. Diagnosis of abrupt change point of the meteorological and hydrological series in the source area of the Yellow River[J]. Yellow River, 2020, 42(11): 22-26. (in Chinese))
- [14] 李杨, 王婕, 唐雄朋, 等. 变化环境下澜沧江-湄公河流域径流演变及年内分配特征[J]. 水土保持研究, 2021, 28(3): 141-148. (LI Y, WANG J, TANG X P, et al. Characteristics of runoff variation and seasonal pattern of lancang-mekong river in the context of environment change[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2021, 28(3): 141-148. (in Chinese))
- [15] 罗贤, 何大明, 季漩, 等. 近50年怒江流域中上游枯季径流变化及其对气候变化的响应[J]. 地理科学, 2016, 36(1): 107-113. (LUO X, HE D M, JI X, et al. Low flow variations in the middle and upper Nujiang River basin and possible responds to climate change in recent 50 years[J]. Scientia Geographica Sinica, 2016, 36(1): 107-113. (in Chinese))
- [16] 李浩, 牛乾坤, 王宣宣, 等. 1961—2015年雅鲁藏布江流域径流演变规律分析[J]. 水土保持学报, 2021, 35(1): 110-115. (LI H, NIU Q K, WANG X X, et al. Variation characteristics of runoff in the Yarlung Zangbo River basin from 1961 to 2015[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021, 35(1): 110-115. (in Chinese))
- [17] 李秋菊, 李占玲, 王杰. 黑河流域上游径流变化及其归因分析[J]. 南水北调与水利科技, 2019, 17(3): 31-39. (LI Q J, LI Z L, WANG J. Variation and attribution of runoff over the upper reaches of Heihe River basin[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2019, 17(3): 31-39. (in Chinese))
- [18] IMMERZEEL W W, van BEEK L P H, BIERKENS M F P. Climate change will affect the Asian water towers[J]. Science, 2010, 328(5984): 1382-1385.
- [19] SEN P K. Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau[J]. Journal of the American Statistical Association, 1968, 63(324): 1379-1389.

## Dipole spatiotemporal variations of river runoff in Eastern Tibetan Plateau\*

TIAN Fuqiang<sup>1</sup>, LI Kunbiao<sup>1</sup>, HAN Songjun<sup>2</sup>, NAN Yi<sup>1</sup>, YANG Long<sup>3</sup>

(1. State key laboratory of Hydrosience and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. Department of Irrigation and Drainage, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100048, China; 3. School of Geography and Ocean Science, Nanjing University, Nanjing 210023, China)

**Abstract:** As a typical cold mountainous region, the Tibetan Plateau (TP) is characterized by complex water cycle processes, including snow and glacier melting, soil freezing and thawing, and rainfall runoff. Driven by global climate change over the past several decades, discharges of the major rivers on the TP have changed significantly, influencing the water resource utilization and ecosystem in the downstream regions. This study analyzed the discharge variations at 12 hydrological stations in six major exoreic TP rivers from 1980 to 2015, including Heihe River, Yellow River, Yangtze River, Lancang River, Nu River, and Yarlung-Tsangpo River. The precipitation variations in six basins were also analyzed based on five datasets. Results show that the runoff of stations located north of Changdu-Jiayuqiao decreased before 1999, and turned into an increasing trend after 1999. The stations located in the South TP had reversed runoff variations. Such variation can be described as a dipole spatiotemporal variation pattern. The precipitation variations over the TP were similar to that of runoff, showing a dipole pattern with reversed variations bounded by 32° N. These findings are helpful for runoff change mechanism understanding and projection under climate change, providing a scientific foundation for water resource management.

**Key words:** river runoff variations; dipole pattern; temporal turning; spatial boundary; Tibetan Plateau

\* The study is financially supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 92047301).