

DOI:10.7522/j.issn.1000-0240.2020.0069

LUO Yu, QIN Ningsheng, PANG Yishu, et al. Effect of climate warming on the runoff of source regions of the Yangtze River: take Tuotuo River basin as an example[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2020, 42(3):952-964. [罗玉, 秦宁生, 庞轶舒, 等. 气候变暖对长江源径流变化的影响分析:以沱沱河为例[J]. 冰川冻土, 2020, 42(3):952-964.]

## 气候变暖对长江源径流变化的影响分析 ——以沱沱河为例

罗 玉<sup>1,2</sup>, 秦宁生<sup>1,2</sup>, 庞轶舒<sup>2</sup>, 王春学<sup>2</sup>, 刘 佳<sup>2</sup>, 李金建<sup>3</sup>, 刘希胜<sup>4</sup>

(1. 中国气象局成都高原气象研究所/高原与盆地暴雨旱涝灾害四川省重点实验室, 四川 成都 610072; 2. 四川省气候中心, 四川 成都 610072; 3. 成都信息工程大学, 四川 成都 610225; 4. 青海省水文水资源勘测局, 青海 西宁 810008)

**摘 要:** 在气候变暖背景下, 20 世纪 60 年代以来, 长江源区气温年和四季增温显著, 蒸发量、径流量总体呈增加趋势; 进入 21 世纪后, 源区降水量呈增加趋势。沱沱河作为长江源区的主要径流, 以此为代表研究长江源区气候变暖对径流的影响具有重要的现实意义。利用 1981 - 2015 年沱沱河水文站径流量资料、沱沱河同期气象站降水量、气温、蒸发量的实测资料, 分析了长江源区沱沱河降水、气温、蒸发量变化对径流量的影响。结果显示: 在全球变暖背景下, 近 35 a 来沱沱河流域年及四季平均气温、平均最高气温、最低气温均呈显著增加趋势; 年及春、夏、秋季降水量增加而冬季降水量减少; 春、冬季蒸发量呈增加趋势, 年及夏、秋季蒸发量呈减少趋势。沱沱河流域降水量是影响径流量大小的最主要的气候因子, 夏季降水量的增多与夏季径流量的增多关系密切, 年平均最低气温升高导致的冰川和积雪融水对径流量的影响次之, 蒸发量对径流量的影响明显低于前两者。

**关键词:** 长江源; 气候变暖; 沱沱河; 气候因子; 径流量

**中图分类号:** P333.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-0240(2020)03-0952-13

### 0 引言

IPCC 第五次报告指出, 全球的平均气温在 1971 - 2010 年以  $0.09 \sim 0.13 \text{ }^{\circ}\text{C} \cdot (10\text{a})^{-1}$  的速率升高, 在近 62 年来以  $0.12 \text{ }^{\circ}\text{C} \cdot (10\text{a})^{-1}$  的速率快速升高, 导致全球范围内的冰川逐渐消退<sup>[1]</sup>。在全球变暖的背景下, 作为“世界第三极”的青藏高原的气候也发生了变化, 特别是在 20 世纪 80 年代, 气温升温强烈<sup>[2-4]</sup>, 位于青藏高原腹地的长江源区生态环境较为脆弱敏感, 对气候变化的响应剧烈<sup>[5]</sup>。以往的研究表明, 近年来源区的气温显著升高<sup>[6]</sup>, 降水明显增多<sup>[7-8]</sup>, 气候因子的变化将影响水文资源的改变。曹建廷等<sup>[9]</sup>的研究表明 1980 - 2000 年长江源区降水减少为径流量减少的直接原因, 温度升高

有利于融冰融雪以及降水形式的变化, 并指出长江源区春季径流量的明显增加与融雪过程提前及融雪量增加有关。齐冬梅等<sup>[10]</sup>指出长江源区的高原夏季风、7 - 8 月地面感热、流域降水量及气温、蒸发量、冰川和积雪消融均对长江源区径流变化有明显的影响。

作为青藏高原腹地、长江源头的主要流域, 沱沱河流域的气候及径流变化特征得到了国内学者的关注, 唐雄鹏等<sup>[11]</sup>指出 1961 - 2010 年沱沱河流域的气温、降水和径流深度均呈不同程度的上升趋势, 特别是气温和径流上升趋势显著, 而降水变化不太明显; 赵子岳等<sup>[12]</sup>对 1959 - 2011 年沱沱河流域的气候演变规律进行了分析, 也发现沱沱河流域的年降水量、年平均气温均呈增加趋势; 张国胜

收稿日期: 2018-05-11; 修订日期: 2019-07-26

基金项目: 国家自然科学基金项目(41772173); 四川省科技厅项目(2019YJ0620); 中国气象局气候变化专项(CCSF202034); 青海省“高端创新人才千人计划”项目; 青海省应用基础研究项目(2019-ZJ-7045)资助

作者简介: 罗玉(1989 -), 女, 四川成都人, 工程师, 2015 年在成都信息工程大学获硕士学位, 从事气候变化与数值模拟研究。

E-mail: lida2008891229@163.com

通信作者: 秦宁生, 正研级高级工程师, 从事气候与气候变化研究. E-mail: qinns0515@163.com.

等<sup>[13]</sup>对沱沱河区的气候变化研究发现, 20 世纪 80 年代夏季温度升高, 降水减少, 进入 90 年代后升温加剧, 在暖干化的气候背景下, 导致冰川消融加快; 在 20 世纪 90 年代长江源区的降水减少, 地表蒸发增多, 导致水资源与水循环系统失衡, 水源的涵养作用下降。就目前而言, 有关研究大多集中在以长江源区作为整体来探讨气候变化对水资源的影响, 对沱沱河流域的研究也多集中在气象要素气候变化特征上, 针对长江源沱沱河流域的径流变化及其与影响因子的关系的研究尚不多见。为此, 本文以沱沱河为研究切入点, 采用气象数据、水文数据从不同的时间尺度探讨在全球变暖背景下气候变化趋势对长江源径流量的影响, 为长江源区及长江中下游水资源的合理配置、安全利用提供科学的参考。

## 1 流域概况

长江源区(直门达水文站以上流域)地处青藏高原腹地, 大致范围介于  $90^{\circ}43' \sim 96^{\circ}45' E$ ,  $32^{\circ}30' \sim 35^{\circ}35' N$ , 是青藏高原上高原湿地的主要分布之一, 也是江河源区冰川分布最集中的区域, 同时也是青藏高原主要的冻土带。沱沱河流域( $89^{\circ}48' \sim 92^{\circ}54' E$ ,  $33^{\circ}22' \sim 35^{\circ}12' N$ )位于青海省的西南部, 发源于唐古拉山主峰各拉丹冬雪山群的西南侧, 是长江源头的主要流域, 海拔 6 621 m, 流域面积  $15\,924\text{ km}^2$ <sup>[11]</sup>, 流域地势较高, 海拔最高达 6 468 m, 最低海拔为 4 489 m, 南北均有高山, 地形封闭, 属高空西风带控制区, 气候属于高寒半干旱与半湿润气候过渡带, 受到来自印度洋的孟加拉湾水汽输送途径以及高原地形的影响<sup>[14]</sup>, 气候干旱, 终年低温, 流域多年平均气温为  $-4.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 常年冻结期长达 7 个月, 流域内气候干旱, 降水较少, 多年平均降水量约为 283.1 mm, 降水多集中在夏、秋季的 7-9 月。流域内多年的径流量为  $26.2\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ , 多年平均径流深 51.9 mm。沱沱河流域冰川覆盖面积为长江源区第二大, 冰川面积为  $389.09\text{ km}^2$ , 冰储量为  $42.1465\text{ km}^3$ <sup>[15]</sup>, 研究区有多年冻土分布<sup>[16]</sup>。

## 2 资料和方法

### 2.1 资料

本文选取的资料包括 1981-2015 年长江源区沱沱河流域沱沱河水文站逐年、月径流量资料; 长

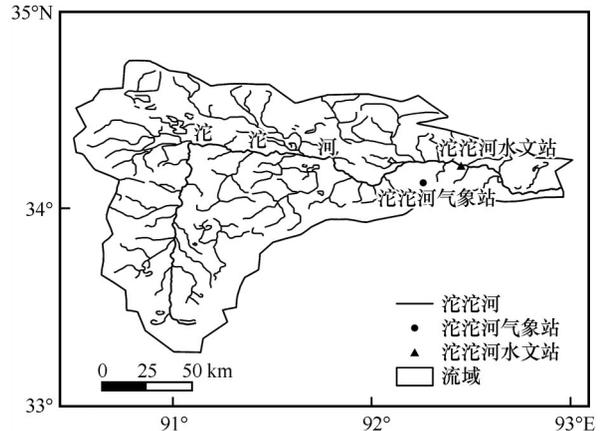


图1 沱沱河流域气象站点和水文站点位置及流域水系  
Fig. 1 River network and locations of meteorological and hydrological stations in the Tuotuo River basin

江源区沱沱河气象站( $33^{\circ}57' N$ 、 $92^{\circ}37' E$ , 海拔 4 533.1 m) 1981-2015 年逐月降水量、平均气温、平均最高气温、平均最低气温、小型蒸发皿蒸发量数据。四季划分为 3-5 月为春季、6-8 月为夏季、9-11 月为秋季、12 月-翌年 2 月为冬季; 5-9 月为汛期, 10 月至翌年 4 月为非汛期; 气候平均值采用 1981-2010 年的平均值。

### 2.2 方法

#### 2.2.1 变差系数

在分析径流量年际变化特征时, 为了反应年径流量总体变化的离散程度, 采用变差系数  $C_v$  表示径流年际变化的总体特征,  $C_v$  值越大, 年径流量的年际变化越剧烈,  $C_v$  值越小, 则年径流量的年际变化小, 计算公式如下:

$$C_v = \sigma_Q / \bar{X} \quad (1)$$

$$\sigma_Q = \sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 / (n-1)} \quad (2)$$

式中:  $X_i$  为第  $i$  年的径流量;  $\bar{X}$  为平均径流量。

#### 2.2.2 差积曲线

在探讨径流量与气候因子的相关关系时, 为了消除年径流量等单位 and 量纲的差异及  $C_v$  值的影响, 本文采用标准化  $(K-1)/C_v$  来表示径流量等要素多年变化情况, 其中  $K$  由  $Q_i/\bar{Q}$  得,  $Q_i$  为第  $i$  年的径流量,  $\bar{Q}$  为年均径流量; 为显现径流量阶段性的变化趋势, 还计算了差积曲线, 其中纵坐标为  $\sum (K-1)/C_v$ 。

本文采用线性趋势分析方法研究沱沱河流域径流及气候因子的长期变化趋势, 采用  $F$  检验方法检验气候变化趋势是否稳定, 利用相关分析方法探讨气候变化因子与径流量在不同时间尺度上的相关关系<sup>[17]</sup>。

### 3 长江源流域气候变化特征

#### 3.1 气温变化特征

##### 3.1.1 气温的年际变化

长江源区年平均气温变化呈持续增加趋势,其气候倾向率为 $0.37\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{a})^{-1}$ [10]。为了验证相关结论,我们对沱沱河流域进行研究,结果如图2,可以看出,沱沱河流域年平均气温为 $-8.95\sim-1.99\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,最高、最低值分别出现在2010年和1986年;年平均

最高气温在 $1.13\sim 6.12\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间波动,最高值出现在2010年,最低值出现在1985年;年平均最低气温在 $-14.50\sim-8.25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之前,2009年最高,1985年最低。从平均气温的年际变化趋势来看,近35 a来沱沱河流域年平均气温、年平均最高及最低气温均呈显著增加,气候倾向率分别为 $0.68、0.49、0.95\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{a})^{-1}$ (分别通过 $0.001、0.001、0.001$ 的显著性水平检验)。综上,年均气温、最高气温及最低气温呈波动式增暖趋势,年均最低气温变化幅度最大。

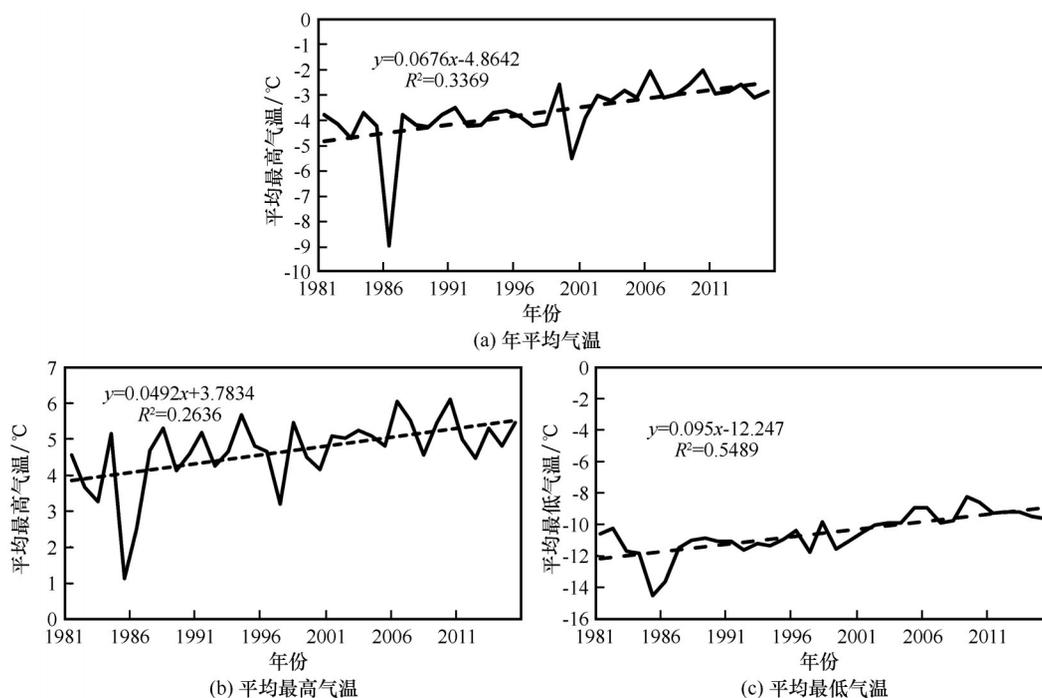


图2 1981—2015年沱沱河气温变化

Fig. 2 The variations of annual mean temperature (a), annual mean maximum temperature (b) and annual mean minimum temperature (c) in the Tuotuo River basin, 1981—2015

长江源区四季平均气温变化呈增加趋势,其气候倾向率分别为 $0.27、0.31、0.39、0.48\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{a})^{-1}$ [10]。通过计算沱沱河流域各季节的气候倾向率,可以发现年均气温及最低气温在各个季节均呈显著升高趋势,特别是春、夏季的年均气温及最低气温气候倾向率升高幅度最为明显(均达到 $0.001$ 的显著性水平);平均最高气温以春、冬季升高趋势显著(达到 $0.05$ 的显著性水平),夏、秋季的变化趋势并不明显。可见在全球气候变暖背景下研究区主要在春、夏季增暖趋势显著、而秋、冬季增温缓慢,这些特点与自20世纪60年代至90年代流域的各季增暖趋势基本一致[13],但增温幅度偏大。

##### 3.1.2 气温的年代际变化

从沱沱河流域年均气温、最高气温及最低气温的逐年代变化特征来看(表1),20世纪80年代各季平均气温、最高气温及最低气温均为负距平,为一个相对寒冷的时期,冷空气活动较多;90年代各季的年平均气温、最高气温及最低气温均比80年代显著升高,除了春、夏季的年平均气温、最高气温、最低气温以及春季的年平均最低气温为正距平,其余时期仍为负距平,多数季节的年平均气温、最高气温、最低气温的增暖趋势在80年代至90年代与青藏高原的增温趋势基本一致[18],80年代中后期开始进入相对高温的时期,90年代升温更为显著;进入21世纪00年代以及2011—2015年,除春季的最高气温偏低以外,各季均为正距平,为相对温暖期。

表 1 沱沱河流域逐年代气温距平

Table 1 The decadal variations of temperature anomaly (annual mean, annual maximum and annual minimum air temperatures) for the four seasons in Tuotuo River basin

年份	年平均气温/℃				最高气温/℃				最低气温/℃			
	春	夏	秋	冬	春	夏	秋	冬	春	夏	秋	冬
1981 - 1990年	-0.64	-0.41	-0.82	-1.15	-0.81	-0.28	-0.72	-1.02	-0.60	-0.68	-1.10	-1.35
1991 - 2000年	0.10	0.02	-0.16	-0.62	0.41	0.26	-0.03	-0.45	0.16	-0.25	-0.35	-0.65
2001 - 2010年	0.56	0.38	0.98	1.79	0.40	0.00	0.74	1.47	0.77	0.94	1.46	2.02
2011 - 2015年	0.41	0.60	1.42	1.19	-0.20	0.25	0.78	0.72	1.17	0.88	1.60	1.84

3.2 降水量的年际变化

长江源区年际降水量整体呈稳定的缓慢增加趋势<sup>[19]</sup>, 2005年之前, 长江源区年及夏、秋季的降水量呈减少趋势, 2005年之后源区年及四季降水量均呈显著的增加趋势<sup>[10]</sup>。为了验证相关结论, 我们对沱沱河流域进行研究, 结果如图3, 1981 - 2015年沱沱河流域的降水量的年际变化如图3所示。由图3可以看出, 年降水量在180.6 ~ 469 mm之间,

最小值出现在年平均气温相对较高的90年代的1994年, 最大值出现在年平均气温最高的21世纪初的2009年。沱沱河流域年降水量存在显著的年际波动特征, 并且呈逐年显著增加趋势, 气候倾向率为 $25.17 \text{ mm} \cdot (10\text{a})^{-1}$ , 通过了0.05的显著性检验水平, 结合[图1(a)]年降水量从80年代至21世纪初经历了一个从冷干转为暖湿的变化过程。从各季节降水量的年际变化来看, 春、夏、秋、冬降水

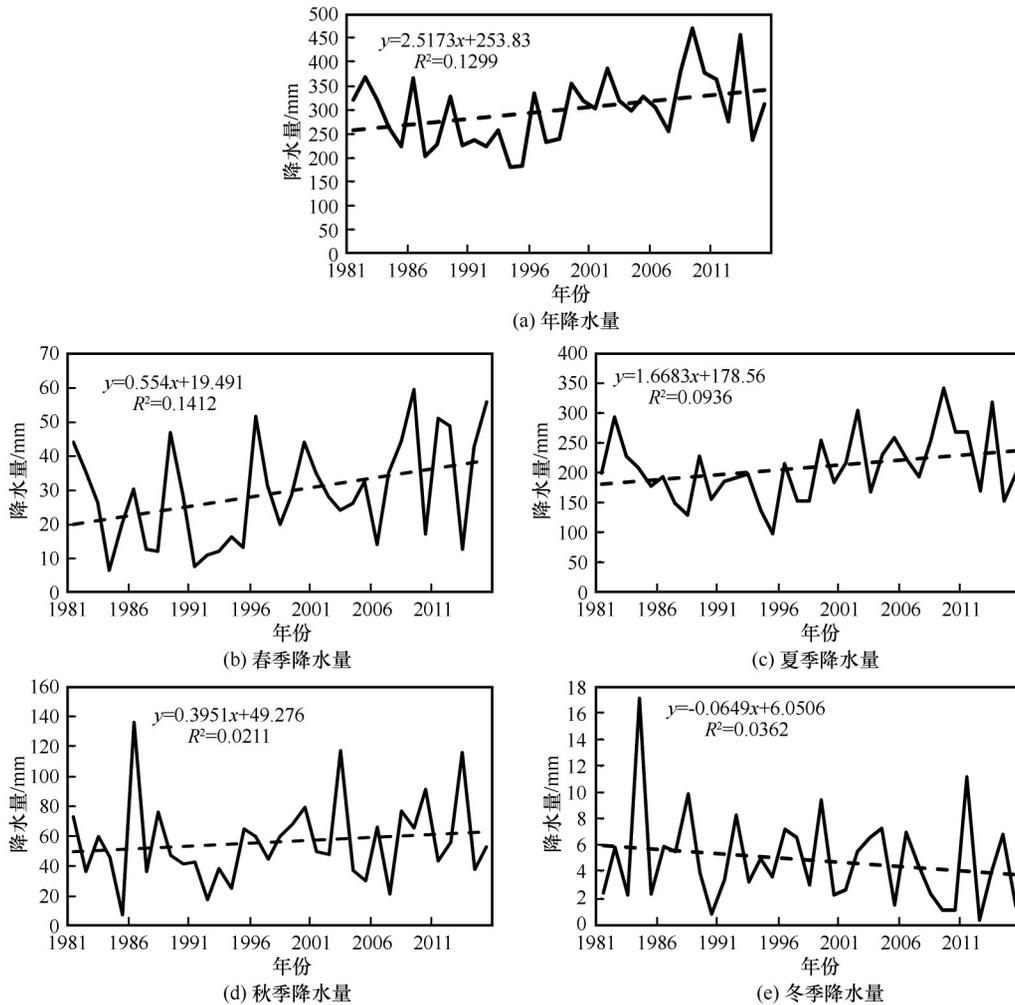


图3 1981 - 2015年沱沱河年降水量及四季变化

Fig. 3 The variations of precipitation of annual mean (a) and seasonal mean (b, c, d, e) in the Tuotuo River basin, 1981 - 2015

量的气候倾向率为 5.54、16.68、3.95、-0.65 mm·(10a)<sup>-1</sup>，冬季降水量整体呈减少趋势，与以往对源区冬季降水量呈增加趋势<sup>[10]</sup>有所不同，可能与选择的水文站点、时间长度有关。汛期和非汛期降水量的倾向率为 29.43、-0.29 mm·(10a)<sup>-1</sup>(图略)，可以看出季节降水量以夏季的增加趋势最为显著，通过 0.05 显著性检验水平，此外除春、夏、秋季的降水量变化趋势一致，呈增加趋势外，冬季降水量呈减少趋势，汛期和非汛期降水量以汛期降水量增加趋势尤为显著，通过 0.05 显著性检验水平，非汛期降水量则呈弱减少趋势。这意味着在全球变暖的背景下，流域降水在季节分配上发生了变化，暖季降水增加，冷季降水略有减少，由于研究时段不同，与张国胜等<sup>[13]</sup>研究结果沱沱河流域 1959 - 2003 年暖季降水略有减少，冷季降水增加的趋势呈相反态势。

在 20 世纪 80 年代和 90 年代全球中高纬大陆大部分地区降水量显著增加，从沱沱河流域降水量的逐年代变化特征来看(表 2)，流域年、汛期和春、夏季降水距平百分率在 20 世纪 80 年代是负距平，为降水偏少的时期，在 90 年代继续偏少，之后在 21 世纪 00 年代以及 2011 - 2015 年为正距平，在 13.04% ~ 51.50%；冬季和非汛期的降水量均在 20 世纪 80、90 年代以偏多为主，21 世纪 00 年代转为负距平，以冬季减幅最大，2011 - 2015 年冬季降水表现为偏少，非汛期降水表现为偏多；秋季降水表现为除 90 年代为偏少时期，其余年代为降水偏多时期。综上，年、汛期、非汛期及各季降水量均为 90 年代比 80 年代明显减少，除冬季和非汛期以外，降水量在 21 世纪 00 年代比 90 年代增多，除夏季和汛期降水在 2011 - 2015 年比 21 世纪 00 年代减少以外，其余时期降水增多。

表 2 沱沱河流域逐年代降水距平百分率

Table 2 The decadal variations of precipitation anomaly of the four seasons and flood season, non-flood season, annual mean in Tuotuo River basin

年份	春	夏	秋	冬	汛	非汛期	年
1981 - 1990 年	-3.08%	-5.01%	1.01%	13.60%	-5.60%	15.50%	-3.28%
1991 - 2000 年	-13.00%	-14.10%	-9.75%	5.70%	-14.00%	1.33%	-12.93%
2001 - 2010 年	16.23%	19.16%	8.73%	-19.00%	19.40%	-17.00%	16.25%
2011 - 2015 年	51.50%	13.04%	14.74%	-3.90%	17.20%	22.4%	16.60%

### 3.3 蒸发量变化特征

#### 3.3.1 蒸发量的年际变化

刘光生等<sup>[6]</sup>的研究表明，自 1961 - 2007 年长江源区年及春、夏、秋季蒸发量呈增加趋势，冬季水面蒸发量呈减少趋势。与长江源区蒸发量统计结果有所不同，从沱沱河流域多年蒸发来看(图 4)，沱沱河流域的年蒸发量在 1 326.8 ~ 1 980.9 mm 之间，最多值出现在 1995 年，最小值出现在 1986 年；春季蒸发量在 400.6 ~ 627.2 mm 之间，1995 年最多，2012 年最少；夏季蒸发量在 436.5 ~ 794.8 mm 之间，1995 年最多，2010 年最少；秋季蒸发量在 229.3 ~ 445.3 mm 之间波动，2010 年最多，1981 年最少；冬季蒸发量为 120.6 ~ 292.8 mm，最多值出现在 2005 年，最少值出现在 1999 年。从近 35 a 流域年及各季的气候倾向率来看，除冬季为不显著增多趋势外，年及春、夏、秋季均呈减少趋势，气候倾向率分别为 -21.00、-4.40、-16.37、5.75 mm·(10a)<sup>-1</sup>，其中夏季减少趋势较为明显(达到 0.1 的显著性水平)，蒸发量的减少有利于改善流域内水

分条件。通过计算汛期和非汛期期间的变化趋势，可以发现，汛期、非汛期的蒸发量均呈减少趋势，气候倾向率分布为 -23.07、0.70 mm·(10a)<sup>-1</sup>。

#### 3.3.2 蒸发量的年代际变化

由近 35 a 沱沱河流域蒸发量的年代际变化来看(表 3)，在 20 世纪 80 年代除秋、冬季蒸发量为正距平外，其余时期为负距平，可以看出 80 年代是蒸发量相对偏少的时期；90 年代整体蒸发量仍为相对偏多的时期，春、夏季及汛期、年蒸发量均为正距平，其余时期为负距平值，汛期蒸发量偏多最明显，为 73.19 mm；21 世纪初的 10 年，秋、冬季和非汛期蒸发量偏多，春、夏季及汛期、年蒸发量呈偏少的态势，汛期蒸发量偏少最明显，为 53.29 mm；2011 - 2015 年蒸发量整体偏少，特别是年蒸发量偏少最多，为 63.73 mm。

## 4 长江源径流的变化特征

### 4.1 径流的年际变化

苏中海等<sup>[20]</sup>的研究表明，1956 - 2012 年长江源

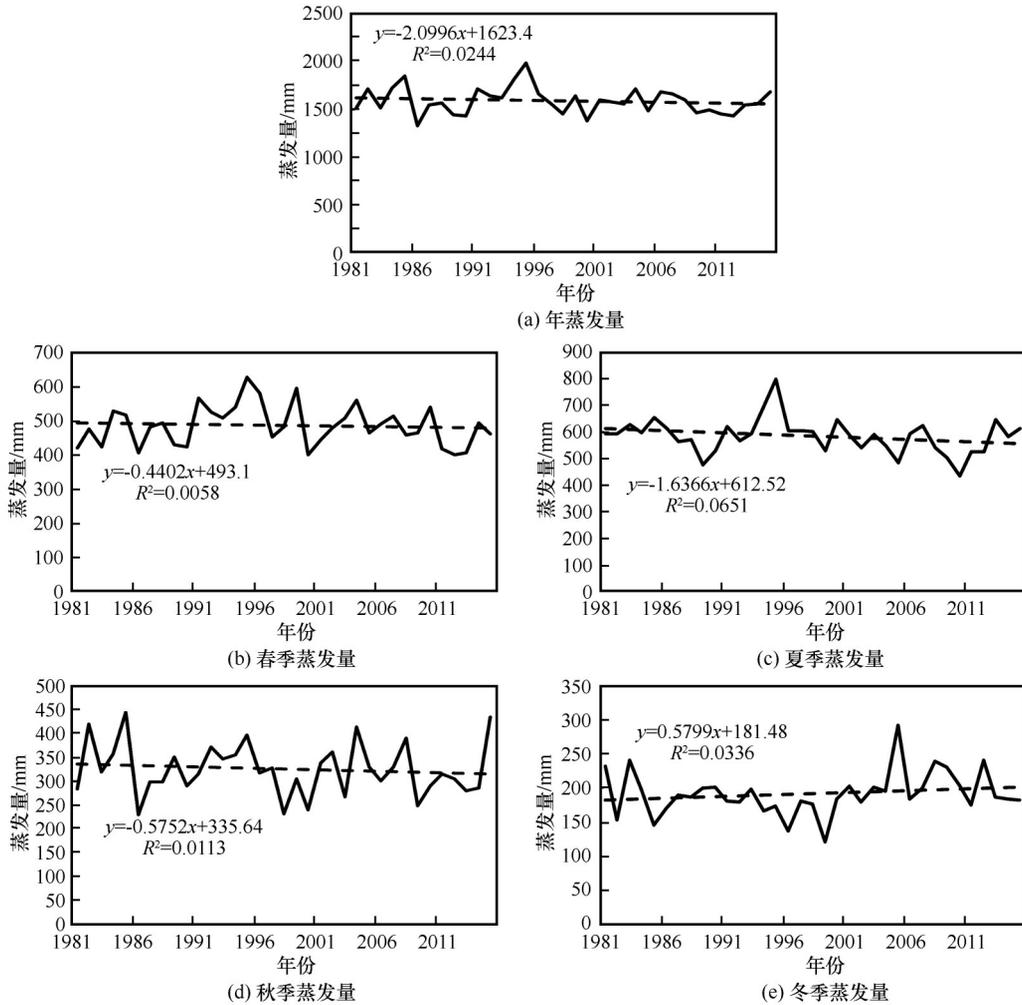


图4 1981 - 2015年沱沱河年蒸发量及四季变化

Fig. 4 The variations of evaporation, annual (a) and seasonal (b, c, d, e), in Tuotuo River basin, 1981 - 2015

表3 沱沱河流域逐年代蒸发量距平(单位: mm)

Table 3 The decadal variations of evaporation anomaly of the four seasons and flood season, non-flood season, annual mean in Tuotuo River basin (unit: mm)

年份	春	夏	秋	冬	汛期	非汛期	年
1981 - 1990年	-33.57	-2.66	3.89	0.48	-19.89	-3.33	-33.29
1991 - 2000年	34.64	42.09	-5.00	-21.95	73.19	-31.07	49.14
2001 - 2010年	-1.08	-39.44	1.10	21.47	-53.29	34.41	-15.86
2011 - 2015年	-58.38	-6.58	-1.92	1.87	-30.42	-30.93	-63.73

区径流量整体呈增加趋势,上游径流量年际变化较下游剧烈。与前人研究相似,从图5可以看出,流域年平均流量年际波动显著,整体呈显著增加趋势,气候倾向率为  $8.10 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot (10\text{a})^{-1}$  (通过 0.001 显著性水平检验),四季的平均流量均呈显著增加趋势,气候倾向率分别为 1.88、20.17、11.91、 $0.14 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot (10\text{a})^{-1}$  (各季平均流量均达到 0.001 显著性水平)。汛期和非汛期平均流量的气候倾向率分别为 17.39、 $1.66 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot (10\text{a})^{-1}$  (均通过 0.001 显

著性水平检验)。

变差系数  $C_v$  常用来表示径流年际变化的总体特征,其大小可以反映出年平均径流相对于多年平均流量的离散程度,  $C_v$  值越大表示年平均径流量相对于多年平均径流量的变差越大<sup>[21-23]</sup>。沱沱河流域年平均流量的变差系数  $C_v$  值为 0.44, 恰好符合季节积雪融雪或雨水补给为主的河流的  $C_v$  值范围<sup>[22]</sup>。

#### 4.2 径流的年代际变化

由表4可以看出,沱沱河流域各季节及汛期、

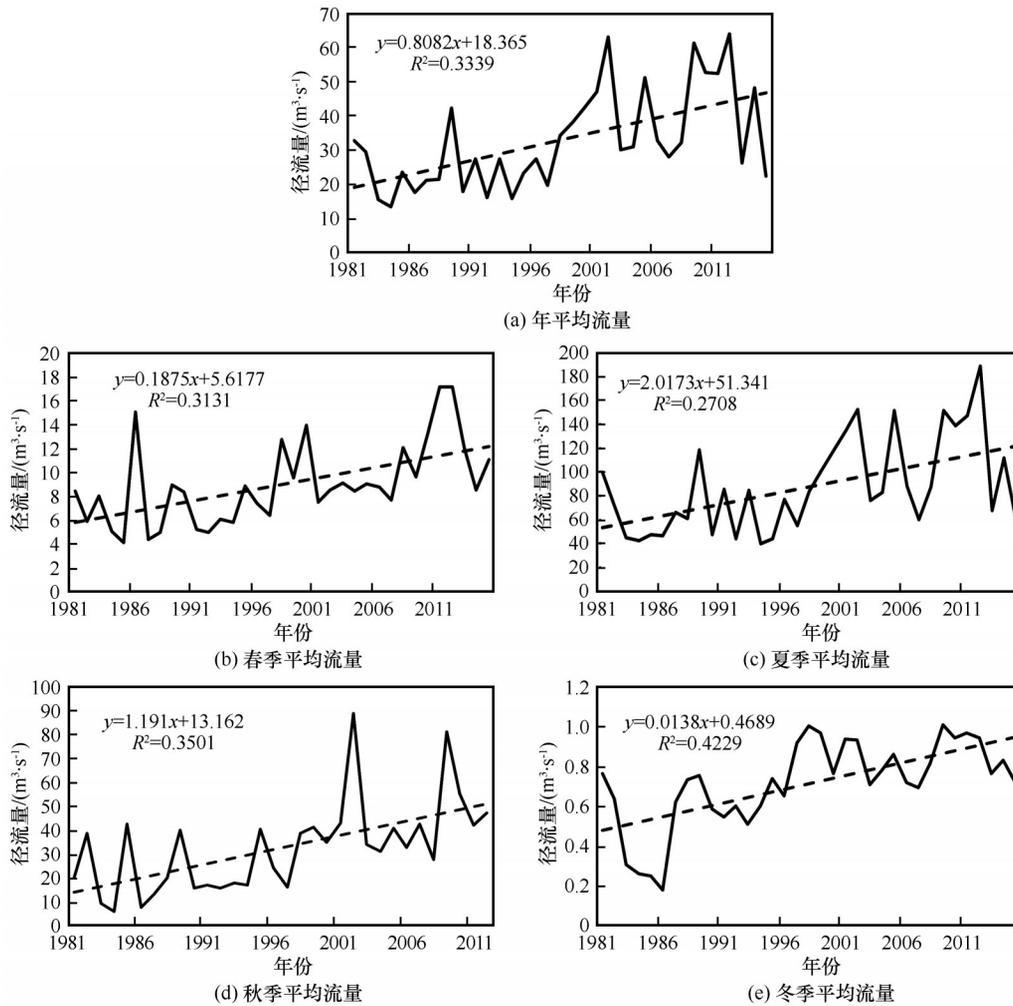


图5 1981 - 2015年沱沱河年及四季平均流量变化

Fig. 5 The variations of annual mean runoff (a) and the four seasonal mean runoff (b, c, d, e) in Tuotuo River Station, 1981 - 2015

非汛期、年平均流量均呈逐年代递增的趋势，20世纪80年代各季节及汛期、非汛期、年平均流量为负距平，为各年代值最小；90年代各时期平均流量显著增大，到21世纪初的10年，各时期平均流量持续增大，转为正距平，到2011 - 2015年除秋季、非汛期、年平均流量外，各时期平均流量为各年代最大。为进一步了解径流的丰枯变化，以距平百分率划分径流的丰枯等级，距平百分率以  $P$

$[P=(\text{某年径流量}-\text{多年平均值})/\text{多年平均值}\times 100\%]$ 来表示： $P\geq 20\%$ 为丰水； $10\%<P<20\%$ 为偏丰； $-10\%\leq P\leq 10\%$ 为平水； $-20\%\leq P<-10\%$ 为偏枯； $P<-20\%$ 为枯水<sup>[24]</sup>。由计算结果可以看出，20世纪80年代是一个相对枯水期，平均流量为各年代最少；90年代是相对偏枯的时期，到21世纪00年代以及2011 - 2015年，平均流量进入相对丰水期。

表4 沱沱河平均流量逐年代变化(单位： $\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ )

Table 4 The decadal variations of the four seasons and flood season, non-flood season, annual mean runoff anomaly in Tuotuo River basin (unit:  $\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ )

年份	春	夏	秋	冬	汛期	非汛期	年
1981 - 1990年	-18.34	-26.50	-36.13	-28.96	-27.75	-35.38	-28.14
1991 - 2000年	-9.72	-16.65	-21.33	1.68	-16.96	-19.78	-17.11
2001 - 2010年	4.74	28.09	41.43	16.84	28.27	44.84	30.51
2011 - 2015年	46.84	30.12	32.10	17.44	32.82	20.23	29.54

## 5 气候因子对径流的影响

为了讨论长江源气候因子与平均流量之间的关系,以沱沱河为例,深入分析降水量与径流量、多雨年和少雨年环流形势、气温与径流量、蒸发量与径流量以及气候变化对径流量的综合影响,探索气候变化对长江源径流的影响机理。

### 5.1 降水量与流量的相关分析

图6为经过标准化处理后的降水量与径流量曲线,年降水量与年平均流量的年际变化具有较好的一致性,两者间的波动起伏对应关系较好,两者的相关系数高达0.49(通过0.01的显著性检验),在35 a当中正、负值一致的年份有23年,一致率达到65.7%。因此,可以认为降水量是影响沱沱河流域径流量的主要因子。

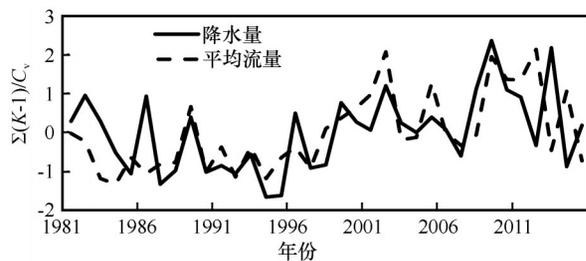


图6 1981 - 2015年沱沱河年降水量和平均流量的差积曲线  
Fig. 6 The difference curve of annual rainfall and runoff in the Tuotuo River, 1981 - 2015

为了进一步探讨降水量与流量的关系,表5列出了各季节、汛期、非汛期及年降水量与流量的关系,由此可知,秋、冬季和非汛期降水量与各季节、汛期、非汛期和年流量关系不显著,并且秋、

表5 沱沱河降水量与平均流量的相关系数

Table 5 The correlation coefficients between precipitation and runoff for the four seasons and flood season, non-flood season, annual mean in Tuotuo River basin

径流量	春	夏	秋	冬	汛期	非汛期	年
春	0.55***	0.38*	-0.03	-0.07	0.36*	0.01	0.49**
夏	0.46**	0.69***	0.14	-0.01	0.70***	0.19	0.69***
秋	0.23	0.68***	0.16	-0.01	0.69***	-0.17	0.64**
冬	0.39*	0.34*	0.08	-0.19	0.42*	-0.17	0.36*
汛期	0.44**	0.72***	0.20	-0.01	0.74***	0.15	0.69***
非汛期	0.37*	0.68***	0.17	-0.26	0.68***	-0.14	0.66***
年	0.45**	0.72***	0.19	-0.28	0.74***	-0.03	0.72***

注: \*、\*\*和\*\*\*分别代表通过0.05、0.01、0.001信度的检验;以上相关系数中,当降水量统计期间落后于径流量统计期间时,均为相应时期内当年降水量与滞后一年的径流量的相关系数。

冬季及非汛期三个时间段降水量多为固态降水,对径流量的补给作用不明显;其次可以看出,夏季降水量与各个季节和汛期、非汛期、年流量存在显著的正相关,并且注意到春季降水量与各个时段的流量关系显著,这可能与春季降水增多以及温度升高所引起的融冰化雪有关,增加了对径流的补给作用,沱沱河流域径流的产生极其复杂,既有积雪和冰融化产生的径流,也有降水变化产生的径流,已有研究表明,沱沱河以上降水和非降水因素对径流量增大的贡献分别为22.89%和77.11%<sup>[25]</sup>,但各产流因子在径流变化中的贡献尚不清楚,有待进一步深入研究,春、夏季以及汛期降水量的多少很大程度上决定流域流量的丰枯;除了秋、冬季、非汛期外,各季、汛期、年流量不仅与同期降水量存在明显的正相关关系,并且与前期降水量存在一定的显著相关,比如当年的夏季流量与同期降水量相关系数为0.69(达到0.001显著性水平),与前期春季降水量关系也较显著,通过0.01显著性水平检验。

### 5.2 沱沱河流域多、少雨年的环流形势

由表5可以看出,夏季降水量与流量显著相关,说明夏季降水的多少对沱沱河流域同期夏季流量有明显的影 响,当夏季降水量偏多(少)时,流域流量偏多(少),这里进一步分析了6-8月沱沱河流域多、少雨期间的环流形势,加深对降水量与流量存在显著相关关系的理解,根据降水量标准化值选取大于1的为多雨年,小于-1值为少雨年,典型多雨年为1982年、2002年、2009年、2010年、2011年、2013年,典型少雨年为1987年、1988年、1994年、1995年、1997年、1998年,用这些年份进行合成分析,由于从地面到整层积分的水汽输送特征能够综合体现深厚气层中的湿度场和流场并且明显反应出大尺度环流系统,这里主要讨论多、少雨年期间异常水汽输送特征。由图7(a)可以看出多雨年期间,影响沱沱河流域的水汽主要来源于季风携带的孟加拉湾水汽以及中纬度偏西风的水汽输送,在两支水汽共同作用下,沱沱河流域上空水汽输送 $>5 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ;而少雨期[图7(b)],季风携带的偏南的水汽较弱,水汽输送较小, $<5 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

### 5.3 气温与流量的相关关系

以往研究表明<sup>[9]</sup>在青藏高原地区,气温对径流的影响主要表现在三个方面:1)影响冰川和积雪的消融;2)影响流域总的蒸发量;3)改变流域高山区

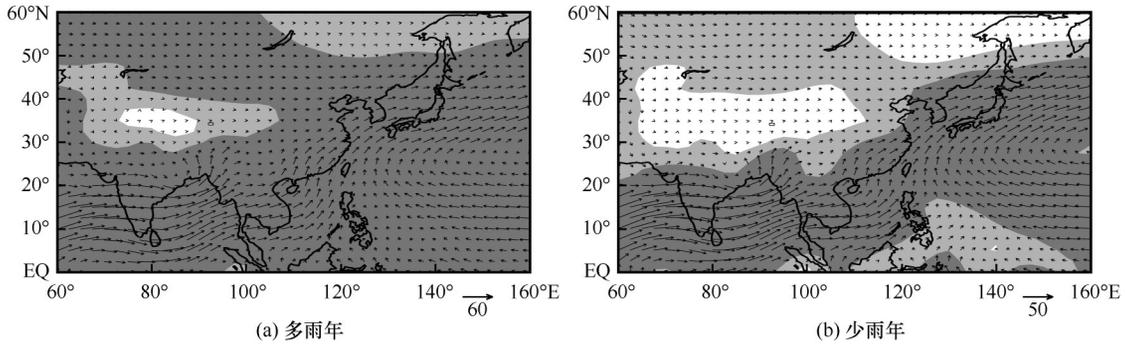


图7 多雨年(a)和少雨年(b)夏季平均整层水汽输送通量场(浅、深色阴影区表示水汽输送 $\geq 5$ 、 $10 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ 的区域, 方框表示沱沱河流域区)

Fig. 7 Distributions of the vertically integrated water vapor flux for the rainiest (a) and rainless years (b) (The light and dark shadow areas indicate areas where water vapor transport is greater than or equal to  $5$  and  $10 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ .

The black box indicates the Tuotuo River)

的降水形态。图8可知,年流量与年均、最高、最低气温存在显著的正相关关系,相关系数分别为0.40、0.26、0.62,表明气温的升高对流量的增多起到了增强作用,但气温的变化是如何影响沱沱河流域径流的变化需要进一步的深入研究,以往的研究表明<sup>[26-27]</sup>,在全球变暖的背景下,长江源区大多数冰川处于退缩状态,冰川退缩加速冰川融雪,从而增加了径流的补给量;沱沱河流域发源于各拉丹冬雪山群的姜古迪冰川,张立芸等<sup>[28]</sup>指出,长江源各拉丹冬地区冰川普遍退缩,与全球变暖

存在一定的对应关系,在1969-2012年姜古迪冰川整体和局部退缩明显,1970-2009年气温显著升高,特别是在21世纪10年代最为显著,说明冰川变化与气候变化表现出一定的对应关系。综上所述,近35 a沱沱河流域随着气温的升高,有助于冰川和积雪融化,对流量的补给起到促进作用,特别是在21世纪以来,2001年之后流量的显著增加跟温度急剧上升导致的冰川和积雪融水关系密切,冰川融水对流域径流的影响机制将在以后的研究中深入讨论。

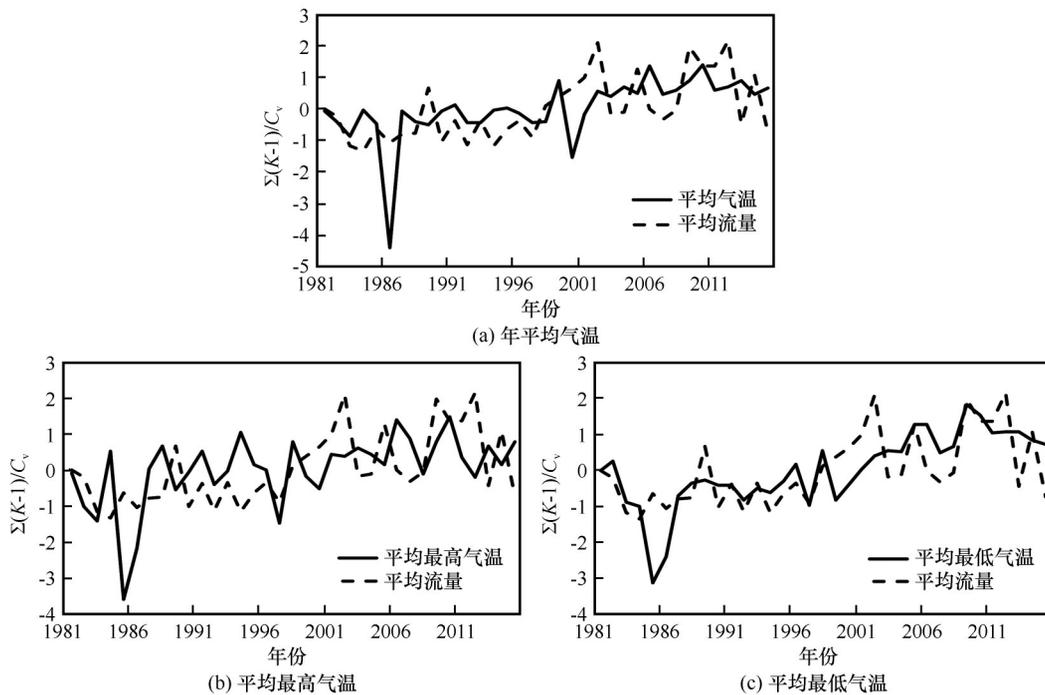


图8 1981-2015年沱沱河年气温和径流量的差积曲线

Fig. 8 The difference curve of annual air temperature and runoff in the Tuotuo River, 1981-2015

表6列出了年均、最低气温与流量的相关关系, 夏季平均气温与除春季以外的其余各季、汛期、非汛期及年流量存在显著的正相关关系, 说明夏季随着气温较前冬、春季进一步变暖, 加速了流域冰川的消融, 与此期间, 随着西太平洋副热带高压的西移以及印度西南季风的爆发, 研究区进入雨季, 降水量显著增多, 径流量明显增多<sup>[15]</sup>, 且往往径流与气候要素之间存在时间滞后性, 秋、冬季、非汛期的流量与夏季平均气温关系明显; 春、夏季的平均最低气温与不同时期的流量均存在较好的相关关系, 且春季平均最低气温与非汛期流量关系显著, 说明春季最低气温升高引起的冰雪融水补给作用加大;

夏季的平均最低气温与除春季以外的各时段径流量存在显著正相关(达到0.001显著性水平); 同时注意到在冬季降水量减少情况下, 冬季最低气温与冬季流量相关明显, 冬季最低气温升高, 使得冰雪消融和土壤冻结推后, 特别是进入21世纪以来, 暖冬的出现导致地面升温明显, 冻土退化、释放地下水, 补给河流, 同时冻土活动层厚度增加, 季节性冻结减少, 土壤冻融的变化加强了水分向地下的迁移, 使得冬季河流径流增多, 对气候变暖的响应显著<sup>[29]</sup>。夏季最高气温与同期夏季流量关系显著, 前期秋季最高气温与春季流量存在显著负相关关系, 前冬最高气温与秋季流量存在显著正相关关系(表略)。

表6 沱沱河气温与径流量的相关系数

Table 6 The correlation coefficients between air temperature and runoff in Tuotuo River basin

径流量	年平均气温				最低气温			
	春	夏	秋	冬	春	夏	秋	冬
春	0.17	0.19	0.41*	0.05	0.53**	0.47**	0.08	-0.15
夏	0.19	0.46**	0.16	0.29	0.38*	0.83***	0.35*	0.29
秋	0.33*	0.32*	0.36*	0.37*	0.32*	0.67***	0.40*	0.33*
冬	0.35*	0.58***	0.47	0.56***	0.40*	0.74***	0.62***	0.45**
汛期	0.23	0.47**	0.30	0.32**	0.39*	0.84***	0.47**	0.30
非汛期	0.45**	0.40*	0.36*	0.44**	0.49**	0.74***	0.51**	0.30
年	0.26	0.47**	0.31	0.47**	0.41*	0.84***	0.48**	0.37*

注: \*、\*\*和\*\*\*分别代表通过0.05、0.01、0.001信度的检验; 以上相关系数中, 当气温统计期间落后于径流量统计期间时, 均为相应时期内当年气温与滞后一年的径流量的相关系数。

5.4 蒸发量与流量的相关关系

流域的蒸发量是地表水资源平衡中的主要支出项, 蒸发量的增多或减少, 必然加大或削弱地表水资源的消耗, 导致流域流量的减少或增加。由图9可知, 流域年蒸发量与流量呈负相关, 相关系数为-0.40。表7具体列出了四季、汛期、非汛期及年与各时段流量的相关关系, 夏季的蒸发量与除秋季外的各时段流量存在显著的负相关关系, 表明夏季的蒸发量对除秋季外的各时段的流量有明显的削弱作用。

表7 沱沱河蒸发量与平均流量的相关系数

Table 7 Correlation coefficients between evaporation and mean runoff in Tuotuhe Station

蒸发量	春	夏	秋	冬	汛期	非汛期	年
春	-0.47**	-0.33*	0.05	-0.10	-0.26	-0.27	-0.58***
夏	-0.29	-0.61***	-0.18	0.13	-0.57***	-0.11	-0.47**
秋	0.03	-0.30	-0.06	0.22	-0.21	0.07	-0.09
冬	-0.06	-0.40*	-0.20	0.15	-0.35*	-0.01	-0.24
汛期	-0.23	-0.55***	-0.22	0.14	-0.49**	-0.10	-0.40*
非汛期	-0.05	-0.49**	-0.21	0.20	-0.42**	0.06	-0.27
年	-0.22	-0.56***	-0.22	0.30	-0.50**	-0.03	-0.40

注: \*、\*\*和\*\*\*分别代表通过0.05、0.01、0.001信度的检验; 以上相关系数中, 当蒸发量统计期间落后于径流量统计期间时, 均为相应时期内当年蒸发量与滞后一年的径流量的相关系数。

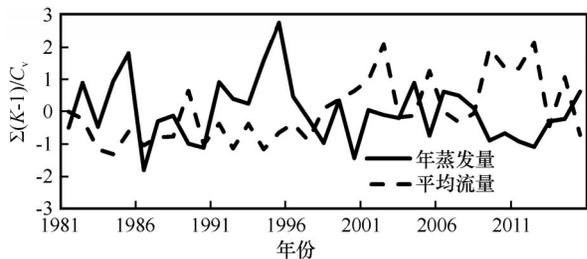


图9 1981 - 2015年沱沱河年蒸发量和平均流量的差积曲线  
Fig. 9 The difference curve of annual evaporation and runoff in the Tuotuo River, 1981 - 2015

5.5 气候变化对径流的综合影响

综上所述, 在全球变暖背景下, 近35 a沱沱河流域降水量增多<sup>[30]</sup>, 气温显著升高, 蒸发量减少, 导致该流域流量显著增多, 为体现以上各气象因子对流域流量的综合影响, 利用1981 - 2015年沱沱

河流域逐年实测降水、气温、小型蒸发皿蒸发量资料,采用多元线性回归方程建立气候变化对沱沱河流域流量影响的评估模型:

$$Q=114.710+0.035P+5.407T_{\min}-0.022E \quad (3)$$

式中:  $Q$  为年径流量( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ );  $P$  为年降水量(mm);  $T_{\min}$  为年平均最低气温( $^{\circ}\text{C}$ );  $E$  为年蒸发量(mm)。

回归方程中复相关系数为 0.69,  $F=9.42 > 7.56$  (通过 0.01 显著性水平检验),表明回归方程回归效果显著,根据式(2)建立 1981-2015 年年流量实测值与回归方程拟合值的曲线,由图 10 可知,大多数年份拟合效果较好,两者的平均相对误差为 16.3%,因此,根据式(2)建立的回归方程在沱沱河流域具有一定的可信度,也可以看出降水量、气温、蒸发量三个气象因子是影响沱沱河流域流量变化的主要因素。

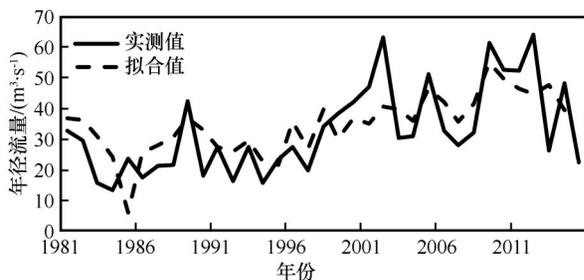


图 10 1981-2015 年沱沱河水文站年平均流量实测值与模拟值曲线

Fig. 10 Comparison between observed and simulated annual runoff in the Tuotuo River during 1981-2015

## 6 结论与展望

气候变暖背景下,从 20 世纪 60 年代以来,长江源区气温年和四季增温显著;蒸发量、径流量总体呈增加趋势;进入 21 世纪后,源区降水量呈增加趋势。沱沱河作为长江源区的主要径流,以此为代表研究长江源区气候变暖对径流的影响具有重要的现实意义,以沱沱河为例,得出以下结论:

(1) 近 31 a 沱沱河流域年和各季平均的平均气温及最高气温、最低气温均呈显著增加趋势,年气候倾向率分别为  $0.68$ 、 $0.49$ 、 $0.95 \text{ }^{\circ}\text{C} \cdot (10\text{a})^{-1}$ ;流域年和除冬季以外的各季降水量均呈增加趋势,其中年降水量呈显著增加趋势,气候倾向率达  $25.17 \text{ mm} \cdot (10\text{a})^{-1}$ ;流域年及夏、秋季蒸发量呈减少趋势,春、冬季呈增多趋势;流域流量在年及四季均呈显著增多趋势,年平均流量增多显著,气候倾向率为  $8.10 \times 10^8 \text{ m}^3 \cdot (10\text{a})^{-1}$ 。

(2) 近 35 a 流域流量与降水量、气温呈显著正相关,与蒸发量呈负相关关系。特别是春季降水量与各个时段的流量关系显著,这可能与春季降水增多以及温度升高所引起的融冰化雪有关,增加了对径流的补给作用;夏季平均最低气温与流量关系显著,夏季平均最低气温升高,加速了流域冰川的消融,与此同时,随着西太平洋副热带高压的西移以及印度西南季风的爆发,研究区进入雨季,降水量显著增多,流量明显增多;冬季最低气温与冬季径流量相关明显,冬季最低气温升高,使得冰雪消融和土壤冻结推后,冻土退化、释放地下水,补给河流,同时冻土活动层厚度增加,季节性冻结减少,土壤冻融的变化加强了水分向地下的迁移,使得冬季河流流量增多。

(3) 气候因子与流量的关联度:降水量>气温>蒸发量。沱沱河流域流量随流域降水量的增加(减少)、最低气温的升高(降低)和蒸发量的减小(增大)而增加(减少);在这三个影响因子中,作为地表水资源供给项的降水量对于流量的贡献是最为显著的,气温次之,最低气温升高有助于冰川、积雪消融,对流量的补给起到促进作用,蒸发量影响要明显低于前两者。

本研究对气候变化背景下长江源区径流变化特征进行了系统分析,但本文仅以沱沱河为例,具有局限性,未来可以结合其他长江源区重要流域(如:通天河流域、楚玛尔河流域、布曲流域)共同分析,得出更全面准确的结论,为科学服务。另外,沱沱河流域水资源的变化特征及与气候变化之间的联系非常复杂,本文侧重于从气候因子的角度来分析探讨,在以后的研究中将进一步加强对于冰川和冻土变化等对径流影响的定量分析。

## 参考文献(References):

- [1] IPCC. Climate change 2013: the physical science basis: Contribution of working group I to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change [M]. New York: Cambridge University Press, 2013.
- [2] Zhang Lei, Miao Qilong. Precipitation changes in the Tibetan Plateau during the last four decades[J]. Arid Land Geography, 2007, 30(2): 240-246. [张磊, 缪启龙. 青藏高原近 40 年来的降水变化特征[J]. 干旱区地理, 2007, 30(2): 240-246.]
- [3] Kang Xingcheng. The features of the climate changes in the Qing-Zang Plateau area during the last 40 years[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1996, 18(Suppl 1): 281-288. [康兴成. 青藏高原近 40 年来气候变化的特征[J]. 冰川冻土, 1996, 18(增刊 1): 281-288.]
- [4] Wei Zhigang, Huang Ronghui, Dong Wenjie. Interannual and

- interdecadal variations of air temperature and precipitation over the Tibetan Plateau[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2003, 27(2): 157 - 170. [韦志刚, 黄荣辉, 董文杰. 青藏高原气温和降水的年际和年代际变化[J]. *大气科学*, 2003, 27(2): 157 - 170.]
- [5] Kang Shichang, Zhang Yongjun, Qin Dahe, et al. Ice core evidence of temperature rising quickly in the Yangtze River sources region of Qinghai-Xizang Plateau in recent decades[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2007, 52(4): 457 - 462. [康世昌, 张拥军, 秦大河, 等. 近期青藏高原长江源区急剧升温的冰芯证据[J]. *科学通报*, 2007, 52(4): 457 - 462.]
- [6] Liu Guangsheng, Wang Genxu, Hu Hongchang, et al. Climate change characteristics in the source regions of the Yangtze River and Yellow River over the past 45 years[J]. *Resources Science*, 2010, 32(8): 1486 - 1492. [刘光生, 王根绪, 胡宏昌, 等. 长江黄河源区近45年气候变化特征分析[J]. *资源科学*, 2010, 32(8): 1486 - 1492.]
- [7] Wang Keli, Cheng Guodong, Ding Yongjian, et al. Characteristics of water vapor transport and atmospheric circulation for precipitation over the source regions of the yellow and Yangtze Rivers[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2006, 28(1): 8 - 14. [王可丽, 程国栋, 丁永建, 等. 黄河、长江源区降水变化的水汽输送和环流特征[J]. *冰川冻土*, 2006, 28(1): 8 - 14.]
- [8] Qian Kaizhu. Hydrological periods and its responses to climate change in the source region of Yangtze River, China[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2013. [钱开铸. 长江源区水文周期特征及其对气候变化的响应[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2013.]
- [9] Cao Jianting, Qin Dahe, Luo Yong, et al. Discharge changes of the Yangtze River in source area during 1956 - 2000[J]. *Advances in Water Science*, 2007, 18(1): 29 - 33. [曹建廷, 秦大河, 罗勇, 等. 长江源区1956 - 2000年径流量变化分析[J]. *水科学进展*, 2007, 18(1): 29 - 33.]
- [10] Qi Dongmei, Li Yueqing, Chen Yongren, et al. Changing characteristics and cause analysis of the runoff in the source regions of the Yangtze River under the background of climate change[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2015, 37(4): 1075 - 1086. [齐冬梅, 李跃清, 陈永仁, 等. 气候变化背景下长江源区径流变化特征及其成因分析[J]. *冰川冻土*, 2015, 37(4): 1075 - 1086.]
- [11] Tang Xiongpeng, Lü Haishen. Temporal variation of main hydrologic meteorological elements in Tuotuohe River basin[J]. *Water Resources and Power*, 2016, 34(12): 37 - 40. [唐雄朋, 吕海深. 沱沱河流域水文气象要素变化特征分析[J]. *水电能源科学*, 2016, 34(12): 37 - 40.]
- [12] Zhao Ziyue, Chen Kangning, Zhai Jiaqi, et al. Climate evolution law of Tuotuo River meteorological station in Sanjiangyuan region during last 53 years[J]. *Yangtze River*, 2014, 45(1): 24 - 27. [赵子岳, 陈康宁, 翟家齐, 等. 三江源沱沱河气象站53年来气候演变规律分析[J]. *人民长江*, 2014, 45(1): 24 - 27.]
- [13] Zhang Guosheng, Shi Xinghe, Li Dongliang, et al. Climate change in Tuotuohe area at the headwaters of Yangtze River[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2006, 28(5): 678 - 685. [张国胜, 时兴合, 李栋梁, 等. 江源沱沱河区45a来的气候变化特征[J]. *冰川冻土*, 2006, 28(5): 678 - 685.]
- [14] Han Li, Song Kechao, Zhang Wenjiang, et al. Temporal and spatial variations of hydrological factors in the source area of the Yangtze River and its responses to climate change[J]. *Mountain Research*, 2017, 35(2): 129 - 141. [韩丽, 宋克超, 张文江, 等. 长江源头流域水文要素时空变化及对气候因子的响应[J]. *山地学报*, 2017, 35(2): 129 - 141.]
- [15] Yang Jianping, Ding Yongjian, Liu Shiyin, et al. Clacier change and its effect on surface runoff in the source regions of the Yangtze and Yellow Rivers[J]. *Journal of Natural Resources*, 2003, 18(5): 596 - 602. [杨建平, 丁永建, 刘时银, 等. 长江黄河源区冰川变化及其对河川径流的影响[J]. *自然资源学报*, 2003, 18(5): 596 - 602.]
- [16] Chen Jin. Water cycle mechanism in the source region of Yangtze River[J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2013, 30(4): 1 - 5. [陈进. 长江源区水循环机理探讨[J]. *长江科学院院报*, 2013, 30(4): 1 - 5.]
- [17] Wei Fengying. Modern climatic statistical diagnosis and prediction technology[M]. 2nd ed. Beijing: China Meteorological Press, 2007. [魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术[M]. 2版. 北京: 气象出版社, 2007.]
- [18] Cai Ying, Li Dongliang, Tang Maocang, et al. Decadal temperature changes over Qinghai-Xizang Plateau in recent 50 years[J]. *Plateau Meteorology*, 2003, 22(5): 464 - 470. [蔡英, 李栋梁, 汤懋苍, 等. 青藏高原近50年来气温的年代际变化[J]. *高原气象*, 2003, 22(5): 464 - 470.]
- [19] Jiang Youcheng, Liu Jiao, Zhang Yueguan, et al. Analysis of spatiotemporal distribution of precipitation changes in the source region of the Yangtze River[J]. *Journal of Water Resources Research*, 2020, 9(3): 335 - 343. [蒋佑承, 刘蛟, 张越关, 等. 长江源区降水变化的时空分布规律分析[J]. *水资源研究*, 2020, 9(3): 335 - 343.]
- [20] Su Zhonghai, Chen Weizhong. Runoff in source Region of the Yangtze River in Recent 60 years Variation characteristics and trend analysis[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2016, 32(34): 166 - 171. [苏中海, 陈伟忠. 近60年来长江源区径流变化特征及趋势分析[J]. *中国农学通报*, 2016, 32(34): 166 - 171.]
- [21] Yang Zhigang, Zhuoma, Lu Hongya, et al. Characteristics of precipitation variation and its effects on runoff in the Yarlung Zangbo River basin during 1961 - 2010[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2014, 36(1): 166 - 172. [杨志刚, 卓玛, 路红亚, 等. 1961 - 2010年西藏雅鲁藏布江流域降水量变化特征及其对径流的影响分析[J]. *冰川冻土*, 2014, 36(1): 166 - 172.]
- [22] Li Lin, Wang Zhenyu, Qin Ningsheng, et al. Analysis of the relationship between runoff amount and its impacting factor in the upper Yangtze River[J]. *Journal of Nature Resources*, 2004, 19(6): 694 - 700. [李林, 王振宇, 秦宁生, 等. 长江上游径流变化及其与影响因子关系分析[J]. *自然资源学报*, 2004, 19(6): 694 - 700.]
- [23] Zhang Hezhen, Zhuoma, Xiang Fei, et al. Effect of climate factors on the runoff over Lhasa River basin during 1981 - 2013[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2015, 37(5): 1304 - 1311. [张核真, 卓玛, 向飞, 等. 1981-2013年气候因子变化对西藏拉萨河径流的影响[J]. *冰川冻土*, 2015, 37(5): 1304 - 1311.]
- [24] Hu Xinglin. Analysis of time-space distribution regulation and evolution tendency of runoff of main Rivers in gansu Province[J]. *Advance in Earth Sciences*, 2000, 15(5): 516 - 521. [胡兴林. 甘肃省主要河流径流时空分布规律及演变趋势分析[J]. *地球科学进展*, 2000, 15(5): 516 - 521.]
- [25] Li Yan, Li Qijiang, Liu Xisheng, et al. Analysis of runoff variation in source region of Yangtze River[J]. *Journal of China Hydrology*, 2017, 37(1): 92 - 95, 32. [李燕, 李其江, 刘希胜, 等. 长江源区径流量变化分析[J]. *水文*, 2017, 37(1):

- 92 - 95, 32. ]
- [26] Wu Hao, Yu Xiaogan. Changes of runoff and sediment in the source region of Yangtze River during the last four decades[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2002, 11(2): 175 - 178. [吴豪, 虞孝感. 近四十年来长江源区河流水沙量的变化[J]. 长江流域资源与环境, 2002, 11(2): 175 - 178. ]
- [27] Liang Pengbin, Li Zhongqin, Zhang Hui, et al. Temporal and spatial variation characteristics of mass balance of global reference glaciers from 1984 through 2016[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2018, 40(3): 415 - 425. [梁鹏斌, 李忠勤, 张慧, 等. 1984 - 2016年全球参照冰川物质平衡时空变化特征[J]. 冰川冻土, 2018, 40(3): 415 - 425. ]
- [28] Zhang Liyun, Tang Ya, Yang Xin. Overall and local changing patterns of main glaciers and their responses to climate change in Geladandong area of Yangtze headwater region during 1969 - 2012[J]. Arid Land Geography, 2014, 37(2): 212 - 221. [张立芸, 唐亚, 杨欣. 1969 - 2012年长江源各拉丹冬地区主要冰川整体和局部变化及其对气候变化的响应[J]. 干旱区地理, 2014, 37(2): 212 - 221. ]
- [29] Zhu Meizhuang, Wang Genxu, Xiao Yao, et al. A study on the changes of soil water infiltration in alpine meadow of permafrost regions in the Tibetan Plateau[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2017, 39(6): 1316 - 1325. [朱美壮, 王根绪, 肖瑶, 等. 青藏高原多年冻土区高寒草甸土壤水分入渗变化研究[J]. 冰川冻土, 2017, 39(6): 1316 - 1325. ]
- [30] Qi Dongmei, Zhang Shunqian, Li Yueqing. Research process on variations of the climate and water resource region of the Yangtze River[J]. Plateau and Mountain Meteorology Research, 2013, 33(4): 89 - 96. [齐冬梅, 张顺谦, 李跃清. 长江源区气候及水资源变化特征研究进展[J]. 高原山地气象研究, 2013, 33(4): 89 - 96. ]

## Effect of climate warming on the runoff of source regions of the Yangtze River : take Tuotuo River basin as an example

LUO Yu<sup>1,2</sup>, QIN Ningsheng<sup>1,2</sup>, PANG Yishu<sup>2</sup>, WANG Chunxue<sup>2</sup>,  
LIU Jia<sup>2</sup>, LI Jinjian<sup>3</sup>, LIU Xisheng<sup>4</sup>

(1. Institute of Plateau Meteorology, China Meteorological Administration / Heavy Rain and Drought-Flood Disasters in Plateau and Basin, Key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu 610072, China; 2. Sichuan Climate Center, Chengdu 610225, China; 3. Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China; 4. Hydrological and Water Resources Survey Bureau of Qinghai Province, Xining 810008, China)

**Abstract:** Under the background of climate warming, the annual and seasonal temperatures of the Yangtze River since the 1960s have shown a significant warming trend; evaporation and runoff have generally increased. Since the beginning of the 21st century, precipitation in the source regions of the Yangtze River has increased. Tuotuo River is the main river in the source areas of the Yangtze River, which is of great practical significance to study the impact of climate warming on the runoff in the source areas of the Yangtze River. By using the hydrological and meteorological observation data from 1981 to 2015, the influence of climate factors on runoff are analyzed in this paper. The results show that the annual and seasonal mean temperature, the mean maximum and minimum temperatures had increased in the 31 years; the annual and seasonal (except winter) precipitations had increased in the 31 years in the Tuotuo River basin; evaporation had shown a decreasing trend in summer, autumn and the year round, together with an increasing trend in spring and winter. Among the climate factors, precipitation was the most important factor to effect runoff, which had increased in summer and had a very close relationship with runoff in summer. The influence of glacier and snow melt water on runoff was followed by the increase of annual mean minimum temperature, and the influence of evaporation was obviously lower than the former two.

**Key words:** source regions of the Yangtze River; global warming; Tuotuo River; climatic factor; runoff

(责任编辑: 周成林; 编辑: 庞瑜, 周成林)