

# 石羊河流域径流量分布特征及对气候变化的响应

——以西营河为例

刘明春<sup>1,2</sup>, 李玲萍<sup>2</sup>, 史志娟<sup>3</sup>, 秦三杰<sup>3</sup>

(1. 中国气象局兰州干旱气象研究所 甘肃省干旱气候变化与减灾重点实验室 中国气象局干旱气候变化与减灾开放实验室, 甘肃 兰州 730020;  
2. 甘肃省武威市气象局, 甘肃 武威 733000; 3. 甘肃省气象局, 甘肃 兰州 730020)

**摘要:** 利用1961—2009年石羊河流域西营河径流量和气象资料, 分析了近49年来径流量变化趋势、年内分配特征及与气象因素的内在关系。结果表明: 近49年来西营河径流量总体呈减少趋势, 冬、夏季减幅大于秋、春季; 90年代四季径流量衰减明显, 特别是年、春、夏季径流出现明显突变; 年径流量补给主要以汛期雨水补给为主, 雨水补给比例在逐渐增加, 冬季积雪融水对径流量的补给比例在减少; 流域内降水量呈较小的增加趋势, 但是夏季降水增幅不明显。气温呈明显升高趋势, 特别是冬季气温趋势系数最大, 受其影响蒸发量均呈增大趋势; 径流量与6—9月降水量呈显著正相关, 但与7、8月气温、蒸发呈显著负相关。分析了未来气温、降水变化在不同情形下对径流量的可能影响, 表明气温对径流量的负效应占据着主导作用, 汛期气温的升高且伴随着蒸发的增大使年总径流量减少, 气候变暖总体不利于流域径流量的增加。

**关键词:** 气候变化; 径流量; 气候因子; 石羊河流域

**中图分类号:** P333.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-7601(2013)01-0193-06

## Distribution characteristics of runoff in Shiyang River basin and its responses to climate change

——The case study of Xiying River

LIU Ming-chun<sup>1,2</sup>, LI Ling-ping<sup>2</sup>, SHI Zhi-juan<sup>3</sup>, QIN San-jie<sup>3</sup>

(1. Key Laboratory of Arid Climatic Change and Disaster Reducing of Gansu Province / Key Open Laboratory of Arid Climatic Change and Disaster Reducing of CMA / Institute of Arid Meteorology, China Meteorological Administration, Lanzhou, Gansu 730020, China; 2. Wuwei Meteorological Bureau of Gansu Province, Wuwei, Gansu 733000, China; 3. Gansu Provincial Meteorological Bureau, Lanzhou, Gansu 730020, China)

**Abstract:** Based on the runoff observation and meteorological data at Xiying River in the Shiyang River basin during 1961—2009, the change trend and annual distribution of runoff as well as their relationship with meteorological factors were analyzed. The results showed that the overall change trend of runoff was going down in the recent 49a, and the decrease range was greater in winter and summer than in spring and autumn. The seasonal runoff decreased obviously in 1990s, especially the evident abrupt changes were found in yearly, spring and summer runoff. The annual runoff came mainly from rainwater during flood seasons, and the proportion of rainwater in total runoff was gradually increased, while that of snow melt water in total runoff was decreased. There was a small increasing trend of precipitation in the river basin, but it was not obvious in summer. The temperature increased significantly, and the trend coefficient of temperature was the largest in winter, which caused the increase trend of evaporation. Correlative analysis showed that the runoff was positively correlated with the monthly precipitation during June to September, but it was negatively correlated with monthly temperature and evaporation during July to August. The probable influences of future temperature and precipitation changes on runoff under different conditions was also analyzed, which showed that the temperature would play a main negative role on runoff, and the rise of temperature along with the increase of evaporation during flood periods would bring out the decrease of total annual runoff. Climate warming would be unfavorable to the increase of runoff in general.

**Keywords:** climate change; runoff variation; climate factor; Shiyang river basin

收稿日期: 2011-12-28

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目(973计划)(2012CB955903, 2010CB428401); 公益性行业(气象)科研专项(GYHY200806021); 甘肃省气象局“十人计划”

作者简介: 刘明春(1966—), 男, 青海互助人, 高级工程师, 主要从事干旱区应用气象研究。E-mail: Liuncwqxj@163.com。

石羊河流域位于甘肃省河西走廊东部,祁连山北麓,乌鞘岭以西,东经  $101^{\circ}41' \sim 104^{\circ}16'$ ,北纬  $36^{\circ}29' \sim 39^{\circ}27'$ 之间,自东向西由大靖河、古浪河、黄羊河、杂木河、金塔河、西营河、东大河、西大河八条河流及多条小沟小河组成(图 1),河流补给来源为山区大气降水和高山冰雪融水,产流面积  $1.11$  万  $\text{km}^2$ ,多年平均径流量  $15.60$  亿  $\text{m}^3$ 。近半个多世纪以来,随着流域工农业生产的发展,中下游地区水土资源被大规模开发利用,对水的需求日益增大,工业、农业与生态用水之间,上、中、下游用水之间的矛盾已变得十分尖锐,流域下流民勤尾间区由于严重超采地下水,出现了地下水水位下降、水库干涸、农田次生盐渍化、植被大面积退化等严重的生态环境问题,“罗布泊”景象初步显现<sup>[1-2]</sup>。近年来许多学者从不同角度对石羊河流域气候、农业生态、水资源、径流变化等方面做了大量研究<sup>[3-13]</sup>。本文通过分析石羊河流域一条支流——西营河径流量历年变化,进一步揭示和印证气候变化所带来的深刻影响及其内在联系。

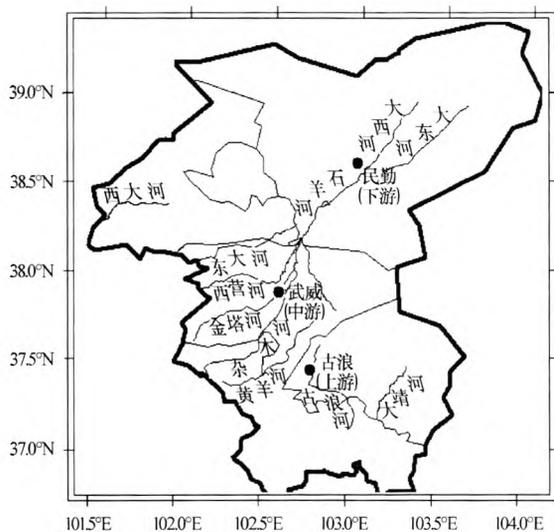


图 1 石羊河流域水系分布

Fig. 1 Water system distribution of Shiyang River basin

西营河是流域 8 条河流中径流量最大的一条河,历年平均流量占石羊河流域总流量的 38%,其年来水丰枯变化对整个流域来水总量影响很大。据计算,流域总径流量与西营河径流量存在一致的正相关(相关系数  $0.45$ ,  $n = 49$ ),通过 95% 置信度水平。因此,本文以西营河为代表,分析逐月径流量时间演化特征和气候要素之间的相互关系,来探明气候变化对流域未来水资源变化趋势的可能影响,为石羊河流域重点治理和科学调配水资源提供参考依据。

## 1 资料来源与分析方法

### 1.1 资料来源

西营河逐月平均径流量资料(1954—2002 年)来自武威市九条岭水文站历年实测径流。气象资料采用流域祁连山北坡上游的乌鞘岭、古浪、永昌气象站观测资料。

### 1.2 分析方法

主要采用趋势系数、径流量峰型度(4—6 月径流总量与 7—9 月径流总量比值)、年丰枯率(4—9 月径流总量与 10 月至翌年 3 月径流总量比值)<sup>[16]</sup>进行分析。用 Mann-Kendall 法<sup>[17]</sup>进行突变检验。

## 2 径流量变化特征

### 2.1 年际变化

西营河年总径流量总体上呈逐年代减少趋势,趋势系数为  $-0.335$ ,通过极显著水平( $P < 0.01$ ),线性倾向率为  $-0.128$  亿  $\text{m}^3 \cdot 10\text{a}^{-1}$ (图 2)。50 年代中后期平均径流量为  $3.8$  亿  $\text{m}^3$ ,80 年代为  $3.32$  亿  $\text{m}^3$ ,90 年代减幅明显,平均只有  $2.86$  亿  $\text{m}^3$ ,较 50 年代减少了 25%。按径流量距平百分率  $\geq 15\%$  为丰水年,  $\leq -15\%$  为枯水年,其余为平水年标准统计,49 年中丰水年出现频次为 12 a,占总年数的 24%;枯水年频次 13 a,占 27%,平水年频次 24 a,占 49%。在 13 a 枯水年中,1990 年代以来出现 7 a,占枯水年总数的 54%。丰水年多出现在 20 世纪 50、70 年代,为 8 a,占丰水年数的 67%。

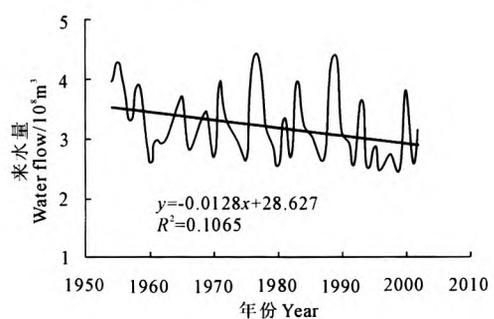


图 2 西营河出山口来水量变化

Fig. 2 Change of water flow at the mountain-pass of Xiyang River

### 2.2 年内变化

西营河径流量一年中呈单峰型曲线分布。夏季(6—8 月)最大,历年平均为  $1.81$  亿  $\text{m}^3$ ,占年径流量的 58%,秋季(9—11 月)、春季(3—5 月)分别为  $0.67$ 、 $0.56$  亿  $\text{m}^3$ ,分别占 21% 和 18%,冬季(12—2 月)最小为  $0.13$  亿  $\text{m}^3$ ,仅占 4%。各月中 7 月份最大,2 月份最小。汛期 4—9 月径流量占全年的

86%, 为非汛期的 6 倍多。

四季径流量年代际变化呈减少趋势。其中冬、夏季径流量分别由 20 世纪 50 年代的 0.15、2.157 亿  $m^3$  减少到 90 年代的 0.112、1.466 亿  $m^3$ , 减少了 27% 和 32%, 秋、春季由 0.739、0.586 亿  $m^3$  分别减少到 0.606、0.479 亿  $m^3$ , 均减少了 18% (表 1)。计算四季径流量趋势系数均为负值, 范围在  $-0.181 \sim -0.525$ , 其中冬、夏季减少趋势明显, 趋势系数分别为  $-0.525$ 、 $-0.435$ , 均通过极显著水平 ( $P < 0.001$ )。线性倾向率冬季  $>$  夏季  $>$  秋季  $>$  春季, 倾向值分别为 0.14、0.12、0.03、0.01 亿  $m^3 \cdot 10a^{-1}$ 。

表 1 西营河四季径流量年代际变化/ $10^8 m^3$   
Table 1 Decadal variation of seasonal runoff in Xiying River

年代 Decade	冬季 Winter	春季 Spring	夏季 Summer	秋季 Autumn	资料年代 Information years
50	0.150	0.586	2.157	0.739	1954—1960
60	0.132	0.529	1.772	0.695	1961—1970
70	0.124	0.605	1.904	0.701	1971—1980
80	0.128	0.626	1.935	0.637	1981—1990
90	0.112	0.479	1.466	0.606	1991—2000

为了反映径流量在年内分布特征, 图 3 给出了

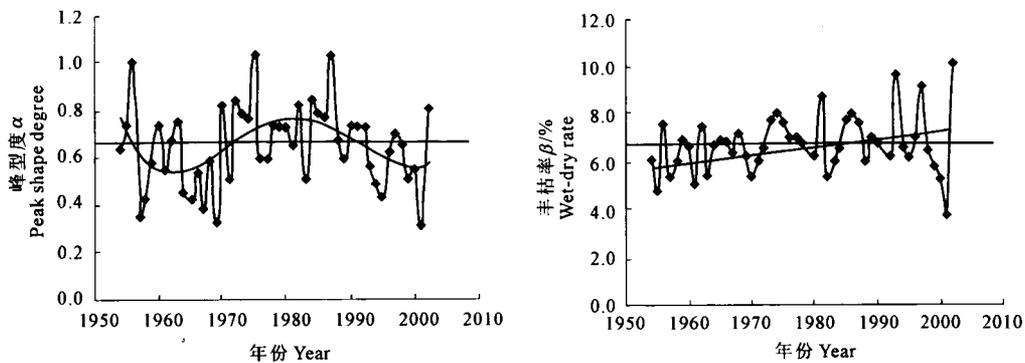


图 3 西营河径流量峰型度、丰枯率变化曲线

Fig.3 Variation curve of peak shape degree and wet-dry rate of runoff in Xiying River

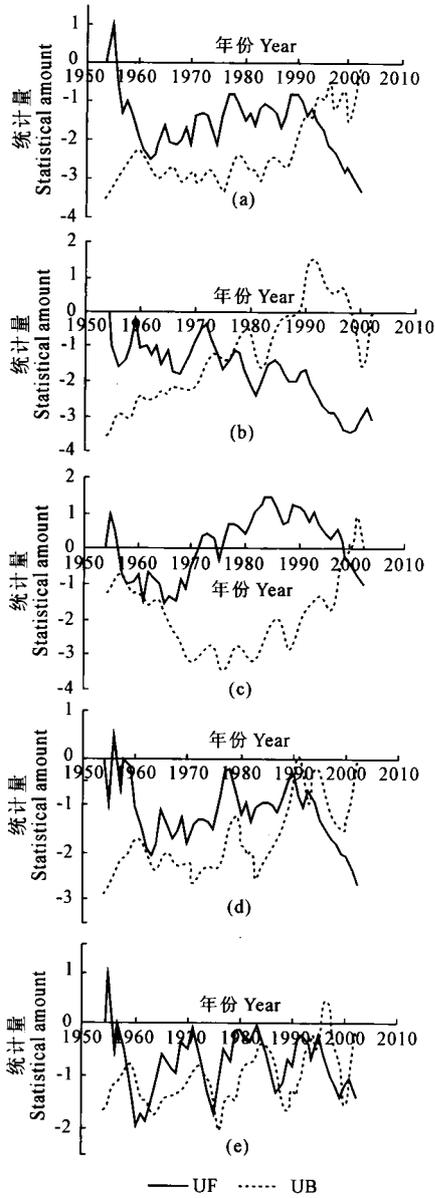
### 2.3 径流量突变分析

计算西营河年径流量 (a) Mann-Kendall 统计量 (图 4), 1993 年出现径流量减少突变点。之前的 1954—1964 年径流量呈减少趋势, 其中 1960—1964 年减少最为明显, 通过显著性水平 ( $P < 0.05$ )。1966—1993 年增多趋势和减少趋势基本交替出现, 河流来水丰枯变换基本平衡。1993 年以来径流量呈减少趋势, 特别从 1996 年以来减少达到显著水平 ( $P < 0.05$ ); 冬季 (b) 径流量于 1974、1977 年出现突变点。1974 年以前径流量呈减少趋势, 1976 年开始及其后的 1976、1977 年径流量转而增大, 1977 年以后又进入减少时期, 其中 1980—1982、1987—1988 年

径流量峰型度  $\alpha$ 、丰枯率  $\beta$  历年变化曲线。从中看出, 峰型度在 50 年代中后期至 60 年代为减少时期, 70 年代至 80 年代中期呈波动性增加, 80 年代中期 (1987 年) 以后呈快速减少, 这与气候冷暖期分布时间相吻合。如 60 年代气候相对偏暖, 80 年代中期以后气候明显偏暖, 70 年代和 80 年代前期气候相对偏冷, 与此相对应, 峰型度在 60 年代和 80 年代中期以后处于低值区,  $\alpha$  值平均分别为 0.55 和 0.59, 70 年代至 80 年代前期处于高值区,  $\alpha$  值平均为 0.75, 即气候处于冷期时峰型度为高值期, 暖期时则为低值期。1987 年气候明显变暖以来峰型度呈持续减小, 2001 年  $\alpha$  值达到历年来最低值 (0.31)。丰枯率  $\beta$  值随时间呈波动性增加趋势, 一年中冷季径流量占全年径流量比例呈减少趋势, 暖季呈增加趋势。从峰型度和丰枯率这一变化特征看出, 随着气候变暖, 导致西营河四季出山口径流量均呈减少态势, 但冬季径流量减少的幅度大于夏季, 故冬季积雪融水对径流量的补给比例在减少, 而汛期雨水形成的径流比例相对在增加。这也从一个侧面印证了地处石羊河流域上游的祁连山区冬季积雪减少、雪线上升和许多小冰川消失的事实。

和 1991 年以来减少趋势明显, 通过显著性水平 ( $P < 0.05$ ); 春季 (c) 径流量突变点出现在 1957、1961、1999 年。1957 年以前径流量呈明显减少趋势。其后的 1958—1960 年呈增加趋势, 1961 年又明显减少, 通过显著水平 ( $P < 0.05$ )。1961 年以后进入一个较长时间的增多时期。直到 1991 年以后径流量从增多时期又进入减少时期, 且通过显著性水平 ( $P < 0.05$ )。1999 年以后又开始增加, 但增加不明显; 夏季 (d) 径流量突变点出现在 1991、1993 年。1991 年以前分为两个时期。第一个时期即 1963 年以前径流量呈明显的减少趋势, 1963 年通过显著水平 ( $P < 0.05$ )。1963 年以后进入一个增加和减少交替出

现并维持相对平衡的一个时期。直到 1993 年以后这种平衡状态被打破,径流量转入减少时期,特别从 1999 年以后减少明显,通过显著性水平 ( $P < 0.05$ ); 秋季(e)径流量出现多个突变点,增加和减少趋势均不十分明显,两种状态交替出现,说明径流量总体基本稳定。



(a)年 (b)冬季 (c)春季 (d)夏季 (e)秋季  
(a) yearly (b) winter (c) spring (d) summer (e) autumn

图 4 西营河不同季节径流量突变分析

Fig. 4 Mutation analysis of runoff in different seasons in Xiying River

### 3 影响流域径流量气象因素分析

#### 3.1 降水量

祁连山东部地区各测点历年降水量均呈不同程度的增加趋势,年趋势系数在 0.02 ~ 0.62 之间。只有永昌站通过极显著性水平 ( $P < 0.01$ )。

降水的季节变化,乌鞘岭(冬季)、永昌(夏季)趋势系数分别为 0.61、0.38,通过极显著水平 ( $P < 0.01$ ),但倾向率值较小,分别只有 1.96、10.2  $\text{mm} \cdot 10\text{a}^{-1}$ ,其它季节趋势系数更小。特别是古浪、永昌的秋季降水呈减少趋势,趋势系数和倾向率均为负值。由此可见,降水总体上增幅均较小,特别是对径流形成贡献最大的夏季降水增幅不明显。

计算年径流量与各站降水量相关系数(表 2),径流量与主要来水季节 6—9 月降水量均呈正相关,通过显著水平 ( $P < 0.05$ )或极显著水平 ( $P < 0.01$ ),这一时期降水多、径流量大。统计石羊河流域径流量和各测点降水年内分布特征发现,6—8 月径流量占年径流量的比例多年平均为 56.6%,而 6—8 月降水量占全年降水量的比例古浪、永昌、乌鞘岭分别占 49%、58%、59%,平均 55%。径流量和降水两者存在较好的一致性,说明汛期降水量的多少在很大程度上决定着流量的丰枯。

#### 3.2 气温

各代表点历年气温均呈不同程度上升趋势,年趋势系数均为正值,在 0.64 ~ 0.71 之间。趋势系数均通过 0.01 极显著水平,线性倾向率在 0.29 ~ 0.40  $^{\circ}\text{C} \cdot 10\text{a}^{-1}$ ,均高于全国平均增温速度 (0.044  $^{\circ}\text{C} \cdot 10\text{a}^{-1}$ ),说明石羊河流域上游产流区气温增幅十分明显。气温的季节变化以冬季的趋势系数最大,春季最小。倾向率最大值在 0.45 ~ 0.73  $^{\circ}\text{C} \cdot 10\text{a}^{-1}$  (冬季),最小值在 0.11 ~ 0.27  $^{\circ}\text{C} \cdot 10\text{a}^{-1}$  (春季)。

计算流域径流量与各站气温相关系数(表 3),夏季 7、8 月气温与径流量呈显著的负相关,相关系数在 -0.20 ~ -0.36,均通过 0.05 显著性水平检验。气温高多对应晴好天气,无降水产生,河流补给量少。而在非汛期的 3、4、9、10 月,相关系数多呈正值,特别是 3、10 月相关系数接近显著性水平临界值,说明此期气温高,冰雪融水快,有利于径流量的增加。

#### 3.3 蒸发量

年蒸发量古浪、永昌、乌鞘岭均呈增加趋势,趋势系数均为正值,古浪、乌鞘岭达到显著水平 ( $P < 0.05$ )。倾向值分别为 39.87、16.17、24.3  $\text{mm} \cdot 10\text{a}^{-1}$ 。季节趋势系数中古浪、乌鞘岭四季均为正值,其中古浪冬季、乌鞘岭夏季最大,通过极显著水平 ( $P < 0.01$ )。永昌夏、秋季趋势系数为正值,冬、春季为负值。

计算北坡乌鞘岭、永昌、古浪三站逐月蒸发量与流域年径流量相关系数,二者均呈负相关关系(表 4),蒸发大,水分散失快,不利于汇流形成和径流的

增加。一年中蒸发对径流的影响效应在汛期或非汛期均呈现出相同的作用。特别是夏季 7、8 月蒸发量对河流径流量的负效应最大,相关系数达到一年中

的最大值, $t$  检验统计值呈显著( $P < 0.05$ )或极显著( $P < 0.01$ )水平。

表 2 降水量与径流量的相关系数

Table 2 Correlation coefficients between precipitation and runoff

站点 Station	月份 Month											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
古浪 Gulang	-0.12	-0.03	0.06	-0.02	-0.08	0.33*	0.40**	0.14	0.33*	-0.02	-0.02	-0.10
永昌 Yongchang	-0.14	-0.18	0.06	0.01	-0.16	0.39**	0.09	0.16	0.22	0.09	0.17	-0.17
乌鞘岭 Wushaoling	-0.19	0.02	-0.02	0.27	-0.15	0.38**	0.35*	0.39**	0.32*	0.05	0.02	-0.29*

注: \* 0.05 显著性水平; \*\* 0.01 极显著水平。下同。

Note: \* means significance at 0.05 level; \*\* means significance at 0.01 level. Hereinafter the same.

表 3 气温与径流量的相关系数

Table 3 Correlation coefficients between air temperature and runoff

站点 Station	月份 Month											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
古浪 Gulang	-0.02	-0.08	0.21	0.01	-0.06	-0.22	-0.33*	-0.36*	-0.08	0.16	-0.07	-0.10
永昌 Yongchang	0.09	-0.03	0.22	-0.01	0.03	-0.15	-0.31*	-0.35*	-0.05	0.20	-0.03	-0.02
乌鞘岭 Wushaoling	-0.04	-0.03	0.19	0.01	0.02	-0.15	-0.29*	-0.36*	-0.05	0.14	-0.08	-0.16

表 4 蒸发量与径流量的相关系数

Table 4 Correlation coefficients between evaporation and runoff

站点 Station	月份 Month											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
古浪 Gulang	-0.54**	-0.29	-0.34*	-0.22	-0.33*	-0.35*	-0.48**	-0.62**	-0.15	-0.27	-0.28	-0.24
永昌 Yongchang	-0.36*	-0.24	-0.24	-0.17	-0.14	-0.06	-0.23	-0.62**	-0.21	-0.36*	-0.30*	0.05
乌鞘岭 Wushaoling	-0.16	-0.16	-0.22	-0.28	-0.19	-0.13	-0.34*	-0.52**	-0.20	-0.26	-0.21	-0.20

利用多元回归统计方法建立西营河汛期(6—8 月)径流量( $Y$ )与同期降水量( $X_1$ , 古浪)、气温( $X_2$ , 永昌)预测模型: $Y = 4.106 + 0.005X_1 - 0.225X_2$ (回归值  $F = 4.3$ , 置信度 95%)。据此计算,在气温不变的情形下,降水分别增加 10% 和 20% 时,汛期径流量将分别增加 0.088 亿  $m^3$ 、0.176 亿  $m^3$ ,对年径流量的贡献率将由本世纪初的 51.2% 分别提高到 54.3% 和 57.5%;在降水不变的情形下,气温分别增加 1℃、2℃ 时,汛期径流量将分别减少 0.225 亿  $m^3$ 、0.45 亿  $m^3$ ,对年径流量的贡献率将分别下降到 43.2% 和 35.2%;在降水增加 10% 和 20%、气温升高 1℃ 的情形下,汛期径流量将减少 0.137 亿  $m^3$  和 0.049 亿  $m^3$ ;只有在降水增加 25%、气温升高 1℃ 的情形下,汛期径流量才呈增加趋势。

从以上分析看出,在气候变暖背景下,对于以降水补给型为主的石羊河流域来说,流域内降水总量虽有一定增加,但由于增幅较小,对径流量补给作用不明显,由于气温的显著升高,在强烈的蒸发作用

下,水分散失量大,不利于径流量的增加,较降水的正效应而言,气温对径流量的负效应占据着主导作用。在非汛期,气温虽有利于冰雪消融,但由于冬季降水减少导致冰雪贮量减少,使补给比例也呈下降趋势。

## 4 结论与讨论

1) 近 49 年来西营河年径流量呈减少趋势,线性倾向率达  $-0.128$  亿  $m^3 \cdot 10a^{-1}$ 。年径流量以雨水补给为主,主要集中在汛期。且雨水补给比例在逐渐增加,而冰雪融水补给比例在减少。

2) 四季径流量年际变化 20 世纪 50 年代中期至 60 年代中期均出现了较明显的衰减。90 年代初期和末期转入明显的衰减时期,其中以冬季和夏季径流量衰减较明显。年、春、夏季径流量减少突变点分别出现在 1993、1999、1993 年。

3) 流域内降水量年际变化虽呈增加趋势,但增量较少。特别是对径流形成贡献最大的夏季降水增

幅不明显;径流量与 6—9 月降水量呈显著或极显著正相关,汛期降水量的多少决定着年际流量的丰枯。

4) 流域内气温年际变化均呈明显上升趋势。四季中以冬季的增温趋势系数最大,秋、夏季次之,春季最小;蒸发量年际变化呈增加趋势,四季蒸发量趋势系数大多呈正值。

5) 主汛期 7、8 月气温、蒸发与径流量呈显著的负相关。气温高,蒸发大,不利于径流量的增加。在气温不变的情形下,降水增加,径流量增加。降水不变时,气温升高,径流量减少。就目前降水和气温对石羊河流域径流量影响程度而言,气温对径流量的负效应占据着主导作用。

气候变化对流域来水量的影响除与局地中小尺度天气环流特征、环境气象要素变化等因素影响程度有关外,还与祁连山源地冰川数量、大小、走向、植被状况等因素有密切关系。如同在河西走廊且毗邻的黑河流域来水量随气候变暖则呈增加趋势<sup>[18]</sup>。总之,在气候变暖背景下,通过实施生态综合治理措施,如保护祁连山林草植被、加强水源涵养林建设、开发山区空中云水资源等,都将有效改善局地水热环境,保护祁连山冰川,减缓气候变化带来的不利影响,保持山区来水量的稳定和永续利用,促进河西绿洲的可持续发展。

#### 参考文献:

- [1] 马全林,孙 坤,王继和.石羊河流域的生态环境问题、引发原因与治理对策[J].安全与环境学报,2004,4(5):64-68.
- [2] 沈大军,崔丽娟,姜素梅.石羊河流域水资源问题的制度原因及对策[J].自然资源学报,2005,20(2):293-299.
- [3] 蓝永超,康尔酒.河西内陆干旱区主要河流出山径流特征及变化趋势分析[J].冰川冻土,2000,6(2):147-152.
- [4] 蓝永超,丁永建,沈永平,等.河西内陆河流域出山径流对气候转型的响应[J].冰川冻土,2003,25(2):181-185.
- [5] 康尔酒,李 新,张济世,等.甘肃河西地区内陆河流域荒漠化的水资源问题[J].冰川冻土,2004,26(6):657-667.
- [6] 高前兆,杨新源.甘肃河西内陆河径流特征与冰川补给[C]//中国科学院兰州冰川冻土研究所集刊,第 5 号.兰州:中国科学院兰州冰川冻土研究所,1985:131-141.
- [7] 李玲萍,杨永龙,钱 莉.石羊河流域近 45 年气温和降水特征分析[J].干旱区研究,2008,25(5):705-710.
- [8] 刘明春.石羊河流域气候干湿状况分析及评价[J].生态学杂志,2006,25(8):880-884.
- [9] 黄玉霞,王宝鉴,张 强,等.气候变化和人类活动对石羊河流域水资源影响评价[J].高原气象,2008,27(4):866-872.
- [10] 徐宗学,李占玲.石羊河流域主要气象要素及径流变化趋势分析[J].资源科学,2007,29(5):121-128.
- [11] 马 岚,魏晓妹.石羊河下游年径流序列的变异点分析[J].干旱地区农业研究,2006,24(2):174-177.
- [12] 王贵忠.石羊河流域出山径流变化分析[J].甘肃水利水电技术,2007,43(3):203-204.
- [13] 刘明春,张 强,邓振镛,等.气候变化对石羊河流域农业生产的影响[J].地理科学,2009,29(5):727-732.
- [14] 康绍忠,粟晓玲,杜太生,等.西北旱区流域尺度水资源转化规律及其戒定慧调控模式[M].北京:中国水利水电出版社,2009.
- [15] Ma Zhenmei, Kang Shaozhong, Tong ling, et al. Analysis of impacts of climate variability and human activity on streamflow for a river basin in arid region of northwest China[J]. Journal of Hydrology, 2008, 352: 239-249.
- [16] 丁永建,叶柏生,刘时银.祁连山中部地区 40a 来气候变化及其对径流的影响[J].冰川冻土,2000,22(3):193-198.
- [17] 魏凤英.现代气候统计诊断与预测技术[M].北京:气象出版社,1999:106-113.
- [18] 李栋梁,冯建英,陈 雷.黑河流量和祁连山气候的年代际变化[J].高原气象,2003,22(2):104-109.

(上接第 192 页)

#### 参考文献:

- [1] 郑一华.基于支持向量机的水质评价和预测研究[D].南京:河海大学,2006.
- [2] 沃 飞,陈效民,吴华山,等.灰色聚类法对太湖地区农村地下水水质的评价[J].安全与环境学报,2006,6(4):38-41.
- [3] 罗定贵,王学军,郭 青.基于 MATLAB 实现的 ANN 方法在地下水水质评价中的应用[J].北京大学学报(自然科学版),2004,40(2):296-302.
- [4] 倪深海,白玉慧.神经网络模型在地下水水质评价中的应用[J].系统工程理论与实践,2000,(8):124-127.
- [5] 汤 洁,李艳梅,卞建民,等.物元可拓法在地下水水质评价中的应用[J].水文地质工程地质,2005,(5):1-5.
- [6] 梁 坚.支持向量机在水质评价及预测中的应用研究[D].杭州:浙江工业大学,2009.
- [7] 薛巧英.水环境质量评价方法的比较分析[J].环境保护科学,2004,30(8):35-40.
- [8] 孙增圻,徐红兵.基于 T-S 模型的模糊神经网络[J].清华大学学报(自然科学版),1997,37:76-80.
- [9] Takagi T, Sugeno M. Fuzzy identification of systems and its application to modeling and control[J]. IEEE Trans on Systems, Man, and Cybernetics, 1985, 15(1):116-132.
- [10] 周忠涛.基于 T-S 模型的模糊神经网络在水质评价中的应用[D].南京:河海大学,2007.
- [11] Vapnik V. The Nature of statistical learning[M]. New York: Springer, 1995.
- [12] 边肇祺,张学工.模式识别[M].北京:清华大学出版社,1999.
- [13] 史 峰,王小川,郁 磊,等. Matlab 神经网络 30 个案例分析[M].北京:北京航空航天大学出版社,2010.
- [14] 李梅玲,张锡根,阎葆瑞,等. GB/T14848-93. 地下水质量标准[S].北京:中国标准出版社,1993.
- [15] 刘文杰,苏永中,杨 荣,等.民勤地下水水化学特性和矿化度的时空变化[J].环境科学,2010,30(10):2912-2917.