

河西内陆河流域出山径流对气候转型的响应

蓝永超, 丁永建, 沈永平, 康尔泗, 张济世

(中国科学院 寒区旱区环境与工程研究所, 甘肃 兰州 730000)

摘 要:对甘肃河西内陆河流域出山径流变化过程与趋势的研究表明,从20世纪80年代中后期开始,受西风环流降水的影响,祁连山区中、西部的黑河、疏勒河流域的气候环境发出了由增温变干转为变湿的信号,具体表现为随着山区气温升高,降水量增加,出山径流相应增大。采用区域气候模式预测和水文统计模式的计算,亦同样证实出山径流有显著的增加趋势。但受季风影响的祁连山东部的石羊河流域则尚未出现这种转变,从20世纪50年代起,出山径流量持续下降,表明其气候环境仍向增温变干的方向发展。

关键词:水文循环;暖干;暖湿;气候转型

中图分类号:P343 **文献标识码:**A

1 引言

中国西北地区从小冰期结束以来的100 a左右的时间里,处于波动性暖干的气候环境,至20世纪80年代天山中段和祁连山东段分别升温 $1.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $1.0\text{ }^{\circ}\text{C}$,而降水量减少了50~65 mm和70~85 mm^[1]。树木年轮研究显示,1920—1978年间北疆降水负距平达 -11.8% ^[2]。近50 a的实测记录显示,中国西部以 $0.2\text{ }^{\circ}\text{C} \cdot (10\text{ a})^{-1}$ 的速率升温,特别是近20 a来气温升幅更大,北疆近50 a气温升高达 $1.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ ^[3],远高于近百年全球 $0.4\sim 0.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的平均升幅。与此同时,1951—1989年间,中国西北东部和华北地区降水呈明显减少的趋势^[4],西北干旱区多条河流出山径流在20世纪50~80年代呈现波动性下降趋势^[5,6],青海湖水位从1908年的海拔3 205 m降至1986年的海拔3 193.78 m,下降了11.22 m,更明确地揭示了中国西部地区气候变化的暖干趋势^[7]。但20世纪80年代后期以来,许多水文气象观测台站的实测记录显示,中国最西部的新疆气候发出了由暖干向暖湿转型的信号^[8]。甘肃省的河西内陆区与新疆毗邻,尤其是河西内陆区西部的疏勒

河流域,与新疆同属中纬度西风带,降水主要受西风环流所携带的水汽影响;而河西内陆区中部的黑河流域位于西风带和东亚季风带之间的过渡带^[9,10],其降水在很大程度上也受大西洋水汽的影响。因此,这些地区的气候变化与新疆有很好的—致性,出现气候由暖干向暖湿的转型。

2 河西内陆干旱区地理概况及气候特征

河西内陆区位于中国西北干旱区的东半部,甘肃省的西北部;东起乌鞘岭,西与新疆交界,南以祁连山与青海省接壤,北有北山山系与内蒙古毗邻。地理位置大致在 $37^{\circ}17'\sim 42^{\circ}48'\text{ N}$, $93^{\circ}23'\sim 104^{\circ}12'\text{ E}$ 之间,东西横跨11个经度,呈东南—西北长条状,总面积 $27.11\times 10^4\text{ km}^2$,占甘肃全省面积的60%。

本区地处欧亚大陆腹地,水汽来源有多条途径,首先是印度洋水汽,盛夏期间这部分水汽可随暖湿气团的北沿进入青藏高原到达本区东部,并受青藏高原环流的影响,组成若干热低压。对祁连山区降水影响较大的是疏勒河高压和张掖低压^[9,10],其次是由东南季风带来的太平洋水汽。夏季,由太

收稿日期:2002-10-08;修订日期:2002-12-16

基金项目:中国科学院知识创新工程重大项目(KZCX1-10-06;KZCX2-301);中国科学院寒区旱区环境与工程研究所知识创新项目(CACX210100)资助

作者简介:蓝永超(1957—),男,四川资阳人,副研究员,1982年毕业于成都科技大学,主要从事寒区与干旱区水资源及出山径流中长期预报模型的研究工作。E-mail:lyc@ns.lzb.ac.cn

平洋副热带高压和东南沿海输送来的暖湿气流翻越重山,进入本区并向西延伸,一般认为可达张掖附近并影响到甘、新边界。第三,西风环流带来的大西洋水汽进入新疆并影响本区西部。

本区的高山区降水较丰沛,降水量在 400~700 mm,年径流深在 100~500 mm。由于低温高寒,降水的一部分以冰和雪的固体形式被储藏起来,成为天然的固体水库。从山区到平原,降水量急剧减少,如东段冷龙岭主峰年降水量达 800 mm,走廊区的武威市仅 161 mm。本区西部降水量更少,阿尔金山主脉降水量约 300 mm,敦煌市不足 50 mm。走廊区为干旱气候,年平均气温 5~10℃,年降水量 50~200 mm,年蒸发能力 1 500~2 500 mm,年径流深只有 5 mm。北山山地为干旱荒漠气候,年平均气温 8~10℃,多年平均降水量 30~100 mm,干旱指数大于 30。

本区共有大小河流 58 条(按出山年平均流量大于 0.1 m³·s⁻¹统计)。按出山年径流量分级,大于 10×10⁸m³的有黑河和昌马河两条;1.0×10⁸~10×10⁸m³的有 25 条;0.1×10⁸~0.03×10⁸m³的有 18 条。河流补给主要为大气降水,所谓的地下水和冰雪融水补给实质上也是大气降水经过特殊产汇流条件调蓄出来的不同形式。各条河流大致相互平行,独立流出山口并最终消耗于洪积、冲积平原和下游盆地。流出山口的河流被走廊上的大黄山、黑山分割成石羊河、黑河和疏勒河三个水系。其中石羊河水系和疏勒河水系均在省内消失,只有黑河流出省外,进入内蒙古额济纳旗,消失于东西居延海。

3 近 50 a 来河西内陆区径流变化特征与趋势

河川径流是气候与环境变化综合影响的产物,在目前西北地区中高山区降水、气温资料稀少的情

况下,流域出山口断面的径流能比较好的反映中高山区气候环境的变化\+[11]。通过对河西内陆区主要河流出山口水文站 1956—2000 年的同步径流系列资料进行统计分析,以其 1987 年以后径流量系列均值或 1990 年代径流量系列均值与多年均值相比较(分 1956—1979、1956—1986 和 1956—2000 年 3 个标准)(表 1、2),探讨本区气候环境转型问题。

从表 1、2 可清楚地观察到,分别发源于祁连山北坡东段、中段和西段的河西内陆区三大水系各主要河流的出山径流呈现出不同的变化过程。位于河西内陆区西部的疏勒河水系主要河流的出山径流从 20 世纪 70 年代起持续丰水,到 90 年代达到最高值,位于河西内陆区中部的黑河水系主要河流的出山径流亦从 20 世纪 80 年代起持续丰水。党河 1991—2000 年年径流量系列均值比 1956—1990 年系列均值增加 15.7%,昌马河 1991—2000 年年径流量系列均值比 1956—1990 年系列均值增加近 10%。如果以 1987 年(根据水文气象观测记录,新疆大部地区该年起气候明显发出转型信号^[11])为气候转型突变点进行分析,以黑河干流为界,黑河干流以西的河西内陆河流均有不同程度的转型迹象。其中,党河最为显著,其 1987—2000 年年径流量系列均值比 1956—1986 年系列均值增加 24.0%,昌马河 1987—2000 年同期年径流量系列均值比 1956—1986 年系列均值增加 9.27%;黑河干流与梨园河同期年径流量系列均值比 1956—1986 年系列均值分别增加 6.78%和 6.65%。对石羊河、黑河和疏勒河三个水系各主要河流年径流量变化过程进行分析可观察到,由于水汽来源的不同,使分别发源于祁连山北坡东段、中段和西段的三个水系的出山径流

表 1 河西主要河流出山径流不同年代的丰枯变化(m³·s⁻¹)

Table 1 Abundance and low variations of mountain runoff in the main rivers in Hexi inland region(m³·s⁻¹)

年代	石羊河水系(平均流量/丰枯程度)		黑河水系(均流量/丰枯程度)		疏勒河水系(平均流量/丰枯程度)	
	西营河	杂木河	黑河干流	梨园河	昌马河	党 河
1940			45.1/偏枯			
1950	13.7/偏丰	10.1/偏丰	47.9/平水	8.09/偏丰	24.6/偏枯	9.02/ 偏枯
1960	11.8 /偏丰	7.46/偏枯	46.4/偏枯	6.39/偏枯	25.3/偏枯	9.02/偏枯
1970	10.2/平水	7.43/偏枯	44.0/偏枯	6.69/偏枯	28.1/偏丰	11.6/偏丰
1980	10.6/偏枯	7.67/偏枯	53.2/偏丰	8.66/偏丰	29.0/偏丰	11.6/偏丰
1990	8.60/偏枯	6.42/偏枯	49.8/偏丰	8.02/偏丰	29.7/偏丰	12.4/偏丰
平均	10.8	7.88	48.1	7.41	26.8	10.5

表 2 不同时段主要河流年径流量均值对比
($\times 10^8\text{m}^3$)

Table 2 Comparison of runoff in the main rivers in Hexi inland region for different period($\times 10^8\text{m}^3$)

径流系列均值	站名					
	昌马堡	党城湾	莺落峡	梨园堡	杂木寺	九条岭
W_1 (1956—1986)	8.504	3.132	15.34	2.05	2.40	3.49
W_2 (1987—2000)	9.293	3.882	16.38	2.18	2.166	2.905
$(W_2 - W_1)/W_1/\%$	9.27	24.0	6.78	6.65	-9.75	-16.8
W_3 (1956—1990)	8.52	3.37	15.23	2.19	2.46	3.49
W_6 (1991—2000)	9.37	3.90	15.73	2.21	2.03	2.71
$(W_6 - W_5)/W_5/\%$	9.98	15.7	3.28	0.91	-16.7	-22.35

呈现出不同的变化趋势，增加幅度较大的河流主要是位于西风环流降水区源于祁连山北坡中、西段的疏勒河、黑河流域，而位于东部季风降水区祁连山北坡东段石羊河流域的出山径流则呈下降的趋势^[5]。

4 出山径流未来变化趋势

伴随着全球气温升高，将使水文循环更加激烈，导致更多的蒸发和降水^[7、11]。为了充分论证中国西部地区气候存在着由暖干向暖湿转型的可能性，可以从区域气候模式及水文时间序列统计模型的预测和计算结果来进行进一步的探讨。根据 IPCC 2001 年的报告^[6]，全球平均表面温度预计在 1990—2100 年间升高 1.4~5.8℃；对于大多数的 SRES 方案，全球模拟的结果表明，21 世纪全球平均水汽预计要增加。康尔泗等^[12、13]根据 HadCM2 Gsa 气候模型对 93.75°~105°E 和 42.5°~37.5°N 地区的经纬度范围，也就是河西内陆干旱区所在范围的气温和降水模拟结果进行修正，得到了 20 世纪 90 年代到 21 世纪 40 年代该地区气温和降水量的可能变化估计值(表 3)及黑河干流和疏勒河干流昌马河出山径流的可能变化估算值(表 4)。为了对上述计算进行验证，利用灰色系统理论结合周期外延的预测方法^[14、15]对未来 20 a 黑河干流等河西内陆干旱区主要河流出山径流量进行了计算(表 5)并将其与表 4 中同期估算值进行比较。结果表明，两种方法对河西内陆干旱区西部昌马河出山径流量未来变化趋势的预测相当一致，HadCM2Gsa 气候模型对中部黑河干流出山径流量未来变化预测值较后者偏大，但趋势基本是一致的。表 3、表 4 和表 5 的结果显示，

未来的几十年间，位于西风环流降水区的河西干旱区中、西部疏勒河、黑河流域出山径流仍呈增加的趋势，而位于东部季风降水区祁连山北坡东段石羊河流域的出山径流则呈下降的趋势。

表 3 河西内陆区年代平均气温与平均降水量未来 50 a 与 1980 年代比较的可能变化估算值

Table 3 A prediction of ten-year mean air temperature and precipitation in Hexi inland region, together with those measured values in the 1980s and the 1990s

年代	年代平均气温/℃	年代平均降水量/mm
1980(实测)	3.8	212.5
1990(实测)	+0.1	+35.1
2000	+0.3	+48.5
2010	+0.6	+65.1
2020	+0.9	+57.7
2030	+1.4	+62.0
2040	+1.2	+77.5

表 4 河西内陆区黑河(莺落峡站)和疏勒河昌马河(昌马堡站)出山径流的可能变化估算值($\times 10^8\text{m}^3$)

Table 4 A prediction of ten-year mean mountain runoff in the Yingluoxia Hydrometric Station on the Heihe River and the Changmapu Hydrometric Station on the Changma River in Hexi inland region, together with that in the 1980($\times 10^8\text{m}^3$)

年代	黑河流域黑河干流 (莺落峡站)	疏勒河流域昌马河 (昌马堡站)
1981—1990(实测)	16.79	8.933
1991—2000	18.52	9.043
2001—2009	18.31	9.119
2010—2019	17.46	8.704
2020—2029	17.48	8.836
2030—2039	16.10	8.485
2040—2049	16.63	8.847

5 结论

通过上述分析，可得出以下结论：

(1) 伴随着气温的升高，降水量亦在增加，并且超过了由于气候大幅变暖而导致的蒸发量的增加，将使中国西北干旱区气候环境变得更加湿润。有关区域气候模式和水文统计模式的计算结果进一步证实了中国西北干旱区西部气候环境已开始出现转型。

表 5 未来 20 a 河西内陆区主要河流出山口水文站径流量的可能变化估算值(× 10⁸ m³)
Table 5 A prediction of ten-year mean mountain runoff in Hexi inland region(× 10⁸ m³)

年代	石羊河水系		黑河水系		疏勒河水系	
	九条岭站	杂木寺站	莺落峡站	冰沟站	昌马堡站	党城湾站
多年平均径流量均值	2.63	2.07	15.31	4.30	9.35	4.76
2001—2009	2.76 ~ 3.26	1.89 ~ 2.09	15.3 ~ 15.8	4.06 ~ 4.46	9.04 ~ 9.36	4.81 ~ 5.01
2010—2019	2.52 ~ 3.02	1.85 ~ 2.05	14.9 ~ 15.4	3.98 ~ 4.47	9.22 ~ 9.54	4.77 ~ 4.97

(2) 中国西北干旱区气候环境的转型主要出现在受西风环流影响的区域. 该区域内, 从新疆天山西部到甘肃河西内陆区中、西部, 出山径流都有不同程度的增加.

(3) 受东部季风影响的甘肃河西内陆区东部石羊河流域, 尚未出现气候环境的转型, 其出山径流量继续减少, 与西北干旱区东部、华北地区相同, 气候环境仍表现为波动性增温变干的趋势.

参考文献 (References):

[1] Wang Zongtai. The glacier and environment in the middle sector of Tianshan and the eastern sector of Qilianshan since the Little Ice Age [J]. *Acta Geographica Sinica*, 1991, **46**(2): 160 – 168. [王宗太. 天山中段及祁连山东段小冰期以来冰川及环境[J]. *地理学报*, 1991, **46**(2): 160 – 168.]

[2] Yuan Yujiang, Han Shutu. Feature of dry and wet change for 500 years in the northern Xingjiang [J]. *Journal Glaciology and Geocryology*, 1991, **13**(4): 315 – 322. [袁玉江, 韩淑. 北疆 500 年干湿变化特征[J]. *冰川冻土*, 1991, **13**(4): 315 – 322.]

[3] Wang Shaowu, Dong Guangrong, Qin Dahe. Assessment on Environment of Western China, Vol. 1 [C]. Beijing: Science Press, 2002. 49 – 61. [王绍武, 董光荣. 中国西部环境演变评估, 第一卷 [M]. 北京: 科学出版社, 2002. 49 – 61.]

[4] Chen Longxun, Shao Yongling, Zhang Qingfen. Preliminary analysis of climatic change during the last 40 years in China [J]. *Quarterly Journal of Applied Meteorology*, 1991, **2**(2): 164 – 174. [陈隆勋, 邵永宁, 张清芬. 近 40 年来我国气候变化初步分析[J]. *应用气象学报*, 1991, **2**(2): 164 – 174.]

[5] Lan Yongchao, Kang Ersi. Chang trend and features of the runoff from mountain areas of some main rivers in the Hexi inland region [J]. *Journal Glaciology and Geocryology*, 2000, **22**(2): 147 – 152. [蓝永超, 康尔泗. 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, **22**(2): 147 – 152.]

[6] Zhao Zongci, Gao Xuejie, Tang Maocang, et al. Prediction of climate change [A]. Ding Yhui. Prediction of Environment Change in Western China. Qin Dahe. Assessment on Environment of Western China, Vol. 2 [C]. Beijing: Science Press, 2002. 47 – 93. [赵宗慈, 高学杰, 汤懋苍, 等. 西北气候变化预测 [A]. 丁一汇. 中国西部环境变化的预测. 秦大河. 中国西部环境演变评估, 第二卷 [C]. 北京: 科学出版社, 2002. 47 – 93.]

[7] Shi Yafeng. Glacier recession and lake shrinkage indicating a climatic warming and dry trend in Central Asia [J]. *Acta Geographica Sinica*, 1990, **45**(1): 1 – 13. [施雅风. 山地冰川和湖泊的萎缩指示的亚洲中部气候暖干化趋势及未来展望[J]. *地理学报*, 1990, **45**(1): 1 – 13.]

[8] Shi Yafeng, Shen Yongping, Hu Ruji. Preliminary study on signal, impact and foreground of climatic shift from warm – humid in northwest China [J]. *Journal Glaciology and Geocryology*, 2002, **24**(3): 219 – 226. [施雅风, 沈永平, 胡汝骥. 西北气候由暖干向暖湿转型的信号、影响和前景的初步探讨[J]. *冰川冻土*, 2002, **24**(3): 219 – 226.]

[9] Cheng Longheng, Qu Yaoguang. Water and Land Resources and Their Rational Development and Utilization in the Hexi Region [M]. Beijing: Science Press, 1992. 6 – 46. [陈隆亨, 曲耀光. 河西地区水土资源及其开发利用 [M]. 北京: 科学出版社, 1992. 6 – 46.]

[10] Tang Qicheng, Qu Yaoguang, Zhou Yuchao. Hydrology and Water Resources and Their Utilization in Chinese Drought Region [M]. Beijing: Science Press, 1982. 44 – 80. [汤奇成, 曲耀光, 周聿超. 中国干旱区水文及水资源利用 [M]. 北京: 科学出版社, 1992. 44 – 80.]

[11] Zhang Gouwei, Wu sufeng, Wang Zhijie. The signal of climatic shift in Northwest China deduced from river runoff change in Xinjiang region [J]. *Journal Glaciology and Geocryology*, 2003, **25**(2): 183 – 187. [张国威, 吴素芬, 王志杰. 西北气候环境转型信号在新疆河川径流变化中的反映[J]. *冰川冻土*, 2003, **25**(2): 183 – 187.]

[12] Kang Ersi, Cheng Guodong, Dong Zhengchuan. Glacier – Snow Water Resources and Mountain Runoff in the Arid Area of Northwest China [M]. Beijing: Science Press, 2002. 270 – 293. [康尔泗, 程国栋, 董增川. 中国西北干旱区冰雪水资源与出山径流 [M]. 北京: 科学出版社, 2002. 270 – 293.]

[13] Ding Yongjian, Ye Baisheng, Zhou Wenjuan. Impact of climate change on the alpine streamflow during the past 40 a in the middle part of the Qilian Mt., Northwestern China [J]. *Journal Glaciology and Geocryology*, 2000, **22**(3): 193 – 199. [丁永建, 叶佰生, 周文娟. 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 – 199.]

[14] Den Julong. Grey Prediction and Decision [M]. Wuhan: Polytechnic of Central China Press, 1986. 97 – 190. [邓聚龙. 灰色预测与决策 [M]. 武汉: 华中工学院出版社, 1986. 97 – 190.]

[15] Lan Yongchao. Application of gray cognate analysis on snowmelt runoff forecast [J]. *Journal Glaciology and Geocryology*, 1993, **15**(3): 481 – 486. [蓝永超. 灰色系统关联分析方法在融雪径流预报中的应用[J]. *冰川冻土*, 1993, **15**(3): 481 – 486.]

Responding of River Streamflow to the Climate Shift in the Hexi Inland Region

LAN Yong-chao , DING Yong-jian , SHEN Yong-ping , KANG Er-si , ZHANG Ji-shi

(Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute , Chinese Academy of Sciences , Lanzhou Gansu 730000 , China)

Abstract : In Northwest China , climate warming and drying dominated the past 100 a . In the middle Tianshan Mountains and the eastern Qilian Mountains , temperatures rose 1.3 °C and 1.0 °C and precipitation decreased 50 ~ 65 mm and 70 ~ 85 mm , respectively , until the 1980s . The result of tree – ring study shows that the negative precipitation departure in the north Uygur Autonomous Region of Xinjiang reaches – 11.8% during the period from 1920 to 1978 . In the last 50 a , the measured hydrological and meteorological data indicate that air temperature in West China rises with a mean rate of 0.2 °C per ten years . In northern Xinjiang , air temperature rising even reaches 1.4 °C in the last 50 a , which exceeds greatly the mean rise range of 0.4 ~ 0.8 °C of global air temperature rising in near upon 100 a . The while , precipitation in the west part of Northwest China and North China decreased and many rivers in northwest arid areas of China all appeared a fluctuant downtrend during the period from 1951 to 1989 . Water level of the Qinghai Lake has descended from 3 250 m a.s.l. in 1908 to 3 193.78 m a.s.l. in 1986 , definitely showing a warm-dry trend of climate change in the west of China . But the observed data of some meteorological and hydrological stations have showed that climate of Xinjiang , located in the west of Northwest China , send out a signal of climate shift from warm-dry to warm-humid . Hexi inland arid region is adjacent to Xinjiang . Especially , the Shulehe River basin , located in the west of the region , similar to Xinjiang , located in the middle latitude westerly belt , where precipi-

tation is under the influence of Atlantic vapor carried by westerly ; Again the Heihe River basin in the middle of the Hexi inland arid region is located in the transition area between westerly belt and east Asia monsoon zone , where precipitation is also under the influence of Atlantic vapor . So climate change in the Hexi inland region should have a quite consistency with Xinjiang , having a climate shift from warm – dry to warm-humid .

Water cycles will be exquisite with global warming , bringing on further precipitation . Global temperature has risen since the 20 Century , because of increase of CO₂ and other house gases in atmosphere , which accelerates global warming . Concretely , there appears a fluctuant , warming and drying trend in northwest arid regions of China . But analyzing the change process and trend of the mountainous runoff in the Hexi inland region revealed that the climate – environment of the region relates a clear signal of climatic environment shift from warm-dry to warm-humid beginning from the 1980s . The signal concretely shows an increase in mountain runoff with air temperature rising and precipitation increasing in mountainous area . Prediction and calculation from some regional climatic models and hydrologic statistic models also approve the shift . Besides , Shiyanghe River in the east of the region and under the influence of east monsoon still not occurs such a shift signal , where the mountain runoff has continuously decreased since the 1950s , indicating the climate-environment still developing towards warm \ dry .

Key words : hydrological cycle ; warm-dry ; warm-humid ; climatic shift