

Response of Runoff to Future Climate Change in the Upper Reaches of Heihe River Basin*

Yanjun Ma, Zhanling Li[#]

School of Water Resources and Environment, China University of Geosciences, Beijing
Email: #zhanling.li@cugb.edu.cn

Received: Jul. 5th, 2012; revised: Jul. 19th, 2012; accepted: Jul. 27th, 2012

Abstract: Understanding the changes of water resources in different climate scenarios for Heihe River Basin are of great importance due to its scare amount and its vital role in social sustainable development. Therefore, responses of runoff to future climate change in the upper reaches of Heihe River Basin were mainly focused on by using SWAT model. Results showed that, when precipitation increased by 10% and 20% with no change in temperature, annual average runoff depth would increase 24% and 49%; when precipitation decreased by 10% and 20%, annual average runoff depth would decrease 20% and 37%; when temperature increased 1°C and 2°C, while precipitation was stable, annual average runoff depth would decrease 6% and 11%; and when temperature decreased 1°C and 2°C, annual average runoff depth would increase 13% and 27%. When temperature and precipitation changed simultaneously, more complex conditions would occur. To sum up, if the climate in the study area changed to warm and arid, water resources would decrease; if the climate there changed to cold and arid, changes in water resources would depend on the decreasing degree of precipitation and temperature; if the climates changed to warm and humid or cold and humid, water resources would increase, and more increase in water resources would occur for cold and humid climate. Results also showed that, different meteorological variables affected water resources in different ways. Precipitation had great effects on total water yield, while temperature affected the temporal distribution of water yield in the basin.

Keywords: Heihe River; Climate Scenario; Runoff; SWAT

黑河上游径流量对未来气候变化的响应分析*

马彦军, 李占玲[#]

中国地质大学(北京)水资源与环境学院, 北京
Email: #zhanling.li@cugb.edu.cn

收稿日期: 2012年7月5日; 修回日期: 2012年7月19日; 录用日期: 2012年7月27日

摘要: 未来气候变化条件下黑河流域水资源量的变化将直接影响整个流域的水资源分配以及社会和经济的可持续发展。本文借助 SWAT 模型, 探讨了未来不同气候变化情景下黑河上游水资源量的变化情况。结果表明, 气温不变时, 当降水增加 10% 和 20%, 多年平均径流深分别增加 24% 和 49%; 降水减少 10% 和 20% 时, 多年平均径流深分别减少 20% 和 37%; 降水不变时, 气温升高 1°C 和 2°C, 多年平均径流深减少 6% 和 11%; 气温降低 1°C 和 2°C, 多年平均径流深会增加 13% 和 27%。气温和降水同时发生变化时, 径流量变化更为复杂。当流域气候向暖干方向转变时, 流域水资源量会有所减少; 当流域气候向冷干方向转变时, 流域水资源量既可能减少也可能增加, 取决于降水和气温下降的程度;

*基金项目: 由中央高校基本科研业务费专项资金资助(项目编号 2010ZY13, 2012078)。

[#]通讯作者。

作者简介: 马彦军, (1988-), 男, 汉族, 学士, 水文水资源专业。

当流域气候向暖湿或冷湿方向转变时, 流域水资源量都将有所增加, 且冷湿气候导致水资源量的增幅更大。不同气象要素对流域产流量的影响不同, 降水对流域总的产流量影响较大, 而气温对流量的时间分配影响较大。

关键词: 黑河; 气候变化情景; 流量; SWAT

1. 引言

黑河流域是我国西北地区第二大内陆河流域, 由于其重要的地理位置和典型的气候特征, 该流域历来是科学工作者研究寒区、旱区水文、水资源的典型区域, 现已取得了许多丰硕的成果^[1-5]。该流域降水稀少、气候干旱, 水资源十分短缺; 水资源已成为制约当地社会经济发展、生态环境保护的重要因素之一。在未来气候变化条件下该流域水资源量也将发生一系列变化, 水资源量的变化将会直接影响整个流域的水资源分配以及社会和经济的可持续发展。本研究将采用 SWAT(Soil and Water Assessment Tool)模型对黑河流域产流区进行径流模拟, 在此基础上, 采用假设情景设置法生成研究区未来气候变化的各种情景, 对各种情景下研究区的径流量变化进行预测, 分析和讨论其相对于历史时期径流量的变化, 探讨黑河上游水资源量对气候变化的响应程度。为整个黑河流域的水资源合理配置、有效应对气候变化的不利影响以及更高效地利用西北内陆地区有限水资源提供依据。

2. 研究区域及数据资料

黑河流域范围介于东经 98°~102°, 北纬 37°50'~42°40'之间, 涉及青海、甘肃、内蒙古自治区三省。

流域内有 35 条小支流。随着用水的不断增加, 部分支流逐步与干流失去地表水力联系, 形成东、中、西 3 个独立的子水系。东部子水系即黑河干流水系, 干流全长 821 km, 由于该水系产流区主要在黑河上游, 因此选取黑河上游(从祁连山至流域出口莺落峡水文站)作为本文的研究区。上游河道长 303 km, 面积约 1.0 万 km²; 降水量年内变化较大, 汛期连续最大 4 个月(6~9 月)降水量占年降水量的 70%以上^[6]; 水面蒸发的区域分布与降水量相反, 由南部祁连山区向北部增加, 由高山向低山增加, 且梯度变化较大^[7]; 径流主要由降水形成, 流量过程与雨量过程基本相应; 黑河深居内陆, 属大陆性气候干旱区, 气候地带性和区域性非常明显^[8]。

SWAT 模型的输入数据包括研究区域分辨率为 950 m 的黑河流域数字化高程模型(DEM)、1:100 万土地利用图、1:100 万土壤类型分布图以及气象数据等。气象数据包括 7 个雨量站(托勒, 莺落峡, 野牛沟, 扎木什克, 祁连, 俄博, 康乐)1987~2000 年的逐日降水数据, 4 个气象站(托勒, 野牛沟, 祁连, 张掖)逐日相对湿度、平均风速、最高气温及最低气温。各站点地理位置及高程如图 1 和表 1 所示。流量资料包括莺落峡站 1987~2000 年逐日流量数据。选用 1987~1989 年

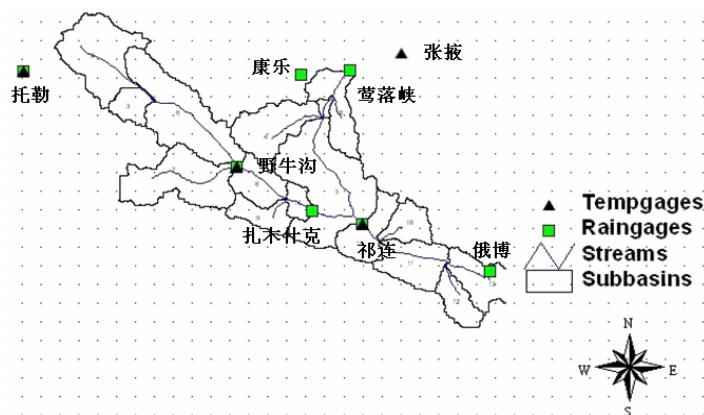


Figure 1. Locations of rainfall and meteorological stations in the upper reaches of Heihe River Basin
图 1. 研究区气象站及雨量站分布图

Table 1. Information of rainfall and meteorological stations in the upper reaches of Heihe River Basin
表1. 黑河上游雨量站及气象站站点位置及高程

名称	经度(°E)	纬度(°N)	高程(m)
野牛沟	38.417	99.583	3180
祁连	38.183	100.250	2787
山丹	38.800	101.083	1765
张掖	38.933	100.433	1483
托勒	38.820	98.417	3367
扎木什克	38.230	99.980	2810
俄博	37.970	100.930	3460
莺落峡	38.820	100.180	1700
康乐	38.800	99.920	2600

数据作为模型预热期, 1990~1996 年作为模型率定期, 1997~2000 年作为模型验证期。

3. 气候变化情景构建

目前气候情景的构建通常采用两种方法: 一是假想的气候情景, 即假定到未来某一特定时期气候要素(温度、降水等)的变化量; 二是取自 GCM(General Circulation Model)模拟的气候情景。由于 GCM 网格格距较大, 对于区域气候而言, 其分辨率较低, 因此本文采用第一种方法构建气候变化情景。建立的黑河流域未来气候变化情景具体设置为: 降水量比 1990~1996 年原始数据分别增加+20%, +10%, 0%, -10%, -20%, 气温分别在 1990~1996 年原始数据基础上增加 2℃, 1℃, 0℃, -1℃, -2℃, 一共有 24 组组合情景。对这 24 组气候情景组合进行模拟, 计算在未来气候变化情景下的径流量变化情况。

4. 结果分析与讨论

4.1. 模型率定与验证

采用莺落峡水文站 1990~2000 年流量资料进行 SWAT 模型的参数率定及验证。结果表明, 无论在率定期还是验证期, 模拟的莺落峡站日、月流量过程线与实测流量过程线吻合的都很好; 率定期莺落峡站的年平均流量模拟 $E_{NS}^{[9]}$ 为 0.72, 验证期年平均流量模拟 E_{NS} 为 0.64。就不同年份日流量过程的模拟效果而言, 率定期 1996 年日流量过程 E_{NS} 达到最高为 0.80, 验证期 1998 年日流量过程 E_{NS} 达到最高为 0.73。这说明 SWAT 模型可以对黑河上游莺落峡水文站的流量进行很好的模拟和预测, 可以用来进行不同气候情景条件下径流量的计算。

4.2. 不同气候变化情景下的流域径流量

根据已率定好的 SWAT 的模型, 对未来各种气候变化情境下的黑河上游莺落峡水文站径流量进行预测, 得出多年平均流量和多年平均年径流深, 如表 2 所示。图 2 显示了各种情景下莺落峡水文站多年平均径流深变化情况。由表 2 和图 2 可知, 在气温不变的情况下, 随着降水的增加, 多年平均流量和多年平均径流深增加; 反之亦然。这主要因为黑河上游径流量主要由降水形成, 仅有小部分径流由融雪和冰川融化形成; 河流来水量随降水的变化而变化, 流量过程与雨量过程是基本对应的。由图 2 可知, 气温不变时, 当降水增加 10%, 多年平均径流深增加 24%; 降水增加 20%时, 多年平均径流深增加 49%; 降水减少 10%和 20%时, 多年平均径流深减少 20%和 37%; 降水变化会导致多年平均径流深发生 2 倍左右的变化。

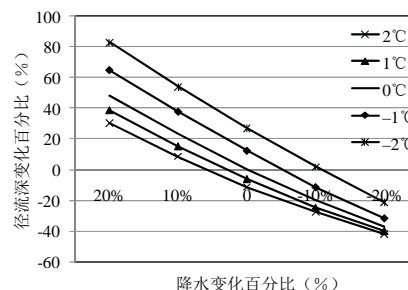


Figure 2. Annual average runoff depth of the Yingluoxia Station under different climate scenarios
图2. 不同气候变化情景下莺落峡水文站多年平均径流深变化情况

Table 2. Annual average discharge and runoff depth of the Yingluoxia Station under different climate scenarios
表2. 不同降水和气温变化条件下莺落峡站多年平均流量和多年平均径流深计算结果

	气温变化	降水变化百分比				
		20%	10%	0	-10%	-20%
多年平均流量 (m^3/d)	2℃	49.92	41.57	33.92	27.69	22.20
	1℃	53.04	44.06	35.89	28.75	22.96
	0℃	57.00	47.33	38.44	30.53	24.01
	-1℃	57.02	52.71	43.03	34.00	26.29
	-2℃	70.00	58.97	48.59	39.02	30.15
多年平均径流深 (mm)	2℃	157.28	130.97	106.87	87.24	69.94
	1℃	167.12	138.81	113.08	90.58	72.35
	0℃	178.99	149.11	120.45	96.20	75.63
	-1℃	198.64	166.08	135.58	107.12	82.83
	-2℃	220.54	185.79	153.09	122.94	94.98

当降水条件不变时, 随着气温的升高, 多年平均流量和多年平均径流深呈现减少态势; 随着气温的降低, 流量和径流深呈增加态势; 气温升高 1℃, 多年平均径流深减少 6%; 气温升高 2℃时, 径流深减少 11%; 气温降低 1℃时 2℃时, 径流深分别增加 13% 和 27%; 显然, 气温降低比气温升高对流域径流量的影响更大。这是因为气温不仅影响流域总蒸散发量, 同时也会影响降水形态。气温降低, 一方面导致流域总蒸散发量降低, 另一方面会增加降雪量, 从而增加融雪径流, 这些都会导致流域来水量的增加。很多研究^[10,11]已表明, 近些年来及未来一段时期内, 黑河流域气温都呈现上升趋势。因此可能需要更多的关注气温升高对流域产流量的影响。

当气温和降水同时发生变化时, 径流量变化更为复杂。降水增加 10%, 气温升高 1℃会导致多年平均径流深增加 15%, 气温升高 2℃会导致径流深增加 8%; 降水增加 20%, 气温升高 1℃和 2℃, 分别会导致径流深增加 39% 和 31%。这表明降水增加所导致的流域来水量的增加会弥补由于气温升高所带来的流域总蒸散发的损失; 另外, 气温升高也会使得融雪径流增加, 从而增加流域总的来水量。研究还表明, 在降水增加、气温下降条件下, 流域径流量增幅更大。也就是说, 无论黑河上游气候向暖湿方向变化还是向冷湿方向变化, 流域水资源量都将会有所增加; 后者导致水资源量增幅更大。降水减少 10%, 气温升高由 1℃变化到 2℃, 多年平均径流深减少量由 25% 变化到 28%; 降水减少 20%, 气温升高由 1℃变化到 2℃, 径流深减少量由 40% 变化到 42%; 即当流域气候向暖干方向变化时, 流域水资源量会有所减少。此外, 降水

减少对径流量减少的贡献远要比气温升高对径流量减少的贡献大。研究还发现, 当降水减少、气温降低时, 即当流域气候向冷干方向变化时, 流域水资源量即可能减少也可能增加, 这将取决于降水和气温下降的程度大小。当然, 流域实际情况要远比这些假想条件复杂的多, 影响产流量的因素也错综复杂; 流域产流量的大小是多种因素共同作用的结果。

图 3 显示了不同气候变化情景下莺落峡水文站多年平均径流深在不同月份的变化情况。可以看出, 仅降水发生变化时, 随着降水增加比例的增大(由 10% 到 20%), 流量过程线(图中多年平均径流深月分配过程线)越来越尖瘦; 随着降水减少比例的增大(由-10% 到-20%), 流量过程线越来越平坦; 不同月份流量基本呈现近似的等幅变化; 无论降水增加还是减少, 7、8 月份流量总是占全年流量的比例最大, 其次是 6、9 和 5 月份。这说明降水对于流域总的产流量有着重要的影响, 但对于流量的月分配过程影响不大。在仅有气温发生变化时, 不同月份的流量变化趋势不相一致, 流量过程线形状发生明显变化。具体表现为, 对于秋季(9~11 月份)、冬季(12~2 月份)和春季的 3、4 月份, 气温变化对流量的影响较小, 而对于春季的 5 月份以及夏季(6~8 月份), 气温升高则对流量的影响较大, 其中 6 月份流量增加最为明显。当气温升高时, 6 月份流量出现明显大幅度增加; 当气温升高 2℃时, 洪峰时间提前, 由原来的 7 月份提前到 6 月份。这说明, 比较降水而言, 气温对于流量的时间分配影响更大。也就是说, 通过分析不同气候变化情景下莺落峡水文站多年平均径流深在不同月份的表现, 可以发现, 不同气象要素对流域产流量的影响作用和程度

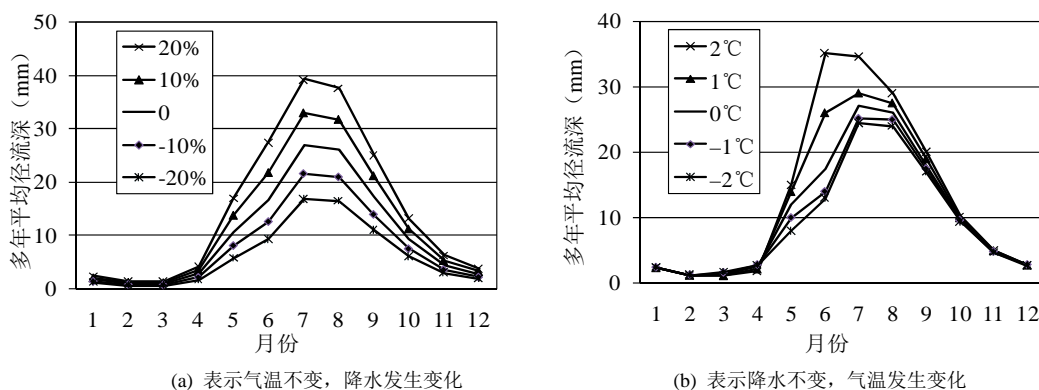


Figure 3. Seasonal average runoff depth of the Yingluoxia Station under different climate scenarios
图 3. 不同气候变化情景下莺落峡水文站多年平均径流深在不同月份的变化情况

是不同的, 降水对流域总的产流量影响较大, 而气温主要是对流量的时间分配影响较大。这与 Stonefelt 等人的研究结论较为一致^[12]。

5. 结论

本文基于 SWAT 模型对黑河上游莺落峡水文站的径流模拟, 着重探讨了未来不同气候变化情景下研究区水资源量的变化情况。结果表明: 1) 气温不变时, 降水增加 10% 和 20%, 黑河上游多年平均径流深分别增加 24% 和 49%; 降水减少 10% 和 20%, 径流深分别减少 20% 和 37%; 降水变化会导致多年平均径流深发生 2 倍左右的变化。2) 降水不变时, 气温升高 1℃ 和 2℃, 多年平均径流深减少 6% 和 11%; 气温降低 1℃ 和 2℃, 径流深会增加 13% 和 27%; 气温降低比气温升高对流域径流量的影响更大。3) 当气温和降水条件同时发生变化时, 径流量变化更为复杂。当流域气候向暖干方向变化时, 流域水资源量会有所减少; 当流域气候向冷干方向变化时, 流域水资源量即可能出现减少也可能出现增加, 这将取决于降水和气温下降的程度大小。当流域气候向暖湿或冷湿方向变化, 流域水资源量都将会有所增加; 且冷湿气候导致水资源量的增幅更大。4) 通过分析不同气候变化情景下莺落峡水文站多年平均径流深在不同月份的表现, 可以发现, 不同气象要素对流域产流量的影响和程度是不同的, 降水对流域总的产流量影响较大, 而气温对流量的时间分配影响较大。

参考文献 (References)

- [1] 蓝永超, 康尔泗, 金会军, 等. 黑河出山径流量年际变化特征和趋势研究[J]. 冰川冻土, 1999, 2(1): 49-53.
LAN Yongchao, KANG Ersi, JIN Huijun, et al. Study on the variation characteristics and trend of mountainous runoff in the Heihe River Basin. Journal of Glaciology and Geocryology, 1999, 2(1): 49-53. (in Chinese)
- [2] 李志, 刘文兆, 张勋昌, 等. 未来气候变化对黄土高原黑河流域水资源的影响[J]. 生态学报, 2009, 29(7): 3456-3464.
LI Zhi, LIU Wenzhao, ZHANG Xunchang, et al. The impacts of future climate change on water resources in the Heihe Watershed on the Loess Plateau. Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(7): 3456-3464. (in Chinese)
- [3] LI, Z. L., XU, Z. X. and LI, Z. J. Performance of WASMOD and SWAT on hydrological simulation in Yingluoxia watershed in northwest of China. Hydrological Processes, 2011, 25: 2001-2008.
- [4] 李占玲, 徐宗学. 近 50 年来黑河流域气温和降水量突变特征分析[J]. 资源科学, 2011, 33(10): 1877-1882.
LI Zhanling, XU Zongxue. Detection of change points in temperature and precipitation time series in the Heihe River Basin over the past 50 years. Resources Science, 2011, 33(10): 1877-1882. (in Chinese)
- [5] 李常斌, 李文艳, 王雄师, 等. 黑河流域中、西部水系近 50 年来气温降水径流变化特征[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2011, 47(4): 7-12.
LI Changbin, LI Wenyao, WANG Xiongshi, et al. Characteristic changes in air temperature, precipitation and mountain runoff in the past 50 years in the middle and western reaches of Heihe River Basin. Journal of Lanzhou University (Natural Sciences), 2011, 47(4): 7-12. (in Chinese)
- [6] 张天昌. 黑河上游水文特性及区间水量分析[J]. 甘肃水利水电技术, 2005, 41(3): 220-222.
ZHANG Tianchang. Hydrological characteristics and water available analysis in the upper reaches of Heihe River Basin. Gansu Water Conservancy and Hydropower Technology, 2005, 41(3): 220-222. (in Chinese)
- [7] 金婧靓, 王飞儿. SWAT 模型及其应用与改进的研究进展[J]. 东北林业大学学报, 2010, 38(12): 111-114.
JIN Jingliang, WANG Feier. Research progress on SWAT model and its application and improvement. Journal of Northeast Forestry University, 2010, 38(12): 111-114. (in Chinese)
- [8] 付有智, 曹玲. 黑河流域气候特征及面雨量分析[J]. 甘肃气象, 2002, 2(2): 8-10.
FU Youzhi, CAO Ling. The area rainfall analysis and climatic feature of Heihe River Drainage. Gansu Meteorology, 2002, 2(2): 8-10. (in Chinese)
- [9] NASH, J. E., SUTCLIFFE, J. V. River flow forecasting through conceptual models: Part 1. A discussion of principles. Journal of Hydrology, 1970, 10: 282-290.
- [10] 康兴成, 程国栋, 康尔泗, 等. 利用树轮资料重建黑河近千年来出山口径流量[J]. 中国科学(D 辑), 2002, 32(8): 675-685.
KANG Xingcheng, CHENG Guodong, KANG Ersi, et al. Reconstruction of runoff over the past thousand years of Heihe River using tree-ring width chronologies. Science in China (Series D), 2002, 32(8): 675-685. (in Chinese)
- [11] 汤贵仁, 陈文雄. 黑河流域祁连山区气象要素演变趋势分析[J]. 甘肃水利水电技术, 2010, 46(9): 7-9.
TANG Guiren, CHEN Wenxiong. Trend analysis of meteorological variables in Qilian Mountains of Heihe River Basin. Gansu Water Conservancy and Hydropower Technology, 2010, 46(9): 7-9. (in Chinese)
- [12] STONEFELT, M. D., FONTAINE, T. A. and HOTCHKISS, R. H. Impacts of climate change on water yield in the upper wind river basin. Journal of the American Water Resources Association, 2000, 36(2): 321-336.