

DOI :10.3969/j.issn.1004-6933.2012.01.011

气候变化对长江、黄河源区水资源的影响

白路遥 荣艳淑

(河海大学水文水资源学院 , 江苏 南京 210098)

摘要 利用 1961—2010 年长江、黄河源区 22 个气象站的月降水量和月平均气温资料 , 分析长江、黄河源区的气候特征 , 用降水与蒸发的差值作为水资源量的代表 , 分析了气候变化对水资源的影响。结果表明 , 长江源区和黄河源区降水、气温和蒸发都有明显变化 , 尤其是近 20 年有明显增加趋势 , 但是两个源区的变化并不一致 , 黄河源区水资源量一直呈波动变化 , 而长江源区在最近 10 多年水资源量有明显增多现象。降水增多可直接增加水资源量 , 但是气温升高会促进蒸发 , 导致更多的水资源消耗 , 因此降水和气温的变化可相互抵消对水资源的影响 , 这是黄河源区水资源量变化不大的原因。但是近 10 多年长江源区气温显著增加 , 导致更多冰川融化 , 这可能是近年来长江源水资源量增多的原因。

关键词 : 气候变化 ; 水资源 ; 长江源区 ; 黄河源区

中图分类号 : P339

文献标识码 : A

文章编号 : 1004-6933(2012)01-0046-05

Impacts of climate change on water resources in source regions of Yangtze River and Yellow River

BAI Lu-yao , RONG Yan-shu

(College of Hydrology and Water Resources , Hohai University , Nanjing 210098 , China)

Abstract : The characteristics of the climate in the source regions of the Yangtze River and Yellow River were analyzed based on the monthly precipitation and monthly mean temperature at 22 meteorological stations from 1961 to 2010. The difference in the value between precipitation and evaporation was used to represent the water resources , in order to analyze the impacts of climate change on the water resources. The results show that the precipitation , temperature , and evaporation in the source regions of the Yangtze River and Yellow River have changed significantly , especially in the last 20 years , when there were significant increasing trends in these properties. The water resources presented a fluctuating variation in the source region of the Yellow River and increased significantly in the last 10 years in the source region of the Yangtze River. The increase of precipitation can directly lead to the increase of water resources ; however , the increasing temperature can lead to high evaporation that would consume more water resources. Therefore , the influences on water resources can be balanced out by the changes of precipitation and temperature , which explains why there is no significant change in the water resources in the source region of the Yellow River. The temperature increased significantly in the last 10 years in the source region of the Yangtze River , causing more glaciers to melt and water resources to increase in the region.

Key words : climate change ; water resources ; source region of Yangtze River ; source region of Yellow River

众所周知 , 水是生命之源、生产之要、生态之基 , 事关经济生态和国家安全。在全球气候变暖的大背

景下 , 水资源问题已成为全世界各国关注的焦点。2011 年中央 1 号文件对水资源管理划定了三条红

基金项目 : 国家自然科学基金(40830639)

作者简介 : 白路遥 (1986—) 男 , 硕士研究生 , 研究方向为应用水文气象。E-mail : bly_1030@163.com

通讯作者 : 荣艳淑 教授。E-mail : ysrn@hhu.edu.cn

线^[1] ①确立水资源开发利用红线,严格实行用水总量控制;②确立用水效率控制红线,坚决遏制用水浪费;③确立水功能区限制纳污红线,严控排污总量。这三条红线充分体现了我国政府对水资源问题的态度以及水资源问题研究的必要性。近年来我国学者在水资源与气候变化方面的相关研究也成果甚多^[2-5]。

长江源区和黄河源区是长江、黄河的重要组成部分,源区的气候变化不仅对当地的水资源和生态环境产生重要的影响,而且对其中下游的供水、发电、航运等同样有重要影响。

近年来的研究表明,源区冻土厚度减小、地下水水位下降、冰川消融、湖泊退缩、土地荒漠化等事件的严重程度呈增加的趋势^[6],说明气候变暖及人类活动对长江黄河源区的影响十分显著。这种影响将会对源区的气候、植被、生态环境,甚至对源区水资源分布产生深刻影响。

过去许多研究都从径流变化探讨源区水资源的可能变化,例如,谢昌卫等^[7]的研究表明,近半个世纪以来,长江源区径流量呈微弱的减小趋势,而黄河源区的径流量呈微弱的增加趋势。杨建平等^[8]的研究表明,气候变暖导致冰川退缩,冰川融水径流量增加,但是长江源区的冰川融化速度明显小于黄河源区,这是因为黄河源区气候变暖更显著的原因。时兴合等^[9]的研究表明,长江源区雨季和过渡季节降水量、积雪融水量和高山冰雪融水量所形成的总径流量呈下降趋势。还有人认为黄河源区径流量进入20世纪90年代以来呈减小的趋势^[10]。引起这种变化原因归结于年平均气温和蒸发量增大^[11],因此气候变化导致的流量减小量占总减小量的70%左右^[10],这充分说明气候变化是影响水资源的主要因素。

事实上,长江源区和黄河源区自然条件艰苦,水文站点稀少,能够全面控制江河源区的径流量的水文站更加稀少,所以实测的径流量不能全面代表该地区的水资源量。对此,笔者拟从水量平衡理论出发,探讨长江、黄河源区的水资源量,以及气候变化对水资源的影响。

1 资料和方法

笔者在长江源区和黄河源区共选取了22个气象站作为代表,以1961—2010年月降水量和月平均气温资料作为基本气候要素。两个源区内气象站的位置示意如图1所示。所有数据均来自于中国气象信息中心。

长江、黄河源区的水资源主要来自大气降水和冰雪融水,而大气降水是长江源区和黄河源区水资源的重要补给来源,但相当的一部分以蒸发形式损

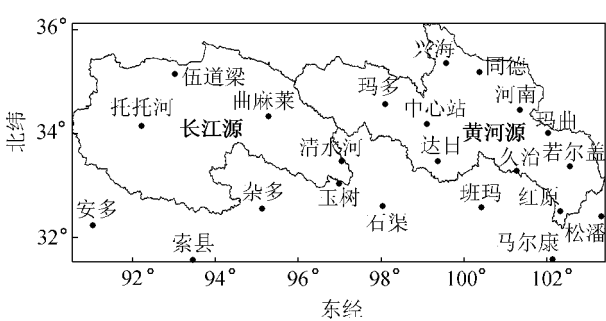


图1 长江、黄河源区气象站分布示意图

失掉。因此,根据水量平衡原理,笔者将降水量扣除蒸发量后作为该地区的可利用降水,并以此作为水资源量 F 的代表。蒸发量的计算采用高桥浩一郎^[12]的经验公式:

$$E = \frac{3\,100P}{3\,100 + 1.8P^2 \exp\left(-\frac{34.4T}{235 + T}\right)} \quad (1)$$

式中: E 为陆面实际蒸发量,mm; P 为月降水量,mm; T 为月平均气温, $^{\circ}\text{C}$ 。

定义 $F = (P - E)A$ 为可利用水资源量,其中 A 为研究区域的面积,长江源区和黄河源区的面积分别为13.77万 km^2 和12.197万 km^2 。下面对水资源的分析,便是基于这种思路和方法进行的。

2 长江、黄河源区的基本气候特征

2.1 降水特征

图2所示为长江、黄河源区1961—2010年降水量的年际变化。由图2可知,长江源区的平均年降水量约为440 mm,降水量最大值出现在2009年,为544.2 mm,相对于多年平均值的变化也是最大值,最小值出现在1984年,为353.7 mm,极差大约为190 mm,相对变率大约为43%。黄河源区的年降水量约为590 mm,最大降水量出现在1975年,为696.6 mm;最小降水量出现在2002年,为463.8 mm,极差大约为230 mm,相对变率大约为39%。因此黄河源区年降水量较多,长江源区较少,黄河源区的年降水量极差较大,变率较小,而长江源区降水量极差较小,变

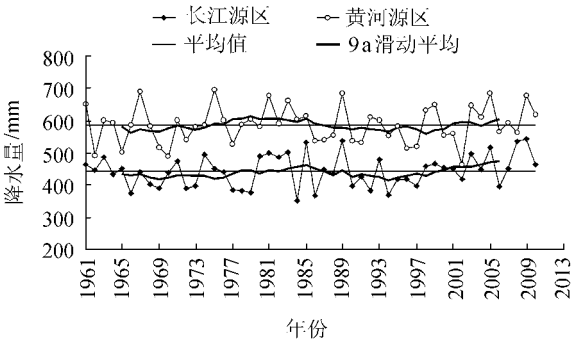


图2 降水量年际变化

率较大。

此外,由9年滑动平均曲线可以看出,长江源区在1970年代以前和1990年代期间,滑动平均值小于多年平均值,说明在这两个时段降水量偏少,1990年代后期开始,年降水量明显高于平均值,说明从20世纪末以来降水增大的趋势比较明显。黄河源区也有类似的变化特征,而且最近20年来降水增加的趋势也很明显。

2.2 蒸发特征

根据式(1)计算了长江、黄河源区的蒸发量,图3是最近50年来蒸发量的年际变化。由图3可知,长江源区的多年平均蒸发量约为190 mm,最大值出现在2005年,为216.7 mm;最小值出现在1984年,为150.7 mm。极差大约为66 mm。黄河源区的多年平均蒸发量约为250 mm,最大值出现在2009年,为282.8 mm;最小值出现在1986年,为226.7 mm,极差大约为56.1 mm。此外,由图3中的9年滑动平均值曲线可以看出,两个源区在1990年代以前,蒸发量基本在多年平均值以下,其后则明显高于平均值,两个源区蒸发量的变化具有同步性,而且存在明显的线性变化趋势,蒸发量增大幅度分别为每年7.6%和8.5%,都通过了显著性0.05水平的信度检验。

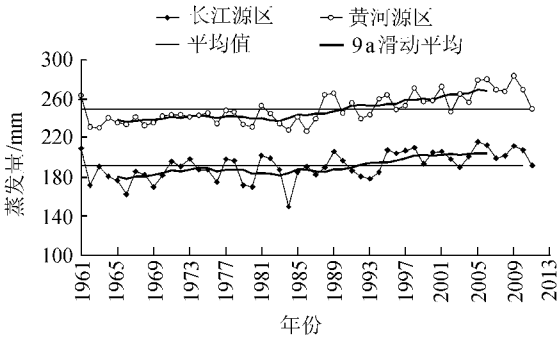


图3 蒸发量年际变化

2.3 气温特征

长江源区和黄河源区由于地处青藏高原腹地,多数气象站的海拔高度在3500 m以上,仅有两个站低于3000 m,因此源区多数月份月平均气温在零度以下。表1给出了长江黄河源区各月平均气温的比较。由表1可以看出,长江源区从10月至次年4月,平均气温均在0℃以下,负温持续时间长达7个月,正温期只有5个月,从5月持续到9月份,最暖月的平均气温不超过10℃。黄河源区负温持续时间较长江源区短,仅有5个月,是从11月持续到次

年3月,而正温持续期大约为7个月,最暖月的平均气温超过11℃。因此,长江源区和黄河源区正负温度持续期有所不同,而且黄河源区的各平均气温均高于长江源区。这种现象是由于长江源区的气象站海拔高度更高,平均达到了4200 m以上,而黄河源区的平均海拔高度大约为3500 m,因此长江源地势较高,气温随高度降低明显。

图4为长江、黄河源区1961—2010年年平均气温的年际变化。由图4可以清楚看出,两个源区平均气温不仅存在明显的年际波动特征,而且都有明显的增加现象,气候倾向率分别达到了0.35℃/10 a和0.37℃/10 a,通过了0.05的显著性水平检验。此外还发现,长江源区和黄河源区气温变化有明显的一致性,虽然两个地区平均气温不同,但是它们增暖的进程是一致的。观察两个源区气温变化,可以发现,如果以1997年为分割点,那么在1997年以前,气温变化比较平稳,这一时期长江源区和黄河源区的平均气温分别为-2℃和0.9℃;1997年以后,气温有了一个明显跃升,平均气温分别达到了-0.8℃和2.2℃,两个源区在前后两个时期气候均值分别变化了1.2℃和1.3℃,说明黄河源区增暖比长江源区还要明显,两个源区年平均气温的线性趋势也是黄河源大于长江源。因此,长江源区和黄河源区不仅都有气温增暖现象,而且黄河源区的增暖强度要大于长江源区。

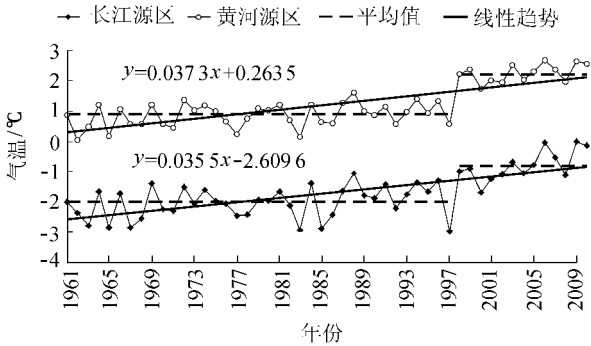


图4 年平均气温年际变化

3 气候变化对长江、黄河源区水资源的影响

3.1 水资源变化分析

根据可利用降水的计算方法,图5给出了长江源区和黄河源区1961—2010年水资源量的年际变化情况。由图5可知,长江源区多年平均水资源量约为350亿 m³,最大值出现在1985年,为479.4亿

表1 长江、黄河源区逐月平均气温

分区	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
长江源区	-13.3	-10.4	-5.9	-1.1	3.2	6.6	9.0	8.5	5.1	-1.1	-8.5	-12.6
黄河源区	-10.1	-7.0	-2.4	2.3	6.1	9.0	11.1	10.5	7.2	1.9	-4.8	-9.3

m³ ,最小值出现在 1986 年 ,为 415 亿 m³ 。极差大约为 237 亿 m³ 。而黄河源区水资源量为 242.7 亿 m³ ,最大值出现在 1967 年 ,约为 549 亿 m³ ;最小值出现在 2002 年 ,约为 270 亿 m³ ,极差大约为 279 亿 m³ 。由 9 年滑动平均曲线可以看出 ,两个源区表现出相似的变化规律 ,都呈现两个波谷和一个波峰的现象 ,不同的是 ,最近 10 年以来 ,长江源区的水资源量已经转为正距平时期 ,水资源量基本大于平均值 ,说明长江源区水资源量略有增多 ;而黄河源区仍处于波动中 ,没有增加的迹象。对比图 4 可以发现 ,长江源区水资源增多时期基本与气温升高的时期相对应 ,因此气候变暖对长江源区的水资源是有影响的。

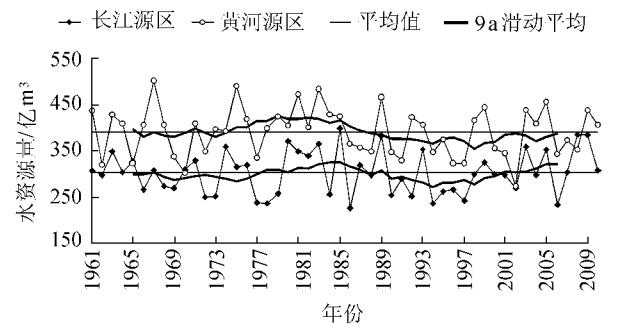


图 5 水资源量年际变化

3.2 降水变化对水资源的影响

为了分析气候变化对水资源的影响 ,笔者对降水量、蒸发量及水资源量的季节分配进行了简要分析(表 2)。从表 2 中可以看出 ,长江源区和黄河源区的降水主要集中在夏季 ,夏季降水量占年总量的 56% 以上 ,其次是秋季 ,夏秋两个季节降水总量可占全年的 80% 以上 ,因此夏秋多雨、冬春少雨的气候特征十分显著。蒸发也主要集中在夏季 ,夏季蒸发量约占全年的 50% ,秋季和春季次之。季节蒸发量与季节降水量有一个明显不同之处 ,就是春秋季节蒸发量几乎是相同的 ,而降水量中 ,秋季降水量明显多于春季。这种特点可能与温度有关 ,也可能与夏季风的进程有关。

表 2 长江和黄河源区平均 P、E、F 的季节分配及占全年的比例

时段	P/亿 m ³	占全年百分比/%	E/mm	占全年百分比/%	F/亿 m ³	占全年百分比/%
春季	96.1	18	51.5	22	115.8	15
夏季	301.3	57	112.8	50	489.5	61
秋季	124.2	23	52.7	23	185.7	23
冬季	12.5	2	10.8	5	4.4	1
全年	534.1		227.8		795.4	

由于水资源量的变化主要取决于降水和蒸发 ,因此水资源量也主要集中在夏季 ,夏季两个源区可产生的水资源量占全年总量的 61% ,秋季次之 ,冬春两季水资源量很少。综上所述 ,降水和蒸发的年

内变化对水资源有重要影响。

由于降水量、蒸发量主要集中在夏秋季节 ,因此笔者对这些指标夏季和秋季各月的变化趋势进行了分析(表 3)。从表 3 中可以看出 ,降水量的变化趋势与水资源量完全一致 ,降水量增多或减少 ,水资源量也相应的增多或减少。而蒸发量与水资源量的关系则显得较复杂 ,有的月份二者同增 ,有的月份甚至反向变化。

表 3 长江、黄河源区 P、E 和 F 的气候倾向率

P/ 月份 (mm· 10a ⁻¹)	E/ (mm· 10a ⁻¹)	F/ (亿 m ³ · 10a ⁻¹)	P/ 月份 (mm· 10a ⁻¹)	E/ (mm· 10a ⁻¹)	F/ (亿 m ³ · 10a ⁻¹)
6 2.50	0.74*	4.79	9 -0.31	0.76*	-10.48
7 -1.77	0.82*	-6.45	10 1.07	0.37	1.82
8 1.25	0.70*	1.43	11 -0.02	0.05	-0.18

注 : * 表示显著性水平超过了 95%。

图 6 是两个源区降水量与水资源量的相关图 ,从中可以看出降水量与水资源量有非常好的相关性 ,R² 都达到了 0.9 以上。因此 ,水资源的变化与降水量有着密切联系 ,这也充分说明了降水是水资源补给的重要一环 ,而且黄河源区水资源对降水补给的依赖略大于长江源区 ,这也间接表明 ,长江源区水资源的补给可能存在其他方式。

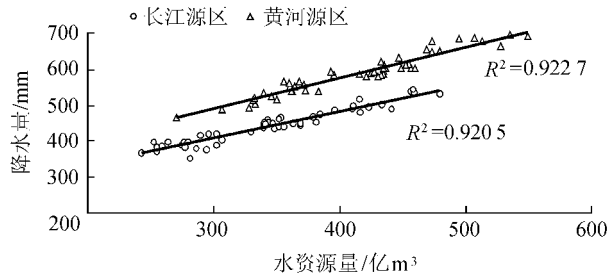


图 6 降水量与水资源量的相关性

3.3 气温变化对水资源的影响

此外 ,由水资源量的计算公式可知 ,水资源量的变化不仅与降水变化有关 ,而且应当与气温有关系。事实上 ,气温的高低对降水的形态、冰雪消融的程度、蒸发能力的大小都有不同程度的影响。因此讨论气温变化对水资源的影响是很有意义的。

图 7 是气温与水资源量的相关图 ,由图中的 6 阶多项式拟合曲线可以看出 ,长江源区的 R² 约为 0.1 ,黄河源区 R² 约为 0.2 ,因此 ,气温与水资源量的相关性较差 ,而且不能用线性关系来表述 ,这说明气温对水资源量的影响并不像降水量那样直接 ,可能是通过其他方式对水资源产生影响的。

事实上 ,长江源区分布着众多冰川、积雪和冻土 ,其总面积占源区总面积的 0.87% ,黄河源区冰川面积明显小于长江源区 ,其面积比仅为 0.11% 左右^[7] ,因此 ,长江源区可称为冰雪融水与降水共同补

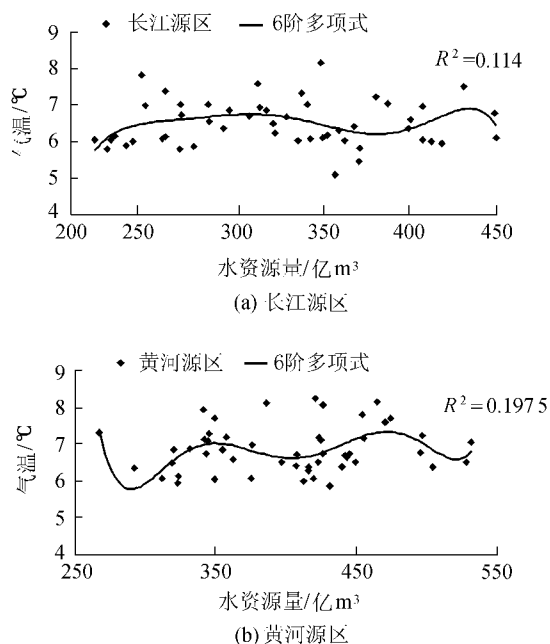


图7 气温与水资源量的相关性

给水资源区域,黄河源区基本为降水补给型区域。冰川和冻土等地表物质对气温变化非常敏感。源区的冰川消融时间基本出现在正温期的几个月中^[8],对比表2可以看出,气温在0℃以上的时期正是两个源区降水较多、蒸发量较大和水资源较多的时期,因此,气温升高后,有利于冰川融化,对源区补充水资源。

研究表明,长江源区冰川总面积在1969—2000年减少了1.7%,并且在1994年以后开始明显退缩^[7],这种现象与气温在1990年代后期明显升高相对应,因此,气温是直接影响冰川融化的气候要素。融冰后产生的径流是源区水资源量的重要部分,统计表明^[8],长江源区冰川融水径流量约占年总径流量的9.2%,而冰川融水对黄河源区径流的贡献较小,仅为0.63%。如果考虑融冰仅出现在春末和夏季,那么冰川融化产生的径流量占夏季径流的比重会明显增加。

另外,气温变化可直接导致蒸发量发生变化,二者关系明显是一种正相关关系^[13-14],也就是说气温增大时,大气中水气压会明显增大,因此大气保水量会增多,此时会促进蒸发。当蒸发量增大时,会消耗地面水资源量,因此水资源应当减少。所以气温对冰雪融化有积极作用,可增加水资源;但是气温升高,又增大蒸发量,对水资源有减少作用。因此气温对水资源的影响是复杂的。

对于那些以径流量作为水资源代表的文献中,多次论及气温对径流量的影响,例如,研究表明,以冰雪融水为主的河流,暖干与暖湿的气候时期径流量偏丰,而在冷湿与冷干气候时期径流量偏枯。以降水补给为主的河流在冷干和暖干的气候条件下径

流量偏枯,而冷湿和暖湿的径流量偏丰,特别是当降水量增大50%,气温下降1~3℃时,径流量可偏大70%以上;对于温度偏高,降水量偏少的年份,径流量会显著减少^[15]。数值模拟结果显示,气温变化对径流量可能造成负的影响,若降水不变,气温升高4℃时,流域径流量可能减少15%左右^[16]。因此,如果仅考虑气温1个要素,它对地面水资源的影响(在不考虑冰川消融情况下)将是负面的。对于长江源区而言,由于冰川分布较广,气温升高导致冰川融化会弥补一些径流的损失。对于黄河源区而言,由于降水主要集中在夏季,此时正是夏季风活动的季节,夏季风可带来更多的降水,为黄河源区的水资源量提供保障。

4 结 语

a. 长江源区和黄河源区从50年的时间尺度看,降水量变化不明显,气温和蒸发量都有明显的增加趋势,但是在最近20年间,降水量、气温和蒸发量均有不同程度的增加趋势,尤其是两个源区气温的气候倾向率分别达到了0.35℃/10a和0.37℃/10a,具有对全球变暖响应的特点。

b. 长江源区和黄河源区水资源量的变化呈波动变化特征,没有明显的趋势变化特征,但是长江源区近10年来水资源明显增多,这与黄河源区明显不同。

c. 降水变化对长江源区和黄河源区水资源有直接影响,即降水多与寡直接影响水资源量的多与少。气温对水资源的影响较复杂,气温升高可导致冰川融化,提供更多的融冰水资源,但是气温升高又会导致蒸发增大,更多地消耗水资源。这可能是近几十年来黄河源区水资源波动变化,没有明显增多或减少趋势的原因。对于长江源区而言,当气温变化不明显时,降水量带来的水资源与蒸发量消耗的水资源几乎相当,因此水资源量变化不明显,但是近十几年来,气温明显升高,产生了更多的融冰水资源,这可能是近10年来水资源增多的主要原因。

参考文献:

- [1] 中共中央国务院关于加快水利改革发展的决定[J]. 实践·党的教育版, 2011(3):4-7.
- [2] 江善虎,任立良,雍斌,等. 气候变化和人类活动对老哈河流域径流的影响[J]. 水资源保护, 2010, 26(6):1-4.
- [3] 龚宇,邢开成,王聪玲,等. 气候变化对沧州水资源的影响与对策[J]. 水资源保护, 2007, 23(3):20-23.
- [4] 周陈超,贾绍凤,燕华云,等. 近50a以来青海省水资源变化趋势分析[J]. 冰川冻土, 2005, 27(3):432-436.

(下转第70页)

流。泉水平均流量 4.56 万 m³/d。④泉水流量恢复期(2003—2009 年),自 2003 年 9 月 6 日趵突泉又一次复涌以来,四大泉群已持续喷涌,泉水平均流量 12.8 万 m³/d。

可见,济南泉水喷涌量呈明显衰减趋势。
影响泉水流量的因素主要有大气降水量的变化、地下水人工开采量变化、下垫面条件的改变对地表、地下水转化的影响等 3 个方面。卧虎山水库则属于下垫面条件改变的一个因子。

3.2 卧虎山水库对济南泉水影响程度

据有关研究,济南泉域总面积 1 486 km²,多年平均岩溶水补给量 19 453 万 m³/a(53.3 万 m³/d)。自 1959 年开始,济南市区 4 大泉群具有系统的泉水水位及泉流量的监测资料。监测序列的前 10 年(1959—1968 年),人类活动对济南泉水的影响相对较小,泉域下垫面条件变化不大,泉域岩溶水人工开采量较小。1959—1968 年泉域平均年降水量为 698.3 mm,与泉域多年平均(1956—2006 年)年降水量 687.5 mm 基本相当,因此,可以把 1959—1968 年的泉水喷涌状况作为天然条件下的背景值。
天然条件下(1959—1968 年),市区 4 大泉群平

均涌水量为 12 592.5 万 m³/a(34.5 万 m³/d),占泉域岩溶水年总补给量的 64.7%。按同样比例分配,卧虎山水库对泉域岩溶水补给影响总量 2 302 万 m³/a(6.3 万 m³/d),其中对泉流量的影响为 1 489.3 万 m³/a(4.08 万 m³/d),占天然条件下泉流量的 11.8%,即在不考虑其他因素的情况下,卧虎山水库的拦蓄运行使市区四大泉群的泉流量削减了 11.8%。

参考文献：

[1] 刘家宏,秦大庸,王浩,等.海河流域二元水循环模式及其演化规律[J].科学通报,2010(6):512-521.
[2] 徐军祥,邢立亭,佟光玉,等.济南泉域地下水环境演化与保护[J].水文地质工程地质,2004,31(6):69-73.
[3] 吴兴波.济南人工回灌补源保泉试验研究[D].武汉:武汉大学,2004.
[4] BOUWER H. Artificial recharge of groundwater:hydrogeology and engineering[J]. Hydrogeology Journal,2002,10(1):121-142.
[5] 邢立亭.济南泉域岩溶水环境保护[J].水利科技与经济,2000(9):601-604.

(收稿日期 2010-11-16 编辑 高渭文)

(上接第 50 页)

[5] 王辉,甘艳辉,马兴华,等.长江源区气候变化及其对生态环境的影响分析[J].青海科技,2010,17(2):11-15.
[6] 曹建廷,秦大河,罗勇,等.长江源区 1956—2000 年径流变化分析[J].水科学进展,2007,18(1):29-33.
[7] 谢昌卫,丁永建,刘时银,等.长江-黄河源寒区径流时空变化特征对比[J].冰川冻土,2003,25(4):414-421.
[8] 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):595-602.
[9] 时兴和,秦宁生,许维俊,等.1956—2004 年长江源区河川径流量的变化特征[J].山地学报,2007,5(5):513-523.
[10] 常国刚,李林,朱西德,等.黄河源区地表水资源变化及其影响因子研究[J].地理学报,2007,62(3):312-320.
[11] 李林,王振宇,秦宁生,等.长江上游径流量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.
[12] 高桥浩一郎.从月平均气温、月降水量来推断蒸发的公式[J].天气,1979,26(12):29-32.
[13] 荣艳淑,周云,王文.淮河流域蒸发皿蒸发量变化分析[J].水科学进展,2011(1):15-22.
[14] 荣艳淑,余锦华,屠其璞.华北地区各区域动力和热力蒸发特征的研究[J].河海大学学报:自然科学版,2006,34(6):614-617.
[15] 杨针娘,王强,朱守森.祁连山北坡寒区水文对气候变

化的响应[J].冰川冻土,1996,18(S1):305-313.
[16] 施雅风.气候变化对西北华北水资源的影响[M].济南:山东科学出版社,1995.

(收稿日期 2011-05-11 编辑 高渭文)

