

窟野河流域径流演变及其驱动因素分析

王国庆^{1,2}, 张建云^{1,2}, 李岩³, 刘翠善^{1,2}, 鲍振鑫^{1,2}, 金君良^{1,2}

(1. 南京水利科学研究院水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210029;

2. 水利部应对气候变化研究中心, 江苏 南京 210029; 3. 水利部水文局, 北京 100053)

摘要:以黄土高原典型流域窟野河流域为对象,采用有序聚类方法,诊断了近60年来实测径流演变的阶段性特征,在此基础上,分析了不同阶段实测径流与气候要素之间的响应关系,初步揭示了径流演变的驱动机制。结果表明:近60年来窟野河流域实测径流量以1980年和1998年为分割点总体呈现阶段性减少趋势,其中,1999年以来减少尤其明显。不同阶段的年降水、径流关系有一定差异,相比而言,汛期(6-10月份)的月降水量与径流量具有相对较好的相关关系;非汛期(11-5月份)的月降水径流关系点群散乱,在月平均气温低于5℃时,月径流量与月平均气温具有较好的正相关性。窟野河流域汛期产流受高强度降水支配,人类活动对河川径流演变的影响有增大趋势。

关键词:径流;径流演变;有序聚类分析方法;驱动力;窟野河流域

中图分类号:TV211.1;P467

文献标识码:A

文章编号:1672-643X(2014)02-0007-05

Analysis of runoff evolution and factor of driving force in Kuye river catchment

WANG Guoqing^{1,2}, ZHANG Jianyun^{1,2}, LI Yan³, LIU Cuishan^{1,2}, BAO Zhenxin^{1,2}, JIN Junliang^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China; 2. Research Center for Climate Change, Ministry of Water Resources, Nanjing 210029, China;

3. Hydrology Bureau, Ministry of Water Resources, Beijing, 100053, China)

Abstract: Taking Kuye river catchment as an object and using method of sequential cluster analysis, the paper detected the phase feature of runoff evolution. It then analyzed the response relationship of runoff and climate elements in different phases, and initially revealed the regulation of driving force of runoff evolution. The results indicate that the measured runoff at Wenjiachuan station in Kuye River catchment presented a general decrease trend in recent 60 years with significant changes starting in 1980 and 1998, and decreased clearly since 1999. The relationship between precipitation and runoff of annual scale in different phases has certain difference. The correlation between monthly precipitation and runoff in flood season from June to October is better; but in dry season from November to May, the correlation between monthly precipitation and runoff is random. When the temperature of monthly mean is below 5℃, monthly runoff exponentially correlates to mean temperature. The runoff in flood season is dominated by high intensity rainfall while human activities play a principle role on river runoff evolution.

Key words: runoff; runoff evolution; method of sequential cluster analysis; driving force; Kuye river catchment

1 研究背景

黄土高原气候干旱,水土流失严重,水资源短缺和生态环境恶化是当前该区域面临的主要环境问题^[1]。河川径流是支撑区域经济发展和生态环境改善的重要因素,随着全球性气候变化和日益加剧

的人类活动,黄河中下游实测径流量出现较大幅度的衰减,如花园口站1980-2004年的实测径流量与1955-1979年相比减少了33.1%^[2],黄土高原典型的多数支流实测径流也呈现锐减趋势,成为典型的季节性河流^[3],对区域工农业生产、矿产资源开发乃至社会经济的稳定发展提出了严峻挑战。深入分

收稿日期:2013-11-29; 修回日期:2013-12-10

基金项目:国家973气候变化专项计划(2010CB951103)、国家自然科学基金项目(41330854、41371063)、江苏省“333工程”培养资金资助项目(BRA2012203)联合资助

作者简介:王国庆(1971-),男,山东成武人,博士,教授,主要从事水文水资源和气候变化影响评价等方面的研究。

析黄土高原典型流域径流演变规律及其驱动机制对于水资源的合理利用以及生态环境工程建设等方面具有重要意义。

以位于黄土高原腹地的窟野河流域为研究对象,系统诊断了近60 a来实测径流量的演变趋势及阶段性变化特征,分析了不同阶段实测径流与气候要素之间的响应关系,初步揭示了径流演变的驱动要素,以期为窟野河流域的治理开发及区域经济发展提供参考依据。

2 资料与方法

2.1 流域概况

窟野河是位于黄河河西府谷-吴堡区段的一条重点支流,发源于内蒙古自治区鄂尔多斯市柴登乡拌树村,流经内蒙古伊金霍洛旗和陕西省府谷县,于神木县贺家川镇沙峁村汇入黄河。流域地理位置在东经 $109^{\circ}28'$ ~ $110^{\circ}52'$ 、北纬 $38^{\circ}23'$ ~ $39^{\circ}52'$ 之间,上游由勃牛川和乌兰木伦河两大支流组成,干流全长242 km,流域面积约 $8\,706\text{ km}^2$ 。流域位于毛乌素沙漠与陕北黄土高原的接壤地带,流域下垫面条件复杂,上游是风沙草原区,中下游是黄土沟壑区;土质疏松,土壤瘠薄,地表植被稀少,水土流失严重。温家川是窟野河流域最下游控制站。收集整理了流域内及邻近周边气象站点的降水、气温资料及流域出口控制站温家川站的实测流量资料,流域水系及气象、水文站点分布见图1。

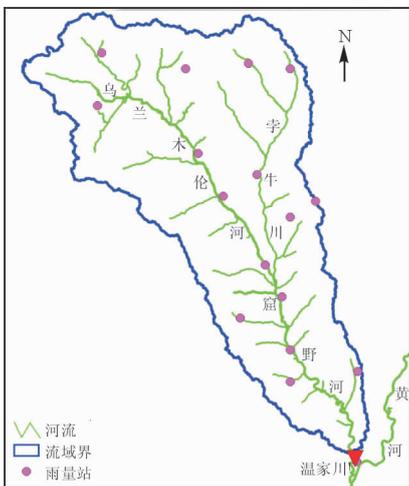


图1 窟野河流域水系及雨量站点位置分布示意图

根据1955-2010年资料统计,窟野河流域多年平均降水量 388.6 mm ,主要集中在汛期6-10月份,且多以暴雨形式出现,该时期降水占年降水量的80%以上。多年平均气温约 7.5°C ,7月份气温最

高;11月份气温由正转负,12月至次年2月份,气温一直在 0°C 以下。温家川站多年平均径流量为 5.54 亿 m^3 ,实测流量的年内分配为双峰型过程,分别出现在3月份和汛期8月份;主汛期7-8月份径流量约占年总量的43.5%,3月份流量明显高于相邻的其它月份,该月径流量约占年总量的13.2%。

为防治水土流失,自20世纪70年代以来,窟野河流域水利化程度提高显著,截止到2008年,在干流修建了6座骨干工程,总库容达到 1.76 亿 m^3 ,在支流修建淤地坝1192座,形成坝地面积 $5,039\text{ hm}^2$,修建梯田 $8\,280\text{ hm}^2$,造乔木林 $27\,902\text{ hm}^2$,种草 $65\,594\text{ hm}^2$,流域内的水利工程及水土保持活动在一定程度上改变了流域下垫面条件^[1]。水土保持通过改变产汇流机制和水文循环,会对河川径流产生重大影响^[3]。冉大川等^[4]对黄河中游的分析结果表明,20世纪90年代,黄河流域河口镇至龙门区间实测径流量较1956-1969年减少了近40%,与该时期流域的水土保持密切相关^[4]。

2.2 分析方法

受人类活动或气候变化显著影响后的水文序列在某种意义上异于原天然序列;在“类”的角度上,可将影响后的序列和原有序列(天然序列)视为两类,因此,天然序列和影响后序列间突变点的推求可以采用有序聚类分析法^[5]。利用有序聚类分析法推估水文序列的可能显著干扰点,其实质上就是推求最优分割点,使同类之间的离差平方和最小,而类与类之间的离差平方和相对较大。一般地,若序列有两个明显的阶段性过程,则总离差平方和的时序变化呈现单谷底现象;若两个或两个以上的明显阶段性过程,则总离差平方和的时序变化则呈现宽谷底现象,这样,可以根据谷底发生的时间划分序列变化的阶段^[6]。目前Mann-Kendall等其它数理统计方法一般只能诊断水文序列的最明显的单一变异点,而有序聚类分析方法则可以直接诊断水文序列的多阶段性变化特征,本研究采用有序聚类分析方法来分析窟野河流域水文变化的阶段性。

3 实测径流演变的阶段性特征

3.1 实测径流演变的阶段性

图2给出了1955-2010年温家川站年均流量及其5年滑动平均变化过程。由图可以看出,(1)温家川站实测流量总体呈现递减趋势,多年平均线性递减率为 $0.371\text{ m}^3/(\text{s}\cdot\text{a})$ 。(2)1980年之前,实测流量总体偏丰,且丰枯交替变化现象明显;该期间

平均流量约为 $22.82 \text{ m}^3/\text{s}$,其中,1959 年平均流量最大,为 $42.86 \text{ m}^3/\text{s}$,1965 年平均流量最小,约为 $9.35 \text{ m}^3/\text{s}$ 。(3)20 世纪 80、90 年代,实测流量较前期有所偏低,且变化幅度有一定程度地减小,该区间平均流量为 $15.25 \text{ m}^3/\text{s}$,变化幅度介于 $5.3 \sim 24.2 \text{ m}^3/\text{s}$ 之间。(4)21 世纪以来,处于持续性流量偏低阶段,多年平均流量为 $5.26 \text{ m}^3/\text{s}$,不到 1980 之前平均实测流量的 $1/4$ 。

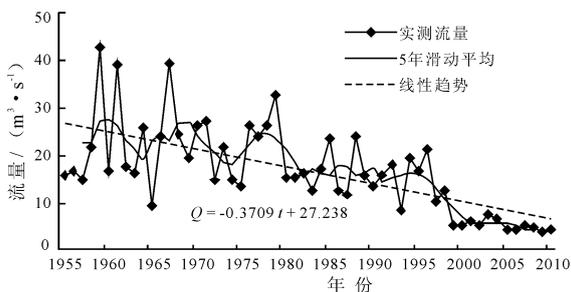


图 2 窟野河流域温家川站 1955 - 2010 年实测流量及其 5 年滑动平均过程

采用有序聚类的方法,分析了温家川站实测流量变化的阶段性,图 3 给出了 1955 - 2010 年实测流量离差平方和的时序变化过程。由图可以看出,实测流量离差平方和总体呈现宽谷底的变化过程,在 1980 年前后进入谷底,在 1998 年实测流量离差平方和达到最低点。由此可以说明,温家川站实测流量变化以 1980 和 1998 年为分界年份总体可以划分为三个阶段,分别为:第一阶段 1955 - 1979 年,第二阶段 1980 - 1998 年,和第三阶段 1999 - 2010 年。

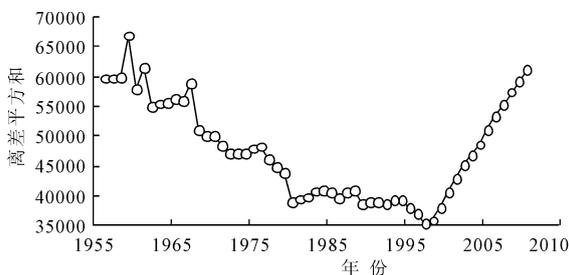


图 3 窟野河流域温家川站 1955 - 2010 年实测流量离差平方和的时序变化

3.2 降水径流变化的阶段性特征

以 1955 - 1979 年为基准期,图 4 给出了后两个阶段实测径流量及降水较基准期的变化。由图可以看出,(1)在 1980 - 1998 年期间,实测径流量较基准期减少 30.9% ;在年内分配上,只有 6 月份较前期稍微增多,约 5.4% ,其余月份均偏少明显,其中,8、9 月份偏少最多,超过 40% 。(2)在 1999 - 2010

年期间,实测径流量较基准期减少更为显著,平均偏少 77.2% ;在季节分配上,所有月份均呈偏少趋势,其中,7、8 月份偏少最多,超过 85% 。

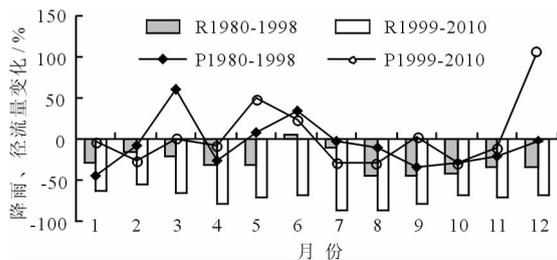


图 4 窟野河流域不同阶段降水、径流较基准期变化的年内分配(实线为降水变化,柱状图为径流变化)

窟野河流域河川径流源于降水,降水的丰枯变化在基本上决定了河川径流量的变化状况。统计结果表明,1980 - 1998 年和 1999 - 2010 年窟野河流域降水量较 1955 - 1979 年分别偏少 6.8% 和 11.4% 。由图 3 可以看出,(1)尽管后两个阶段降水量在多数月份较基准期偏少,但降水变化的年内分配格局与径流量变化格局仍具有一定的差异,后两个阶段具有 3 个月份的降水量较基准期偏多。(2)在主汛期 7 - 9 月份的降水量与基准期相比基本持平或显著偏少,1980 - 1998 年和 1999 - 2010 年的变化幅度分别为 $-1.3\% \sim -32.6\%$ 和 $+2.5\% \sim -28.2\%$,毫无疑问,主汛期降水量变化对河川径流量的锐减起到了至关重要的作用。

统计结果表明,1980 - 1998 年和 1999 - 2010 年窟野河流域年均气温较 1955 - 1979 年分别升高 0.44°C 和 1.53°C 。尽管气温升高可以在一定程度上阐释个别月份降水呈增多而径流量减少的现象,但已有研究表明,干旱半干旱地区河川径流量对降水变化更为敏感^[7],诚然,对于降水量增多但径流量大幅度锐减的月份,也只能用人类活动的影响进行合理解释。

4 河川径流对不同驱动要素之间的响应关系

4.1 径流对流域治理度的响应

窟野河流域水土流失严重,梯田、淤地坝、以及植树造林、种草等水土保持措施是防治区域水土流失的重要措施。统计资料表明,在 1979 年之前窟野河流域内水土保持面积总体较少且变化较为稳定,在 20 世纪 50 年代,流域内几乎没有水土保持措施,60 年代末期水土保持措施面积也仅占流域面积的 2% ,尽管 70 年代有所增加,流域治理度(流域内水

水土保持措施治理面积占流域面积的百分比)也不到7%。20世纪80、90年代,林地面积显著增加,1999年流域治理度达到17%,2008年治理度超过40%。大规模的水土保持措施必然导致流域水文的系列变化,图5统计给出了各年代末的流域治理度与各年代实测径流量之间的响应关系。

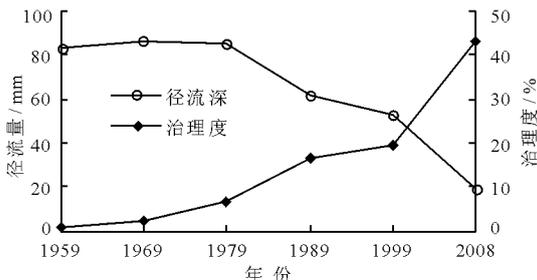


图5 窟野河流域水土保持治理度与流域径流量之间的响应关系

由图5可以看出,窟野河流域水土保持治理度保持了稳定上升的趋势,其中20世纪80年代和21世纪以来上升幅度较大。温家川站实测径流量在20世纪50年代到70年代一直比较稳定,平均年径流量约84 mm左右,但自20世纪80年代以来,径流量递减趋势明显,其中,21世纪以来递减趋势最为突出。尽管径流量变化受降水量的影响显著,但径流量的这种锐减情势与流域治理度变化的高度一致性也可以从某种程度上说明流域内的人类活动如水土保持亦是河川径流量变化的主要驱动因素之一。

4.2 不同阶段径流对降水变化的响应关系

以对比试验小流域为对象,穆兴民等(2000)、王国庆等(2002)对比分析了天然小流域与治理小流域在相同降水过程下的洪水过程,发现治理的小流域洪水过程变缓,峰值流量明显变小^[8-9]。诸如水利工程及水土保持等人类活动通过改变区域下垫面条件,使得降水径流关系发生改变,进而对流域的产汇流状况产生一定影响。图6给出了窟野河流域不同阶段年径流量与降水量之间的相关关系。

图6表明,(1)在第二、第三阶段,年降水量介于250~500 mm之间,缺少流域性的较大降水过程和流域性干旱等极端情况;而在1955-1979年期间,年降水量在160~650 mm之间变化,极端暴雨和极端干旱事件发生频率相对较大。(2)不同阶段降水径流关系点群分布区域存在一定差异,其中,第一阶段降水径流关系点群集中在上部,第二阶段的点群处于第一阶段点群分布范围之内,但相对偏下部,而第三阶段的点群分布最低;由此说明,在降水

相同的条件下,1955-1979年期间的径流量最大,1980-1998年期间的径流量相对偏小,1999-2010年的径流量最小;若以1955-1979年为基准,不难推断,1980-1998年期间新增水土保持等人类活动对河川径流产生了一定的影响,但影响程度相对较小,而21世纪以来人类活动对河川径流量影响的幅度较大。(3)不同阶段降水径流关系斜率差异明显,其中,1955-1979年期间的降水径流关系斜率最大,说明在人类活动较少期间,单位降水增加引起的河川径流量变化较大;而1999-2010年的降水径流关系斜率较为平缓;说明随着降水增加,河川径流变化较小,该时期地下径流占有河川径流的较大成分;在降水较大情况下人类活动对河川径流特别是地面径流的影响更为明显。统计结果表明,三个阶段年降水量与径流量之间的相关系数分别为0.55、0.41和0.29,说明人类活动不仅改变了河川径流量,而且降低了年降水量与径流量之间的相关性。

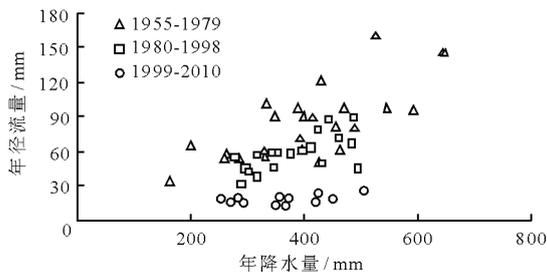


图6 窟野河流域不同阶段年径流量与年降水量的相关关系

人类活动对不同季节河川径流量的影响存在差异,图7给出了窟野河流域汛期(6-10月份)和非汛期(11-次年5月份)月降水与径流量之间的相关关系。

由图7可以看出,(1)第一阶段汛期最大月降水量可达270 mm以上,接近多年平均年降水量的80%,降水量大于100 mm的月份超过10%;第二阶段汛期最大月降水量为229 mm,约7%的月份降水量超过100 mm;第三阶段最大月降水量明显偏小,约139 mm,仅有8个月份的月降水量超过100 mm,汛期月降水量显著偏少是径流量减少的重要原因之一。(2)汛期月降水量与径流量的关系点群分布格局总体与年降水径流关系点群的分布类似,第一阶段点群集中在上部,第三阶段点群位于下部,人类活动对第三阶段汛期影响明显。此外,与年尺度降水径流关系不同的是月尺度降水径流关系的非线性更加明显。(3)第三阶段内,汛期月降水量小于100 mm时,径流量没有大的变化,当降水量超过100

mm,径流量才有所增加,说明 21 世纪以来,即便在汛期,河川径流仍以地下径流为主,降水产生的地面径流多被水土保持工程拦蓄,人类活动对河川径流的影响显著。(4)三个阶段非汛期月降水量与径流

量关系点群散乱,降水径流的相关性较差;三个阶段非汛期点群分布格局与汛期类似,其中,第三阶段点群处于下部,说明人类活动不仅影响汛期径流量,而且对非汛期径流量也具有一定的影响。

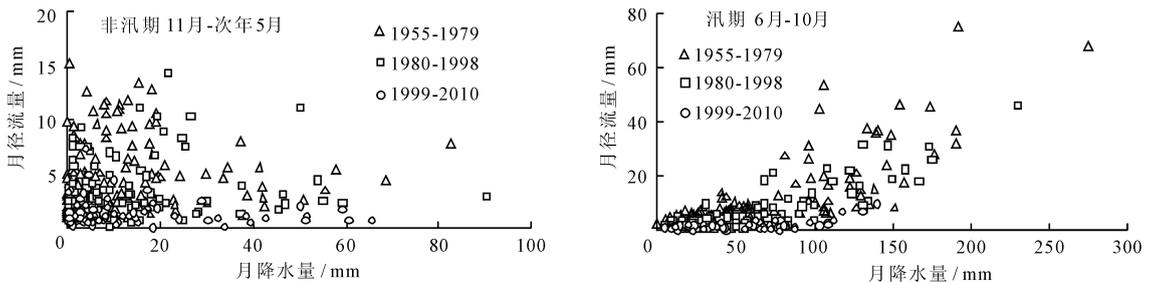


图 7 窟野河流域不同阶段汛期(6月-10月)和非汛期(11月-次年5月)月径流量与月降水量的相关关系

4.3 不同阶段径流对气温变化的响应关系

值得注意的是,在图 7 中非汛期月径流量与降水量的关系图中也表明了,在降水量偏低的情况下,三个阶段的河川径流量普遍偏高,由此说明,在降水量较少的情况下,径流并非直接源于当月降雨。前述分析表明,窟野河流域冬季降水较少且气温较低,三月份气温升高引起流域内冰雪消融,对河川径流补给有一定影响,图 8 给出了非汛期月平均气温与径流量之间的相关关系。

大,而该时期的降水尚难以满足蒸发的损耗,因此,导致河川径流存在随气温升高而减少的趋势。

5 结 语

(1)窟野河流域温家川站实测流量总体呈现递减趋势,以 1979、1998 年为分界点呈现三个阶段变化特征,其中,21 世纪以来,窟野河流域一直处于持续性流量偏低阶段,多年平均流量不到 1980 之前平均实测流量的 1/4,径流量锐减异常明显。

(2)窟野河流域径流源于降水,同时,径流量的锐减情势与流域治理度变化具有高度的一致性。主汛期降水减少和流域内的水土保持增加是窟野河流域河川径流量变化的重要驱动因素。

(3)人类活动对窟野河流域年尺度降水径流关系具有重要影响,不同阶段降水径流关系点群分布区域存在一定差异,其中,第一阶段降水径流关系点群集中在上部,第二阶段的点群处于第一阶段点群分布范围之内,但相对偏下,而第三阶段的点群分布最低,对于相同降水条件下,第三阶段的产流量最小,说明人类活动对第三阶段影响更为明显。

(4)在月尺度上,不同阶段内汛期月降水量与径流量的关系点群分布格局总体与年降水径流关系点群的分布类似,同时,汛期月降水径流关系的相关性较好。非汛期月降水径流的相关性较差;在气温低于 5℃ 的情况下,月径流与气温具有较好的指数型关系。

窟野河流域位于黄土高原多沙粗沙区,水土流失严重,是国家开展水土保持生态工程建设的重点区域。人类活动和主汛期降水变化是径流锐减的主要原因,定量评估变化环境下窟野河流域径流变化

(下转第 16 页)

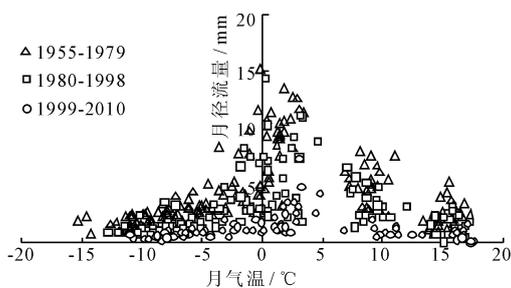


图 8 窟野河流域不同阶段非汛期(11-5月份)月径流量与月均气温的相关关系

由图 8 可以看出,在气温与径流关系点群具有明显的区域性,不同阶段的点群区域分布类似与降水径流关系点群的分布特征,第三阶段集中在下部区域。此外,以 5℃ 为阈值,不同阶段气温径流关系点群呈现左右集中分布;在月气温低于 5℃ 的情况下,径流与气温的相关性较好,随气温升高呈指数型增加趋势;当月气温高于 5℃ 时,随气温升高径流有减少趋势。分析认为,窟野河流域在 11 月份至次年 3 月份气温低于 5℃ 时,该时期降水偏少且多以降雪形式出现,三月份气温回暖,温度高于 0℃,流域内的前期积雪融化导致河川径流增加。非汛期气温高于 5℃ 的月份主要集中在 4、5 月份,该时期气温较高,蒸发较

20 s时二级泵站管道最小水压力为 1.83 m,因此二级泵站阀门关闭时间安全起见应该大于 20 s。停泵时间相同,当前流量越大管道压力越小。随着停泵时间的延长,停泵过程中管道中最小水压力逐渐增大,水压力震荡幅度减小。

表 2 正常停泵管道压力最小值 $m^3/s, s, m$

时间	流量 0.16		流量 0.31	
	一级泵	二级泵	一级泵	二级泵
20	26.46	2.41	2.30	1.83
30	26.47	3.53	2.30	1.86
60	26.51	4.64	2.33	1.88

4 结 语

结合一长距离输水工程,建立了能够综合考虑空气罐和空气阀等防护措施的水力过渡过程仿真计算模型。主要结论如下:在长距离有压输水管道中,事故断电停泵工况时管道的最大水锤压力是由管道压力过低而出现水柱分离再弥合引起的撞击水锤;空气罐能降低水锤压力,防止出现液柱分流和断流弥合水锤;空气阀能够排除管路中的有害气体和抑制管路负压;建立的能够综合考虑空气罐和空气阀的水力过渡过程仿真模型能够较好的模拟长距离输水工程的各种运行状态,为输水工程安全运行提供数据支持。

参考文献:

[1] 陈壁宏,周发毅. 水电站和泵站水力过渡流[M]. 大连:

大连理工大学出版社,2001.

[2] 郑源,刘德有,张健,等. 有压输水管道系统气液两相瞬变流研究综述[J]. 河海大学学报(自然科学版),2002,30(6):1-5.

[3] 马世波,张健. 长距离输水工程停泵水锤防护措施研究[J]. 人民长江,2009,40(1):85-86+99.

[4] Wylie E B, Streeter V L, Suo L Streeter. Fluid transient in systems[M]. Englewood Cliffs, N J:Prentice Hall,1993.

[5] 蒋劲,赵红芳,李继珊. 泵系统管线局部凸起水锤防护措施的研究[J]. 华中科技大学学报(自然科学版),2003,31(5):65-67.

[6] Bazargan-Lari M R, Kerachian R, Afshar H, et, al. Developing an optimal valve closing rule curve for real-time pressure control in pipes[J]. Journal of Mechanical Science and Technology,2013,27(1):215-225.

[7] Constantin A, Nitescu C S. Simulation of water hammer phenomenon in a pumping discharge duct protected by air[C]// Latest trend on computer, 14th WSEAS international conference on computers, Corfu, Greece, 2011. 1.

[8] 胡建永,张健,索丽生. 长距离输水工程中空气阀的进排气特性研究[J]. 水利学报,2007,38(S1):340-345.

[9] 刘志勇,刘梅清. 空气阀水锤防护特性的主要影响参数分析及优化[J]. 农业机械学报,2009,40(6):85-89.

[10] 兰刚,蒋劲,李东东,等. 空气罐在长距离输水管线水锤防护中的应用[J]. 水电站机电技术,2013,36(4):42-44.

[11] 毛艳艳,闫观清,毛艳民,等. 空气阀在长距离供水工程水锤防护中的作用[J]. 人民黄河,2011,33(12):123-125.

(上接第 11 页)

归因,科学遴选有效适宜的水土保持措施是未来研究的重要科学问题和开展窟野河流域治理的重要前期工作。

参考文献:

[1] 姚文艺,徐建华,冉大川等. 黄河流域水沙变化情势分析与评价[M]. 郑州:黄河水利出版社,2011.

[2] 张建云,章四龙,王金星,李岩. 近 50 年来中国六大流域年际径流变化趋势研究[J]. 水科学进展,2007,18(2):230-234.

[3] 徐建华,李晓宇,陈建军,等. 黄河中游河口镇至龙门区间水土保持工程对暴雨洪水泥沙影响研究[M]. 郑州:黄河水利出版社,2009.

[4] 冉大川,柳林旺,赵力仪,等. 黄河中游河口镇至龙门区间水土保持与水沙变化[M]. 郑州:黄河水利出版社,2000.

[5] 王文圣,丁晶,金菊良. 随机水文学[M]. 北京:水利水电出版社,2008.

[6] 王国庆,贾西安,陈江南,等. 人类活动对水文序列的显著影响干扰点分析——以黄河中游无定河流域为例[J]. 水资源与水工程学报,2001,12(3):13-15.

[7] 王国庆,张建云,刘九夫,等. 中国不同气候区河川径流对气候变化的敏感性[J]. 水科学进展,2011,22(3):307-314.

[8] 穆兴民,王文龙,徐学选. 黄土高原沟壑区水土保持对小流域地表径流的影响[J]. 水利学报,1999,30(2):71-75.

[9] 王国庆,兰跃东,张云等. 黄土丘陵沟壑区小流域水土保持措施的水文效应[J]. 水土保持学报,2002,16(5):87-89.