

黄土高原昕水河流域径流变化及其对环境要素的响应

王国庆^{1,2}, 张建云^{1,2}, 李雪梅³, 金君良^{1,2},
刘翠善^{1,2}, 鲍振鑫^{1,2}, 严小林^{1,2}, 宋晓猛^{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, 南京 210029;
2. 水利部应对气候变化研究中心, 南京 210029; 3. 黄河水利委员会水文局, 郑州 450002)

摘 要:以黄土高原昕水河流域为对象,采用有序聚类等数理统计方法,诊断了近 60 a 来实测径流的变化及其阶段性特征,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 a 来昕水河流域实测径流量以 1965 年和 1979 年为分割点总体呈现阶段性减少趋势,其中,21 世纪以来减少尤其明显。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。积雪及融雪对河川径流量的影响存在 $\pm 5^{\circ}\text{C}$ 阈值,当气温介于该阈值区间,气温变化对河川径流影响较大。昕水河流域汛期产流受高强度降水支配,非汛期径流量以地下径流和融雪径流为主。人类活动对河川径流的影响有增大趋势。

关键词:昕水河流域;径流演变;有序聚类分析方法;气候要素;响应

中图分类号:P333.1;TV211.1

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2014)03-0192-05

Runoff Variation of the Xinsuihe River Catchment and Its Response to Environmental Change on the Loess Plateau

WANG Guo-qing^{1,2}, ZHANG Jian-yun^{1,2}, LI Xue-mei³, JIN Jun-liang^{1,2},
LIU Cui-shan^{1,2}, BAO Zhen-xin^{1,2}, YAN Xiao-lin^{1,2}, SONG Xiao-meng^{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, Yellow River Conservancy Commission, Zhengzhou 450002, China)

Abstract: Xinsuihe River catchment was taken as a case. Evolution phases of runoff were detected by using cluster analysis method. We then analyzed the responses of runoff variation to changes in climatic elements at different phases, and preliminarily revealed driving forces of runoff variation in the Xinsuihe River catchment. Results indicate that the recorded runoff at Daning station of the Xinsuihe River catchment presented a general decreasing trend over the period from 1955 to 2008, with significant changing year occurring in 1965 and 1979. Relationships between runoff and precipitation at annual scale and monthly scale for different phases are different. Relatively, monthly runoff highly correlates to precipitation in flood season from June to October rather than that in dry season from November to May, but monthly runoff positively correlates to temperature when monthly mean temperature ranges from -5°C to $+5^{\circ}\text{C}$. Runoff in flood season is dominated by high intensity rainfall while snow-melting flow and base flow are main components of runoff in dry season. Moreover, human activities including soil and water conservation measure and hydraulic engineering construction, play principle driving roles in runoff decline, especially for the period of the 21st century.

Key words: Xinsuihe River catchment; runoff evolution; cluster analysis method; climatic elements; responses

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,黄河流域实测径流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

收稿日期:2013-07-12

修回日期:2013-09-26

资助项目:国家“973”气候变化重大计划项目(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)

作者简介:王国庆(1971—),男,山东成人,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。E-mail: gqwang@nhri.cn

少了33.1%,黄土高原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^[2],对区域工农业生产、生态环境保护乃至社会经济的稳定发展提出了严峻挑战。深入分析黄土高原典型流域径流变化及其对环境要素的响应关系,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。

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

1 资料与方法

1.1 流域概况

昕水河是黄河中游左岸的一级支流,具有南北两源,北源发源于交口县石口镇,流经冯家乡、朱家峪乡、隰县、水堤乡,在午城镇与南源相汇。南源发源于山西省蒲县东北的摩天岭,与北源汇合后向西流经大宁县、曲峨、徐家垛后汇入黄河。干流长度135 km,流域面积4 326 km²。大宁是昕水河流域最下游控制站,建站于1955年,具有较好的长序列观测水文资料。流域内及邻近周边有9个站点的长序列降水观测资料。流域水系及气象、水文站点分布见图1所示。

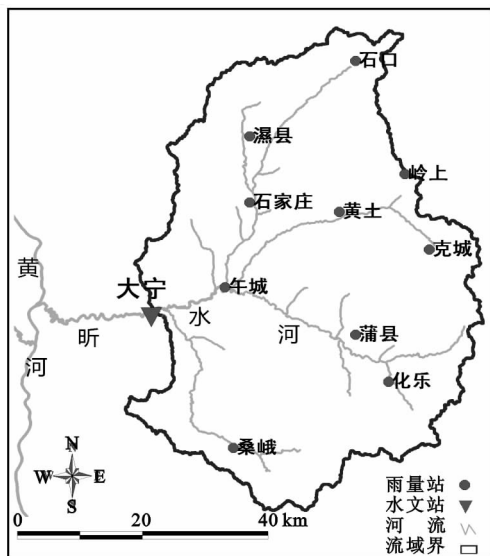


图1 昕水河流域水系及雨量站点位置分布示意图

根据1955—2008年资料统计,昕水河流域多年平均降水量约为510 mm,受季风气候的影响,降水具有年际变化较大且年内分配不均的特点,最大年降水量约为最小年降水量的2.2倍。大宁站多年平均年径流为1.48亿m³,其中,汛期径流量约占年径流量的60%以上。为防治水土流失,自20世纪70年

代以来,昕水河流域水利化程度提高显著,截至1999年,流域内共修建中小型水库2座,总库容达到710万m³,修建骨干工程12座,总控制面积61 km²;淤地坝885座,谷坊3 867道,水窖19 554眼;修建梯田17 951 hm²,造乔木林23 793 hm²,种草3 332 hm²,淤成坝地1 794 hm²。流域内的这些人类活动在一定程度上改变了下垫面条件,使流域的水文状况发生了一定的变化。

1.2 有序聚类分析方法

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。

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。最优点分割方法如下:

$$V_{\tau} = \sum (\alpha_i - \bar{\alpha}_{\tau})^2 \quad (1)$$

$$V_{n-\tau} = \sum (\alpha_i - \bar{\alpha}_{n-\tau})^2 \quad (2)$$

式中: $\bar{\alpha}_{\tau}$ ——干扰点 τ 前的水文序列均值; $\bar{\alpha}_{n-\tau}$ ——干扰点 τ 后的水文序列均值。

总离差平方和为:

$$S_n(\tau) = V_{\tau} + V_{n-\tau} \quad (3)$$

最优分割使 $S_n^*(\tau) = \min[S_n(\tau)]$,满足该条件的 τ 为最优分割点。

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,谷底对应的年份即为最优的序列突变年份;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呈现宽谷底现象,谷底两端对应的年份即为最优的突变年份。这样,就可以根据谷底发生的时间划分序列变化的阶段。目前,有序聚类分析方法是针对水文序列阶段性异常变化的较为有效的方法之一^[3]。

2 结果与分析

2.1 实测径流演变的阶段性

昕水河流域气候干旱,降水、蒸发对河川径流影响显著,大部分降水消耗于蒸发损失,多年平均径流深32.4 mm,年径流系数为0.02~0.13,多年平均径流系数约为0.06。图2给出了1955—2008年大宁站年均流量及其5 a滑动平均变化过程。由图2可以看出:(1)大宁站实测流量总体呈现递减趋势,多年平均线性递减率为-0.85 mm/a。(2)在1965年之前,实测流量总体偏高,且丰枯交替变化现象明显,该时期平均径流量约为55.6 mm,其中,1958年和

1964 年径流量较大,均超过 100 mm。(3) 1980 年之后的实测径流量明显偏小,多数年份的径流量低于多年均值,其中,90 年代平均径流量 21.1 mm,较多年均值偏少 1/3,该时期只有 1993 年的实测径流量超过多年均值,约为 40.1 mm。(4) 21 世纪以来,处于持续性流量偏低阶段,多年平均径流量为 15.7 mm,不到多年均值的一半。

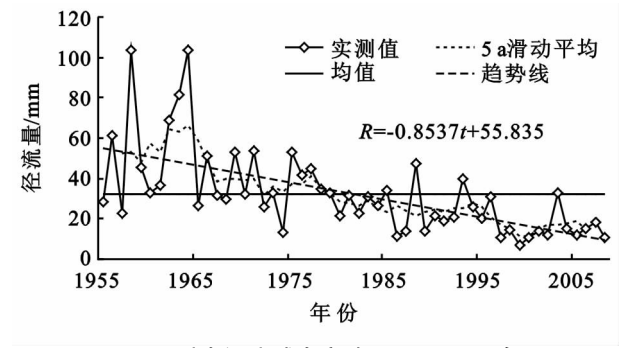


图 2 昕水河流域大宁站 1955—2010 年
实测流量及其 5 a 滑动平均过程

采用有序聚类的方法,分析了大宁站实测流量变化的阶段性,图 3 给出了 1955—2008 年实测流量离差平方和的时序变化过程。由图 3 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 1965 年前后进入谷底,在 1979 年实测流量离差平方和达到最低点。由此可以说明,大宁站实测流量变化以 1965 年和 1979 年为分界总体可以划分为三个阶段,分别为:第一阶段 1955—1965 年,第二阶段 1966—1979 年,第三阶段 1980—2008 年。河川径流量变化的阶段性与流域内的人类活动密切相关,昕水河流域自 20 世纪 60 年代中期之前水土保持面积总体较少且变化较为稳定,20 世纪 70 年代以来,林地面积显著增加;21 世纪以来,草地和坝地面积增加明显。实测径流量阶段性变化的诊断结果与流域人类活动强度变化总体相符。

昕水河流域气温年内分布季节差异明显,多年平均气温约为 9.0℃;6—8 月份气温较高,一般均在 20℃以上,其中,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℃以下,其中,1 月份气温最低。降水主要集中在 7—9 月份,且多以暴雨形式出现,该三个月降水约占年降水量的 60%。实测流量的年内分配为双峰型过程,3 月份有个小的峰值出现;汛期 8 月份峰值较大,约占年径流量的 25%。主汛期高强度暴雨下的超渗产流是昕水河流域 7 月,8 月份洪水及汛期水量的主要原因;尽管 3 月份降水量仅占年降水量的 3.0%,但由于该月气温升高显著,流域内的前期积雪消融,冰雪融水有效补给河川径流,使得流量显著增加。

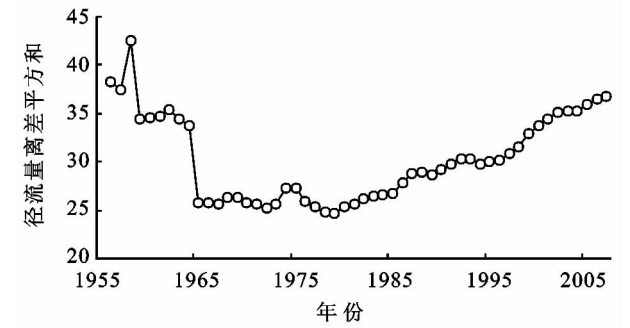


图 3 昕水河流域大宁站 1955—2008 年
实测流量离差平方和时序变化

前述分析结果表明,昕水河流域实测流量呈现阶段性减少趋势,以 1955—1965 年为基准期,图 4 给出了后两个阶段实测径流量较基准期的变化。由图可以看出:(1) 在 1966—1979 年期间,实测径流量较基准期减少 31.9%;在年内分配上,1—4 月份和 7 月份较前期偏少幅度小于 20%,其余月份偏少幅度均超过 20%,其中,5 月份偏少最多,接近 60%。(2) 在 1980—2008 年期间,实测径流量较基准期减少更为显著,平均偏少 62.42%;在季节分配上,1—3 月份偏少幅度为 30%~40%,其余月份偏少幅度在 60%左右。

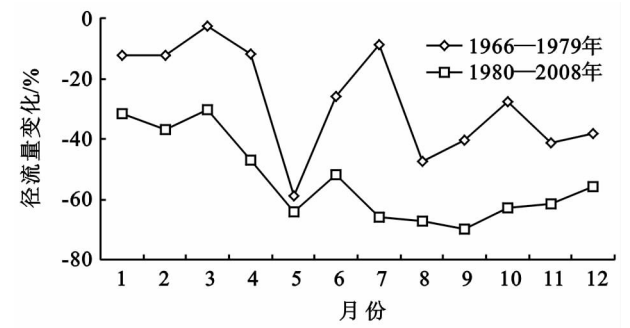


图 4 昕水河流域不同阶段实测径流量较基准期变化的年内分配

2.2 不同阶段径流与气象要素之间的响应关系

降水是流域河川径流的重要驱动力^[4-6],降水的丰枯变化在一定程度上决定了昕水河河川径流量的变化状况。统计结果表明,1966—1979 年和 1980—2008 年昕水河流域降水量较 1955—1965 年分别偏少 7.2%和 16.6%。在年内分配格局上,1966—1979 年期间有 3 个月份(3 月、5 月、8 月)较基准期明显偏少,偏少幅度达 40%,其余月份略微偏多或与基准期持平;1980—2008 年期间只有 12 月份降水量较基准期约偏多 40%左右,其余月份均较基准期偏少。尽管很难从 1966—1979 年阶段降水的年内分配看出降水对河川径流季节分配影响的贡献,但 1980—2008 年降水大幅度减少无疑对该时期河川径流量的锐减起到了至关重要的作用。

人类活动也是影响河川径流的主要驱动因子,以对比试验小流域为对象,穆兴民等^[7]、王国庆等^[8]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。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^[9-10]。图 5 给出了昕水河流域不同阶段年降水量与径流量的相关关系。

图 5 结果表明:(1) 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;降水量小于 580 mm 时,第二阶段的点群处于第一阶段点群分布范围之内,但当降水量超过 580 mm,第二阶段的点群分布低于第一阶段点群;第三阶段的点群分布最低;由此表明,当降水量小于 580 mm 时,对于相同的年降水量,第一、二阶段的产流量基本相当,但均高于第三阶段的产流量,当降水量大于 580 mm,对应相同的年降水量,第一阶段产流量最大,第二阶段次之,第三阶段产流量最小。(2) 不同阶段降水径流关系的变化无疑是由于流域内水土保持等人类活动影响造成的,不同阶段降水径流关系点群的分布同时表明,在年降水量不超过 580 mm 的情况下,第二阶段新增人类活动对径流量的影响并不明显,而在第三阶段,新增人类活动对河川径流量的影响却较为显著;当降水量超过 580 mm 时,不同阶段新增人类活动对河川径流量的影响均较为明显。(3) 不同阶段降水径流关系斜率差异明显,其中,1955—1965 年期间的降水径流关系斜率最大(0.173),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 1980—2008 年的降水径流关系斜率最小(0.079);说明随着降水增加,河川径流变化较小,该时期地下径流占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 0.82、0.62、0.51,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。

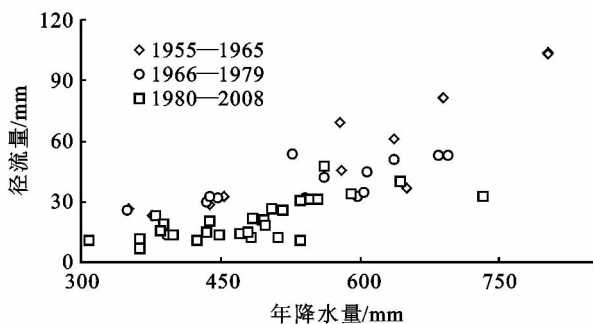


图 5 昕水河流域不同阶段年降水量与径流量的相关关系
人类活动对不同季节河川径流量的影响存在差

异,图 6—7 分别给出了昕水河流域汛期(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。

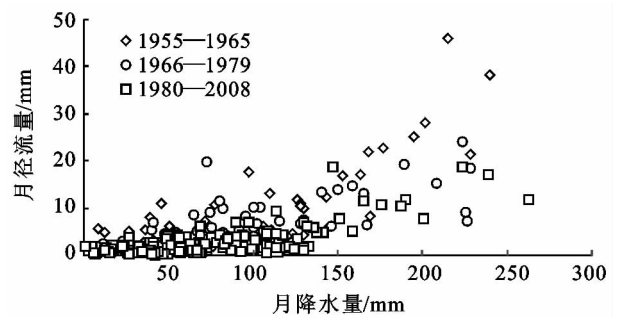


图 6 昕水河流域不同阶段汛期(6—10 月份)
月降水量与径流量的相关关系

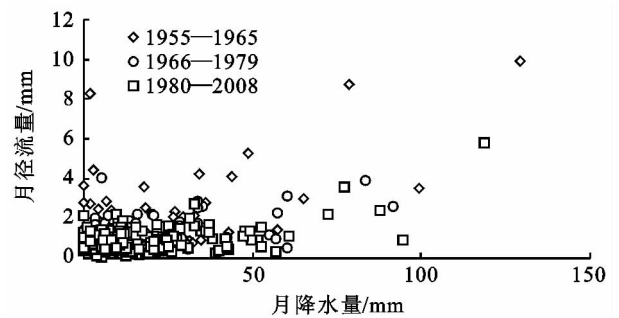


图 7 昕水河流域不同阶段非汛期(11—5 月份)
月降水量与径流量的相关关系

由图 6 可以看出:(1) 三个阶段月降水量的变化范围基本一致,变化范围大多在 0~250 mm,其中,第三阶段有一个月份降水量超过 250 mm。第一阶段汛期月降水量大于 100 mm 的月份约占 45.5%,第二、三阶段汛期约 30%和 26.9%的月份降水量超过 100 mm;汛期较大降水月份的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,降水量小于 130 mm 时,径流量没有大的变化,当降水量超过 130 mm,径流量才有所增加,说明第三阶段即便在汛期,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。

由图 7 可以看出:(1) 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。(2) 值

得注意的是,在降水量偏低(小于 10 mm)的情况下,三个阶段的河川径流量变化幅度偏大,如第一阶段非汛期个别月份在降水量接近 0 的情况下,月径流量却高达 8 mm,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,昕水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,对河川径流补给可能有一定影响,图 8 给出了非汛期月平均气温与径流量之间的相关关系。

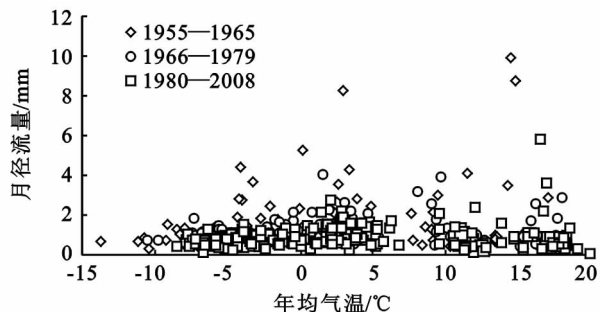


图8 昕水河流域不同阶段非汛期(11—5月份)
月均气温与径流量的相关关系

由图8可以看出:(1)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。(2)此外,大约以 5°C 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°C 的情况下,径流随气温升高具有增加趋势,其中,第一阶段增加幅度较为明显;当月气温高于 5°C 时,气温与径流基本没有相关性;分析认为,昕水河流域在11月份至次年3月份气温低于 5°C 时,该时期降水偏少且多以降雪形式出现,3月份气温回暖,温度高于 0°C ,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°C 的月份主要集中在4月、5月,该时期气温较高,蒸发较大,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。(3)同时也可以看出,当气温低于 -5°C 时,不同阶段气温径流点群变化幅度较小,由此可以推断,由于气温较低,冰雪难以融化,该时期河川径流主要为地下径流成分。(4)前述分析表明,气温、降水在季节分配上具有较好的同步性,即汛期气温较高,降水量也较大。当气温超过 5°C 时,随气温升高而径流量增大的规律实际上反映了径流与降雨之间的响应关系。不同时期气温与径流量之间的差异也间接反映了人类活动对流域水文的影响。

3 结论

大宁站实测流量总体呈现递减趋势,以1965年、1980年为分界点呈现三个阶段变化特征,21世纪以

来,昕水河流域一直处于持续性流量偏低阶段,多年平均流量不到多年平均径流量的1/2。昕水河流域降水的年内分配为单峰型过程,实测流量的年内分配为双峰型过程。主汛期高强度暴雨下的超渗产流是昕水河流域7月、8月份洪水及汛期水量的主要原因。3月份气温升高引起的积雪消融是3月份凌峰产生的重要组成。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,第三阶段的点群分布最低,说明人类活动对第二阶段河川径流有一定影响,对第三阶段影响更为明显。前期积雪及积雪融化对河川径流量影响的气温阈值约为 $\pm 5^{\circ}\text{C}$,当气温低于 -5°C 时,河川径流量以地下径流量为主。当气温高于 5°C 时,气温对河川径流量的影响主要体现为增大流域蒸发导致径流量减少,基本不再存在融雪径流成分。昕水河流域水土流失严重,是国家开展水土保持生态工程建设重点区域,大规模的水土保持等系列人类活动对流域水文产生深远的影响,定量评估变化环境下昕水河流域径流变化原因是未来研究的重要科学问题和有效遴选适宜的水土保持措施,开展昕水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,等.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] 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.
- [4] 胡海英,黄国如,黄华茂.辽河流域铁岭站径流变化及其影响因素分析[J].水土保持研究,2013,20(2):98-102.
- [5] 刘士余,章俊霞,罗志军,等.近50年赣西北大坑小流域径流对降雨的响应[J].水土保持研究,2012,19(1):19-22.
- [6] 白桦,穆兴民,高鹏,等.嘉陵江流域降水及径流演变规律分析[J].水土保持研究,2012,19(1):102-106.
- [7] 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(2):71-75.
- [8] 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.
- [9] 郭兰勤,杨勤科.藉河流域水土保持效益评价[J].水土保持研究,2012,19(1):139-143.
- [10] 许海丽,潘云,宫辉力,等.1959—2000年奶水河流域气候变化与水文响应分析[J].水土保持研究,2012,19(2):43-47.