

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdkj.2019.0057

李秋菊,李占玲,王杰.黑河流域上游径流变化及其归因分析[J].南水北调与水利科技,2019,17(3):31-39. LI Q J, LI Z L, WANG J. Variation and attribution of runoff over the upper reaches of Heihe River basin[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2019, 17(3): 31-39. (in Chinese)

黑河流域上游径流变化及其归因分析

李秋菊,李占玲,王杰

(中国地质大学(北京)水资源与环境学院,北京 100083)

摘要:基于莺落峡站径流资料,结合流域内气象因子及土地利用类型的变化情况,采用 Budyko 假设下的张鲁经验公式,定性和定量分析了不同因素对黑河流域上游径流变化的影响。结果表明:1960—2015 年研究区径流量显著增加,在 1997 年和 2004 年存在变点,据此将研究期划分为基准期(1960—1997 年)、突变期 I(1998—2004 年)、突变期 II(2005—2015 年);降水、潜在蒸散发与永久性冰川雪地面积三者的变化与径流变化在一定程度上呈现一致性;降水和永久性冰川雪地融化对径流增加产生正效应,潜在蒸散发对径流增加产生负效应;突变期 I 时段三者变化对径流变化的贡献率分别为 149%、-83% 和 34%;突变期 II 时段三者的贡献率分别为 138%、-35% 和 -3%。

关键词:径流归因;Budyko 假设;贡献率;黑河流域上游

中图分类号:P333 文献标志码:A 开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Variation and attribution of runoff over the upper reaches of Heihe River basin

LI Qiuju, LI Zhanling, WANG jie

(School of Water Resources and Environment / MOE Key Laboratory of Groundwater Circulation and Environmental Evolution, China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

Abstract: Based on the hydrological and meteorological data and land types in the upper reaches of Heihe River basin, variations and attribution of runoff over the study area were investigated using several statistical methods and Zhang Lu's empirical formula under Budyko framework. The results showed that: The runoff increased significantly from 1960 to 2015 and changed abruptly in 1997 and 2004. The study period was divided into three stages: the base period of 1960-1997, the abrupt change period I of 1998-2004, and the abrupt change period II of 2005-2015; The changes of precipitation, potential evapotranspiration and permanent glacial snow area were consistent with the changes of runoff to a certain extent. The increase of precipitation and the decrease of permanent glacial snow area had positive effects on runoff generation, while the increase of potential evapotranspiration had negative effects on runoff generation; The contribution rates of precipitation, potential evapotranspiration and other factors (mainly the permanent glacial snowmelt) to runoff changes during abrupt change period I were 149%, -83% and 34%, respectively; and decreased to 138%, -35% and -3%, respectively, during abrupt change period II.

Key words: runoff attribution; Budyko; contribution rate; the upper reaches of Heihe River basin

收稿日期:2018-11-16 修回日期:2019-01-04 网络出版时间:2019-01-18

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20190118.0907.002.html>

基金项目:中央高校基本科研业务费专项资金(35832015028);中国地质大学(北京)发展基金(F05037)

作者简介:李秋菊(1994—),女,河北人,从事水文学及水资源研究。E-mail:2105160004@cugb.edu.cn

通信作者:李占玲(1980—),女,内蒙古人,副教授,从事水文学及水资源研究。E-mail:zhanling.li@cugb.edu.cn

近些年来,气候变化和人类活动都在不同程度地影响着区域水文循环过程。径流变化的归因分析是当前水文水资源研究的热点问题之一。黑河流域地处我国西北干旱区,其径流变化对气候响应十分敏感。黑河流域上游是整个流域的主要产流区,了解其径流变化及归因对于流域水资源开发利用与管理具有重要的现实意义。

近年来,已有很多学者对流域径流变化的归因方面进行了研究,常用的方法包括简单的经验曲线法以及水文模型分析法等^[1-6]。经验曲线法(如降雨径流双累积曲线)通常只考虑影响径流的某一个因素而忽视了其他因素;水文模型建模过程往往比较复杂,且参数率定过程繁琐。耦合了流域水量平衡和能量平衡的 Budyko 假设理论为开展径流变化的归因分析提供了新的思路。Budyko 假设理论以及由此推求的各种经验公式由于综合考虑了流域内各因素间的相互作用^[7-9],并通过引入反映下垫面条件的模型参数,使得该方法既具有一定的物理机制,计算起来又相对简单便捷^[10-16]。Budyko 假设理论下的诸多研究中,张榕等人提出的经验公式是在傅抱璞经验公式基础上的改进,该公式既能有效描述流域内水热平衡关系,形式又非常简洁^[8],因此在径流归因方面取得了较好的应用效果^[17-19]。

本文选用 Budyko 假设下的张榕经验公式,结合流域内气候条件及土地利用类型对黑河流域上游径流变化的归因进行分析,定量估算不同因素对研究区径流变化的贡献率,从而为流域水资源管理与决策提供依据。

1 研究区概况

黑河起源于祁连山脉,途经河西走廊,终点为内蒙古北部的额济纳旗,干流全长约 800 km。流域范围大致介于 98°~101°30'E,38°~42° N,流域面积约 14 万 km²,是我国西北地区第二大内陆河流域。以莺落峡站和正义峡站为界,该流域分为上、中、下游,流域地貌丰富,地形复杂多变。

黑河流域上游介于 37°30'~39°41' N,97°28'~101°16'E(见图 1),是黑河流域的主要产流区,也是本文的研究区域,包括祁连县和肃南县部分地区。径流由地表径流、冰川融水量及少量的地下水回归组成^[20]。主要地貌类型为山地,海拔高程约 2 000~5 500 m,年降水量 300~700 mm,多年平均气温 -5~4 °C,降水少,气温低,高寒阴冷,是典型的大陆性高寒半干旱气候。植被类型属于山地森林草原型,植被带的分布对径流调蓄起着重要作用。此外,研究区还分布着永久性冰川雪地,雪线高度由东向西逐渐升高^[21]。

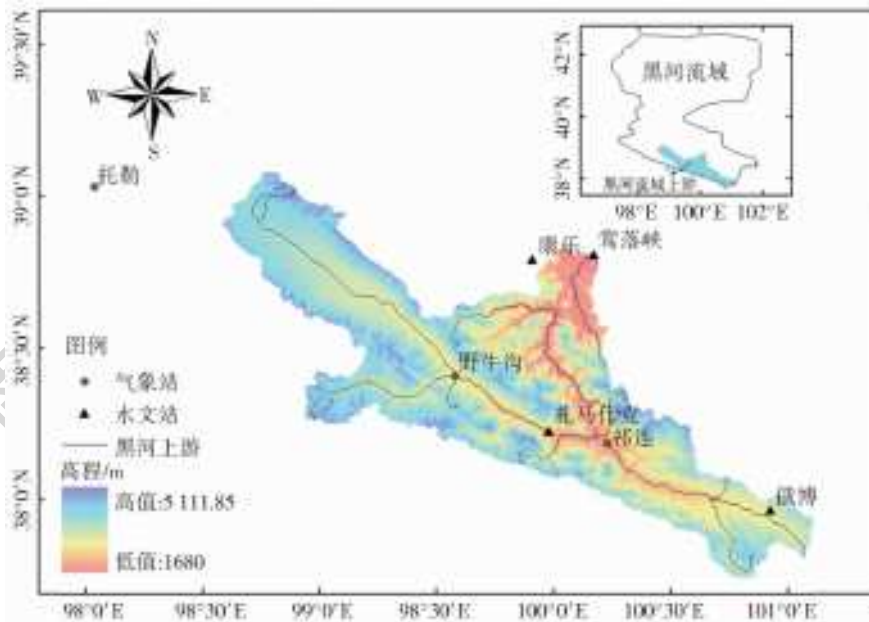


图 1 黑河流域上游概况

Fig. 1 Overview of the upper reaches of Heihe River basin

2 数据与方法

2.1 数据来源

分析数据包括黑河流域上游莺落峡站 1960—2015 年径流数据,7 个雨量站/气象站(康乐、扎马什

克、莺落峡、俄博、托勒、野牛沟、祁连)同时期降水数据,3 个气象站(祁连、野牛沟、托勒)同时期气象数据,1990—2015 年不同时段、空间分辨率为 1 km 的土地利用类型数据;数据来源于中国气象数据网(<http://data.cma.cn/>)、水文年鉴和资源环境数据

云平台(<http://www.resdc.cn/Default.aspx>)。经检查,所有数据质量良好。

2.2 研究方法

2.2.1 趋势及变点诊断

对水文序列进行趋势和变点分析的方法有很多^[22]。本文采用王毓森开发的水文时间序列趋势与突变分析系统^[23],综合使用多种方法,对径流序列的趋势和变点特征进行综合分析。趋势检验方法包括 Spearman 检验和线性趋势相关分析法;变点检验以 Mann-Kendall 检验法为主,辅以有序聚类分析法、李一海哈林检验法、累积距平法、滑动 T 检验等多种方法。各种统计检验方法的详细说明见参考文献^[22-24]。

2.2.2 径流变化贡献率计算

Budyko 假设认为在一定气候和植被条件下,流域水分和能量之间存在着水热耦合平衡关系,流域多年平均降水量、潜在蒸散发量和实际蒸散发量的关系可以用经验曲线来描述^[9]。我国傅抱璞教授根据流域水文气象的物理意义,通过量纲分析和数学推导得出了 Budyko 假设的解析表达式^[7]

$$\frac{E}{P} = 1 + \frac{E_0}{P} - [1 + (\frac{E_0}{P})^\omega]^{1/\omega} \quad (1)$$

式中: E 、 P 、 E_0 分别为流域实际蒸散发(mm)、降水量(mm)和潜在蒸散发(mm); ω 为无量纲的积分常数,反映流域下垫面条件(地形、土壤、植被等)的调蓄作用。张槽等人在傅抱璞公式(式(1))基础上进行了改进,提出以下经验公式^[8]

$$\frac{E}{P} = \frac{1 + \omega(E_0/P)}{1 + \omega(E_0/P) + (E_0/P)^{-1}} \quad (2)$$

其中: E 、 P 、 E_0 意义上, E_0 可由 Thornthwaite 经验公式计算得到。公式(2)中的 ω 是一个和植被类型有关的经验参数,它反映的是不同植被类型利用土壤水进行蒸腾的相对差异性。张槽等人根据流域内不同植被情况,给出了 ω 的取值范围:例如对于森林、草地, ω 的取值分别为 2.0 和 0.5;对于裸土 $\omega < 0.5$;对于混合植被, ω 取值为 1^[8]。本研究区既有耕地、林地,又有草地、水域、裸土等,因此本文计算中,取 $\omega = 1$ 。比较傅抱璞经验公式,显然,张槽经验公式形式更为简洁。

根据流域水量平衡方程 $E = P - Q - \Delta S$,其中 Q 为流域多年平均径流量(mm), ΔS 为流域内水量的变化量(mm),多年时间尺度上可认为 $\Delta S = 0$,即 $E = P - Q$ 。综合公式(2),则有

$$\frac{P - Q}{P} = \frac{1 + \omega(E_0/P)}{1 + \omega(E_0/P) + (E_0/P)^{-1}} \quad (3)$$

即长时间尺度上流域径流量可以用流域内降水、潜在蒸散发以及与植被有关的经验参数 ω 进行描述

$$Q = f(P, E_0, \omega) \quad (4)$$

根据全微分方程可得

$$dQ = \frac{\partial Q}{\partial P} dP + \frac{\partial Q}{\partial E_0} dE_0 + \frac{\partial Q}{\partial \omega} d\omega \quad (5)$$

通过对本研究区不同时段土地利用类型分析可知,近些年来流域内主要植被类型(如草地、林地、未利用土地、耕地等)面积和占比基本稳定,可以认为植被类型基本保持不变,因此文中将 ω 设为定值,即公式(5)中 $\frac{\partial Q}{\partial \omega} d\omega = 0$ 。

根据敏感系数定义,分别得到径流的降水、潜在蒸散发敏感系数 ϵ_p 和 ϵ_{E_0}

$$\epsilon_p = \frac{\partial Q}{\partial P} = \frac{1 + 2x + 3\omega x}{(1 + x + \omega x^2)^2} \quad (6)$$

$$\epsilon_{E_0} = \frac{\partial Q}{\partial E_0} = -\frac{1 + 2\omega x}{(1 + x + \omega x^2)^2} \quad (7)$$

其中, $x = E_0/P$

由此可计算得到降水、潜在蒸散发变化导致的径流变化量分别为

$$\Delta Q_P = \epsilon_p \Delta P \quad (8)$$

$$\Delta Q_{E_0} = \epsilon_{E_0} \Delta E_0 \quad (9)$$

式中: ΔP 和 ΔE_0 分别表示径流序列突变前后时段多年平均降水变化量和多年平均潜在蒸散发变化量。

在基于 Budyko 假设进行径流变化的归因分析时,很多研究将经验公式中的降水和潜在蒸散发二者的变化归结为气候变化,即通过 Budyko 经验公式来量化气候变化对径流变化的影响程度,而将其其他因素归结为人类活动,通过突变前后的水量平衡方程求出人类活动对径流变化的影响程度。通过分析近些年来研究区气候变化和人类活动情况(见 3.2),可以发现人类活动对本研究区径流变化的影响微弱,而降水和潜在蒸散发二者并不能完全解释径流的所有变化,因此这里用降水、潜在蒸散发和其他因素(如冰雪融水)三方面来解释研究区的径流变化。由降水和潜在蒸散发变化导致的径流变化由 Budyko 假设及张槽经验公式定量估算(公式(8)、(9)),其余的径流变化量则归结于其他因素的影响。因此,由其他因素导致的径流变化量 $\Delta Q_{其他}$ 则可以表示为

$$\Delta Q_{其他} = \Delta Q_{总} - (\Delta Q_P + \Delta Q_{E_0}) \quad (10)$$

其中 $\Delta Q_{总} = Q_2 - Q_1$, Q_1 和 Q_2 分别表示径流序列突变前后多年平均径流量。

降水、潜在蒸散发和其他因素变化对径流变化

的贡献率 β, γ, τ 通过以下公式计算得到

$$\beta = \frac{\Delta Q_P}{\Delta Q_{\text{总}}} \times 100\% \quad (11)$$

$$\gamma = \frac{\Delta Q_{E_0}}{\Delta Q_{\text{总}}} \times 100\% \quad (12)$$

$$\tau = \frac{\Delta Q_{\text{其他}}}{\Delta Q_{\text{总}}} \times 100\% \quad (13)$$

贡献率为正值说明该因素变化所带来的径流效应为正效应,即导致径流增加,相反为负效应,即导致径流减少。

3 结果分析与讨论

3.1 径流变化特征分析

研究区的径流变化特征主要从径流变化的趋势和变点两方面加以讨论。图 2 给出了 1960—2015 年莺落峡站年径流过程线,图中红色虚线为

线性趋势线。可以看出,研究区年径流过程线随时间变化呈现波动上升趋势。采用 Spearman 检验和线性趋势相关法对径流序列进行趋势检验可知(表 1),研究区 1960—2015 年径流序列呈现显著的上升趋势。

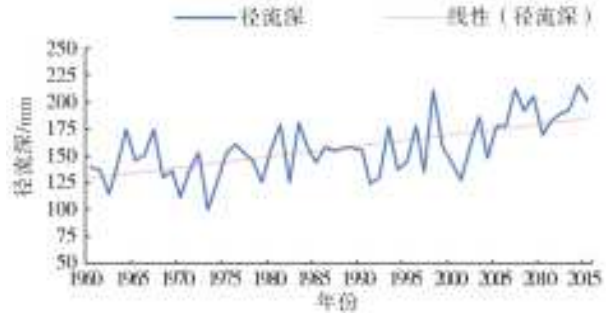


图 2 黑河流域上游莺落峡站 1960—2015 年径流过程线
Fig. 2 Annual runoff at Yingluoxia Station from 1960 to 2015 over the upper reaches of Heihe River basin

表 1 黑河流域上游莺落峡站 1960—2015 年径流序列趋势和变点检验结果

Tab. 1 Trend and change points of annual runoff at Yingluoxia Station from 1960 to 2015 over the upper reaches of Heihe River basin

趋势检验方法	检验统计量	变点检验方法	检验统计量	变点	变点前均值/mm	变点后均值/mm	变化量/mm
Spearman 检验	T =5.34 (上升趋势显著)	有序聚类分析法	T =6.19	2004 年	149	192	43
		李-海哈林检验法	T =6.19	2004 年	149	192	43
线性趋势相关法	T =5.71 (上升趋势显著)	累积距平法	T =4.51	1998 年	148	179	31
		滑动 T 检验法	T =5.40	1997 年	147	181	34

注:0.05 显著性水平下,表中所有检验方法统计量临界值均为 1.64。

根据 Mann-Kendall 方法检验研究区径流序列是否存在变点。由图 3 可知,径流 Mann-Kendall 统计曲线在 2004 年出现 UF 和 UB 交叉点,2004—2015 时段 $|UF| > U_{\alpha} = 1.96 (\alpha = 0.05)$,表明 2004—2015 年与前一时段相比径流发生显著变化。运用有序聚类分析法和李-海哈林检验法也可得到,0.05 显著水平下检验统计量 $|T| = 6.19 > t = 1.64$ (表 1),即 2004 年前后两时段径流序列的均值差异显著。采用累积距平法和滑动 T 检验法检测出径流序列在 1998/1997 存在变点(表 1)。综合上述结果,确定径流序列的变点位置在 2004 和 1997 年。

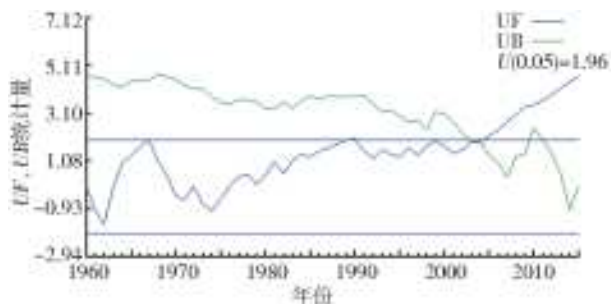


图 3 黑河流域上游 1960—2015 年逐年径流 Mann-Kendall 统计曲线

Fig. 3 Mann-Kendall statistical curve for annual runoff from 1960 to 2015 over the upper reaches of Heihe River basin

3.2 径流变化归因的定性分析

气候变化和人类活动是影响流域径流的两大驱动因素^[25]。气候变化中,降水和气温是引起径流变化的重要气象因子。降水影响流域水分在下垫面的垂向和横向的再分配,进而作用于流域径流的变化^[26];气温一方面对流域蒸发产生影响,另一方面也可引起冰雪融化,从而影响径流。根据已知站点数据,采用泰森多边形法求得研究区面降水量,采用算术平均法求得研究区年平均气温。图 4 给出了 1960—2015 年研究区年降水量及年平均气温随时间的变化曲线,表 2 给出了采用多种检验方法对二者的趋势变化及变点特征进行检验的结果。根据图 4 和表 2 可知,研究区年降水量序列及年平均气温序列整体上均随时间呈波动上升趋势;降水量序列在 2002、2003 或 1997 年检测出变点,2002 年前后两时段降水均值增加了 81 mm;年平均气温序列在 1996 或 1997 年检测出变点,1996 年前后两时段气温均值增加了 1.3 ℃。图 4 给出了研究区年潜在蒸散发量的变化特征。可以看出,年潜在蒸散发序列随时间也呈现波动上升趋势;有序聚类分析法和李-海哈林检验法检测出潜在蒸散发序列在 1996 年

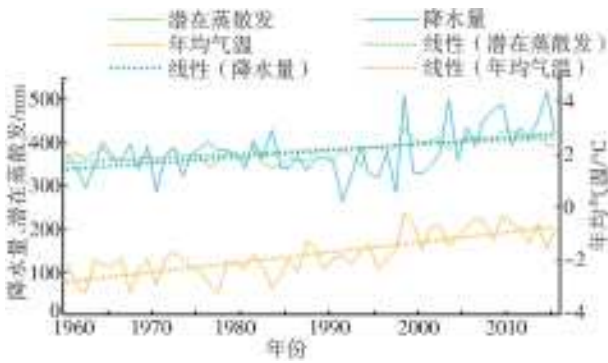


图4 黑河流域上游1960—2015年降水量、年平均气温及潜在蒸散发过程线

Fig. 4 Annual precipitation, temperature and potential evapotranspiration from 1960 to 2015 over the upper reaches of Heihe River basin

存在变点,1996年后多年平均潜在蒸散较1996年以前增加了41 mm(表2)。由以上分析可知,降水量序列与潜在蒸散发序列的变化趋势与径流量的变化趋势基本一致,均呈现明显的上升特征;且二者的变点位置与径流量的变点位置也非常接近。

黑河流域上游径流补给除降水补给外,还有冰

川融雪补给。气温升高不仅会导致研究区蒸散发发生变化,也会引起冰雪融化,从而影响径流。表3给出了研究区不同年代土地类型按照LUCC分类体系进行分类的结果。可以看出,1995—2000年研究区水域面积变化明显,由1995年的440 km²骤减为2000年的265 km²,减少近40%。水域类型主要为河渠、永久性冰川雪地、滩地三种。其中,1995年以前永久性冰川雪地面积约占水域面积的60%;2000年以后,永久性冰川雪地面积急剧减少,减少60%以上;2004年后永久性冰川雪地面积仍在减少但速度减缓;至2015年,永久性冰川雪地面积减至67 km²。别强^[27]等人的研究中也发现黑河流域上游冰川呈现逐年减退的态势。气温升高在一定程度上引起了冰雪融化,从而增加了径流量,与李栋梁^[28],张凯等^[29]对黑河流域的研究结果一致。因此,在研究区径流变化的归因分析中,除了考虑降水和潜在蒸散发的影响外,冰雪融水导致的径流变化量也不可忽视。

表2 黑河上游1960—2015年降水、气温和潜在蒸散发序列趋势及变点检验结果

Tab. 2 Trend and change point of annual precipitation, temperature and potential evapotranspiration series from 1960 to 2015 over the upper reaches of Heihe River basin

检验方法		降水量	气温	潜在蒸散发
趋势检验	Spearman 检验	T =2.97(趋势显著)	T =8.32(趋势显著)	T =7.16(趋势显著)
	线性趋势回归法	T =3.59(趋势显著)	T =9.35(趋势显著)	T =7.14(趋势显著)
变点检验	有序聚类分析法	T =5.78(2002年)	T =9.54(1997年)	T =10.41(1996年)
	李-海格林检验法	T =5.78(2002年)	T =9.54(1997年)	T =10.41(1996年)
	累积距平法	T =4.73(2003年)	T =9.54(1997年)	T =10.12(1994年)
	滑动T检验法	T =4.92(1997年)	T =9.41(1996年)	T =10.40(1993年)

人类活动是影响流域水文循环的另一关键因素,一般通过建设各类水利工程、变更土地利用类型等改变下垫面条件来间接影响径流。由于黑河流域上游工程较少,因此这里主要讨论人类活动是否导致研究区土地利用类型发生改变。根据表3,黑河流域上游土地类型可分为耕地、林地、草地、水域、建筑用地和未利用土地等六大类,其中草地面积最大,占研究区总面积的50%以上,耕地和建筑用地面积最少,占比不足1%。除水域面积外,不同时段研究区土地利用类型占比基本稳定,由此认为研究区下垫面条件在研究期内基本保持稳定。何旭强等^[30]也研究表明,黑河流域上游人类活动较少,对径流的影响微弱。因此,结合近些年来研究区气候变化和人类活动情况,本文将影响径流变化的因素具体归纳为降水、潜在蒸散发以及其他因素(如冰雪融水)三方面,三者变化导致的径流变化量之和即为径流总的变化量。

3.3 径流变化归因的定量分析

根据对研究区径流序列的变点检验结果,将研

究时段设定为基准期1960—1997年,突变期I为1998—2004年,突变期II为2005—2015年。基准期多年平均径流深为147 mm,突变期I为162 mm,突变期II为192 mm,与基准期相比,突变期I、II分别增加15、45 mm;基准期多年平均降水量为358 mm,突变期I、II分别增加35 mm和86 mm;基准期多年平均潜在蒸散发为368 mm,突变期I、II分别增加39 mm和44 mm。

基于张鲁经验公式,分别计算得到径流对降水和潜在蒸散发的敏感系数,敏感系数绝对值的大小可以反映径流变化对某一特定因素变化的敏感程度。由表4可知,径流对降水变化的敏感系数为正,即降水增加对径流增加产生了正驱动效应;径流对潜在蒸散发变化的敏感系数为负,即潜在蒸散发增加对径流增加产生了负驱动效应。突变期I,径流对降水和潜在蒸散发变化的敏感系数分别为0.64和-0.32,表明单位降水的增加导致径流增加了0.64个单位,单位潜在蒸散发的增加导致径流减少了

表 3 1990—2015 年黑河上游不同年代土地利用类型 LUCC 分类体系分类结果

Tab. 3 LUCC classifications of land use types at different periods of 1960-2015 over the upper reaches of Heihe River basin

		单位: km ²					
一级分类	二级分类	1990 年	1995 年	2000 年	2005 年	2010 年	2015 年
耕地	水田	—	1	—	—	—	—
	旱地	27	27	27	27	27	28
	小计(占比%)	27 (0.3)	28(0.3)	27(0.3)	27(0.3)	27(0.3)	28(0.3)
林地	有林地	657	668	657	657	657	685
	灌木林	1 164	1 167	1 164	1 164	1 164	1 261
	疏林地	251	249	253	253	253	270
	小计(占比%)	2 072(20.9)	2 084(21.1)	2 074(20.9)	2 074(20.9)	2 074(20.9)	2 216(21.2)
草地	高覆盖度草地	2 318	2 311	2 321	2 321	2 321	2 438
	中覆盖度草地	1 531	1 547	1 531	1 531	1 531	1 589
	低覆盖度草地	1 155	1 139	1 204	1 204	1 204	1 260
	小计(占比%)	5 004(50.5)	4 997(50.6)	5 056(51.0)	5 056(51.0)	5 056(51.0)	5 287(50.7)
水域	河渠	6	2	6	6	6	5
	水库坑塘	—	—	—	—	—	2
	永久性冰川雪地	238	262	84	84	80	67
	滩地	175	176	175	175	175	195
	小计(占比%)	419(4.2)	440(4.5)	265(2.7)	265(2.7)	261(2.6)	269(2.6)
建筑用地	城镇用地	3	2	3	3	3	3
	农村居民点	6	10	6	6	6	8
	小计(占比%)	9(0.1)	12(0.1)	9(0.1)	9(0.1)	9(0.1)	11(0.1)
未利用土地	沙地	35	43	35	35	35	35
	戈壁	2	1	2	2	2	3
	沼泽地	468	589	468	468	468	489
	裸土地	43	45	43	43	43	50
	裸岩石质地	585	618	640	640	644	685
	其它	1 244	1 028	1 289	1 289	1 289	1 362
	小计(占比%)	2 377(24.0)	2 324(23.5)	2 477(25.0)	2 477(25.0)	2 481(25.0)	2 624(25.1)

表 4 不同因素对黑河上游径流变化的敏感系数与贡献率

Tab. 4 Sensitivity coefficient and the contributions of different factors to annual runoff over the study area

时间段	1960—1997 年基准期	1998—2004 年突变期 I	1998—2015 年突变期 II
年均蒸发 E/mm	211	231	252
年均降水量 P/mm	358	393	444
年均径流量 Q/mm	147	162	192
年均潜在蒸散发 E_0/mm	368	407	412
降水敏感系数 ϵ_p	—	0.64	0.73
潜在蒸散发敏感系数 ϵ_{E_0}	—	-0.32	-0.37
径流总变化量 $\Delta Q_{总}/mm$	—	15	45
ΔP 影响量 $\Delta Q_P/mm$ (贡献率/%)	—	22(149)	62(138)
ΔE_0 影响量 $\Delta Q_{E_0}/mm$ (贡献率/%)	—	-12(-83)	-16(-35)
其他因素影响量/ mm (贡献率/%)	—	5(34)	-1(-3)

0.32 个单位;突变期 II,单位降水的增加导致径流增加 0.73 个单位,单位潜在蒸散发的增加导致径流减少 0.37 个单位。无论是突变期 I 还是突变期 II,径流对降水变化的敏感性都要大于对潜在蒸散发变化的敏感性。

根据式(11)—(13)计算得到不同因素对径流增加的贡献率(表 4)。在突变期 I 径流增加 15 mm,

其中由降水变化导致径流增加 22 mm,由潜在蒸散发变化导致径流减少 12 mm,由其他因素(如冰雪融水)变化导致径流增加 5 mm,贡献率分别为 149%、-83%和 34%。在突变期 II 径流增加 45 mm,降水、潜在蒸散发和其他因素(如冰雪融水)三者分别导致径流增加 62 mm、减少 16 mm、减少 1 mm,三个因素对径流增加的贡献率均有所降低,分别为

138%、-35%和-3%。降水对径流产生的正效应超过100%，是影响径流变化的最主要因素。

4 结 论

本文根据1960—2015年黑河流域上游水文及气象站点数据资料,在分析研究区径流趋势和变点特征的基础上,基于Budyko假设框架下的张槽经验公式讨论了影响研究区径流变化的主要因素。主要结论如下。

(1)1960—2015年研究区径流序列呈现明显波动上升趋势;综合多种变点检验方法得到径流序列在1997年与2004年存在变点,据此设定径流基准期为1960—1997年,突变期Ⅰ为1998—2004年,突变期Ⅱ为2005—2015年。

(2)1960—2015年研究区年平均气温、年降水量、年潜在蒸散发以及冰雪融水等因素的变化趋势和变点时间与径流变化特征呈现出一定程度的吻合,人类活动对径流变化的影响微弱。结合Budyko假设,将影响研究区径流变化的因素归纳为降水、潜在蒸散发和其他因素(如冰雪融水)三方面。根据敏感系数估算得到,单位降水增加导致径流增加0.64~0.73个单位,单位潜在蒸散发增加导致径流减少0.32~0.37个单位,永久性冰川雪地融化增大了径流补给。

(3)突变期Ⅰ,降水增加对径流增加的贡献率为149%,潜在蒸散发增加对径流增加的贡献率为-83%,其他因素变化(如冰雪融水)对径流增加的贡献率为34%;突变期Ⅱ,三个因素变化对径流变化的贡献率均有所降低,分别为138%、-35%和-3%。无论突变期Ⅰ还是突变期Ⅱ,降水都是影响径流变化的最主要因素。

本文基于Budyko假设和水量平衡对黑河流域上游径流变化进行了定性和定量的归因分析,但由于实际水文循环过程中各因素间相互影响、相互作用,要更科学的定量各因素对径流变化的影响,仍需开展更深层次的研究和探讨。

参考文献(References):

[1] 王豪杰,左其亭,罗增良.沙颍河代表站径流演变特征及归因分析[J].南水北调与水利科技,2017,15(5):36-42.(WANG H J,ZUO Q T,LUO Z L.Runoff evolution characteristics of a typical station in Shayinghe River basin and attribution analysis[J].South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology,2017,15(5):36-42.(in Chinese)) DOI:10.13476/j.cnki.nsbdkq.2017.05.006.

[2] 代晓颖,许有鹏,林芷欣,等.太湖西苕溪流域径流变化归因分析[J].长江流域资源与环境,2018,27(6):1279-1286.(DAI X Y,XU Y P,LIN Z X,et al.Attribution analysis for runoff change in Xitiaoxi basin[J].Resources and Environment in The Yangtze Basin,2018,27(6):1279-1286.(in Chinese)) DOI:10.11870/cjlyzyyhj201806011.

[3] 焦阳,雷慧闻,杨大文,等.基于生态水文模型的无定河流域径流变化归因[J].水力发电学报,2017,36(7):34-44.(JIAO Y,LEI H M,YANG D W,et al.Attribution of discharge changes over Wuding River watershed using a distributed eco-hydrological model[J].Journal of Hydroelectric Engineering,2017,36(7):34-44.(in Chinese)) DOI:10.11660/slfdx.20170704.

[4] 王娟娟.干旱区河川径流变化及归因分析[J].水利规划与设计,2016(8):38-39,129.(WNAG J J.Runoff changes and attribution analysis in arid area[J].Water Resources Planning and Design,2016(8):38-39,129.(in Chinese)) DOI:10.3969/j.issn.1672-2469.2016.08.013.

[5] 王欢,刘九夫,谢自银,等.青海湖流域径流变化趋势及归因分析[J].水电能源科学,2018,36(8):18-21,32.(WANG H,LIU J F,XIE Z Y,et al.Trend and attribution analysis of runoff in Qinghai Lake basin[J].Water Resources and Power,2018,36(8):18-21,32.(in Chinese))

[6] 杜军凯,贾仰文,郝春洋,等.太行山区蓝水绿水沿垂直带演变规律及其归因分析[J].南水北调与水利科技,2018,16(2):64-73.(DU J K,JIA Y W,HAO C F,et al.Evolution law and attribution analysis of vertical distribution of blue water and green water in Taihang mountain region[J].South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology,2018,16(2):64-73.(in Chinese)) DOI:10.13476/j.cnki.nsbdkq.2018.0040.

[7] 傅抱璞.论陆面蒸发的计算[J].大气科学,1981,5(1):23-31.(FU B P.On the calculation of the evaporation from land surface[J].Chinese Journal of Atmospheric Sciences,1981,5(1):23-31.(in Chinese)) DOI:10.3878/j.issn.1006-9895.1981.01.03.

[8] ZHANG L,DAWES W R,WALKER G R.Response of mean annual evapotranspiration to vegetation changes at catchment scale[J].Water Resources Research,2001,37(3):701-708.DOI:10.1029/2000wr900325.

[9] 孙福宝.基于Budyko水热耦合平衡假设的流域蒸散发研究[D].北京:清华大学,2007.(SUN F B.Study on coupled water-energy balance in Yellow River basin based on budyko Hypothesis[D].Beijing:Tsinghua University,2007.(in Chinese))

- [10] 卞玉敏,吕海深,谈娟娟,等. 基于 Budyko 假设的流域水量平衡研究[J]. 人民长江, 2014, 45(3): 24-28. (BIAN Y M, LYU H S, TAN J J, et al. Study on watershed water balance based on Budyko hypothesis[J]. Yangtze River, 2014, 45(3): 24-28. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1001-4179. 2014. 03. 006.
- [11] 郭生练,郭家力,侯雨坤,等. 基于 Budyko 假设预测长江流域未来径流量变化[J]. 水科学进展, 2015, 26(2): 151-160. (GUO S L, GUO J L, HOU Y K, et al. Prediction of future runoff change based on Budyko hypothesis in Yangtze River basin[J]. Advances in Water Science, 2015, 26(2): 151-160. (in Chinese)) DOI: 10. 14042/j. cnki. 32. 1309. 2015. 02. 001.
- [12] 刘艳丽,王国庆,金君良,等. 基于 Budyko 假设的环境变化对流域径流影响的界定[J]. 水利水运工程学报, 2014(6): 1-8. (LIU Y L, WANG G Q, JIN J L, et al. An attribution method for catchment-scale runoff variation evaluation under environmental change based on Budyko hypothesis[J]. Hydro-Science and Engineering, 2014(6): 1-8. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1009-640X. 2014. 06. 001.
- [13] 王喆,李昱,丁伟,等. 基于扩展 Budyko 假设的季节径流变化归因分析[J]. 水力发电学报, 2017, 36(8): 22-33. (WANG Z, LI Y, DING W, et al. Attribution analysis on seasonal river runoff based on extended Budyko hypothesis[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2017, 36(8): 22-33. (in Chinese)) DOI: 10. 11660/slfdbx. 20170803.
- [14] 王卫光,陆文君,邢万秋,等. 黄河流域 Budyko 方程参数 n 演变规律及其归因研究[J]. 水资源保护, 2018, 34(2): 7-13. (WANG W G, LU W J, XING W Q, et al. Analysis of change and attribution of Budyko equation parameter n in Yellow River[J]. Water Resources Protection, 2018, 34(2): 7-13. (in Chinese)) DOI: 10. 3880/j. issn. 1004-6933. 2018. 02. 02.
- [15] 张连鹏,刘登峰,张鸿雪,等. 气候变化和人类活动对北洛河径流的影响[J]. 水力发电学报, 2016, 35(7): 55-66. (ZHANG L P, LIU D F, ZHANG H X, et al. Variation characteristics of potential evapotranspiration and actual evapotranspiration during 1960-2011 in Baiyangdian Basin[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2016, 35(7): 55-66. (in Chinese)) DOI: 10. 11660/slfdbx. 20160706.
- [16] 胡珊珊,张涛. 白洋淀流域潜在蒸散量与实际蒸散量变化分析[J]. 南水北调与水利科技, 2016(1): 67-71. (HU S S, ZHANG T. Variation analysis of potential evapotranspiration and actual evapotranspiration in Baiyangdian watershed [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2016(1): 67-71. (in Chinese)) DOI: 10. 13476/j. cnki. nsb-dqk. 2016. 01. 011.
- [17] QIANG L, YANG Z F, CUI B S, et al. Temporal trends of hydro-climatic variables and runoff response to climatic variability and vegetation changes in the Yiluo River basin, China[J]. Hydrological Processes, 2010, 23(21): 3030-3039. DOI: 10. 1002/hyp. 7414.
- [18] 贺燕子,岳大鹏,达兴,等. 气候变化和人类活动对水资源影响的初探——以陕西省为例[J]. 江西农业学报, 2016, 28(12): 87-93. (HE Y Z, YUE D P, DA X, et al. A preliminary study on impact of climatic change and human activity on water resources; taking Shaanxi Province as an example[J]. Acta Agriculturae Jiangxi, 2016, 28(12): 87-93. (in Chinese)) DOI: 10. 19386/j. cnki. jxnyxb. 2016. 12. 18.
- [19] 牟夏,刘强,平凡,等. 1960—2007 年无定河流域径流情势变化及其归因分析[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2017, 53(4): 465-471. (MOU X, LIU Q, PING F, et al. Analysis of changes in annual streamflow and its influence factors in Wuding River basin in the last 50 years(1960-2007)[J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science), 2017, 53(4): 465-471. (in Chinese)) DOI: 10. 16360/j. cnki. jbnuns. 2017. 04. 015.
- [20] 甄玉龙. 黑河径流演变分析及探讨[J]. 甘肃科技, 2017, 33(10): 49-50. (ZHEN Y L. Analysis and discussion of runoff evolution in Heihe[J]. Gansu Science and Technology, 2017, 33(10): 49-50. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1000-0952. 2017. 10. 018.
- [21] 张亚宁. 黑河流域 1960 年至 2009 年水分盈亏量时空格局变化研究[D]. 兰州: 西北师范大学, 2012. (ZHANG Y N. Study on spatial and temporal variation of water deficit in Heihe River basin from 1960 to 2009 [D]. Lanzhou: Northwest Normal University, 2012. (in Chinese))
- [22] 周园园,师长兴,范小黎,等. 国内水文序列变异点分析方法及在各流域应用研究进展[J]. 地理科学进展, 2011, 30(11): 1361-1369. (ZHOU Y Y, SHI C X, FAN X L, et al. Advances in the research methods of abrupt changes of hydrologic sequences and their applications in drainage basins in China[J]. Progress in Geography, 2011, 30(11): 1361-1369. (in Chinese)) DOI: 10. 11820/dlxxjz. 2011. 11. 005.
- [23] 王毓森. 水文时间序列趋势与突变分析系统开发与应用[J]. 甘肃科技, 2016, 32(9): 36-37, 11. (WANG Y S. Development and application of trend and catastrophe analysis system for hydrological time series[J]. Gansu Science and Technology, 2016, 32(9): 36-37, 11. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1000-0952. 2016. 09. 013.
- [24] 牛最荣. 气候变化对祁连山区水文循环的影响研究

- [M]. 兰州:甘肃人民出版社,2013. (NIU Z R. Study on the impact of climate change on hydrological cycle in Qilian mountainous area[M]. Lanzhou: Gansu People's Publishing House, 2013. (in Chinese))
- [25] 宋晓猛,张建云,占车生,等. 气候变化和人类活动对水文循环影响研究进展[J]. 水利学报, 2013, 44(7): 779-790. (SONG X M, ZHANG J Y, ZHAN C S, et al. Review for impacts of climate change and human activities on water cycle[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2013, 44(7): 779-790. (in Chinese)) DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.2013.07.001.
- [26] 张士锋,华东,孟秀敬,等. 三江源气候变化及其对径流的驱动分析[J]. 地理学报, 2011, 66(1): 13-24. (ZHANG S F, HUA D, MENG X J, et al. Climate change and its driving effect on the runoff in the "Three-River Headwaters" region[J]. Acta Geographica Sinica, 2011, 66(1): 13-24. (in Chinese)) DOI: 10.11821/xb201101002.
- [27] 别强,强文丽,王超,等. 1960—2010年黑河流域冰川变化的遥感监测[J]. 冰川冻土, 2013, 35(3): 574-582. (BIE Q, QIANG W L, WANG C, et al. Monitoring glacier variation in the upper reaches of the Heihe River based on remote sensing in 1960-2010[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2013, 35(3): 574-582. (in Chinese)) DOI: 10.7522/j.issn.1000-0240.2013.0066.
- [28] 李栋梁,刘洪兰. 黑河流量对祁连山气候年代际变化的响应[J]. 中国沙漠, 2004, 24(4): 385-391. (LI D L, LIU H L. Responding of Heihe River runoff to decadal climate change in Qilian Mountain area[J]. Journal of Desert Research, 2004, 24(4): 385-391. (in Chinese)) DOI: 10.3321/j.issn:1000-694X.2004.04.002.
- [29] 张凯,王润元,韩海涛,等. 黑河流域气候变化的水文水资源效应[J]. 资源科学, 2007, 29(1): 77-83. (ZHANG K, WANG R Y, HAN H T, et al. Hydrological and water resources effects under climate change in Heihe River basin[J]. Resources Science, 2007, 29(1): 77-83. (in Chinese)) DOI: 10.3321/j.issn:1007-7588.2007.01.012.
- [30] 何旭强,张勃,孙力炜,等. 气候变化和人类活动对黑河上中游径流量变化的贡献率[J]. 生态学杂志, 2012, 31(11): 2884-2890. (HE X Q, ZHANG B, SUN L W, et al. Contribution rates of climate change and human activity on the runoff in upper and middle reaches of Heihe River basin[J]. Chinese Journal of Ecology, 2012, 31(11): 2884-2890. (in Chinese)) DOI: 10.13292/j.1000-4890.2012.0474.
-
- (上接第6页)
- [11] 李阳,李克飞,纪昌明,等. 结合均生函数的神经网络在中长期水文预报中的应用[J]. 水电能源科学, 2013, 31(2): 19-22. (LI Y, LI K F, JI C M, et al. Application of neural network combined with mean generation function to mid longterm hydrological forecasting[J]. Water Resources and Power, 2013, 31(2): 19-22. (in Chinese))
- [12] 刘丹辉,马龙,刘廷玺,等. 均生函数与BP神经网络耦合模拟预测模型(MGF-BP-D)的建立与应用[J]. 水文, 2016, 36(6): 7-15. (LIU D H, MA L, LIU Y X, et al. A coupled simulation and forecast model of mean generating function and BP neural network(MGF-BP-D)[J]. Journal of China Hydrology, 2016, 36(6): 7-15. (in Chinese))
- [13] CANNAS B, FANNI A, SEE L, et al. Data preprocessing for river flow forecasting using neural networks: wavelet transforms and data partitioning [J]. Physics & Chemistry of the Earth Parts A/B/C, 2006, 31(18): 1164-1171. DOI: 10.1016/j.pce.2006.03.020.
- [14] 李永坤,丁晓洁. 北京市降水量变化特征分析[J]. 北京水务, 2013(2): 9-12. (LI Y K, DING X J. Analysis on the change characteristics of precipitation in Beijing[J]. Beijing Water, 2013(2): 9-12. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1673-4637.2013.02.003.
- [15] 钱诚,严中伟,曹丽娟,等. 基于1873年以来器测气温的二十四节气气候变化[J]. 气候与环境研究, 2018, 23(6): 670-682. (QIAN C, YAN Z W, CAO L J, et al. Climatic changes in the twenty-four solar terms based on temperature observations back to 1873[J]. Climatic and Environmental Research, 2018, 23(6): 670-682. (in Chinese))
- [16] 钱诚,严中伟,符淙斌,等. 1960—2008年中国二十四节气气候变化[J]. 科学通报, 2011, 56(35): 3011-3020. (QIAN C, YAN Z W, FU C B, et al. 24 solar terms climate change in China from 1960 to 2008[J]. Chinese Science Bulletin, 2011, 56(35): 3011-3020. (in Chinese))
- [17] 陈菊英. 中国旱涝的分析和长期预报研究[M]. 农业出版社, 1991. (CHEN J Y. Analysis and long-term forecasting of drought and flood in China[M]. Agriculture Publishinghouse, 1991. (in Chinese))
- [18] GB/T 22482—2008, 水文情报预报规范[S]. (GB/T 22482—2008, Standard for Hydrological Information And Hydrological forecasting[S]. (in Chinese))