

DOI:10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2021.0070

王庆明,姜珊,李森,等. 大清河流域山区径流量衰减影响因素[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2021, 19(4): 669-679.
WANG Q M, JIAN S, LI S, et al. Influencing factors of surface runoff attenuation in mountainous areas of the Daqing River basin[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2021, 19(4): 669-679. (in Chinese)

大清河流域山区径流量衰减影响因素

王庆明¹, 姜珊¹, 李森², 张越³, 何国华¹, 赵勇¹,
李海红¹, 朱永楠¹, 翟家齐¹, 王丽珍¹

(1. 中国水利水电科学研究院流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100038;
2. 河北省水利科学研究院, 石家庄 050057; 3. 水利部水利水电规划设计总院, 北京 100120)

摘要:针对大清河流域山区分析降水年内分布、雨强变化、蒸发能力、植被生长质量、梯田建设、水库蓄水等因素的变化规律,并计算径流变化与各因素的敏感性大小,得到以下结论:大清河流域山区地表径流持续衰减,而近 20 年汛期径流衰减更为剧烈;汛期降水减少、雨强减弱、同期蒸发能力增强、区域植被变好以及梯田的拦蓄截留共同作用导致区域径流量的衰减;1983 年和 1997 年是径流演变的 2 个突变点,根据突变点将径流系列前后分为 3 个时段,1961—1982 年汛期降水减少是径流减少的主要因素,1983—1996 年梯田面积大幅增加是径流减少的主要原因,1997—2016 年汛期降水减少、植被质量提高导致蒸发消耗增加是径流衰减的主要因素。

关键词:大清河流域山区;地表径流;衰减;影响因素;敏感性

中图分类号:TV213 文献标志码:A 开放科学(资源服务)标志码(OSID):



20 世纪 80 年代以来,我国北方地区地表径流呈明显的衰减趋势。以海河流域为例,1956—1980 年地表径流量为 410 亿 m^3 ;1980—2000 年地表径流量衰减至 319 亿 m^3 ;2000—2015 年地表径流量进一步衰减至 280 亿 m^3 。径流量的衰减已经严重威胁到区域的自然生态健康和社会生产生活,因此对径流衰减的原因分析一直是近年来的研究热点^[1-2]。王浩等^[3]系统研究了海河流域水循环演变机理,认为自然变异和人类活动对海河流域水资源衰减的影响分别为 38% 和 62%。张建云等^[4]指出人类活动改变了流域下垫面及水利工程取水等措施影响流域水文过程,认为归因分析的关键问题在于基准期的确定和还原人类活动影响期的天然径流量,并计算了海河水系漳河流域径流衰减的原因,其中人类活动占 85%,气候变化占

15%。夏军等^[5]提出在变化环境(气候变化和人类活动)下海河流域水资源脆弱性问题愈加严重,对水资源造成不利影响。

通常把径流衰减归因为气候变化和人类活动影响,研究方法一般分为 2 种:一种是基于统计资料,分析降水、径流等水文要素的演变规律,根据两个时段降水-径流关系的差异识别气候因素和人类活动因素的影响,例如双累积曲线法、Budyko 经验曲线法^[6-10];另一种方法是基于水文模型,从径流的发生机制入手,模拟不同的气候条件、不同的下垫面条件下的径流差异,区分出气候和人类活动的影响^[11-14]。在此基础上,学者进一步研究了不同的要素对径流的影响,如:徐丽娟等^[15]分析了大清河流域植被、水利工程、水资源开发利用等对流域降水径流关系的影响;穆文彬等^[16]对气象要

收稿日期:2020-09-11 修回日期:2021-05-21 网络出版时间:2021-05-26

网络出版地址:https://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1430.TV.20210525.1046.002.html

基金项目:国家重点研发计划(2016YFC0401407);中国水科院基本科研业务费(WR0145B012018);水文水资源与水利工程科学国家重点实验室“一带一路”水与可持续发展科技基金资助(2018491011)

作者简介:王庆明(1987—),男,河北邯郸人,工程师,博士,主要从事水文水资源方面研究。E-mail:wangqm@iwahr.com

通信作者:赵勇(1977—),男,安徽宿州人,正高级工程师,博士,主要从事水文水资源方面研究。E-mail:zhaoyong@iwahr.com

素和土地利用变化对大清河流域水循环的影响进行分析。目前受限于资料的获取和对影响机理认识的不足,如植被、土壤、水保工程等因素对径流衰减的贡献,还没有成熟的计算方法,但有必要对这些因素的演变规律及影响过程先进行分析,凝练总结其影响机理,便于以后的研究在此基础上进行定量分析。

大清河流域山区地表径流衰减尤为剧烈且是下游河湖萎缩的重要原因之一,研究大清河流域山区地表径流衰减规律既为恢复下游河湖健康水面提供技术支撑,也为揭示全流域地表径流衰减规律提供了案例参考。

1 研究区概况

大清河流域位于海河流域中部,东经 $113^{\circ}39' \sim 117^{\circ}34'$,北纬 $38^{\circ}10' \sim 40^{\circ}102'$,流域总面积 $43\,060\text{ km}^2$,其中山区面积 $18\,659\text{ km}^2$ 、平原区面积 $24\,401\text{ km}^2$,分别占流域总面积的 43.3% 和 56.7% 。大清河流域山区按高程及地貌可分为中山区、低山区及丘陵区等 3 类:西部为中山区,总面积约为 $6\,790\text{ km}^2$,山体切割强烈,河谷深切、支脉发育,间插有小型盆地;东南部为低山区和丘陵区,总面积为 $4\,198\text{ km}^2$,低山区山坡低缓、河谷宽阔、陆地发育,地势向东南逐渐变缓直至接连平原,见图 1。

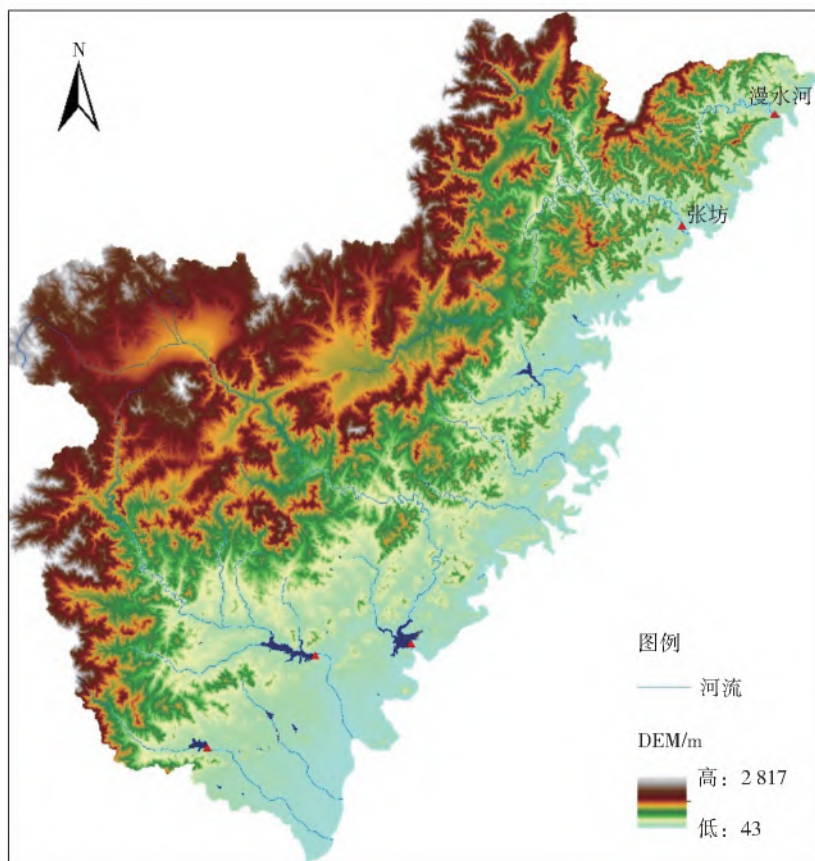


图 1 大清河流域山区地表高程及水系

Fig. 1 DEM and hydrographic net of mountainous area of Daqing River basin

大清河流域山区属于中温带半湿润气候区,1961—2016 年多年平均气温为 $7.4\text{ }^{\circ}\text{C}$,极端最低气温 $-26.8\text{ }^{\circ}\text{C}$,最高气温 $43.3\text{ }^{\circ}\text{C}$,多年平均降水量为 536 mm ,由西向东递减。大清河水系在上游分南北 2 支,北支主要为拒马河,南支为典型的扇形流域。潞沔河、唐河、府河、漕河、瀑河、萍河等 8 条河流均发源于山区。

2 大清河流域山区地表径流演变

2.1 研究方法

Pettitt 突变点检验。Pettitt 法^[17]是检验时间

序列突变点的常用方法,可以避免异常值的干扰以及数据分布特征的影响,其计算方法如下。

对于具有 N 个样本的时间序列,构造统计量

$$U_{i,N} = U_{t-1,N} + \sum_{j=1}^N \text{sgn}(x_i - x_j) \quad (1)$$

式中: j 和 $t=2, \dots, N$ 。令 $x_i - x_j = \theta$,则 $\text{sgn } \theta$ 值由下式确定;

$$\text{sgn } \theta = \begin{cases} 1 & \theta > 0 \\ 0 & \theta = 0 \\ -1 & \theta < 0 \end{cases} \quad (2)$$

可知, $U_{i,N}$ 为 x 序列第 i 个数值大于或小于第 j

个数值的累积数。

原假设认为时间序列的突变不显著,而备择假设认为时间序列的变化趋势显著,其统计量

$$K_N = \text{Max}_i |U_{i,n}| \quad (3)$$

统计量的显著性检验为

$$p \cong 2\exp(-6(K_N) + 2/(N^3 + N^2)) \quad (4)$$

当 $p \leq 0.05$ 时,突变点显著,否则突变点不显著。

影响因素对径流的敏感性分析。统计学上的弹性系数方法通常被用于识别不同因素对径流贡献的敏感性。弹性系数法最早由 Schaake 等^[18] 提出,采用降水弹性系数 $\epsilon_P(P, Q) = \frac{dQ/Q}{dP/P}$ 评价降水的贡献(P 为降雨量); Sankarasubramanian 等^[19] 提出了一个非参数评估因子方法, $\epsilon_P = \text{median} \left(\frac{(Q_i - \bar{Q})/\bar{Q}}{(P_i - \bar{P})/\bar{P}} \right)$; Zheng 等^[20] 在此基础上,提出一种评估气候变量影响的可替代非参数估计量方法,在样本容量较小时仍有相对可靠的结果。本研究采用此方法计算径流对不同影响因素的敏感性,公式为

$$\epsilon_x = \frac{\bar{x}}{Q} \cdot \frac{\sum (x_i - \bar{x})(Q_i - \bar{Q})}{\sum (x_i - \bar{x})^2} = \rho_{x,Q} \frac{C_Q}{C_x} \quad (5)$$

式中: Q 为区域年径流量,亿 m^3 ; x 为影响因素变量; x_i 代表影响因素的年度值; \bar{x} 代表影响因素时段内的平均值; $\rho_{x,Q}$ 代表影响因素变量和径流的相关系数; C_Q 和 C_x 表示变量系数。

2.2 地表径流演变规律

20 世纪 60 年代以来,大清河流域山区天然径流量(由实测径流量还原)呈现明显衰减的规律,大清河流域山区典型站张坊站、王快水库站和西大洋水库站,站点径流量见图 2。采用 Pettitt 法对 3 个站点径流平均值系列进行突变检验(图 3),发现在过去的 56 a 地表径流量发生过两次突变:第 1 次突变发生在 1983 年左右($p = 1.03 \times 10^{-4} < 0.05$, 显著突变);第 2 次突变发生在 1997 年($p = 2.20 \times 10^{-5} < 0.05$, 显著突变)。根据 2 次突变时间将径流系列分为 3 个时段,分别为 1961—1982 年(T_1 时段, 22 a)、1983—1996 年(T_2 时段, 13 a)、1997—2016 年(T_3 时段, 20 a)。对比 3 个时段,区域地表径流量分别为 22.8 亿、19.3 亿和 9.3 亿 m^3 , T_2 和 T_3 分别较 T_1 时段减少了 15% 和 60%。从汛期径流上看,3 个时段汛期径流量分别为 14.2 亿、12.0 亿和 4.1 亿 m^3 , 相较 T_1 时段, T_2 和 T_3 时段分别衰

减了 15% 和 71%; 从非汛期径流上看, 3 个时段径流量分别为 8.6 亿、7.3 亿和 5.2 亿 m^3 , 衰减幅度分别为 15% 和 40%。由上述分析可知:(1) 区域的天然径流量仍处于持续衰减过程中, 在最近 20 a 衰减速度更加剧烈;(2) 与 T_1 时段相比, T_2 时段汛期和非汛期径流减少幅度相当, 但在 T_3 时段汛期径流量衰减幅度明显大于非汛期径流量衰减幅度。

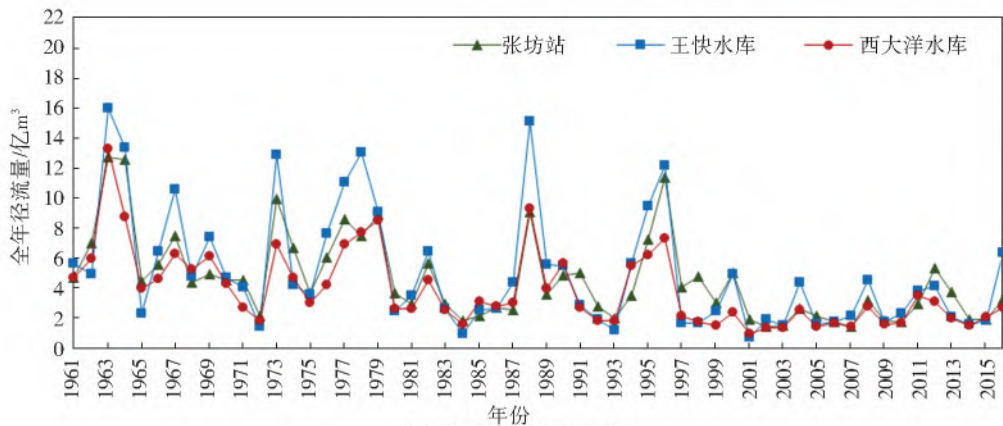
3 地表径流衰减原因分析

流域产汇流是一个非常复杂的非线性过程, 大致可分为降水、植被冠层截留、蒸发、土壤入渗、坡面汇流等几个子过程。降水是形成产流的根源, 不仅降水量影响产流, 降水的时间分布、雨强的变化均会影响区域的产流。降水在到达地面之前, 首先是经过植被冠层截留, 区域的植被生长质量越好, 冠层截留量越大、蒸发损失量也越大, 因此植被生长情况也是径流的一个因素。降水到达地面后开始土壤入渗过程, 入渗量的大小取决于土壤质地、孔隙度、前期土壤含水量等因素, 土壤因素在水文模型的研究中相对深入, 在一般水文模型中都会考虑。到达地面的降水扣除掉入渗量和蒸发量后形成地表产流, 产流量汇聚到河道前仍受下垫面条件的影响, 如人工修筑的水保、水利工程改变下垫面的微地形, 影响蒸发、入渗水量的分配, 减少河道汇流量。基于以上分析, 本研究从上述过程入手, 从降水、蒸发、植被及水保工程等几个方面分析山区径流衰减规律。

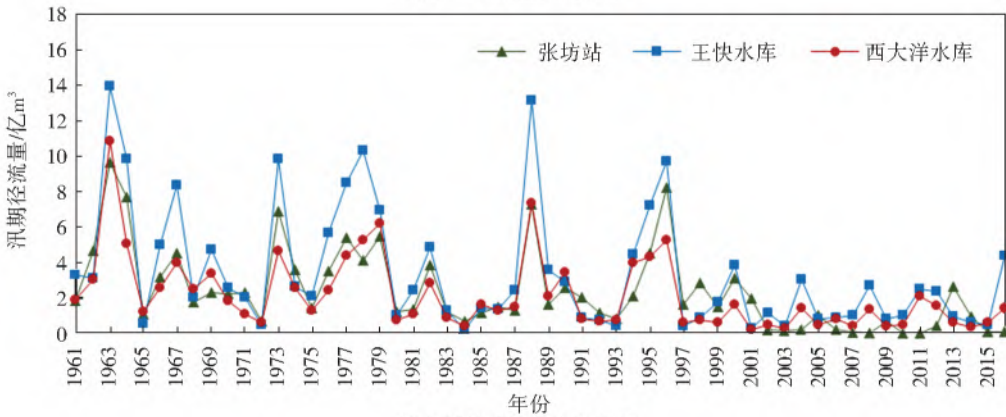
3.1 降水变化对地表径流量的影响

3.1.1 汛期降水及非汛期降水

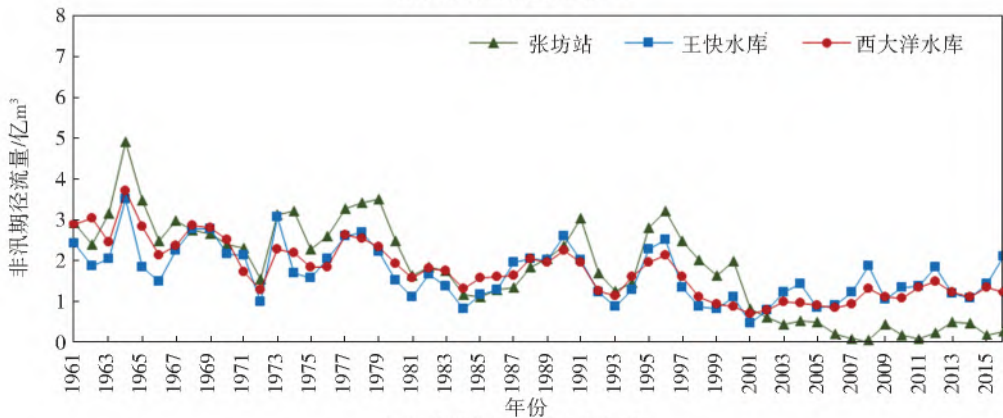
降水是形成地表径流的首要条件, 从年降水总量上看其下降的线性斜率为 -1.3 mm/a , 3 个时段的降水量分别为 548、524 和 467 mm, 经 M-K 检验^[21] 分析, 在统计意义上并未发生显著性变化, 见图 4。但是从汛期降水和非汛期降水对比看: 汛期降水减少的幅度为 1.7 mm/a , 3 个时段降水量分别为 439、424 和 349 mm; 非汛期降水增加幅度为 0.27 mm/a , 3 个时段降水量分别为 109、100 和 118 mm。汛期降水减少的趋势与径流减少趋势较为一致, 尤其是 1997 年以后区域汛期降水大幅衰减, 较前两个时段分别减少了 21.0% 和 17.7%, 也说明汛期降水减少是导致径流减少的重要原因之一。



(a) 年径流量变化规律



(b) 汛期径流量变化规律



(c) 非汛期径流量变化规律

图 2 典型站点径流量变化规律

Fig. 2 The variation of runoff at typical stations

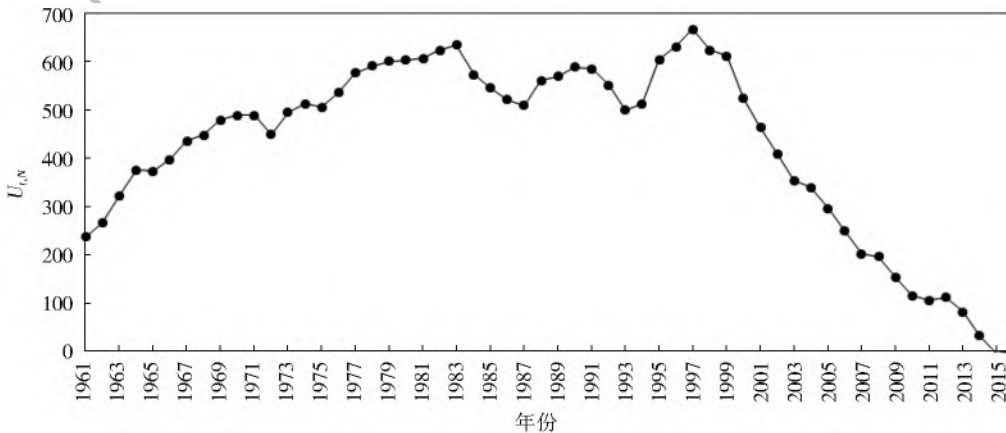


图 3 Pettitt 检验统计量 $U_{L,N}$ 值

Fig. 3 Pettitt test statistical values $U_{L,N}$

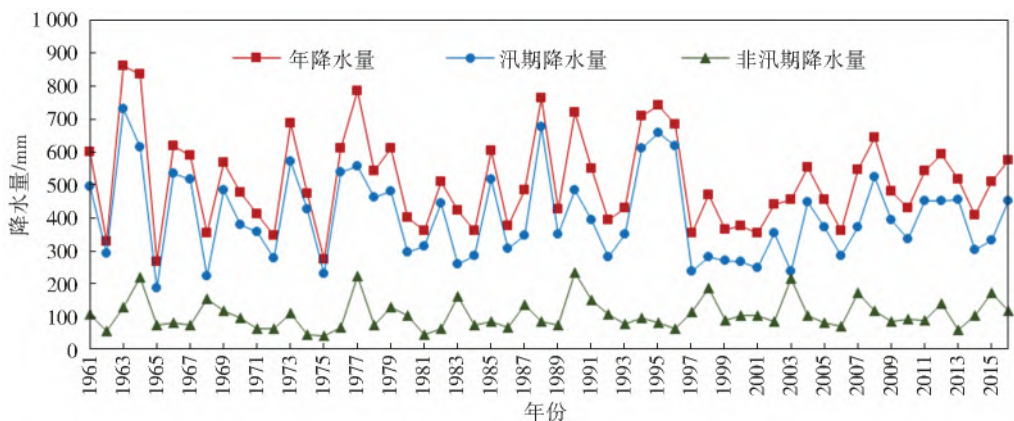


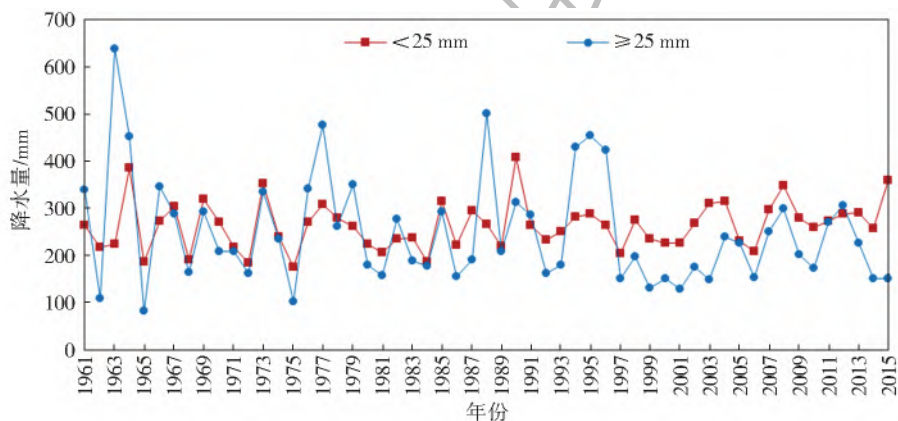
图4 区域年降水量、汛期、非汛期降水量变化规律

Fig. 4 Regional annual precipitation, flood season and non-flood season precipitation change

3.1.2 不同雨型降水变化

雨型的变化也会影响产流量,一般认为降水强度越大,越易产生径流。在气象上,通常把日降水量 $<10\text{ mm}$ 、 $10\sim<25\text{ mm}$ 、 $25\sim 50\text{ mm}$ 和 $>50\text{ mm}$ 的降水分别称为小雨、中雨、大雨和暴雨,在大清河流域山区中、小雨和大雨是最常见的雨型,将 25 mm 降水作为分界线,分别统计中、小雨和大雨的日降水量累积值,见图5。研究数据来自区域内阜

平站、龙门站和紫荆关站3个站点气象数据,对3个站点月均降水量进行分析,发现大河流域山区大雨量呈减少趋势,而中、小雨量呈现增多趋势, $\geq 25\text{ mm}$ 的累积降水3个时段分别为 282 、 273 和 196 mm ,3个时段 $<25\text{ mm}$ 的累积降水分别为 254 、 266 和 271 mm 。大雨量减弱而中、小雨量增多说明大河流域山区降水雨强在变弱,产生暴雨径流的可能性在降低。

图5 区域 $<25\text{ mm}$ 和 $\geq 25\text{ mm}$ 的累积降水量变化规律Fig. 5 The cumulative precipitation variation law of the region $< 25\text{ mm}$ and $\geq 25\text{ mm}$

3.2 蒸发变化对地表径流的影响

根据Budyko水热耦合平衡理论,影响区域实际蒸发量的2个因素分别为大气对陆面的水分供给(降水量)和蒸发能力(潜在蒸发量)^[22]。大河流域位于湿润半湿润的季风气候区,汛期水分条件充足,根据彭曼公式计算的大河流域山区汛期蒸发能力为 301 mm 、降水量为 404 mm ,降水量大于蒸发能力,因此,蒸发能力是限制实际蒸发因素;而非汛期蒸发能力为 580 mm 、降水量为 106 mm ,蒸发能力大于降水量,水分供给是限制实际蒸发主要因素,见图6。当水分供给为限制因素时,降水增加将导致实际蒸发量增加;当水分供给充足时,蒸发能力增加会导致区域实际蒸发增

加^[23]。对于水分充足的汛期,蒸发能力增加意味着实际蒸发量将会增加,而在非汛期由于水分供给条件的限制,蒸发能力的增加则不会增加实际蒸发量。根据彭曼公式计算,在全年尺度上3个时段潜在蒸发量分别为 874 、 845 和 917 mm ;从汛期上看,3个时段潜在蒸发量分别为 297 、 296 和 310 mm ;从非汛期上看,3个时段潜在蒸发量分为 577 、 549 和 607 mm 。全年、汛期和非汛期的蒸发能力变化具有一致性,都是先减少后增加,相对 T_1 时段, T_2 时段的蒸发能力减小,而 T_3 时段蒸发能力又增大并且超过了 T_1 时段。 T_3 时段汛期蒸发能力增加意味着区域实际蒸发损失增加,则降水形成的径流相应减少。

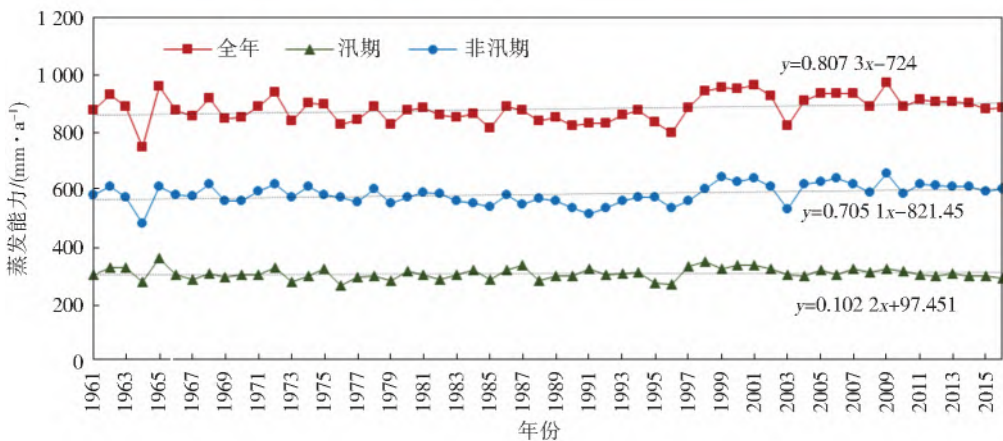


图 6 区域全年、汛期和非汛期蒸发能力变化规律

Fig. 6 regional annual, flood season and non-flood season evaporation capacity change

3.3 山区水保工程

水保工程主要包括山区的基本农田建设、水土保持林建设和一些小型的蓄水保土工程,表 1 为大清河流域山区水保工程统计数据,可以看出,梯田建设和水土保持林建设是最主要的水保措施。梯田改变了坡地的地形地貌,使坡面变成水平面田从而截断了径流的产生,另外坡地改水平梯田后,由于精耕细作,改良了梯田土壤结构,增加了入渗深度;田面上栽培作物,增加了水流阻力,延长入渗时间;田埂也可拦蓄田面积水,水平梯田可将一般年份的降水量全部保留在梯田^[24]。北京水科院于 1993—1999

年在石匣小流域开展不同水保措施对径流的影响作用试验,结果表明对比坡地梯田年产流平均可减少 89%^[25]。根据大清河山区 1 km 分辨率土地利用影像提取梯田面积(图 7),20 世纪 80 年代末期,受农村土地政策改革影响,开始大量修建梯田,梯田面积迅速增加,到 1998 年左右梯田面积达到顶峰,随后呈现小幅下降的趋势。 T_2 时段内梯田面积以增加为主,从 1983 年的 3 658 km² 增加到 1996 年的 5 712 km²,增加了 41%。 T_3 时段梯田面积变化不大,平均值为 5 967 km²,仅比 T_2 时段末增加了 255 km²。

表 1 大清河流域山区水保工程统计

Tab. 1 Statistics of water conservancy project in mountainous area of Daqing River basin

基本农田		治理面积/万 hm ²					小型蓄水保土工程		
梯田	坝地	水土保持林		经济林	种草	封禁治理	点状/万个	线状/万 km	
	其他	乔木林	灌木林						
45.78	0.14	1.80	22.97	21.70	11.14	0.34	14.03	2.49	0.65

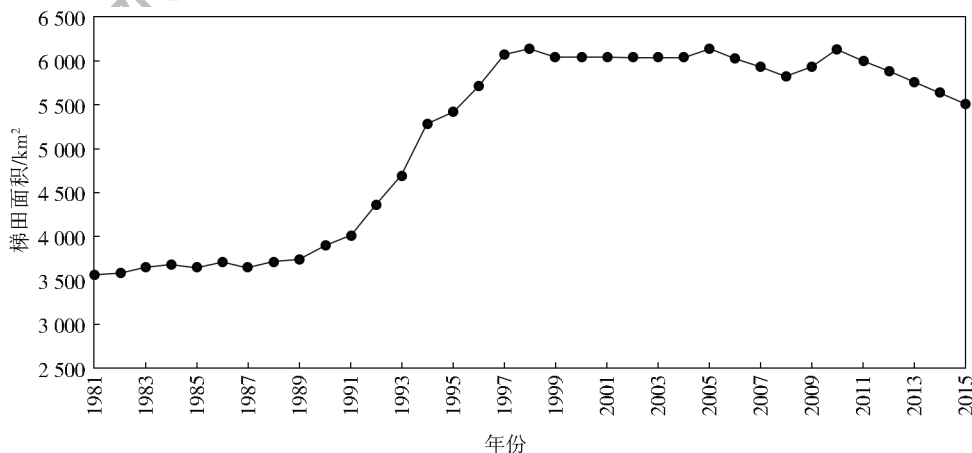


图 7 1981—2015 年区域梯田面积变化

Fig. 7 Regional terrace area variation from 1981 to 2015

水保措施一方面增加了土壤蓄水能力,另一方面也提高了区域植被质量。20 世纪 80 年代以来,大清

河山区年最大 NDVI(归一化植被覆盖指数)整体呈现增加趋势,年均增长率为 0.002 3,见图 8。其中,

T_2 时段年最大 NDVI 均值 0.651, T_3 时段增加到 0.692,较 T_2 时段增加了 6%。NDVI 值增加说明区域植被覆盖情况变好,对降水的冠层截留量增加^[26]。

结合前文对降水和蒸发变化的分析,汛期降水减弱、蒸发能力增加,而植被条件变好,冠层拦蓄更多降水后蒸发到大气,减少了可形成地表径流量的降水^[27]。

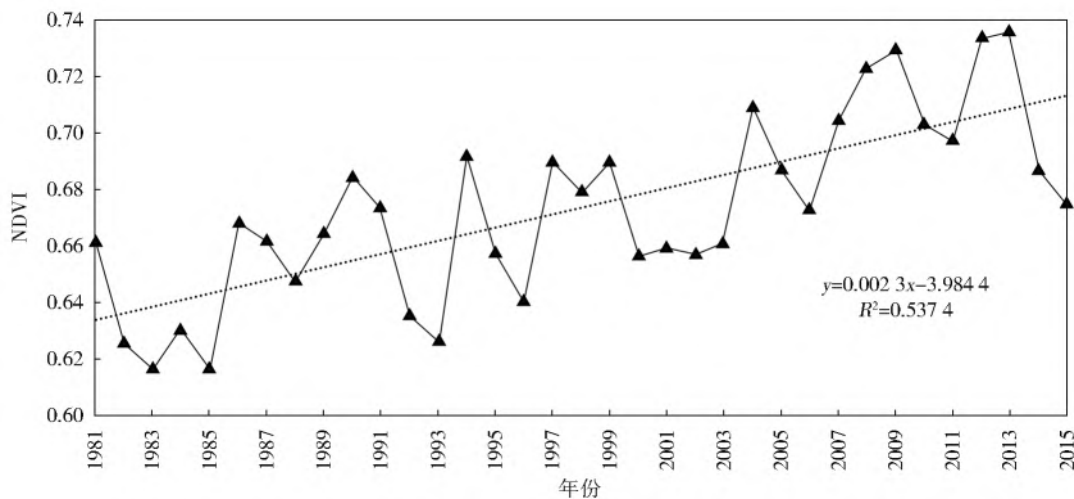


图 8 1981—2015 年区域 NDVI 变化规律

Fig. 8 Regional NDVI variation from 1981 to 2015

3.4 水库蓄水对径流量衰减的影响

水库蓄水并不直接影响降水-产流过程,但对径流汇集后的水资源量产生影响。水库修建以前,蒸发损失主要是原河道水面蒸发损失和当地陆面蒸发损失;水库蓄水以后,库区原来陆面变为水面,蒸发由陆面蒸发变为水面蒸发,引起额外的水量损失。截至目前,大清河流域山区共有水库 125 座,正常蓄水位水面面积 374.5 km²,见表 2。 T_1 时段为水库建设高峰期,60 年代大型水库基本完成,70 年

代中小型水库大量建设,到 80 年代初水库建设已基本完成, T_2 和 T_3 时段水库数量基本没有变化,见图 9。假设以兴利库容对应的正常蓄水位水面面积作为年均水面面积,根据区域水面日蒸发量数据可计算出不同时段水库蒸发水量。 T_1 时段水库蒸发损失量从时段初的 1 529 万 m³ 增加到时段末 3 606 万 m³,年均蒸发损失量为 2 856 万 m³, T_2 和 T_3 时段水库蒸发损失分别为 3 796 万 m³ 和 3 659 万 m³。

表 2 大清河流域山区水库数量及库容统计

Tab. 2 Statistics of reservoir quantity and capacity in mountainous area of Daqing River basin

水库类型	大(1)型	大(2)型	中型	小(1)型	小(2)型	合计
水库数量/座	2	4	7	29	83	125
总库容/亿 m ³	25.26	7.84	1.47	1.07	0.21	35.85

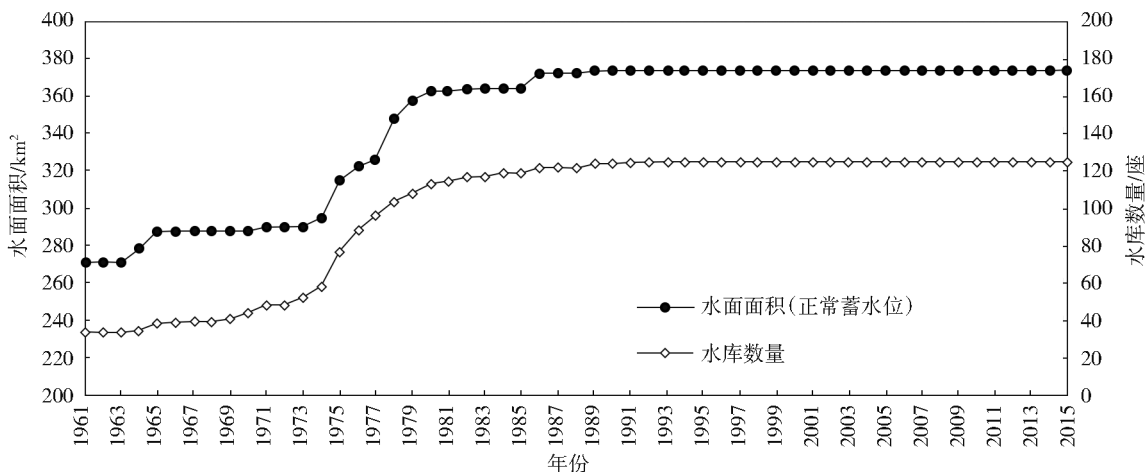


图 9 1961—2015 年水库数量及累积水面面积

Fig. 9 Reservoir number and cumulative water surface area from 1961 to 2015

4 不同影响因素对地表径流衰减敏感性分析

从上述分析可知,导致大清河流域山区径流量衰减影响因素包括汛期降水量(P)、降水雨强(I)、汛期作物潜在蒸发量(ET)、植被质量(N)、梯田建设(T_c)等。采用式(5)计算不同影响因素对研究区地表径流变化的敏感性,因为 NDVI 和梯田面积数据在 1980 年后才有遥感数据获取,因此, T_1 时段只分析汛期降雨特征和蒸发能力的影响, T_2 和 T_3 时段分析以上所有因素的影响,水库建设不直接影响地表径流的生成,只是对后期利用有影响,故没有分析水库对地表径流的敏感性。为消除不同影响因素的数量级差异,除 NDVI 外,其他影响因素数值进行归一化处理,所有数据处理为 0~1。

不同影响因素对径流的敏感的计算结果见表 3。 T_1 时段,地表径流对汛期降雨量的变化最敏感性,其次是汛期大雨量和暴雨量减少的影响,汛期蒸发能力对地表径流的影响最小; T_2 时段地表径流与梯田面积的变化敏感性最高,说明 T_2 时段梯田面积的迅速增加是导致地表径流减少的主要原因。随后敏感性由大到小依次是:汛期降雨 > 汛期雨强 > 植被质量 > 汛期蒸发能力。与 T_1 时段相比, T_2 时段最显著的特点是梯田面积的增加,由于梯田的蓄水能力,降水形成产流后蓄积在梯田里,很难汇集到河道,是该时段监测到的地表径流衰减的最主要原因。 T_3 时段汛期降水对地表径流影响最大,其次是植被质量的提高,相较 T_1 和 T_2 时段,该时段的水保工程以植被修复为主,汛期降水减少,而植被覆盖提高,意味着蒸发损失占降水的比例增大,这可能是 T_3 时段地表径流减少的主要原因,汛期雨强、汛期蒸发能力以及梯田的变化则是影响 T_3 时段地表径流量的次要原因。

表 3 不同影响因素对径流的敏感系数
Tab. 3 Sensitivity coefficients of different influencing factors to runoff

时段	敏感系数				
	ϵ_P	ϵ_I	ϵ_{ET}	ϵ_N^*	$\epsilon_{T_c}^*$
T_1	0.74	0.46	-0.21	—	—
T_2	0.84	0.63	-0.23	-0.38	-1.69
T_3	1.41	1.03	-0.25	-1.26	-0.64

注: * NDVI 和梯田面积来源于遥感影像,20 世纪 80 年代才有数据,故仅有 T_3 和 T_2 时段的结果。

5 结论及展望

大清河流域山区地表径流量仍处于持续衰减的

状态,经突变检验发现地表径流时间序列的突变点为 1983 年和 1997 年,根据突变点将径流系列分为 3 个阶段, T_2 时段和 T_3 时段的地表径流量分别较 T_1 时段地表径流量减少了 15% 和 60%。研究通过分析降水强度、年内分布、蒸发能力、水保工程等因素,讨论了区域地表径流衰减的原因,最后计算了径流对各个因素变化的敏感系数,得到不同时段各个因素影响的大小。主要研究结论如下:

(1) 降水对地表径流的影响主要在汛期,汛期降水减少、雨强减弱从源头减少了产生径流的水量,大清河流域山区汛期降水与地表径流衰减的趋势较为一致,而蒸发能力的增加,导致汛期实际蒸发损耗的增加,进一步加剧径流的衰减。

(2) 20 世纪 80 年来以来,区域的水土保持逐步开展,梯田建设和植被修复是当地主要的水保措施, T_2 时段梯田面积显著增加,时段末比时段初增加了 41%, T_3 时段植被质量较 T_2 时段显著提升,NDVI 从 0.651 增加到 0.692。水保工程导致植被冠层截留增加和土壤蓄水能力增强是区域 T_2 和 T_3 时段地表径流衰减的重要原因之一。

(3) 不同时段影响径流的主要因素也不同: T_1 时段汛期降水变化是影响径流的主要原因; T_2 时段梯田面积的大量增加,拦蓄降雨产流是地表径流减少的主要原因; T_3 时段汛期降水减少,而植被质量提高,蒸发占降水的比例增加导致产流量减少。

由于各个因素常耦合在一起共同发挥作用,定量计算各个因素的贡献极为困难,目前还没有成熟的理论、公式可用。例如:不同强度的降水条件,不同的植被类型、冠层厚度对降水的截留作用;梯田的蓄水作用以及区域蒸发能力的变化对产汇流的影响等。下一步将在小流域内开展综合监测试验,结合气象、水保、水文等多个领域的监测数据,分析径流形成各个环节的数据变化、总结影响机理,才能真实可靠的揭示径流衰减的原因。

参考文献(References):

- [1] 张建云,王国庆. 河川径流变化及归因定量识别[M]. 北京:科学出版社,2014. (ZHANG J Y, WANG G Q. Quantitative identification of river runoff variation and attribution[M]. Beijing: Science Press. 2014. (in Chinese))
- [2] 刘春蓁,占车生,曹建廷. 关于气候变化与人类活动对径流影响研究的评述[J]. 水利学报,2014,45(4): 379-385. (LIU C Z, ZHAN C S, CAO J T. Review on the influences of climate change and human activities on

- runoff[J]. Journal of Hydraulic Engineering. 2014, 45(4): 379-385 (in Chinese) DOI: 10. 13243/j. cnki. slxb. 2014. 04. 001.
- [3] 王浩, 王建华, 贾仰文. 海河流域水循环演变机理与水资源高效利用[M]. 北京: 科学出版社, 2016. (WANG H, WANG J H, JIA Y W. Mechanism of water cycle evolution and efficient utilization of water resources in Haihe River basin[M]. Beijing: Science Press. 2016. (in Chinese))
- [4] 张建云, 贺瑞敏, 齐晶, 等. 关于中国北方水资源问题的再认识[J]. 水科学进展, 2013, 24(3): 303-310. (ZHANG J Y, HE R M, QI J. A new perspective on issues in north China[J]. Advances in Water Science. 2013, 24(3): 303-310. (in Chinese) DOI: 10016791. 2013. 03. 030308.
- [5] 夏军, 石卫, 陈俊旭, 等. 变化环境下水资源脆弱性及其适应性调控研究: 以海河流域为例[J]. 水利水电技术, 2015, 46(6): 27-33. (XIA J, SHI W, CHEN J X. Study on vulnerability of water resources and its adaptive regulation under changing environment: A case of Haihe River basin[J]. Water Resources and Hydro-power Engineering. 2015, 46(6): 27-33. (in Chinese) DOI: 10. 3969/j. issn. 1000-0860. 2015. 06. 006.
- [6] 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: CNKI: SUN: SFXB. 0. 2017-08-003.
- [7] 刘春蓁. 气候变化对江河流域流量变化趋势影响研究进展[J]. 地球科学进展, 2007, 22(8): 777-783. (LIU C Z. The advances in studying detection of stream flow trend influenced by climate change[J]. Advances in Earth Science, 2007, 22(8): 13-19. (in Chinese) DOI: 10. 3321/j. issn: 1001-8166. 2007. 08. 002.
- [8] WIGBOUT M. Limitations in the use of double-mass curves[J]. Journal of Hydrology, 1973, 12(2): 132-138. DOI: 10. 1016/j. jhydrol/43944281.
- [9] 谢平, 许斌, 刘媛, 等. 水资源序列变异的时间尺度主因分析方法[J]. 水力发电学报, 2013, 32(6): 24-30. (XIE P, XU B, LIU Y, et al. Key factor analysis of alteration in the hydrological series on time scale[J]. Journal of Hydroelectric Engineering. 2013, 32(6): 24-30. (in Chinese) DOI: CNKI: SUN: SFXB. 0. 2013-06-006.
- [10] 党素珍, 董国涛, 蒋晓辉, 等. 气候变化和人类活动对泾河上游径流的影响[J]. 南水北调与水利科技, 2014, 12(4): 30-34. (DANG S Z, DONG G T, JIANG X H, et al. Impacts of climate change and human activities on runoff in the upper reaches of Jinghe River [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology. 2014, 12(4): 30-34. (in Chinese) DOI: 10. 13476/j. cnki. nsbdqk. 2014. 04. 007.
- [11] 张利茹, 贺永会, 唐跃平, 等. 海河流域径流变化趋势及其归因分析[J]. 水利水运工程学报, 2017, 8(4): 59-66. (ZHANG L R, HE Y H, TANG Y P, et al. Analysis of runoff change trend and its attribution in Haihe River basin[J]. Hydro-Science and Engineering, 2017, 8(4): 59-66. (in Chinese) DOI: 10. 16198/j. cnki. 1009-640X. 2017. 04. 009.
- [12] 刘艳丽, 张建云, 王国庆, 等. 气候自然变异在气候变化对水资源影响评价中的贡献分析: I. 基准期的模型与方法[J]. 水科学进展, 2012, 23(2): 147-155. (LIU Y L, ZHANG J Y, WANG G Q, et al. Evaluation on the influence of natural climate variability in assessing climate change impacts on water resources: I. Model and methodology in baseline period[J]. Advances in Water Science. 2012, 23(2): 147-155. (in Chinese) DOI: CNKI: 32. 1309. P. 20120224. 2003. 010.
- [13] 郭军庭, 张志强, 王盛萍, 等. 应用 SWAT 模型研究潮河流域土地利用和气候变化对径流的影响[J]. 生态学报, 2014, 34(6): 1559-1567. (GUO J T, ZHANG Z Q, WANG S P, et al. Applying SWAT model to explore the impact of changes in land use and climate on the stream flow in a watershed of northern China[J]. Acta Ecologica Sinica. 2014, 34(6): 1559-1567. (in Chinese) DOI: 10. 5846/stxb201304190746.
- [14] 杨柳, 刘梅冰, 陈莹, 等. 山美水库集水区径流模拟的日尺度 SWAT 模型[J]. 南水北调与水利科技, 2013 (B01): 3-5. (YANG L, LIU M B, CHEN Y, et al. Daily runoff simulation in Shanmei reservoir catchment based on SWAT model [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology 2013 (B01): 3-5. (in Chinese) DOI: 1672-1683(2013)001-0003-03.
- [15] 徐丽娟. 人类活动影响下大清河流域降雨径流关系特征分析[J]. 南水北调与水利科技, 2011, 9(2): 73-76. (XU L J. Analysis on dynamic feature of the rainfall-runoff relationship in the Daqing River basin under the influence of human activities[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology 2011, 9(2): 73-76. (in Chinese) DOI: 10. 3724/SP. J. 1201. 2011. 02073.

- [16] 穆文彬,李传哲,刘佳,等. 大清河流域水循环影响因素演变特征分析[J]. 水利水电技术, 2017, 48(2): 4-11. (MU W B, LI C Z, LIU J, et al. Analysis on evolution characteristics of water cycle impacting factors of Daqing River watershed [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2017, 48(2): 4-11. (in Chinese)) DOI:10.13928/j.cnki.wrahe.2017.02.002.
- [17] 陈占寿,乔爱芳. 几种水文序列变异点诊断方法的性能比较[J]. 青海师范大学学报(自然科学版), 2014(3): 1-5. (CHEN Z S, QIAO A F. Comparison on the performance of several hydrological time series change point testing methods[J]. Journal of Qinghai Normal University 2014(3): 1-5. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1001-7542.2014.03.001.
- [18] SCHAAKE J C, WAGGONER P E. From climate to flow. [J]. Climate Change and US Water Resources, 1990.
- [19] SANKARASUBRAMANIAN A, VOGEL R M, LIMBRUNNER J F. Climate elasticity of streamflow in the united states[J]. Water Resources Research, 2001, 37(6): 1771-1781. DOI:10.1029/2000WR900330.
- [20] ZHENG H X, ZHANG L, ZHU R R, et al. Responses of streamflow to climate and land surface change in the headwaters of the Yellow River basin. [J]. Water Resources Research, 2009, 45(7): 641-648. DOI: 10.1029/2007WR006665.
- [21] 曹洁萍,迟道才,武立强,等. Mann-Kendall 检验方法在降水趋势分析中的应用研究[J]. 农业科技与装备, 2008(5): 35-37. (CAO J P, CHI D C, WU L Q, et al. Mann-Kendall examination and application in the analysis of precipitation trend[J]. Agricultural Science & Technology and Equipment. 2008(5): 35-37. (in Chinese)) DOI:10.3969/j.issn.1674-1161.2008.05.013.
- [22] 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 watershed evapotranspiration based on the Budyko hypothesis[D]. Beijing: Tsinghua University. 2007. (in Chinese))
- [23] YANG H, YANG D, LEI Z, et al. New analytical derivation of the mean annual water-energy balance equation[J]. Water Resources Research, 2008, 44(3): 1-9. DOI:10.1029/2007wr006135.
- [24] 李仕华. 梯田水文生态及其效应研究[D]. 西安:长安大学, 2011. (LI S H. Research on hydro-ecology of terrace and its effect[D]. Xi'an: Chang'an University. 2011. (in Chinese)) DOI:10.7666/d.Y2132861.
- [25] 符素华,吴敬东,段淑怀,等. 北京密云石匣小流域水土保持措施对土壤侵蚀的影响研究[J]. 水土保持学报, 2001, 15(2): 21-24. (FU S H, WU J D, DUAN S H, et al. Effect of soil and water conservation practice on soil erosion at Shixia watershed[J]. Journal of Soil and Water Conservation. 2001, 15(2): 21-24. (in Chinese)) DOI:10.3321/j.issn:1009-2242.2001.02.006.
- [26] 景国臣,陈棣. 典型黑土区水土保持林冠层截留降雨分析[J]. 水土保持应用技术, 2015(6): 1-3. (JING G C, CHEN L. Analysis of soil and water conservation canopy interception rainfall in typical black soil area [J]. Technology of Soil and Water Conservation. 2015(6): 1-3. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1673-5366.2015.06.01.
- [27] 宋文龙,杨胜天,路京选,等. 黄河中游大尺度植被冠层截留降水模拟与分析[J]. 地理学报, 2014, 69(1): 80-89. (SONG W L, YANG S T, LU J X, et al. Simulation and analysis of vegetation interception at a large scale in the middle reaches of Yellow River[J]. Acta Geographica Sinica. 2014, 69(1): 80-89. (in Chinese)) DOI:10.11821/dlxb201401008.

Influencing factors of surface runoff attenuation in mountainous areas of Daqing River basin

WANG Qingming¹, JIANG Shan¹, LI Sen², ZHANG Yue³, HE Guohua¹, ZHAO Yong¹,
LI Haihong¹, ZHU Yongnan¹, ZHAI Jiaqi¹, WANG Lizhen¹

(1. State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River basin, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China; 2. Hebei Institute of Water Resources, Shijiazhuang 050057, China; 3. General Institute of Water Resources and Hydropower Planning and Design, Ministry of Water Resources, Beijing 100120, China)

Abstract: Runoff attenuation has been a serious threat to the natural ecological and social production of the river basins, and it was usually attributed to climate change and human activities. The research methods were generally divided into two types, one was based on statistical data to identify the impact of climate factors and human activities factors by the difference of the relationship between precipitation and runoff in two periods. The other approach was based on the hydrological model that simulate

the difference in runoff under different climate conditions and different surface conditions to distinguish the effect of climate and human activities. Due to the limitation of data acquisition, there is no mature attribution method for the contribution of vegetation, soil and water conservation projects and other factors to runoff attenuation. Therefore, Daqing River basin was taken as the study area to analyze the influence mechanisms of different factors on runoff and investigate the contribution of each factor to runoff attenuation.

Runoff changes at three typical hydrological stations in the Daqing River basin were analyzed, and the abrupt change of surface runoff was analyzed using the Pettitt mutation test. The first abrupt change occurred in 1983, and the second abrupt change occurred in 1997. Thus, the runoff series from 1961 to 2016 was divided into three periods (T_1 , T_2 and T_3) based on the above mentioned two mutation points. Additionally, the evolution patterns of rainfall in flood season and non-flood season, potential evapotranspiration, mountain water conservation and reservoir construction were analyzed in the three periods, respectively. Sensitivity analysis method was applied to evaluate the contribution of each influencing factor to runoff attenuation in the Daqing River basin.

The results showed that there has no significant change in the rainfall in the three periods in the Daqing River basin, but the rainfall decreases in flood season and increases in non-flood season, which is one of the important reasons for the decrease of runoff. In the mountainous area of the Daqing River basin, the heavy rainfall showed a decreasing trend, while the medium and small rainfall showed an increasing trend. The rainfall intensity in the mountainous area of the Daqing River basin gradually decreases, which leads to the decrease of storm runoff. The potential evaporation in the Daqing River basin decreases and then increases during the annual, flood and non-flood seasons. The increase of evapotranspiration capacity in the flood season during the T_3 period means the increase of regional actual evapotranspiration and the corresponding decrease of runoff from precipitation decline. The annual maximum NDVI in Daqing Mountain has shown an increasing trend since the 1980 s, with an average annual growth rate of 0.002 3. Vegetation conditions have become better and more precipitation was retained by the canopy and evaporated into the atmosphere, thus reducing the runoff formed by precipitation. The reservoirs led to an increase in evaporation, with evaporation loss of 37.96 million m^3 and 36.59 million m^3 from the reservoirs in the T_2 and T_3 periods, respectively.

In conclusion, the influence of precipitation on surface runoff in mountainous area of the Daqing River basin is mainly reflected in the flood season. The decrease of precipitation and the weakening of rain intensity in the flood season reduced runoff, while the increase of evaporation capacity leads to the increase of actual evaporation loss in the flood season, which further aggravates the attenuation of runoff. The increased interception of vegetation canopy and the enhancement of soil water storage capacity caused by the water conservation project were important reasons for the attenuation of surface runoff in the T_2 and T_3 periods. The change of precipitation in flood season in the T_1 period is the main reason for affecting runoff. The large increase of terrace area in the T_2 period is the main reason for the decrease of surface runoff. In the T_3 period, precipitation decreased in flood season and the increase of the proportion of evaporation to precipitation due to the improvement of vegetation quality lead to the decrease of runoff.

Key words: mountainous areas of the Daqing River basin; surface runoff; attenuation; influence factors; sensitivity