

引黄入冀补淀工程引黄口径流变化及成因分析

孙妍¹, 王秀茹²

(1. 海河水利委员会海河流域水土保持监测中心站, 天津 300170;
2. 北京林业大学水土保持学院, 北京 100083)

摘要:研究“引黄入冀补淀工程”引黄口重点断面的径流情势变化及其成因,为引黄口重点断面水资源管理和促进该工程建设生态效益的发挥提供参考。采用水文变异指标法/变化范围法(IHA/RVA法),对1958-2005年工程建设影响前、2006-2016年工程建设影响后2个阶段的33个单项水文指标及改变度进行对比分析;基于6种Budyko假设公式,量化分析气候变化和人类活动对径流改变的贡献率。结果显示:8项单项水文指标达到67%以上的高度改变,整体径流情势改变度达到61.72%;气候变化和人类活动对径流变化的贡献率平均值分别为41.79%和58.21%。人类活动是影响“引黄入冀补淀工程”引黄口重点断面径流情势变化的主要因素。
关键词:水文变异指标法/变化范围法;径流变化;Budyko假设公式;气候变化;人类活动
中图分类号:TV211.2 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-3075(2020)06-0019-08

“引黄入冀补淀工程”(以下简称“引黄工程”)自河南省境内黄河下游渠村闸口引水,主输水线路总长482 km,输水线路途径河南、河北两省6市、26个县(市、区),穿卫河后入河北省境内,最终到达雄安新区东南部的白洋淀,其中,河南省境内长84 km,河北省境内长398 km。“引黄工程”在渠村引黄闸口重点断面处总引水设计流量为150.00 m³/s,输水总干渠渠首设计流量为100.00 m³/s,入河北省界流量为61.40 m³/s(王伟等,2015)。该工程将为保障雄安新区水资源供给发挥重要作用(姜鲁光等,2017),同时可能也会对引黄口重点断面径流情势产生一定的影响。

国内外学者多采用IHA/RVA法(Richter et al,1996;1997)分析和研究不同地区水利工程建设对河流径流情势的影响。薛联青等(2017)应用该法研究水利工程建设前后塔里木河生态径流情势的变化;Mwedzi等(2016)采用该方法分析了津巴布韦境内Manyame流域建坝后不同断面的水文指标改变程度。

多项研究指出,径流情势的改变往往与气候变化和人类活动密切相关(Liu et al,2016),近年来学

者主要采取降雨—径流多元线性经验模型、累积量斜率变化分析、多种水文模型和弹性系数法等方法对国内外不同流域径流变化原因进行相应分析(Zhang et al,2016;代晓颖等,2018;赖天锒等,2016;夏军等,2017),其中,Budyko理论的弹性系数法对历史数据要求较低,具有应用简易和可行性强等优势(夏军等,2017),该方法也在黄河流域径流情势变化和归因分析中得到广泛使用,经分析具备合理性(牟夏等,2017;李二辉等,2014;赵广举等,2012)。

本文以黄河下游“引黄工程”引黄口重点断面作为研究对象,选择1958-2005年(以下简称T_A阶段)和2006-2016年(以下简称T_B阶段)2个时段,分别作为工程建设影响前后的2个研究阶段;运用IHA/RVA方法对工程建设前后、共计59年径流数据进行33项单项水文指标和整体水文指标改变度的定量评估;基于6种Budyko假设公式,定量估算气候变化和人类活动对“引黄工程”引黄口重点断面2阶段径流情势变化的贡献率,以期对引黄口重点断面水资源管理和促进该工程建设生态效益的发挥提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区域

研究对象为黄河下游“引黄工程”渠村引黄口重点断面,典型水文站为高村水文站(图1),该水文站距离渠村“引黄工程”入口处约7 km,控制面积为

收稿日期:2018-12-27
基金项目:水利部公益性行业科研专项(201401001)。
作者简介:孙妍,1994年生,女,助理工程师,硕士,主要从事水土保持监测方面研究。E-mail:sunshuishui@126.com
通信作者:王秀茹,1957年生,主要从事流域管理、水资源及农田水利等研究。E-mail:wang-xr@163.com

734 146 km²,其数据能够较好地反映“引黄工程”建设前后的水文情势变化。研究断面区域多年平均降雨量 561.3 mm,集中于 7 - 10 月,占年降雨量的

70%以上;径流量集中在 7 - 10 月,占年径流量的 50%~80%。该地属北温带大陆季风气候,多年平均气温 13.5℃。

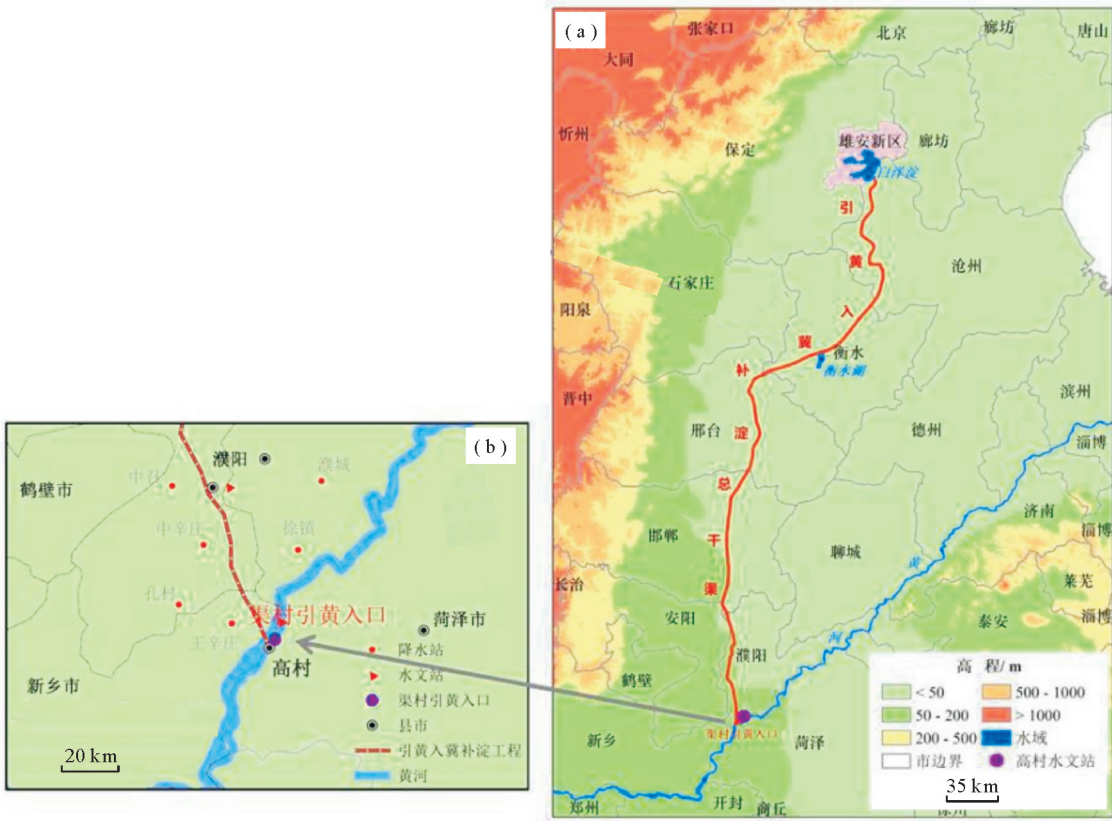


图 1 引黄入冀补淀工程及引黄口位置示意

Fig.1 Schematic diagram of the Yellow River Diversion Project and the research section

1.2 数据及来源

本文收集高村水文站实测日流量、降水量和潜在蒸发量数据进行分析,数据来源于黄河流域水文年鉴、黄河水资源公报和黄河网(<http://www.yellowriver.gov.cn/>)。

1.3 研究方法

1.3.1 IHA/RVA 法 水文变异指标法(Index of Hydrologic Alteration, IHA)(Richter et al, 1996)涵盖了月均流量、年均极值、年极端流量时间、高低流量频率及历时和流量变化率与频率 5 类 33 个水文指标,能够较全面分析流域的径流情势。

变化范围法(Range of Variability Approach, RVA)(Richter, 1997)用于定量分析单个水文指标的改变度,该法将未受干扰状态下各指标发生频率的 75%及 25%划定为该指标的 RVA 阈值,并量化其改变度,公式如下:

$$D_i = \left| \frac{N_i - N_e}{N_e} \right| \times 100\% = \left| \frac{N_i - rN_i}{N_e} \right| \times 100\%$$

①

式中: D_i 为单个指标改变度; N_i 为第 i 个指标受影响后仍落入 RVA 阈值范围内的年数; N_e 为受影响后落入 RVA 阈值范围内的预期年数; r 为受影响前指标落入 RVA 阈值范围内的比例,取值 50%; N_i 为指标受影响后的总年数。

Shiau 等(2004)提出的水文指标整体径流情势改变度计算公式如下:

$$D = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n D_i^2}$$

②

式中: D 为整体水文指标改变度, n 为水文指标个数。

$0 \leq (D_i)$ 、 $D < 33\%$ 当为低度改变, $33 \leq (D_i)$ 、 $D < 67\%$ 为中度改变, $67 \leq (D_i)$ 、 $D < 100\%$ 为高度改变。

1.3.2 径流情势变化定量分析 流域的径流情势变化主要由气候变化和人类活动两种因素共同作用导致(刘波等, 2018), 计算公式:

$$\Delta Q = \Delta Q_C + \Delta Q_H$$

③

$$\eta_C = \Delta Q_C / \Delta Q \times 100\%$$

④

$$\eta_H = \Delta Q_H / \Delta Q \times 100\% \tag{5}$$

式中: ΔQ 为影响前后径流的变化总量; ΔQ_C 、 ΔQ_H 分别为气候变化、人类活动引起的径流变化量; η_C 、 η_H 分别表示气候变化、人类活动对径流变化的贡献率。

采用弹性系数法 (Schaaake, 1990), 根据流域长时段水量平衡公式 ($Q = P - Ea$)、干燥指数 ($\Phi = E_0/P$) 计算公式及 6 种基于 Budyko 假设的公式 (Budyko, 1974), 计算 ΔQ_C 和 ΔQ_H , 如下式:

$$\Delta Q_C = \epsilon_P \frac{Q}{P} \Delta P + \epsilon_{E_0} \frac{Q}{E_0} \Delta E_0 \tag{6}$$

$$\epsilon_P = 1 + \frac{\phi F'(\phi)}{1 - F(\phi)}, \text{ 且 } \epsilon_{E_0} = 1 - \epsilon_P \tag{7}$$

式中: Q 、 E_0 、 P 分别为多年平均径流量、潜在蒸散发和降水量; ΔE_0 和 ΔP 分别为影响前后潜在蒸散发和降水的变化; ϵ_P 和 ϵ_{E_0} 分别为径流对降水和潜在蒸散发的弹性指数;6 种基于 Budyko 假设的公式的 $F(\Phi)$ 和 $F'(\Phi)$ 公式参考相关文献, 具体表达式见表 1 (夏军等, 2017)。

表 1 基于 Budyko 假设的 6 种常用 $F(\Phi)$ 及 $F'(\Phi)$ 表达式
Tab.1 Six commonly used forms of $F(\Phi)$ and $F'(\Phi)$ based on the Budyko hypothesis

序号	$F(\Phi)$	$F'(\Phi)$	文献来源
1	$(1+\omega\Phi)/(1+\omega\Phi+1/\Phi), \omega=1$	$(\omega+2\omega/\Phi-1+1/\Phi^2)/(1+\omega\Phi+1/\Phi)^2$	Zhang et al, 2001
2	$1+\Phi-(1+\Phi^a)^{1/a}, a=2.5$	$1-(1+\Phi^a)^{1/a-1}\Phi^{a-1}$	傅抱璞, 1981
3	$1-e^{-\Phi}$	$e^{-\Phi}$	Schireiber, 1904
4	$[\Phi \tanh(1/\Phi)(1-e^{-\Phi})]^{0.5}$	$0.5[\Phi \tanh(1/\Phi)(1-e^{-\Phi})]^{-0.5} \times [\tanh(1/\Phi) - \text{sech}^2(1/\Phi)/\Phi(1-e^{-\Phi}) + \Phi \tanh(1/\Phi)e^{-\Phi}]$	Budyko, 1948
5	$(1+\Phi^{-2})^{-0.5}$	$1/[\Phi^3(1+(1/\Phi)^2)^{1.5}]$	Pike, 1964
6	$\Phi \tanh(1/\Phi)$	$\tanh(1/\Phi) - 4/[\Phi(e^{-1/\Phi} + e^{1/\Phi})^2]$	Ol'dekop, 1911

2 结果与分析

2.1 IHA 水文指标改变程度

本文划分 T_A 阶段 (1958 - 2005 年) 为工程建设影响前阶段, 满足 IHA/RVA 法影响前资料长度不少于 20 年的要求 (段唯鑫等, 2016)。运用 IHA/RVA 方法, 计算得到 T_A 阶段各水文指标阈值和 T_B 阶段的单项水文改变度如表 2。根据式 (2) 整体径流情势改变度公式计算可知, “引黄工程” 渠村引黄口重点断面建设整体水文改变度为 61.72%。

2.1.1 月均流量变化 “引黄工程” 引黄口重点断面的汛期集中在 7 - 10 月, 这一时期河道流量变化快且 RVA 阈值范围也明显加大; 非汛期为 1 - 2 月、12 月, 这一时期流量变化相对较小, 且 RVA 阈值范围也明显减弱; 其余为汛前期和汛后期阶段。

下游河川的月径流特征变化如图 2。汛期月均流量减少, 由 8 月份的 $2\,112.31\text{ m}^3/\text{s}$ 减少至 $896.99\text{ m}^3/\text{s}$ ($P < 0.05$), 8 - 10 月减少幅度范围为 57.54% ~ 65.14% ($P < 0.05$); 其他除 2、6 月外月均流量均发生不同程度减少; 非汛期 12 月减少量最大为 $114.78\text{ m}^3/\text{s}$, 远小于汛期降幅, 说明工程建设的削峰拦洪作用对汛期径流的影响更大。汛期中 9 - 10 月月均流量均减少且达到中度变化, 可能会降低河流流

量的稳定性, 进一步干扰水生生物的繁殖行为 (薛联青等, 2017)。

2.1.2 年均极值流量变化 引黄口重点断面年均极值流量变化趋势明显 (图 3), 年均最大流量均减少 ($P < 0.05$); 年均最小流量除年最小 90 d 流量外其余均增加, 其中最小 1、3、7 d 流量增加显著 ($P < 0.05$), 增幅分别达到 112.69%、110.26% 和 93.96%, 且均为中度改变。工程建设影响后年均流量极值的变化表现在: 极小值流量 100% 的指标达到中度变化, 极大值流量 60% 的指标达到中度或高度变化。“引黄工程” 的运行明显影响了河流原有的流量极值变化过程, 整体达到 62.12% 的中度改变。

2.1.3 年极端流量出现时间变化 引黄口重点断面年极端流量发生时间均达到高度变化, 具体表现为: 最小流量出现时间从 5 月下旬推迟到 6 月中旬; 最大流量出现时间从 8 月下旬提前到 7 月上旬。极端流量发生时间与生物的产卵和繁殖生息密切相关, 水文相位和变幅产生波动将影响产生“滞冷” 和“滞温” 现象 (薛联青等, 2017), 使鲫、鲤、鲢等鱼类为寻求适宜的温度而更改产卵繁殖时间 (朱国清等, 2012)。“引黄工程” 建设对极端流量出现时间达到的高度改变, 可能会影响引水区鲫、鲤、鲢等鱼类的行为机制、繁殖进化和改变其生活周期。

表 2 T_A/T_B 阶段水文指标 RVA 结果

Tab.2 Results of hydrological RVA index in stages T_A and T_B

水文指标		T _A 阶段		RVA 阈值		T _B 阶段	
		均值	下限	上限		均值	RVA 改变度/%
月均 流量/ m ³ · s ⁻¹	1 月	475.84	323	615		441.12	27.27(L)
	2 月	415.26	251	494		466.33	9.09(L)
	3 月	872.76	579	1140		862.45	81.81(H)
	4 月	868.30	677	961		810.23	9.09(L)
	5 月	793.20	480	970		694.59	9.09(L)
	6 月	612.00	250	789		1414.84	63.64(M)
	7 月	1431.66	767	1610		1293.89	63.64(M)
	8 月	2112.31	1100	2940		896.99	27.27(L)
	9 月	2066.25	1060	2920		720.28	63.64(M)
	10 月	1754.20	557	2400		699.38	45.45(M)
	11 月	1068.00	559	1410		579.28	27.27(L)
	12 月	668.27	439	819		553.50	45.45(M)
年均 流量 极值/ m ³ · s ⁻¹	最小 1d	103.31	30.8	176		219.73	63.64(M)
	最小 3d	120.99	10.27	194.33		254.39	63.64(M)
	最小 7d	140.65	29.91	202.71		272.81	63.64(M)
	最小 30d	278.96	182.46	373.67		314.77	63.64(M)
	最小 90d	576.26	418.83	679.38		479.46	45.45(M)
	最大 1d	6804.64	4660	7390		3683.64	81.81(H)
	最大 3d	5771.55	3723.33	6713.33		3406.67	27.27(L)
	最大 7d	4986.79	3494.29	5811.43		3282.73	27.27(L)
	最大 30d	3738.98	2670.33	4579		1943.00	100.00(H)
	最大 90d	2811.28	1838.59	3525		1328.37	63.64(M)
	零流量天数	0.57	0	0		0	45.45(M)
	基流指数	0.76	0.11	1.4		2.48	100.00(H)
年极端流量	最小流量日	143.46	49	187		159.64	81.81(H)
出现时间/d	最大流量日	244.79	215	266		192.09	81.81(H)
高低流 量频率/% 及历时/d	低脉冲数量	91.25	57	118		138.00	45.45(M)
	高脉冲数量	91.07	47	126		20.73	100.00(H)
	低流量历时	13.03	7.82	15.1		22.95	9.09(L)
	高流量历时	19.3	6.38	21.8		9.99	63.64(M)
流量变化 率与频率/ m ³ · s ⁻¹ · d ⁻¹	涨幅率	8.26	5.86	9.37		4.15	63.64(M)
	降幅率	- 5.47	- 6.37	- 4.4		- 3.31	63.64(M)
	逆转次数	127.93	117	135		158.55	100.00(H)

注:L、M、H 分别代表该单项指标发生低度改变、中度改变和高度改变。

Note: L, M and H denote the light, medium and large change of the single index, respectively.

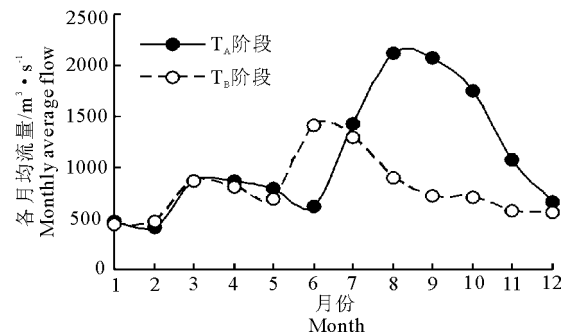


图 2 T_A、T_B 阶段月均流量对比

Fig.2 Comparison of average monthly flows during stages T_A and T_B

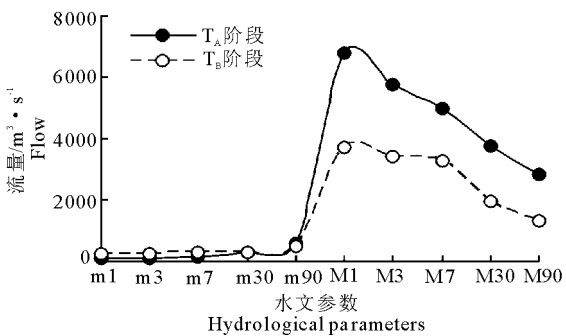


图 3 T_A、T_B 阶段年均流量极值对比

Fig.3 Comparison of the average annual runoff extremes during stages T_A and T_B

2.1.4 高低流量频率及历时变化 引黄口重点断面的年低流量发生次数增加了 51.23%，持续历时也增长了 76.14%；低流量次数的增加和其历时的增长，可能会降低河床的物质运输和对水生生物漫滩

生境的支持能力;同时,年高流量发生次数减少了 77.24%,达到 100% 的高度改变,其持续历时也减少了 48.23%;高低流量频率及历时的变化会影响河流生态系统的组成、结构或功能(Chen,2012),以上变化可能会使部分河滩干湿交替的现象频现,进一步影响土壤水分含量和改变流域水生生物的生境。

2.1.5 流量改变率及频率变化 引黄口重点断面流量平均增加率以 49.78% 的幅度减少,流量平均减少率以 39.43% 的幅度增加,且均达到中度改变,使得流量允许变动范围减小;年流量逆转次数增加明显,且达到高度改变水平;说明工程建设导致流量的波动状态加剧。生物承受外界变化的能力有限,流量变化率与频率指标决定着河流的涨落规律和水文动态特征,进一步影响水生生物的正常生长(杜河清等,2011)。2006 年以后,流量变动范围的减小将不利于河岸带生物的生存和生长,而频繁流量波动也会破坏动植物生境的稳定性,阻碍水生生物生长

(薛联青等,2017)。

2.2 径流情势变化的归因分析

年径流、降水量、蒸散发量变化如图 4。引黄口重点断面的年径流变化并不稳定,总体呈现明显下降趋势,并伴随一定幅度的震荡。在 T_A 和 T_B 阶段期间,年径流量以 $2.39 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ 的速率递减;与 T_A 阶段相比, T_B 阶段年径流量减少约 36.18%,发生了较为显著的减少。降水量波动较为剧烈,而线性趋势分析显示其多年间降低幅度并不明显;与 T_A 阶段相比, T_B 阶段降水量减少约 6.86%,减少幅度很小。蒸散发量有比较明显的减少,在 T_A 和 T_B 阶段期间以 $4.09 \text{ mm}/\text{a}$ 的速率递减,且在 T_B 阶段减少约 31.56%。

采用弹性系数法在年尺度上定量分析气候变化和人类活动对径流情势变化的影响。根据表 1 计算的弹性系数和依据公式③~⑦计算的 ΔQ_C 、 ΔQ_H 、 η_C 、 η_H 结果如表 3。

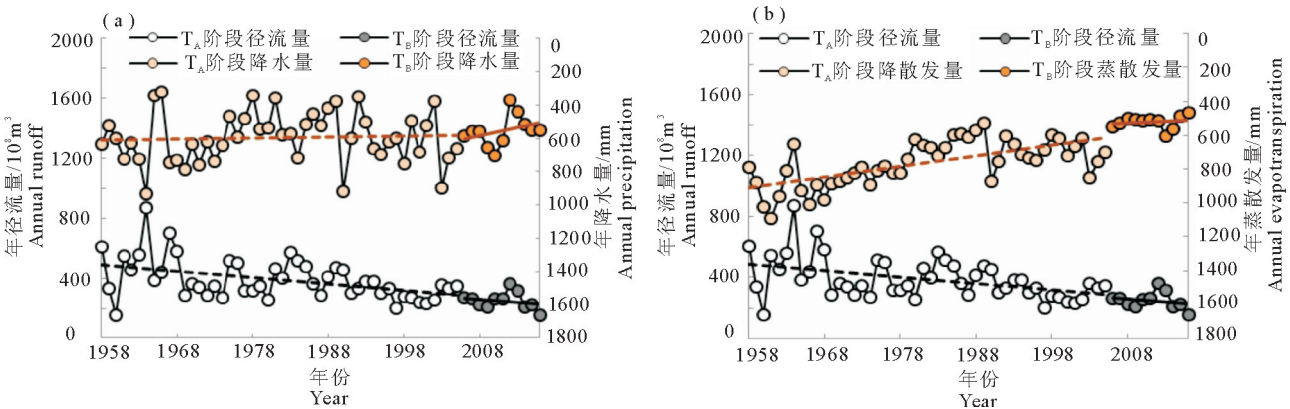


图 4 T_A 和 T_B 阶段引水流域年径流量及降水变化(a)及蒸散发变化(b)
Fig.4 Variation of annual runoff with annual precipitation (a) and annual evapotranspiration (b) in the Qucun section (1958 – 2016)

表 3 气候变化和人类活动影响径流情势计算结果

Tab.3 Quantitative evaluation effects of climate change and human activities on runoff regime using the climate elasticity method

指标	Zhang	Fu	Schreiber	Budyko	Turc-Pike	Ol'dekop	平均值
εp	2.13	2.18	2.22	2.36	2.37	2.58	2.31
$\Delta Q_C/\text{mm}$	-54.42	-55.79	-56.69	-60.26	-60.60	-65.93	-58.95
$\Delta Q_H/\text{mm}$	-86.65	-85.28	-84.38	-80.81	-80.47	-75.14	-82.12
$\eta_C/\%$	38.58	39.55	40.19	42.72	42.96	46.74	41.79
$\eta_H/\%$	61.42	60.45	59.81	57.28	57.04	53.26	58.21

径流对降水的弹性系数为 2.13~2.58,均值 2.31。气候变化对径流变化的贡献率为 38.58%~46.74%,均值 41.79%;人类活动对径流变化的贡献率为 53.26%~61.42%,均值 58.21%。

人类活动对引黄入冀补淀工程引黄口重点断面建设前后径流减少的影响要高于气候变化产生的影

响。这与杨作升等(2008)研究得到的分析结果具有一致性。

姚文艺等(2011)指出,2000 年以来的近 10 年里,黄河中游实施水利措施和水土保持措施导致的减水量占比高达 66.4%;截至 2009 年黄河流域已修建了大、中型水库共计 184 座(赵广举等,2012),各

类水利工程建设和水土保持活动是造成黄河流域径流情势变化的重要人类活动因素,这些水库建设在调控和优化黄河水资源利用效率的同时,也改变了黄河不同研究流域径流的年内分配和天然规律。王怀柏等(2011)研究认为刘家峡和龙羊峡水库联动、小浪底水库的运行均对下游径流产生调节作用;李文文等(2014)在针对黄河水沙突变特征的分析中也指出,人类活动影响占据主导影响。但有研究认为上述人类活动对于黄河的调控效益也毋庸置疑,如Sun等(2013)研究认为黄河防洪体系的建设等工程优化了下游流域的水沙情势和水沙调度模式;王怀柏等(2011)认为,流域内的淤地坝建设和农田灌溉等活动在不同程度上拦蓄了部分区间产流,起到了改善区域的水量分配和水量平衡状态的作用。

本研究得出人类活动对“引黄工程”引黄口重点断面区径流变化贡献率为53.26%~61.42%,初步推算该区域水利工程建设和水土保持活动等人类活动,对引黄口径流情势高度改变造成了主要影响,这与过往研究结论一致。应考虑人类活动对研究区域的生态促进、水沙调度、水量调控、水力发电等多方面功能,以积极促进水生态效益的发挥。

3 结论

本文分别采用IHA/RVA和6种基于弹性系数法的Budyko假设公式,对“引黄入冀补淀工程”引黄口重点断面建设前后两阶段的径流情势改变度进行了定量评价,并对其成因进行分析,结论如下:

(1)“引黄工程”引黄口重点断面年径流量呈显著减小趋势,相较1958—2005年的建设影响前阶段,2006年后“引黄工程”建设影响后33个水文指标中8项指标达到高度变化;基于RVA法得到的径流情势改变度为61.72%,整体改变度值临近中度改变临界值(67%)。

(2)气候变化和人类活动对“引黄工程”引黄口重点断面径流显著减小的贡献率平均值分别为41.79%和58.21%,人类活动是影响引黄口重点断面径流情势产生变化的主要因素。

参考文献

代晓颖,许有鹏,林芷欣,等,2018.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,27(6):1279—1286.
杜河清,王月华,高龙华,等,2011.水库对东江若干河段水文情势的影响[J].武汉大学学报(工学版),44(4):466—470.

段唯鑫,郭生练,王俊,2016.长江上游大型水库群对宜昌站水文情势影响分析[J].长江流域资源与环境,25(1):120—130.
傅抱璞,1981.论路面蒸发的计算[J].大气科学,5(1):23—31.
赖天程,张强,张正浩,等,2016.人类活动与气候变化对东江流域径流变化贡献率定量分析[J].中山大学学报(自然科学版),55(4):136—145.
刘波,陈刘强,周森,等,2018.长江上游重庆段径流变化归因分析[J].长江流域资源与环境,27(6):1333—1341.
李二辉,穆兴民,赵广举,2014.1919—2010年黄河上中游区径流量变化分析[J].水科学进展,25(2):155—163.
李文文,傅旭东,吴文强,等,2014.黄河下游水沙突变特征分析[J].水力发电学报,33(1):108—113.
牟夏,刘强,平凡,等,2017.1960—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),53(4):465—471.
姜鲁光,吕佩忆,封志明,等,2017.雄安新区土地利用空间特征及起步区方案比选研究[J].资源科学,39(6):991—998.
王怀柏,赵淑饶,张家军,等,2011.1950—2010年黄河径流情势变化特点[J].人民黄河,33(12):16—18.
王伟,申黎平,苏卫涛,2015.引黄入冀补淀工程关键问题设计浅议[J].河南水利与南水北调,10(1):35—36.
薛联青,张卉,张洛晨,等,2017.基于改进RVA法的水利工程对塔里木河生态水文情势影响评估[J].河海大学学报(自然科学版),45(3):189—196.
夏军,马协一,邹磊,等,2017.气候变化和人类活动对汉江上游径流变化影响的定量研究[J].南水北调与水利科技,15(1):1—6.
姚文艺,徐建华,冉大川,等,2011.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:56—62.
杨作升,李国刚,王厚杰,等,2008.55年来黄河下游逐日水沙过程变化及其对干流建库的响应[J].海洋地质与第四纪地质,28(6):9—18.
赵广举,穆兴民,田鹏,等,2012.近60年黄河中游水沙变化趋势及其影响因素分析[J].资源科学,34(6):1070—1078.
朱国清,赵瑞亮,胡振平,等,2012.小浪底水库调水调沙对黄河中游鱼类及生态敏感区的影响[J].水生态学杂志,33(5):7—12.
Budyko M I,1948. Evaporation under natural conditions[M]. Leningrad: Gidrometeorizdat.
Budyko M I,1974. Climate and Life[M]. San Diego, CA: Academic.
Chen He,2012. Assessment of hydrological alterations from 1961 to 2000 in the Yarlung Zangbo River, Tibet[J]. Eco hydrology & Hydrobiology,12(2):93—103.

- Liu J, Zhang Q, Singh V P, et al, 2016. Contribution of multiple climatic variables and human activities to streamflow changes across China[J]. *Journal of Hydrology*, 545: 145 – 162.
- Mwedzi T, Katiyo L, Mugabe F T, et al, 2016. A spatial assessment of streamflow characteristics and hydrologic alterations, post dam construction in the Manyame catchment, Zimbabwe[J]. *Water S A*, 42 (2): 194 – 202.
- Ol'dekop E M, 1911. On evaporation from the surface of river basins[J]. *Transactions on meteorological observations*, University of Tartu, 4: 200.
- Pike J G, 1964. The estimation of annual runoff from meteorological data in tropical climate[J]. *Journal of Hydrology*, 2: 116 – 123.
- Richter B D, Baumgartner J V, Powell J, et al, 1996. A method for assessing hydrologic alteration within ecosystems [J]. *Conservation Biology*, 10(4): 1163 – 1174.
- Richter B D, 1997. How much water does a river need? [J]. *Freshwater Biology*, 37(1): 231 – 249.
- Schaake J C, 1990. From Climate to Flow, in *Climate Change and US Water Resources*[M]. New York: John Wiley,
- Schreiber P, 1904. über die Beziehungen zwischen dem Niederschlag und der Wasserführung der Flüsse in Mitteleuropa[J]. *Zeitschrift für Meteorologie*, 21 (10): 441 – 452.
- Shiau J T, WU F C, 2004. Feasible diversion and in stream flow release using range of variability approach [J]. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 130(5): 395 – 404.
- Sun T, Feng M L, 2013. Multistage analysis of hydrologic alternations in the Yellow River [J]. 29: 991 – 1003.
- Yang T, Zhang Q, Chen Y D, et al, 2008. A spatial assessment of hydrologic alteration caused by dam construction in the middle and lower Yellow River, China [J]. *Hydrological Processes*, 22: 3829 – 3843.
- Zhang L, Hickel K, Dawes W, et al, 2001. Response of mean annual evapotranspiration to vegetation change at catchment scale [J]. *Water Resources Research*, 37: 701 – 708.
- Zhang Q, Liu J Y, Singh V P, et al, 2016. Evaluation of impacts of climate change and human activities on stream flow in the Poyang Lake basin, China [J]. *Hydrological Processes*, 30: 2562 – 2576.

(责任编辑 张俊友 郑金秀)

Changes in Runoff and Driving Force Analysis in the Key Section
of the Yellow River Diversion Project

SUN Yan¹, WANG Xiu-ru²

(1. Central Station for Soil and Water Conservation Monitoring of Haihe Water
Conservancy Commission, Tianjin 300170, P.R.China;

2. College of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, P.R.China)

Abstract: The “Water diversion project from the Yellow River to Hebei Province” is important for ensuring the water supply in the Xiong'an area, and impacts runoff in a key section of the water diversion project. The objectives of this study were to investigate changes in the runoff regime and identify the driving forces associated with construction of the Yellow River Diversion Project. The results provide a reference for the water resource management that fully accounts for the benefits provided by water resources. A total of 33 hydrological indices and the overall runoff situation of the key section in the Yellow River Estuary, from 1958 – 2016, were analyzed using the index of hydrologic alteration/range of variability approach (IHA/RVA). The contribution of climate changes and human activities on the variation of runoff was quantified based on six Budyko hypothesis formulas. The study area was the Qucun section, the key section of the Yellow River Diversion Project, and data for calculating the hydrological indices were obtained from the Gaocun hydrologic station, about 7 km from the diversion inflow entrance. The study period (1958 – 2016) included two stages: T_A (1958 – 2005), before project construction, and T_B (2006 – 2016), after project construction. Annual runoff in the section decreased significantly from T_A to T_B . After 2006, the overall degree of variation of the runoff regime reached 61.72% and, using a degree of change above 67% as the threshold value, 8 hydrological indices changed substantially. The average contributions of climate change and human activities to variation in runoff were, respectively, 41.79% and 58.21%. Thus, human activities were the primary driving forces affecting runoff in the key section of the Yellow River Diversion Project. Human activities, such as a water conservancy project and soil conservation efforts were major drivers of changes in runoff, consistent with previous research results. To promote the development of water ecology benefits, effective regulation of water and sediment, hydropower and other human activities should be considered.

Key words: index of hydrologic alteration/range of variability approaches; runoff change; Budyko hypothesis formulas; climate change; human activities