

基于生态补水的永定河流域径流变化分析

李晓琳¹⁾ 潘兴瑶^{1)†} 杨默远¹⁾ 刘波²⁾

(1)北京市水科学技术研究院, 100048, 北京; 2)北京市水文总站, 100089, 北京)

摘要 大规模的跨区域生态水量调度,在恢复长期断流河道生态水量需求的同时,也打破了流域原有的水文循环规律.为识别生态补水对河道径流的影响,本文开展了永定河流域年径流历史序列时空变化及生态补水前后对比分析.结果表明:流域年径流量呈显著性减少趋势,且在1983年存在变点;变点年后年径流量大幅度减少,且日径流量历时曲线显示变异后低流量的分布历时增加,年内日径流量的差异变大;开展大规模生态补水工作以后,官厅水库年入库流量较之前多年平均有明显提高,年内逐月流量过程恢复明显的双峰过程,生态流量满足率显著提高,生态补水对现状条件下河道径流起到了积极作用.

关键词 永定河流域;径流量;流量历时曲线;生态补水

中图分类号 TV121+1

DOI: 10.12202/j.0476-0301.2022005

0 引言

水资源短缺是我国北方地区经济社会发展的关键制约因素.20世纪80年代以后,北方地区河川径流量呈减少趋势,城市水资源供需矛盾加剧,部分时段出现河道干涸现象^[1],引起了一系列水安全与生态环境问题,严重制约了区域经济社会发展^[2].为了遏制由于地表径流衰竭等原因而出现的生态环境恶化、保护河道健康和生态平衡,许多地方实施了生态补水工程^[3-4].生态补水工程旨在恢复河道基流,促进水生态环境恢复与提升,为缓解水资源短缺起到了积极的作用.

永定河流域是我国北方典型的水资源匮乏型流域之一,近几十年来,流域山区地表径流呈明显衰减趋势^[5-6].2001—2018年天然径流与1961—2000年相比减少了47%,地表水资源开发利用率达到90%,流域平原段出现了连续断流现象^[7].水资源短缺现象严重,生态环境十分脆弱,长期缺水也使得其依靠自身难以恢复生态系统功能.永定河是京津冀重要水源涵养区与生态屏障,开展永定河综合治理和生态修复,是京津冀协同发展国家战略的具体要求,对于保护和涵养地下水源、保障生态用水具有重要意义.为推动流域生态修复和系统治理,实现“流动的河”目标,永定河实施了生态用水跨区域调配及引黄补水工程^[8-9],自2017年增大了上游向下游集中生态补水水量.2019年首次开展了引黄水与上游本地径流统筹

生态水量调度,为当时规模最大的一次生态补水并取得了初步成效.2020年春季生态补水实现了全流域的贯通,打破了多年断流的局面,随后常态化的生态补水对河槽重塑、水面面积提升、水生植物恢复以及地下水位恢复都具有十分显著的效果.

大规模的跨区域生态水量调度,在满足恢复长期断流河道的生态水量需求、改善水生态环境的同时,也打破了流域原有的水文循环规律,对径流等水文要素产生了影响.因此,在生态补水常态化的情况下,有必要进一步研究生态补水前后流域径流变化特征.目前永定河流域径流变化规律的相关研究^[10-15],一部分集中于径流衰减归因分析,一部分集中于水文序列年度趋势与变异分析.在此基础上进一步分析流域年内不同等级流量的分布特征,尤其是小流量分布规律等方面的研究相对较少,已不能完全满足流域生态补水调度的需求.

鉴于此,本文在基于1961—2018年代表水文站长系列日径流资料多尺度分析流域径流量变化特征的基础上,结合生态补水后的监测数据,对比分析补水前后流域径流量变化规律,进一步揭示流域径流演变情况,以期能为流域年内径流分配及生态补水调控提供基础依据.

1 数据收集与研究方法

1.1 研究区概况

1.1.1 自然地理 永定河流域(112°~117°45'E, 39°~

† 通信作者:潘兴瑶(1980—),男,博士,教授级高级工程师.研究方向:水文及水资源. E-mail: 041087@163.com

收稿日期: 2022-01-11

41°20'N)是海河水系最大的一条支流,地跨山西、内蒙古、河北、北京、天津等省区市,全流域面积 4.7 万 km²,地势自西北向东南倾斜,西北部为山区,海拔一般为 500~1000 m,官厅水库至三家店,平均海拔为 100 m,从三家店入京津平原,海拔为 25~100 m^[16]。

1.1.2 河流水系 永定河上游有桑干河和洋河 2 大支流,在河北省怀来县朱官屯汇合后称永定河,在官厅水库纳妫水河,经官厅山峡于三家店进入平原,三家店为永定河流域山区、平原分界,其中山区流域面积为 4.51 万 km²,占 95.8%,平原流域面积为 1953 km²,占 4.2%^[8]。

1.1.3 水文气象 永定河流域位于欧亚大陆中部,属于明显的温带大陆性季风性气候,为半湿润、半干旱型气候过渡区。流域多年平均降雨量为 410 mm(1961—2018 年),降雨年内分配极其不均匀,全年降雨量主要集中在汛期(6—9 月),汛期降雨量占全年的 70%~80%。多年平均天然径流量由 20 世纪 70 年代以前的

21.80 亿 m³ 减少到 2001—2018 年的 6.55 亿 m³,总下降幅度达 70%。

1.1.4 社会经济 永定河流域行政区划上分属北京、天津、河北、山西、内蒙古等 5 个省区市,共涉及 51 个市、县、区,流域内总人口约 2200 万人,永定河上游山区矿产资源丰富,是我国重要的能源基地和可再生能源示范区,也是区域重要粮食和蔬菜产地。

1.2 数据收集 收集整理了永定河流域基础地理信息数据包括行政区划图、水系图等(图 1),数据来源于中国科学院资源环境科学数据中心;气象数据选取永定河流域及周边 14 个气象站 1961—2018 年的逐日降雨数据资料为基础,数据来源于中国气象数据网;径流数据选取永定河流域山区具有代表性的水文站点 1961—2018 年日流量数据为基础,其中桑干河流域选取石匣里、洋河流域选取响水堡、永定河山区流域选取官厅水库为代表站点,数据来源于《海河流域水文年鉴》。

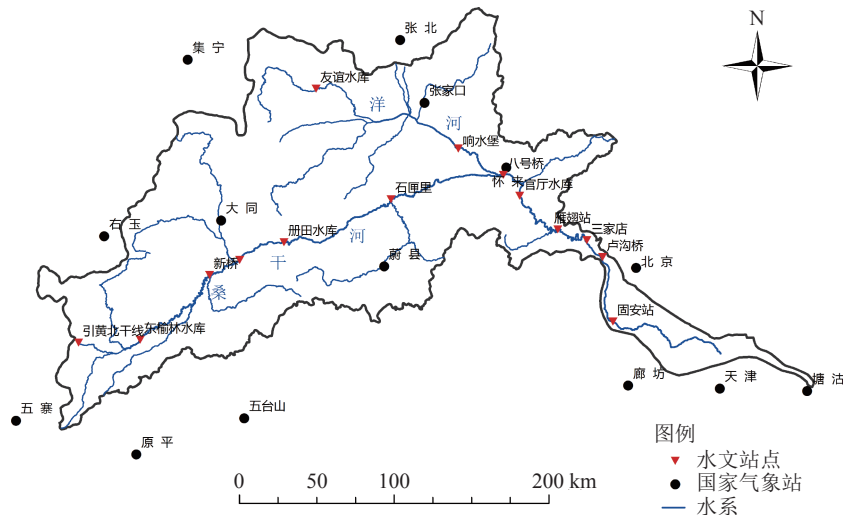


图 1 永定河流域主要水系与站点分布

2019—2020 年春、秋季生态补水数据,以沿途关键断面及重点水库的水量监测数据为基础,实时统计官厅水库入库日均流量、水量等数据,数据来源于北京市水务局。

1.3 数据分析 基于永定河上游流域、桑干河、洋河等代表站点的径流数据,采用多种统计检验方法分析了流域径流量的演变特征。

1.3.1 Mann-Kendall 突变和趋势检验法 采用 Mann-Kendall(M-K)检验法识别与验证径流序列存在的变点,该方法是一种非参数检验方法,在气候和水文序列变化趋势及显著性检验中应用广泛^[16-17]。

对一个长度为 n 的时间序列 x ,首先构造一秩序列 s_k :

$$s_k = \sum_{i=1}^k r_i (k = 2, 3, \dots, n),$$

$$r_i = \begin{cases} 1, & x_i > x_j, \\ 0, & x_i \leq x_j, \end{cases} (j = 1, 2, \dots, i).$$

假设时间序列具有随机独立特性,定义统计量:

$$F_{Uk} = \frac{s_k - E(s_k)}{\sqrt{\text{var}(s_k)}} (k = 2, 3, \dots, n),$$

式中: F_{Uk} 、 $E(s_k)$ 、 $\text{var}(s_k)$ 分别为秩序列 s_k 的均值和方差,计算式为

$$E(s_k) = \frac{k(k+1)}{4},$$

$$\text{var}(s_k) = \frac{k(k-1)(2k+5)}{72},$$

F_{Uk} 为标准正态分布, 给定显著性水平 α , 若 $|F_{Uk}| > U_{\alpha/2}$, 表明序列存在显著趋势. 将时间序列按逆序排序, 再按照上式计算:

$$\begin{cases} F_{UBk} = -F_{Uk}, \\ k' = n + 1 - k, \end{cases} (k = 1, 2, \dots, n).$$

若 $F_{Uk} > 0$, 则序列呈上升趋势; $F_{Uk} < 0$, 则表示呈下降趋势. 如果 F_{Uk} 和 F_{UBk} 2 条曲线存在交点, 且交点位于临界区间内, 则交点对应的时刻即是突变发生的时刻.

1.3.2 双累积曲线 采用降雨径流双累积曲线分析降雨径流关系, 该曲线直线斜率发生明显偏离的点对应径流量开始发生显著变化的年份^[18].

1.3.3 流量历时曲线法 日尺度径流量分析采用流量历时曲线法^[19]分析流域不同河段和不同时段流量历时曲线(FDC), 该方法表示给定流域某一时段(日、月或年)流量发生频次与流量之间的关系, 通过计算整个时间序列中大于等于某一流量发生的时间百分比, 反映不同等级流量频率域上的变化.

2 结果与分析

2.1 基于历史长序列数据的径流量时空变化特征

2.1.1 年径流量变化特征 从桑干河、洋河、永定河分别选取代表性站点开展径流量分析, 其中桑干河选取石匣里作为代表站, 洋河选取响水堡作为代表站, 永定河选取官厅水库作为代表站. 由 1961—2018 年各代表站的径流量变化分析结果可见(表 1), 石匣里多年平均径流量为 2.9 亿 m^3 , 响水堡多年平均径流量为 2.6 亿 m^3 , 官厅水库多年平均径流量为 5.3 亿 m^3 . 各站点趋势均为显著下降的趋势, 显著水平 0.01. 各代表站点径流量均值随时间明显降低, 1961—1980 年石匣里、响水堡、官厅水库的平均径流量分别为 5.6 亿、4.7 亿和 10.4 亿 m^3 , 1981—2000 年分别为 2.1 亿、2.2 亿和 4.1 亿 m^3 , 2001—2018 年分别为 0.8 亿、0.8 亿和 1.0 亿 m^3 . 上游来水减少加上流域水资源的过度开发利用, 河道径流大幅减少^[15], 与 2000 年以前相比, 2001—2018 年石匣里、响水堡、官厅水库的径流量分别减少了 79%、77% 及 86%.

表 1 永定河流域各代表站点径流量变化

河段	站点名称	多年平均/亿 m^3	趋势	显著水平	1961—1980年	1981—2000年	2001—2018年
					亿 m^3		
桑干河	石匣里	2.9	↓	0.01	5.6	2.1	0.8
洋河	响水堡	2.6	↓	0.01	4.7	2.2	0.8
永定河	官厅水库	5.3	↓	0.01	10.4	4.1	1.0

与降雨量的年际变化对比, 流域径流呈现的变化规律和趋势更加明显(图 2), 年径流呈显著下降趋势, 减少量为 2.24 亿 $m^3 \cdot (10 a)^{-1}$. 这主要由于径流量

的变化除了受降雨变化影响外, 还受流域下垫面、地质条件和水资源开发利用等因素的综合影响^[5], 人类活动与径流量显著减少有着密切的关系.

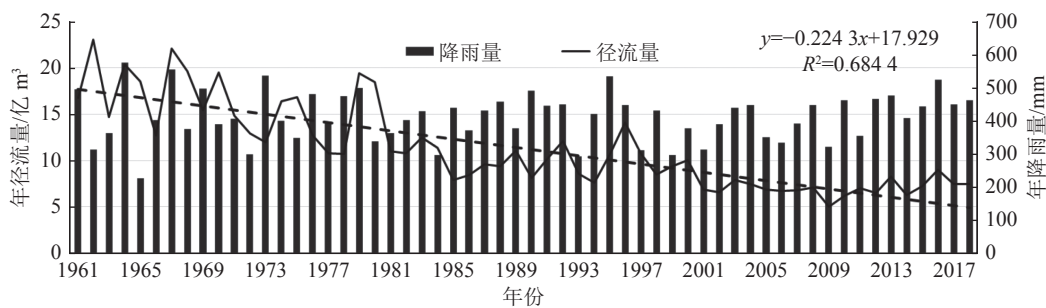


图 2 流域天然径流量与降雨量年际变化

M-K 检验结果显示流域年径流量在 1983 年发生了突变. 将突变点作为不同研究时段的分界点, 选择 1961—1983 年为基准期, 1984—2018 年为变异期. 流域多年平均径流量为 5.3 亿 m^3 , 基准期(1961—1983 年)平均年径流量为 10.4 亿 m^3 , 高于多年平均值, 变异期(1984—2018 年)年径流量为 2.3 亿 m^3 , 低于多年平均

值, 平均径流量均呈现下降趋势.

2.1.2 年降雨与径流关系分析 在分析流域内降雨和径流变化规律的基础上, 采用双累积曲线法分析降雨径流的二者相关性. 降雨-径流双累积曲线如图 3 所示, 由图 3 可见降雨径流关系曲线斜率在 1983 年发生了明显的向下偏离. 结合前文降雨和径流的变

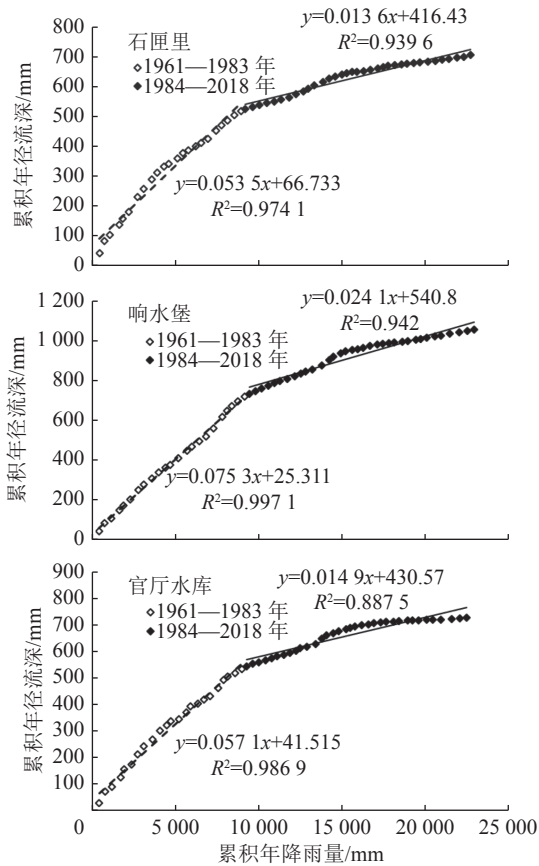


图 3 流域不同河段降雨量与年径流量双累积曲线

异分析结果, 流域内的年降雨序列未发生显著变异, 而年径流序列在 1983 年出现变点, 表明流域从 1983 年开始降雨径流关系发生变化. 1983 年前后径流量均随着降雨增加而增加, 突变点后相同降雨情况下径流量明显减少.

由降雨径流关系特征值(表 2)可见, 变异后径流系数和降雨径流相关系数明显降低, 但与此同时降雨量值没有明显变化. 降雨作为径流形成的主要来源, 与径流的变化之间存在一定的关系, 但从长时间尺度来看降雨不是永定河径流减少的主要原因, 人类活动破坏了降雨径流关系的一致性. 有关研究^[15, 20]表明, 土地利用变化、水利工程修建及水资源开发利用等人类活动, 使得流域降雨径流关系更为复杂, 变

化更为剧烈, 20 世纪 80 年代后期人类活动对径流变化的贡献率约为 70%^[5]; 上游水土保持、退耕还林等土地利用的改变, 通过影响截留、入渗等减少产流, 进而导致流域径流量减小, 但土地利用的改变影响较小. 大中型水利工程的蓄水容积达到了流域多年平均径流量的近 80%, 导致上游来水减少, 出现连续断流现象. 此外, 随着社会经济发展和人口增加, 流域工农业及生活用水需求不断增加, 河道取水灌溉及地下水大量开采等水资源开发利用是径流量大幅减少的主要原因.

2.1.3 日径流过程分布特征 不同河段控制断面多年序列的日均流量历时曲线(FDCs)如图 4 所示, 从石匣里、响水堡和官厅水库 3 个控制断面的曲线来看, 频率 50% 对应的流量值(Q_{50})分别为 4.46, 5.39 和 $10.71 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. 各河段的流量历时曲线分布基本相似, 日均流量多数情况下分布在频率 10% 和 90% 之间, 且曲线变化缓慢. 官厅水库在 80% 频率以内的日均径流最大, 响水堡在 10% 以内高流量部分最小, 40%~80% 频率间的日均径流向上发生偏移, 各站点在 90% 频率低流量时均发生显著下降趋势. 表明各河段除高流量和低流量以外, 年内多数情况下日径流量大小相似, 变化较小.

各河段在 1983 年(变异年)前后 2 个时段内序列日径流量的流量历时曲线如图 5 所示. 与变异前相比, 变异点后时段各河段的日径流量均呈现不同程度的显著减小, 减少程度均 $>60\%$, Q_{50} 减少 70%~80%. 其中, 桑干河日径流量降低在不同频率时较为均匀, 洋河和永定河日径流量频率 $>60\%$ 部分减小程度变大, 频率 $>90\%$ 的日径流量减少比例约为 90%. 总体来看, 日径流量在低流量部分减少程度相对较大.

为进一步分析流域变异年份前后日流量年内变化差异, 根据河流水文特征选取 10% 和 90% 频率下的流量分别为高流量和低流量的代表值(分别用 Q_{10} 和 Q_{90} 来表示), 采用高、低流量与 Q_{50} 比值作为不同时段流量历时曲线的特征值, 不同时段特征值见表 3. 相比于 1961—1983 年, 1984—2018 年的高流量

表 2 流域各典型时段降雨径流特征值

河段	年份阶段	平均径流深/mm	平均降雨量/mm	年径流系数	降雨-径流相关系数
桑干河	1961—1983	22.49	388.9	0.058	0.441
	1984—2018	5.42	393.3	0.014	0.164
洋河	1961—1983	31.21	399.2	0.078	0.673
	1984—2018	9.69	393.1	0.026	0.089
永定河	1961—1983	23.18	391.0	0.064	0.315
	1984—2018	5.51	385.5	0.016	0.029

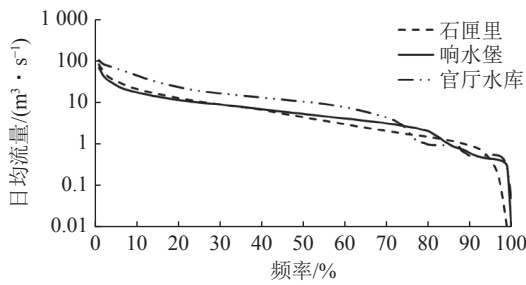


图 4 各河段控制断面长系列日均流量历时曲线

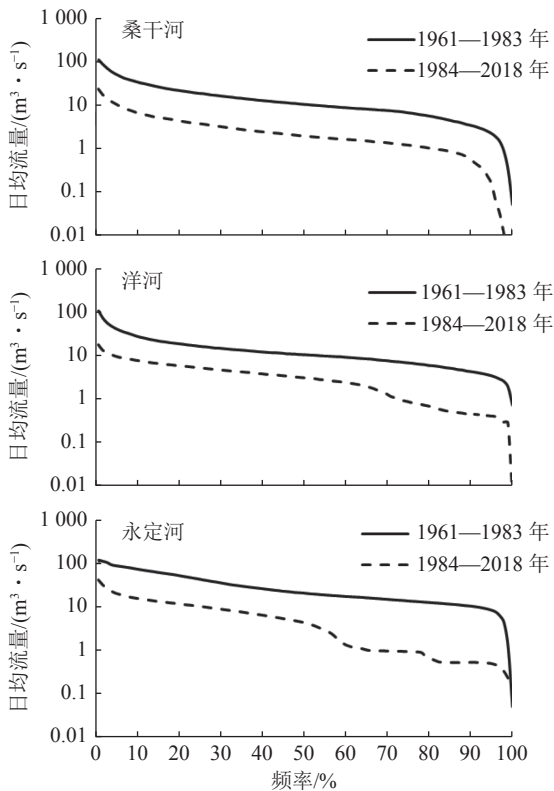


图 5 水文变异前后日均流量历时曲线

部分 Q_{10}/Q_{50} 降低程度较小或有小幅度增加, 而低流量部分 Q_{90}/Q_{50} 均有显著降低. 表明变异时段(1984—2018年)低流量的分布历时增加, 从而年内日径流量的差异变大. 流域内大中型水库等水利工程调蓄水量明显改变了径流量的时空分布^[20], 特别是对汛期流量具有削峰作用, 导致径流量减少. 此外, 降水的年内分布表现为夏季降水减少, 导致汛期流量减少, 从而造成低流量分布增加^[21].

2.2 生态补水前后径流对比分析

2.2.1 月均径流量对比分析

采用 2010—2018 年的官厅月均入库径流量作为补水前的径流代表值, 结合 2019 和 2020 年生态补水数据, 分析大规模引黄补水后官厅入库水量的变化趋势(图 6). 2010—2018 年平均降雨量为 448 mm, 平均年入库径流量为 1.43 亿 m^3 . 2019 年官厅水库入库径流量为 3.08 亿 m^3 , 2020 年入库径流量为 2.33 亿 m^3 , 较之前大幅增加. 同时年内分布也发生了变化, 其中补水期间(3—5、10—12月)的径流量, 分别增加到多年平均月径流量值的 1.3~6.6 倍, 生态补水工作显著提高了河道的径流量与官厅收水量.

2010—2018 年序列流量年内分布较为稳定, 年内波动较小, 尤其是 1—9 月份, 主要原因是河道流量大幅减小, 已不能维持天然状态水平. 而 2019 和 2020 年流量过程呈现出较为明显的双峰过程, 天然来水特征初步呈现. 表明生态补水工作在水量提升与河道天然流量过程恢复上, 都具有积极的效果.

2.2.2 生态流量满足率对比分析

采用魏健等^[22]对永定河生态流量过程估算得到的最小生态流量和适宜生态流量, 分别作为水文变异前后生态流量的下限值与上限值. 生态补水前的生态流量上限及下限值的满足率见表 4, 大规模生态补水后流量与生态流量的对比分析结果如图 7 所示. 生态补水前生态流量下限值的满足率均值为 41%, 而生态流量上限值的满足率均值仅为 4%, 意味着河道生态缺水的情势不容忽视. 2019 和 2020 年的逐月流量数据与水文变异年前后(1983 年前后)适宜生态流量对比结果可知(图 7), 生态补水期间(3—5、10—12月)径流量均满足了变异后(1984—2018年)的生态流量上限值和下限值; 且在 4—5 和 10—11 月也都满足了变异前(1961—1983年)生态流量上限值和下限值. 2019 和 2020 年对变异后生态流量满足率达到了 70%~80%; 对变异前的生态流量下限值的满足率为 58% 和 42%, 对变异前生态流量上限值的满足率也提升到了 25%.

综上所述, 永定河流域开展生态补水工作以后, 流域生态流量满足率有所提升, 对于现状条件下河道

表 3 不同河段研究时段日均流量历史曲线特征值

特征值	桑干河		洋河		永定河	
	1961—1983年	1984—2018年	1961—1983年	1984—2018年	1961—1983年	1984—2018年
Q_{50}	10.1	1.93	10.11	3.02	19.91	4.23
Q_{10}/Q_{50}	3.32	3.48	2.67	2.50	3.56	3.59
Q_{90}/Q_{50}	0.33	0.28	0.41	0.15	0.50	0.11

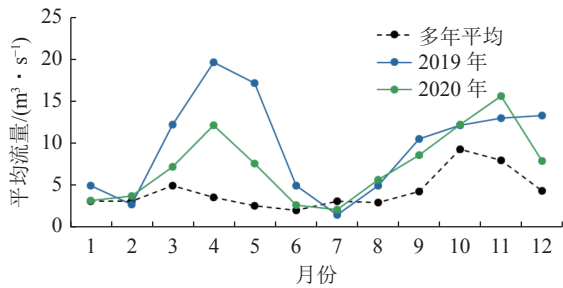


图 6 生态补水前后月平均径流量对比

表 4 生态补水前适宜生态流量满足率 %

月份	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	均值
下限值	11	22	78	11	11	0	22	56	67	67	78	67	41
上限值	0	0	0	0	11	0	0	0	0	22	11	0	4

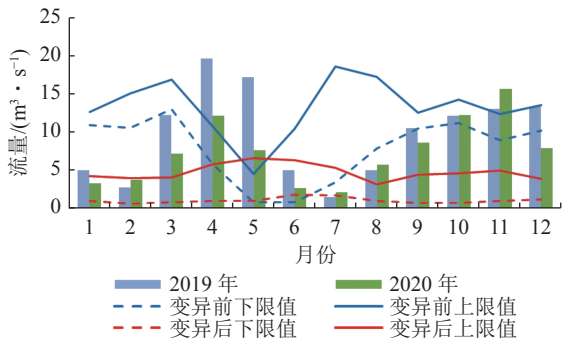


图 7 生态补水后径流与不同阶段适宜生态流量的比较

流量恢复的效果较好，尤其是补水关键期，在一定程度上对河道内水量及生态缺水的情势起到了缓解作用。但距离满足河道生态流量上限值，恢复河道天然阶段(1961—1983年)对应的河道生态流量水平，仍然具有很大的差距。未来河道生态修复开展考虑河道天然特性前提下的生态补水工作仍然面临较大挑战。

3 结论

本文通过对永定河流域历史长序列径流演变规律及生态补水前后径流对比分析，得到以下结论。

1)流域年径流量(1961—2018年)随年份显著减少，变异年(1983年)前后降雨径流关系发生变化。桑干河、洋河、永定河的流量历时曲线分布基本相似，变异年后日径流量均显著减小，尤其低流量显著减小，且分布历时增加，表明年内日径流的差异变大。

2)开展大规模生态补水工作以后，官厅水库入库水量与之前多年平均相比有明显提高，年内逐月流量恢复明显的双峰过程；生态流量满足率显著提高，补水关键期河道流量恢复较好，但相比适宜生态流量高值仍有较大差距。

3)永定河生态补水对现状河道径流恢复起到了积极作用，生态流量满足率有所提高，但距离恢复天

然阶段水平下的生态流量仍具较大差距，未来有必要在充分考虑河道天然特性的前提下，开展生态补水总量及过程控制研究。

目前，永定河生态补水处于试验阶段，未来开展常态化补水工作，对流域径流分布规律长期变化的影响有待进一步研究。

4 参考文献

[1] 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

[2] 刘春霖,占车生,夏军,等.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

[3] 付意成,邢乃春,赵进勇,等.北方缺水城市水资源短缺问题决策策略研究:以廊坊市为例[J].中国农村水利水电,2017(11):1

[4] 董琳,王白陆,刘江侠,等.基于多源互济的永定河泛区生态补水可行性研究[J].水利规划与设计,2021(1):13

[5] 侯蕾,彭文启,董飞,等.永定河上游流域水文气象要素的历史演变特征[J].中国农村水利水电,2020(12):1

[6] 王立明,李文君.永定河山区河流生态水量现状及亏缺原因分析[J].海河水利,2017(2):25

[7] 杜勇,万超,杜国志,等.永定河全线通水需水量及保障方案研究[J].水利规划与设计,2020(7):14

[8] 杨柠.永定河引黄生态补水长效机制初步探索[J].水利发展研究,2020,20(2):13

[9] 纪玉琨,武春侠,朱毕生.新时期永定河流域生态修复思考[J].水利发展研究,2018,18(11):31

[10] 张建中,刘江侠,任涵路.流域下垫面变化对永定河官厅水库径流影响分析[J].海河水利,2016(6):7

[11] 张伟丽.气候变化和人类活动对永定河流域径流的影响[J].人民黄河,2015,37(5):27

[12] 张利平,于松延,段尧彬,等.气候变化和人类活动对永定河流域径流变化影响定量研究[J].气候变化研究进展,2013,9(6):391

[13] 程大珍,陈民,史世平,等.永定河上游人类活动对降雨径流关系的影响[J].水利水电工程设计,2001,20(2):19

[14] 丁爱中,赵银军,郝弟,等.永定河流域径流变化特征及影响因素分析[J].南水北调与水利科技,2013,11(1):17

[15] 丁晓雯,刘卓.河北省永定河流域水文循环及时空分布规律[J].南水北调与水利科技,2011,9(5):40

[16] 张丽梅,赵广举,穆兴民,等.基于Budyko假设的渭河径流变化归因识别[J].生态学报,2018,38(21):7607

[17] 赵广举,穆兴民,田鹏,等.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,2012,34(6):1070

[18] 穆兴民,张秀勤,高鹏,等.双累积曲线方法理论及在水文气象领域应用中应注意的问题[J].水文,2010,30(4):47

[19] 穆兴民,高鹏,巴桑赤烈,等.应用流量历时曲线分析黄

- 土高原水土保持措施对河川径流的影响[J]. 地球科学进展, 2008, 23(4): 382
- [20] 孙宁, 李秀彬, 冉圣洪, 等. 潮河上游降水-径流关系演变及人类活动的影响分析[J]. 地理科学进展, 2007, 26(5): 41
- [21] 王艺璇, 沈彦军, 高雅, 等. 永定河上游环境变化和水资源演变研究进展[J]. 南水北调与水利科技, 2021, 19(4): 656
- [22] 魏健, 潘兴瑶, 孔刚, 等. 基于生态补水的缺水河流生态修复研究[J]. 水资源与水工程学报, 2020, 31(1): 64

Streamflow changes of Yongding River basin after ecological water compensation

LI Xiaolin¹⁾ PAN Xingyao¹⁾ YANG Moyuan¹⁾ LIU Bo²⁾

(1) Beijing Water Science and Technology Institute, 100048, Beijing, China; 2) Beijing Hydrology Center, 100089, Beijing, China)

Abstract To assess impact of ecological water replenishment on streamflow in the Yongding River basin, temporal and spatial changes of streamflow from 1961-2018 and changes before and after ecological water compensation were analyzed. Annual streamflow has shown a significant decreasing trend with change point of 1983. After the change point year, the average annual streamflow decreased significantly, the daily stream flow duration curve showed that the distribution duration of low streamflow increased, the difference of daily runoff of the year became larger. After large-scale ecological water replenishment, annual inflow of Guanting Reservoir has significantly increased compared with average years before, monthly flow process has an obvious bimodal process, satisfaction rate of ecological flow has significantly increased. Ecological water replenishment has played a positive role in streamflow under current conditions.

Keywords Yongding River basin; streamflow; flow duration curve; ecological water compensation

【责任编辑: 武 佳】