DOI:10.11705/j.issn.1672-643X.2015.06.02

漳河上游径流变化特性分析

万思成^{1,3},张建云^{2,3},王国庆^{2,3},刘艳丽^{2,3},刘翠善^{2,3}
(1.河海大学,江苏南京 210098; 2.南京水利科学研究院,江苏南京 210029;
3.水文水资源与水利工程科学国家重点实验室,江苏南京 210098)

摘 要:海河流域人口密集、水资源短缺,分析河川径流演变对支撑社会经济稳定发展具有重要意义。以海河流域 漳河上游为研究对象,基于 1958 - 2012 年的实测径流资料,利用 Mann - Kendall 趋势和突变分析、丰平枯水年划分 系统分析了径流的年际年内演变特性。结果表明:近 50 年来,漳河上游实测径流呈现显著减少趋势,实测径流量 系列在 1980 年前后发生突变,突变后,枯水年出现频次急剧增加,年际变差系数有增大趋势,各月径流量总体减 少,而汛期径流的减少程度尤为剧烈。日趋减少的径流量反映当地水资源将面临更大压力和挑战。 关键词:径流变化; Mann - Kendall 方法;变差系数;年内分配;漳河上游 中图分类号:P33.1 文献标识码: A 文章编号: 1672-643X(2015)06-0007-05

Characteristics of runoff varation in upper Zhanghe River watershed

WAN Sicheng^{1,3}, ZHANG Jianyun^{2,3}, WANG Guoqing^{2,3}, LIU Yanli^{2,3}, LIU Cuishan^{2,3}

(1. Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China;

3. State Key Laboratory of Hydrology - Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing 210098, China)

Abstract: Haihe River basin is suffering from water scarcity partly due to dense population and rapid socio – economic development. It is very important to analyze the evolution of river runoff for the sustainable development of society economy. Taking upper Zhanghe river which belongs to Haihe River basin as study object, the paper used Mann – Kendall trend and abrupt change analysis and high – median – low flow partitioning framework to systematically study the evolution behavior of inter – vs. intra – annual runoff on the basis of discharge observation data from 1958 to 2012. The result showed that from 1958 to 2012, the runoff series from all gauges showed notable downward trend, the abrupt change occured around 1980. The occurrence frequency of low flow years sharply increased after then. The coefficient of annual variation showed an increase trend. The monthly runoff was generally declining with the most descending trend occured in flood season. The result indicated that the local water resources will face greater pressure and challenges because of the ever decreasing runoff.

Key words: runoff variation; Mann – Kendall method; coefficient of variation; intra – annual allocation; upper Zhanghe River basin

径流是水文循环中的重要环节,其形成和变化 特征既来自于流域气象条件和下垫面条件如降水、 温度、地质、土壤、植被类型和覆盖度、地形坡度;同 时又深受人类活动的影响,河道取水、地下水开采、 水库拦蓄等一系列取用水活动可以很大程度地改变 径流量及其时程分配,改变了区域内水循环特 征^[1-3]。

海河流域地处中国华北,气候干旱,水资源量总

体偏少。由于该区域人口密集、工农业发达,水资源 情势面临日益严峻的压力^[4-6]。近些年来,水利科 学家对变化环境下海河流域的水资源问题进行深入 研究,指出人类活动是径流锐减的主要原因^[7-10], 未来气候变化下流域的水资源短缺趋势可能进一步 加剧^[11]。漳河是海河流域水资源冲突最为集中的 地区,近些年来流域内因争水引发的"水事"不 断^[12-13]。然而,目前对该区域径流演变的相关研究

收稿日期:2015-08-20; 修回日期:2015-09-22 基金项目:国家自然科学基金项目(41330854、41371063)

作者简介:万思成(1988-),男,江苏南京人,博士研究生,主要从事气候变化与分布式水文模拟等方面的研究。 通讯作者:王国庆(1971-),男,山东成武人,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。 相对欠缺^[14]。根据漳河上游3个重点水文站1958 -2012年的实测径流量资料,系统分析了径流量的 年际演变趋势、突变点、丰枯年份变化、年内分配特 征等,该分析结果可为流域的水资源可持利用及防 汛抗旱减灾提供科学依据。

1 资料与方法

1.1 研究区概况

漳河属海河流域漳卫南运河水系,在观台以上 属于上游。漳河上游分浊漳河和清漳河两支,清漳 河分为东源和西源,东源发源于山西昔阳漳漕村山 麓、西源发源于山西和顺八赋岭,二者在下交漳合并 为清漳干流;浊漳河分为北源、西源和南源,北源发 源于山西榆社柳树沟、西源发源于沁县潼源庙、南源 发源于山西长子发鸠山,南源先后汇西源、北源,至 石梁附近已为浊漳干流:清浊漳于合漳村并为漳河 上游干流,经观台流至岳城水库。全流域面积约 18 284 km²,边界为太行山东西两翼所包围,地形西 北高东南低,海拔最高处为香烟岭主峰孟信垴2141 m,流域出口观台的海拔为160 m,高低海拔相差很 大。清漳河多石山,地势险峻,悬崖沟壑遍布;浊漳 河外围为高山,中间为上党盆地,多丘陵和平原,地 势平缓,黄土覆盖深,植被较差,水土流失严重,流水 携带大量泥沙,故得名。全流域属温带至暖温带气 候,四季分明,夏短冬长,无霜期短,多年降水量约 560 mm_o

本研究收集整理了清漳河蔡家庄水文站,浊漳 河石栈道水文站,干流观台水文站的逐日实测径流 资料,资料长度从1958-2012年,共55年。图1给 出了研究区域水系及及水文站地理位置。

1.2 研究方法

1.2.1 Mann - Kendall 分析法 Mann - Kendall 方 法是一种非参数统计方法,其无需知道样本序列的 统计分布,在水文气象统计分析中应用极为广泛。 采用 Mann - Kendall 方法进行趋势分析,其具体的 计算步骤为:

(1)给定原假设 H₀,表示样本序列没有显著上 升或者下降趋势;

(2) 构造 Mann – Kendall 统计量 UF_i ,来检验原 假设是否成立,其计算公式为:

$$UF_{i} = \frac{S_{i} - E(S_{i})}{\sqrt{Var(S_{i})}} \quad (i = 1, 2, \cdots, n)$$
(1)

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

$$r_{i} = \begin{cases} +1, & x_{i} > x_{j} \\ 0, & x_{i} \le x_{j} \end{cases} \quad (j = 1, 2, \dots, i-1) \quad (3)$$

式中: x_i 是样本容量为 n 的径流、降水或气温系列, 秩序列 Sk 是第 i 年系列 x(i) 大于此前各年系列 x(j) 的累计数。如果它服从独立同分布且随机,则 Si 的期望值和方差可由下式计算:

$$E(S_i) = \frac{i(i-1)}{4} \tag{4}$$

$$Var(S_i) = \frac{i(i-1)(2i+5)}{72}$$
(5)

(3) 给定一个显著性水平 α ,由正态分布表可 以查的临界值 $U_{\alpha'^2}$ 。当 $| UF_i | > U_{\alpha}$ 时,接受原假设, 即趋势不显著;当 $| UF_i | < U_{\alpha'^2}$ 时,拒绝原假设,即 趋势显著。而且, $UF_i > 0$ 表示序列呈上升趋势; $UF_i < 0$ 表示序列呈下降趋势。



Mann – Kendall 方法检测突变点的思路方法是:对 于原始的系列 x_1, x_2, \dots, x_n ,按照逆序排列,即从后往前 排,形成一个新的系列 x_n, x_{n-1}, \dots, x_1 。重复上述步骤,并 定义 $UB_i = -UF_i, i = n, n - 1, \dots, 1$ 。分别点绘 UF_i 和 UB_i 的曲线,如果系列的上升或者下降趋势显著,两条 曲线的交点即认为是原始系列的突变点。

1.2.2 丰平枯水年划分方法 根据实测径流量及标准离差进行丰平枯水年划分^[15],划分方法如下:

丰水年:
$$Q > \overline{Q} + 0.33\sigma$$

平水年: $\overline{Q} - 0.33\sigma < Q < \overline{Q} + 0.33\sigma$
枯水年: $Q < \overline{Q} - 0.33\sigma$

式中: Q 为某年径流量; Q 为多年平均径流量; σ 为 径流量年际变化标准差。

2 结果与讨论

2.1 径流年际变化的趋势性及突变性

对漳河上游各水文站作年径流深随时间的变化

如图 2,不难发现,从 1958 - 2012 年,各站的年径流 深发生明显的减少,其递减速率约为 18 mm/10a。用 Mann - Kendall 趋势分析法诊断其变化趋势,结 果见表1。



图 2 漳河上游各水文站径流年际变化

表1 漳河上游各水文站年径流变化趋势分析结果

水系	水文站	U	趋势	显著性
清漳河	蔡家庄	-3.55	\downarrow	Y
浊漳河	石栈道	-3.67	\downarrow	Y
干流	观台	-4.94	\downarrow	Y

注:↑表示上升趋势,↓表示下降趋势,Y表示显著,N表示不显著。

从表1可以看出,各水文站的M-K统计值U 的绝对值从蔡家庄的3.55到观台的4.94不等,且 均大大超过了0.05显著水平下的临界值1.96,说 明下降趋势非常显著,径流减少十分明显。从地区 分布来看,流域上游的 | U | 相对较小,清漳河上游 蔡家庄站和浊漳河上游石栈道站的 | U | 小于干流 的观台站,说明上游地区径流受人类活动影响相对 轻微一些,天然特性保持较好。而下游的清漳河、浊 漳河干流以及漳河主干流落差大、水量多,建有多处 灌区及水电站,如浊漳河干流天桥断附近建有红旗 渠、漳河干流观台附近建有大小跃峰渠等,大规模的 生活取用水、农业灌溉、蓄水发电等等势必成为径流 减少不可忽视的因素,乃至在枯季造成断流。除了 高强度的人类活动之外,影响径流最重要的因素之 一就是降水。降水量减少不仅直接减少了水分来 源,而且常伴随温度升高、蒸发加剧,进一步造成了 水分的损失。根据相关研究成果^[5,16-17],海河流域 降水量自 1950 年以来总体不断减少,其中 1980 – 2000 年期间的降水量显著低于 1980 年代以前的降 水量,夏季降水量减少尤其明显,这必然是径流量减 少的一个不可忽略的原因。

从图 2 中可以直观看出,各水文站的径流系列 在 1980 年前后急剧"跌落"减少,采用 Mann – Kendall 突变分析法定量检测径流系列的突变情况,结 果如图 3。



图 3 漳河上游各水文站突变分析

从图 3 中不难看出, M - K 正序列 UF 与逆序列 UB 曲线相交点位于 1977 - 1978 年。突变点定性分 析结果与直观判断几乎一致, 证明各站年径流系列 在 1980 年前后发生突变。突变后, 逐年 M - K 值总 体上呈不断减少趋势, 同样反映了径流量加剧减少。

2.2 径流年际特性分析及突变前后对比

为客观详细了解年径流在突变前后的变化情况,统计其多年平均径流深、年际不均匀系数 C_v、丰

平枯水年出现频次,并进行对比分析。统计计算结 果见表2~4。

表 2	漳河上游突变前后多年平均径流深变化比较

- 卜 - 국 - 국는	多年平均径流深 /mm						
小又珀	1958 – 2012	突变前	突变后				
蔡家庄	59.1	105.5	32.7				
石栈道	82.8	128.8	55.4				
观台	50.4	85.3	16.9				

漳河上游 1958 - 2012 年多年平均径流深从 50.4 mm(观台)到82.8 mm(石栈道)不等,突变前, 蔡家庄站的多年径流深为 105.5 mm、石栈道站为 128.8 mm、观台站为85.3 mm;而突变后各站年径 流深分别仅为32.7、55.4、16.9 mm,减少幅度在70 mm 左右,突变后的径流量普遍不足突变前径流量 的一半,甚至不到其1/4(观台)。由于认为突变前 人类活动影响较小,故分析突变前径流深大小的分 布规律,可发现上游的蔡家庄(105.5 mm)和石栈道 (128.8 mm)径流深大于100 mm,大于下游,径流深 和流域地形密切相关,漳河上游山高坡陡、多悬崖峡 谷,因此总体上产流量更多、径流深更大。

水文站	1958 - 2012 年			ラ	突变前			突变后			
	丰	平	枯	丰	平	枯		丰	平	枯	
蔡家庄	12	15	28	9	7	4		3	8	24	
石栈道	16	13	26	12	5	4		4	8	22	
观台	16	8	31	14	5	2		2	3	29	

从表3看出,1958-2012年全时段,漳河上游 枯水年的出现频次在26~31次之间,远多于丰水年 和平水年,占全年份的一半左右,而丰水年和平水年 除观台外,出现频次大致相等。突变前,所有站的丰 水年多于平水年、平水年多于枯水年,丰水年出现次 数多超过10次,所占比例相当高,接近或超过所有 年份的一半;而枯水年仅占其三分之一不到,甚至更 低,如观台21年来,只有2年为枯水年。然而突变 后,丰水年份骤减,最少的仅出现1次;枯水年出现 频次急剧增加,都在20次以上,多者能占全年份的 90%。从地域分布来看,上游丰水年出现频次突变 前后减少不及下游明显,蔡家庄减少了6次、石栈道 减少了8次,而下游皆减少12次,与M-K 趋势检 验结果较为一致,可能原因为上游受人类活动影响 相对下游较小。

由表4可知,漳河上游各水文站的C_v值普遍在 1.0 左右,清漳河上的蔡家庄站和干流出口总控制 站观台站1958 - 2012 年的C_v高于1.0,浊漳河上的 石栈道站略低于 1.0,说明漳河上游径流年际变化 较大。由于径流在 1980 年前后普遍发生剧烈减少, 这是造成径流年际变化大的一个重要原因,为了消 除径流阶段性突变的影响,更加准确地分析径流年 际变化情况,将各站的 C_v值按突变前后两个阶段进 行分析。从表中可以看出,突变前,所有站的 C_v值均 小于 1.0,其中,突变前浊漳河的石栈道站、干流观 台站不到 0.6;而清漳河的蔡家庄站略高,在 0.8 上 下;而突变后,除蔡家庄站以外,其余各站的 C_v值均 显著增加,突变后年平均径流总体减小,但 C_v值反 而增加,说明干旱出现频次与严重程度增加,加剧了 区域水资源供需压力,影响了社会经济的正常发展。

表 4 漳河上游各水文站的 Cv 值及其变化情况

水文站	1958 - 2012	突变前	突变后
蔡家庄	1.132	0. 835	0. 795
石栈道	0.805	0. 579	0.766
观台	1.129	0. 590	1.099

另外,比较各水文站的 *C_v* 大小,也可发现一些 区域性特征,总体来说,清漳河的 *C_v* 较大,浊漳河的 *C_v* 较小。这应该由于清漳河流域处于太行山迎风坡 侧,更易受到暴雨影响而产生猛涨洪峰。

以1963年8月海河特大暴雨为例,8月上旬漳 河上游普遍发生降水,其中8月3日-5日,海河南 系普遍发生降水;蔡家庄水文站实测降水量达307 mm,其量直逼干旱年份全年降水量,不远处上游漳 漕站实测降水量亦为292 mm;而石栈道水文站和附 近社城雨量站实测降水量仅为49 mm,降水强度一 般。相应地,当年8月5日蔡家庄站的日流量达到 近期峰值433 m³/s;而石栈道站当日流量14.9 m³/s,二者差异悬殊,除去流域面积,二者流量模数 之比约为44:1。

2.3 径流年内分配特性及突变前后对比

为了认识径流在突变前后的年内分配变化特征,统计了突变前后各月径流过程及变化量、汛期径 流占年径流的比例,并作对比分析,统计结果见图4 和5。





漳河上游各水文站汛期与非汛期径流的分配特征 图 5

从图4、5可以看出, 漳河上游的各月水量分配 明显不均,呈现典型的"单峰"特征:径流量峰值出 现在8月,大部分水量集中在夏秋季节,汛期径流占 年径流总量的一半以上,而冬春及初夏季节仅有少 许水量。

突变前,各站8月径流深都在20mm以上,目 上游的两个子流域都达到了40 mm,其中最大值为 石栈道的44.5 mm,从过程线形状特征来看,上游的 月径流过程线比干流观台站的过程线要更加尖瘦, 反映在汛期径流比例上,上游站的汛期径流比例都 在 0.7 以上, 明显高于观台站(0.53)。突变后, 随 着年径流的大幅减少,各月径流也纷纷减少,而减少 幅度最大的也是在7-9月汛期(表5),蔡家庄、石 栈道、观台的7-9月径流深分别减少了57.3、 53.5、34.5 mm,减少比例达60%以上;由于汛期径 流的剧烈减少,致使蔡家庄、石栈道的汛期径流比例 比突变前有所降低,而观台的汛期径流比例则增加 了约10%。而其他季节,尽管减少幅度不如汛期, 但因为径流量本身较小,因此,突变后,径流量变得 更加微弱。不过,值得注意的是,清漳河上游蔡家庄 的1月和2月径流在突变后反而有轻微增加,推测 其中原因是冬季气候变暖,由此导致积雪量减少、融 雪提前,并使得冬季土壤的冻结程度减轻,促使一部 分径流流出。总体来说,突变后各月径流尤其是汛 期径流显著降低,对于当地水资源利用保护来说会 是严峻的挑战。

表 5 突变后各站月径流减少比例

水文站												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
蔡家庄	-0.46	-0.07	0.56	0.49	0.48	0.45	0.71	0.76	0.70	0.71	0.66	0.48
石栈道	0.67	0.65	0.46	0.37	0.33	0.62	0.53	0.59	0.61	0.55	0.57	0.68
观台	0.84	0.85	0.93	0.90	0.86	0.81	0.81	0.71	0.79	0.81	0.83	0.90

结 3 语

(1)55 年来, 漳河上游各水文站的径流变化趋 势均呈现出显著减少。其中,下游的减少程度比上 游要更加强烈,可能原因是更显著的人为活动干扰, 关于气候变化和人为活动对径流影响贡献尚待进一 步分析。

(2) 漳河上游各水文站均在 1980 年前后发生 了突变,突变后的径流量跌落式减少,不足突变前径 流量的一半;枯水年出现频次剧烈增加;相比于上 游,下游的枯水年增加更多。

(3) 漳河上游径流年际变差系数在突变后增 加,流域发生干旱的频次及程度增加,水资源面临更 严峻的压力。

(4) 漳河上游年内径流集中在7-9月汛期, 而 突变前后,各月径流量普遍显著减少,尤以汛期减少 幅度为甚。

参考文献:

- [1] 张建云, 王国庆. 气候变化对水文水资源影响研究 [M]. 北京:科学出版社, 2007.
- [2] 张建云 王国庆, 等. 河川径流变化及归因定量识别 [M]. 北京:科学出版社, 2014.
- [3] Arnell N W, Gosling S N. The impacts of climate change on river flow regimes at the global scale [J]. Journal of Hydrology, 2013, 486(12): 351 - 364.
- [4] 贾绍凤, 张士锋. 海河流域水资源安全评价[J]. 地理 科学进展,2003,22(4):379-387.
- [5] 刘春蓁, 刘志雨, 谢正辉. 近 50 年海河流域径流的变化趋 势研究[J]. 应用气象学报,2004,15(4):385-393.
- [6] 刘家宏, 秦大庸, 王浩, 等. 海河流域二元水循环模式 及其演化规律[J]. 科学通报,2010,55(6):512-521. (下转第18页)

sponse to a large – scale Mississippi River discharge: Examining spatial and temporal response to river management [J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2011, 91(3): 379 – 387.

- [4] Hyfield Emily C G, Day John W, Cable Jaye E, et al. The impacts of re – introducing Mississippi River water on the hydrologic budget and nutrient inputs of a deltaic estuary [J]. Ecological Engineering, 2008,32(4):347-359.
- [5] Lane Robert R, Day John W, Justic D, et al. Changes in stoichiometric Si, N and P ratios of Mississippi River water diverted through coastal wetlands to the Gulf of Mexico[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2004,60(1):1-10.
- [6] Lane Robert R, Mashriqui Hassan S, Kemp G P, et al. Potential nitrate removal from a river diversion into a Mississippi delta forested wetland[J]. Ecological Engineering, 2003,20(3):237-249.
- [7] DeLaune R D, Jugsujinda A, West J L, et al. A screening of the capacity of Louisiana freshwater wetlands to process nitrate in diverted Mississippi River water [J]. Ecological Engineering, 2005, 25(4);315-321.
- [8] Wang Chao, Wang Yanying, Wang Peifang. Water quality
 - (上接第11页)
- [7] 陈 民,谢悦波,冯宇鹏.人类活动对海河流域径流系列
 一致性影响的分析[J].水文,2007,27(3):57-59.
- [8] 王巧平, 王成建. 海河流域人类活动对径流的影响分析 [J]. 海河水利,2009(1):4-6.
- [9] Bao Zhenxin, Zhang Jianyun, Wang Guoqing, et al. Attribution for decreasing streamflow of the Haihe River basin, northern China: Climate variability or human activities? [J]. Journal of Hydrology, 2012, 460(3):117-129.
- [10] Xu Xiangyu, Yang Dawen, Yang Hanbo, et al. Attribution analysis based on the Budyko hypothesis for detecting the dominant cause of runoff decline in Haihe basin[J]. Journal of Hydrology,2014,510: 530-540.
- [11] 鲍振鑫,张建云,严小林,等.环境变化背景下海河流 域水文特征演变规律[J].水电能源科学,2014,23 (10):1-5.

modeling and pollution control for the eastern route of south to north water transfer project in China[J]. Journal of Hydrodynamics Ser. B, 2006,18(3):253-261.

- [9] 李俊玲,钱自立.南水北调东线工程江苏段水环境问题 及其对策[J].水利科技与经济,2007,13(3):180-182.
- [10] 唐莉华,张思聪,吕贤弼,等.南水北调东线工程淮河流 域段农业面源污染负荷估算[J].农业环境科学学报, 2008,27(4):1437-1441.
- [11] 张素英南水北调东线江苏段水污染防治现状及水质保证措施探讨[J]. 南水北调与水利科技,2009,7
 (2):18-20+39.
- [12] 赵世新,张 晨,高学平,等.南水北调东线调度对南四湖水质的影响[J].湖泊科学,2012,24(6):923 931.
- [13] 颜志俊,张明月,逢 勇.南水北调东线江苏段深化治污重点方向及措施[J].南水北调与水利科技,2012,12
 (4):42-46.
- [14] 郭 鹏,吴培任,任 静.南水北调东线主要污染物入河量 历年变化分析[J].南水北调与水利科技,2013,11
 (6):62-66.
- [12] 杨雪丽. 气候变化对漳卫南流域水资源安全影响研究 [D]. 山东:济南大学, 2012.
- [13] 王文军, 吉 华. 漳河水事纠纷的成因及其对策探析 [J]. 海河水利,2011(2):14-15.
- [14] 蔡锡填,徐宗学,李占玲. 漳卫南运河流域水文气象
 要素长期变化趋势分析[J].资源科学,2008,30(3):
 363-370.
- [15] Li Donglong, Wang Wensheng, Hu Shixiong, et al. Characteristics of annual runoff variation in major rivers of China
 [J]. Hydrological Processes, 2012, 26(19):2866-2877.
- [16] 鲍振鑫,张建云,严小林,等.海河流域 60 年降水量 的变化及未来情景分析[J].水利水运工程学报.2014 (5):8-13.
- [17] 翟劭燚,张建云,刘九夫,等.海河流域近 50 年降水 变化多时间尺度分析[J].海河水利,2009(1):1-4.