

南水北调中线工程对汉江中下游的水文情势影响分析

肖婵, 谢平, 唐涛, 陈丽

(武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室, 湖北 武汉 430072)

摘要:为更好地开展南水北调中线工程对汉江中下游水华生态环境问题的量化研究,分析了调水工程对汉江中下游水文情势的影响。基于仙桃断面的流量数据,计算分析了调水 145 亿 m³ 后有、无引江济汉工程两种方案下的流量特征值的变化,并应用分形理论分析了调水前后多年月平均径流过程线的形态特征。结果表明:调水工程对汉江中下游的水文情势有明显影响,主要表现为:径流年内分配趋于均匀化,径流年内集中度变小,径流年内相对变化幅度变小,径流过程线峰谷差变小,引江济汉工程使这些变化更显著;各种历时(年、枯期、汛期)平均流量均变小、旬平均流量极小值变小,引江济汉工程对这些变化起补偿作用。由于汉江水华的暴发期集中在枯水期,由调水工程引起的枯期流量减小以及旬流量极小值变小必然对汉江水华的爆发起到促进作用。

关键词:南水北调; 中线工程; 水文情势; 影响分析; 汉江

中图分类号:TV672;TV121+.2 **文献标识码:**A **文章编号:**1000-0852(2009)01-0026-04

1 引言

南水北调工程是实施我国水资源优化配置,解决北方缺水问题的跨世纪重大战略工程。然而,南水北调中线工程运行后,每年从丹江口水库调水 145 亿 m³,约占汉江流域径流量的 22%,这必将导致汉江中下游的水文情势的变化,从而引发新的生态环境问题^[1]。特别是近年来,随着沿江工农业的高速发展,汉江中下游水体有机污染不断加深,加之调水工程造成的水文情势变化以及气象等因素,汉江中下游在枯季暴发了多次较严重的“水华”现象。奚明等^[1]从水质条件、气温、水文情势三个方面分析了诱发汉江水华的成因机理,指出必须从水质、水文两方面预防水华的发生。谢平等^[2]应用水动力学模型和富营养化动力学模型对汉江水华发生的关键因子进行了分析,指出南水北调中线工程对汉江水华的影响主要体现在水文因子上。陈根祥等^[3]指出汉江水华的发生,其枯季的水文条件起到了决定性作用。

引江济汉工程是汉江中下游的水量补偿工程,由枝江市七星台镇的大布街挖渠引出长江水,渠首引水流量为 500 m³/s,经沙洋县境内的长湖上游,最后在潜江市高石碑镇入汉江。它作为南水北调中线工程的补水措施,可以减缓汉江富营养化污染所造成的不良影响^[1]。

因此,分析调水工程以及引江济汉工程对汉江中下游水文情势的影响,不仅为开展南水北调中线工程对汉江中下游水华生态环境问题的量化研究提供依据,而且对汉江水华的预防能起到较好的指导作用。

目前,大多数研究仅通过水文过程线(如水位、流量过程线

等)的一些特征值(如峰、总量、平均值)来评价水文情势的变化情况,如关彩虹等^[4]从流量、水位、流速的年、月、最枯 30 天的平均值以及变化幅度分析了调水一期工程对汉江下游襄阳段水文情势的变化,但无法对这些过程线全局或局部作“连续的”、全面的评价。近年来研究表明,水文过程线可以看作是一种分形,其变化的复杂程度可以用分维数来表示^[5-6]。运用不均匀系数、集中度和集中期以及变化幅度等指标进行径流年内分配的变化评价也能更好地从不同侧面反应径流的年内分配特性^[7]。本文将首先运用分形理论分析不同年型调水前后径流特征的差异,得出南水北调中线工程对汉江水文情势的影响程度,然后分析调水前后径流年内分配的变化以及各种历时流量特征值的变化。

2 水文情势变化分析

2.1 运用分形理论分析水文情势变化程度

2.1.1 分形理论简介

分形理论中分维的算法有多种,盒维数是应用最广泛的维数之一,主要原因是这种维数的数学计算及经验估值相对容易一些,这里介绍所使用的盒维数。

设 F 是 R^n 上任意非空的有界子集, $N_\delta(F)$ 是直径最大为 δ 、可以覆盖 F 的集的最少个数,则 F 的上、下盒维数分别定义为:

$$d^+ = \lim_{\delta \rightarrow 0} \frac{\ln N_\delta(F)}{-\ln \delta} \quad (1)$$

$$d^- = \lim_{\delta \rightarrow 0} \frac{\ln N_\delta(F)}{-\ln \delta} \quad (2)$$

收稿日期:2008-05-14

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50579052)

作者简介:肖婵(1985-),女,湖北武汉人,在读硕士,主要从事水文水资源及水环境研究。

如果这两个值相等,则称该值为 F 的盒维数,记为:

$$d = \lim_{\delta \rightarrow 0} \frac{\ln N_{\delta}(F)}{-\ln \delta} \quad (3)$$

下面介绍一种盒维数的估计方法^[9]。取边长为 $r_i (i=1,2,\dots,k)$ 的正方形网格覆盖曲线图见图 1,计算出边界 L 所占的格子数 $N(r)$,可得到 $L=N(r)$ 。对于不同的 r_i ,得一系列点对 $(\ln L_i, \ln r_i) (i=1, \dots, k)$,可以在直角坐标系下点绘上述点对,然后用直线拟合,或直接用最小二乘法按直线拟合点对,直线的斜率即为 D 的估计值。

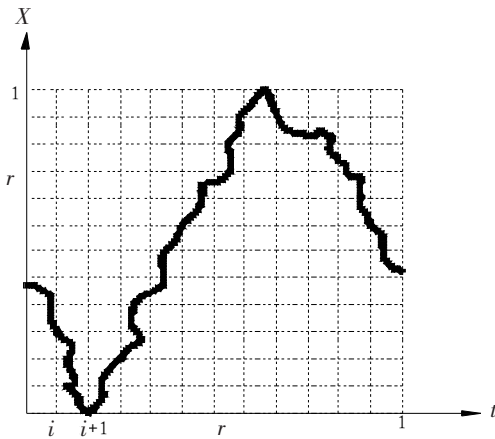


图1 计盒法计算分维示意图

2.1.2 分形理论在汉江仙桃断面的应用

运用分形理论研究汉江仙桃断面处调水前、调水 145m³ 后无引江济汉工程、调水 145m³ 后有引江济汉工程三种条件下 1965 年 5 月~1998 年 4 月多年月平均径流过程线的形态特征。运用分形理论中的分维数从曲线整体结构上描述径流过程线的形态特征,并分析调水前后径流过程的特征差异,得出南水北调中线工程对汉江水文情势的影响程度。相应的直线方程及其分维数见表 1。

由表 1 可得出以下结论:

(1) 分维数的变化反映出径流过程线形态复杂程度的变化情况,值在径流过程线上的反映主要是相邻峰谷差的平均变化,平均峰谷差越大,越大。

表1 $\ln N(r) - \ln(r)$ 直线方程及 D 的估计值

方案	直线相关方程	D 的估计值
调水前	$y = -1.1037x + 3.6687$	1.10
调水后无引江济汉工程	$y = -0.936x + 3.5106$	0.94
调水后有引江济汉工程	$y = -0.9135x + 3.4886$	0.91

表2 调水对多年平均流量的影响

单位: m³/s

方案	调水前	调水无引江济汉	变化百分比	调水有引江济汉	变化百分比
多年平均流量	1318	815	-38%	1006	-24%
多年平均汛期流量	1810	1094	-40%	1306	-28%
多年平均枯期流量	826	537	-35%	707	-14%
多年平均年最大旬流量	4544	3583	-21%	3773	-17%
多年平均年最小旬流量	501	357	-29%	459	-8%

(2)对比调水前和调水后多年平均月径流过程线的分维数,可以看出调水后分维数变小,有引江济汉工程时分维数减小的更多。

根据上述分析结论,可以在一定程度上说明调水前后流量在“过程上的”接近程度,分维数愈接近,认为调水对水文情势的影响愈小。总体上看,调水后的分维数均变小,即径流过程线的峰谷差变小,径流年内分配趋于均匀。局部上看,引江济汉工程使得月径流过程线的峰谷差变得更小,径流年内分配更趋均匀。

2.2 流量特征值的变化

采用调水前、调水 145 亿 m³ 无引江济汉工程、调水 145 亿 m³ 有引江济汉工程三种条件下的仙桃站 1965 年 5 月~1998 年 4 月逐旬流量,分别计算其流量特征值和径流年内分配,并对比分析其变化,进而评价调水工程以及引江济汉工程对汉江仙桃断面水文情势的影响。

调水前和调水后有/无引江济汉工程两种方案调节下的多年平均流量变化见表 2。由此可见,调水后多年平均流量大幅度减小,在引江济汉工程的补偿作用下,多年平均流量又有所增加,但仍然比调水前减小了很大幅度。

2.2.1 年平均流量的变化

图 2 为年平均流量过程线对比图。由图 2 可看出,调水后年平均流量明显低于调水前,有引江济汉工程后年平均流量又有所提高,但仍然低于调水前。但是在波动幅度和变化趋势上没有明显改变。对这三个序列分别进行变异诊断^[10],均无跳跃变异和趋势变异。可见,调水后年平均流量的变化趋势没有发生变化。

2.2.2 枯期和汛期流量的变化

图 3 为枯期平均流量过程线。由图 3 可看出,调水后多年平均枯期流量明显低于调水前,有引江济汉工程后多年平均枯期流量又有所提高,但仍然低于调水前。但是在波动幅度和变化趋势上没有明显改变。对这三个序列分别进行变异诊断^[10],均

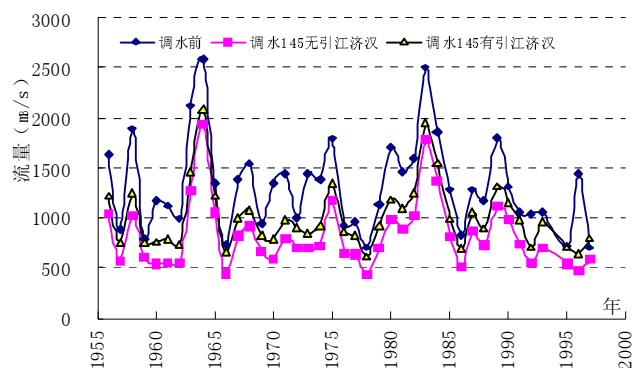


图2 年平均流量过程线对比

无跳跃变异和趋势变异。可见,调水后多年平均枯期流量的变化趋势没有发生变化。调水后多年平均汛期流量的变化情况与枯期流量的变化情况相似。

计算丰枯率(汛期平均流量与枯期平均流量的比值)并绘制其变化过程线见图4,由图4可见,调水后大部分年份的丰枯率与调水前相比有所减小,在引江济汉工程的调节下减小的更多,说明汛期和非汛期平均流量差值缩小,即流量峰谷差变小,与分形理论得到的结论相吻合。

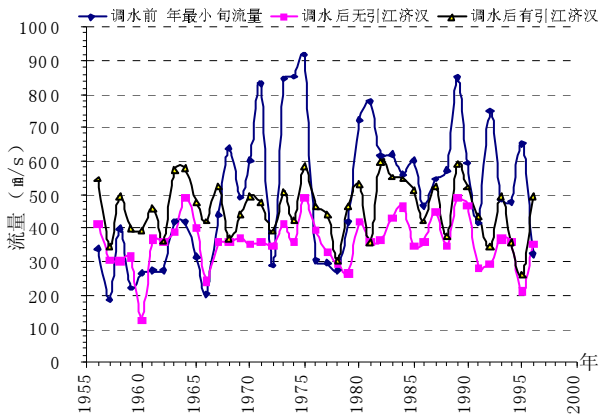


图3 枯期平均流量过程线

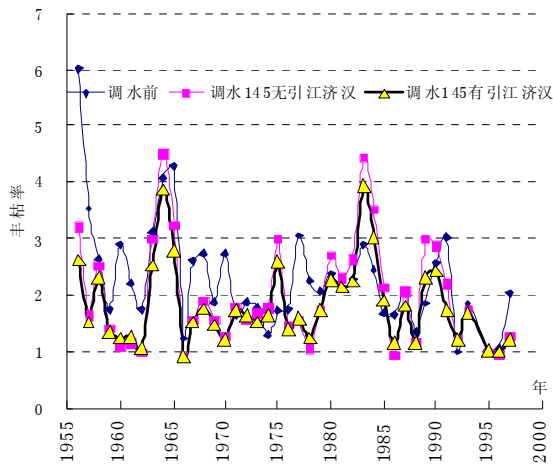


图4 丰枯率

2.2.3 径流年内分配的变化

用径流年内分配不均匀系数 C_v 来衡量径流年内分配的不均匀性。径流年内分配不均匀系数 C_v 的计算公式如下:

$$C_v = \sigma / \bar{R} \tag{4}$$

$$\text{其中: } \sigma = \sqrt{\sum_{i=1}^{12} (R_i - \bar{R})^2} ; \quad \bar{R} = \frac{1}{12} \sum_{i=1}^{12} R(t)$$

式中: $R(t)$ 为年内各月径流量; \bar{R} 为年内月平均径流量。由式(4)中可以看出, C_v 值越大表明年内各月径流量相差悬殊,径流年内分配越不均匀^[6]。

集中度和集中期的计算是将一年内各月的径流量作为向量看待,月径流量的大小为向量的长度,所处的月份为向量的方向^[11,12]。从1月到12月每月的方位角 θ_i 分别为 0,30,60, ..., 360

度,并把每个月的径流量分解为 x 和 y 两个方向上的分量,则 x 和 y 方向上的向量合成分别为:

$$R_x = \sum_{i=1}^{12} R(t) \cos \theta_i, \quad R_y = \sum_{i=1}^{12} R(t) \sin \theta_i$$

于是径流的合成为:

$$R = \sqrt{R_x^2 + R_y^2}$$

定义集中度 C_d 和集中期 D 如下:

$$C_d = R / \sum_{i=1}^{12} R(t), \quad D = \arctg(R_y / R_x) \tag{5}$$

由式(5)可以看出,合成向量的方位,即集中期 D 反映了月径流量合成后的总效应,也就是向量合成后重心所指示的角度,即表示一年中最大月径流量出现的月份。而集中度则反映了集中期径流值占年总径流的比例。

径流变化幅度的大小对于水利调节和水生生物的生长繁殖都有重要的影响。变化幅度过大,水资源的开发利用难度相应增加,水利调节的力度就必须相应地加强。另一方面,河川径流形势适当的变化幅度是一些水生生物重要的生存条件,过于平稳或者过于激烈的变化则可能导致水生生物生境的破坏,威胁生态安全^[6]。本文用相对变化幅度来衡量径流的变化幅度,即取河川径流最大月径流(R_{max})和最小月径流(R_{min})之比,如式(6)所示。

$$C_m = R_{max} / R_{min} \tag{6}$$

表3为调水前后有无引江济汉工程调节下的径流年内分配的集中度、集中期、不均匀系数以及月极值比的计算结果。由表3可见,调水前径流年内分配不均匀性最大,调水后不均匀系数减小,在引江济汉工程的作用下不均匀系数减小的更多;从径流年内分配的集中性看,调水前集中度最大,调水后集中度减小,在引江济汉工程的作用下集中度更小;就集中期而言,根据从1月到12月每月的方位角 θ_i 分别为 0,30,60, ..., 360度可知,三种方案下的集中期均为八月下旬;从径流月极值来看,调水前径流年内相对变化幅度最大,调水后相对变化幅度减小,在引江济汉工程的作用下相对变化幅度更小,与由分形理论得到的结论相吻合。

2.2.4 旬平均流量极值的变化

由于受丹江口水库的调节,仙桃站年最小旬流量在70年代后明显增大;而调水后两种方案下的年最小旬流量在70年代后无增大趋势,相对于调水前变小,见图5。对这三个序列分别进行变异诊断^[10],除调水前最小旬流量在1967年存在中等程度的跳跃变异外(受丹江口水库调节作用的影响),其它序列均无明显变异。可见,调水后最小旬平均流量的变化趋势没有发生变化。

表3 径流年内分配不均匀性

方案	集中度	集中期 (方位角)	不均匀 系数	月极值比
调水前	0.29	238	0.44	3.73
调水后无引江	0.27	233	0.42	2.90
调水后有引江	0.24	236	0.36	2.85

调水后年最大旬流量也变小了,其变化特性与最小旬流量类似。

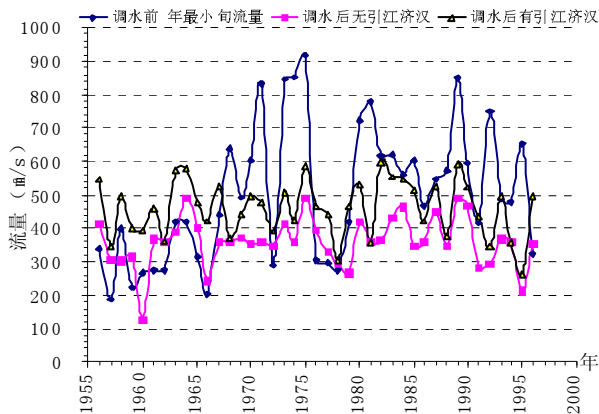


图5 调水工程对最小旬流量地影响

3 结论

(1)从整体上看,调水后径流过程线的峰谷差变小;从局部上看,引江济汉工程使得月径流过程线的峰谷差变得更小,径流年内分配更趋均匀。

(2)调水后各种历时的平均流量均变小,在引江济汉工程的补偿作用下有所回升,但仍然小于调水前,导致汉江中下游的可用水资源量变少,对汉江中下游流域的经济发展难免产生不良影响,也在一定程度上影响了其流域生态系统的结构及稳定性。

(3)调水后枯期平均流量和最小旬流量均减小,在引江济汉工程的补偿作用下有所回升,但仍然小于调水前,导致汉江在枯水期形成近似湖泊的缓流水体,加大了汉江下游暴发水华的可能性。

(4)调水后径流年内分配趋于均匀化,在引江济汉工程的作用下更趋均匀;调水后径流年内集中度变小,在引江济汉工程的

作用下更小,但集中期不变;调水后径流年内相对变化幅度减小,在引江济汉工程的作用下相对变化幅度更小,影响水生生物的生存条件。

(5)调水后各历时的平均流量均无趋势或跳跃变异。

参考文献:

- [1] 窦明,谢平,夏军,等.汉江水华问题研究[J].水科学进展,2002,13(5):557~561.
- [2] 谢平,夏军,窦明,等.南水北调中线工程对汉江中下游水华的影响及对策研究 I—汉江水华发生的关键因子分析 [J]. 自然资源学报,2004,19(4):418~423.
- [3] 陈根祥,胡高平,张德兵.汉江发生“水华”的水文因素[J].长江职工大学学报,2002,19(1):57~58.
- [4] 关彩虹,胡炜,吴月芳,等.南水北调一期工程对汉江下游襄阳段的水文情势影响[J].水资源保护,2005,24(5):10~12.
- [5] 刘德平.分形理论在水文过程形态特征分析中的应用[J].水利学报,1998,(2):20~25.
- [6] 丁晶,刘国东.日流量过程分维估计[J].四川水力发电,1999,18(4):74~100.
- [7] 郑红星,刘昌明.黄河源区径流年内分配变化规律分析[J].地理科学进展,2003,22(6):585~590.
- [8] Jacques Bair, Serge Dubuc. Fractal geometry and analysis. Boston: Kluwer Academic Publisher,1991:221~254.
- [9] 王炳雪,史忠科,吴方向.时间序列曲线盒维数的一种快速算法[J].系统工程,2000,18(4):68~71.
- [10] 谢平,陈广才,李德,等.水文变异综合诊断方法及其应用研究[J].水电能源科学,2005,23(2):11~14.
- [11] 汤奇成,程天文,李秀云.中国河川月径流的集中度和集中期的初步研究[J].地理学报,1982,37(4):383~393.
- [12] 杨远东. 河川径流年内分配的计算方法 [J]. 地理学报,1984,39(2):218~227.

Influence of Middle Route of South-to-North Water Diversion Project on Hydrological Regime in Middle and Lower Reaches of Hanjiang River

XIAO Chan, XIE Ping, TANG Tao, CHEN Li

(State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: In order to evaluate the influence of the middle route of the south-to-north water diversion project (MR-SNWDP) on water bloom in the middle and lower reaches of the Hanjiang River, the effects on the hydrological regime were analyzed. Based on the flow data of Xiantao Section, both of the fractal feature of flow curve and the variations of hydrological feature values (after the 145×108m³ scheme of MR-SNWDP has been implemented) were calculated, considering if the diversion work from Yangtze River to Hanjiang River (DWYRHR) is built. The results indicate that the hydrological regime in the middle and lower reaches of the Hanjiang River will be obviously changed, mainly in the following ways: The annual runoff distribution will become more uniform, the annual runoff concentration will become lower, relative variation rate will become smaller, which will become more visible under the effects of the DWYRHR; the average flow of different period (year, flood season, dry season) will become smaller, and the minimum flow of ten days will become smaller too, which will be mitigated under the effects of the DWYRHR. Since the outbreak of water bloom in the Hanjiang River concentrates in dry seasons, the decrease of average flow during dry season and the minimum flow of ten days surely will accelerate the outbreak of water bloom in the Hanjiang River.

Key words: south-to-north water diversion project; hydrological regime; influence analysis