

DOI: 10.5846/stxb201404080664

刘剑宇, 张强, 顾西辉. 水文变异条件下鄱阳湖流域的生态流量. 生态学报, 2015, 35(16): 5477-5485.

Liu J Y, Zhang Q, Gu X H. Evaluation of ecological flow with considerations of hydrological alterations in the Poyang Lake basin. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(16): 5477-5485.

水文变异条件下鄱阳湖流域的生态流量

刘剑宇^{1,2}, 张 强^{1,2,3,*}, 顾西辉^{1,2}

1 中山大学水资源与环境系, 广州 510275

2 中山大学华南地区水循环与水安全广东省普通高校重点实验室, 广州 510275

3 宿州学院地球科学与工程学院, 宿州 234000

摘要: 受气候变化和人类活动综合影响, 鄱阳湖流域水文状况发生变异。河流生态系统适应了变异前的水文状况, 变异后势必会影响当地生态系统。基于此, 采用 8 种变异检测方法对水文变异进行综合诊断, 阐明水文变异原因。在此基础上, 采用 15 种概率分布函数分别拟合 5 站各月变异前日流量序列, 最终确定 5 站点各月最优分布函数及所对应的概率密度最大处的流量, 即得河道内生态流量。研究表明: (1) 抚河于 1962 年发生弱变异, 赣江、修河于 1968 年发生中变异, 信江、饶河于 1991 年发生弱变异; (2) 变异后, 赣江、信江、饶河、修河生态需水满足率平均上升 11%, 抚河生态需水满足率下降 32%; (3) 水文变异增加提高生态需水满足率, 水利工程建设降低年均生态需水满足率、提高干季生态需水满足率。高森林覆盖率提高干季生态需水满足率, 对年均生态需水满足率影响不明显。研究结果为鄱阳湖流域水资源管理及区域水资源规划与配置提供重要科学依据。

关键词: 鄱阳湖流域; 生态流量; 水文变异

Evaluation of ecological flow with considerations of hydrological alterations in the Poyang Lake basin

LIU Jianyu^{1,2}, ZHANG Qiang^{1,2,3,*}, GU Xihui^{1,2}

1 Department of Water Resources and Environment, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China

2 Key Laboratory of Water Cycle and Water Security in Southern China of Guangdong High Education Institute, Sun Yat-Sen University, Guangzhou 510275, China

3 School of Earth Sciences and Engineering, Suzhou University, Suzhou 234000, China

Abstract: Fluvial hydrological processes within the Poyang Lake basin are significantly altered under the influence of human activities and climate changes. Poyang Lake is the largest freshwater lake and plays an important role in conservation of biological diversity and also in flood mitigation in the Yangtze River basin. In this case, ecological instream streamflow is also altered and the ecological environment is potentially affected under the influences of altered hydrological processes. With consideration of hydrological alterations, re-evaluation of ecological instream streamflow will be of great scientific and practical merit in terms of water resource management and conservation of ecological environment. We use the Hurst coefficient method to preliminary analyze the degree of alterations in five major tributaries of the Poyang lake basin. Then we use eight mutation testing methods to comprehensively investigate change points. We use 15 kinds of probability distribution functions to fit respectively daily flow for each month before occurrence of the hydrological alterations. Finally, the monthly optimal distribution functions and corresponding streamflow with the largest probability are determined and computed, and

基金项目: 鄱阳湖湿地与流域研究教育部重点实验室(江西师范大学)主任开放基金资助项目(ZK2013006); 安徽省高校引进“领军人才”专项项目

收稿日期: 2014-04-08; **网络出版日期:** 2014-09-30

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhangq68@mail.sysu.edu.cn

accepted as the ecological instream streamflow. Results indicate that: (1) main causes behind the hydrological alterations of the Gan, Xin, Rao and Xiu Rivers are the climate changes such as the precipitation changes observed in this study. However, the Hu River is mainly affected by human activities; (2) due to large amounts of water diversion irrigation system, hydrological processes in the Hu River were significantly altered after 1962. The hydrological alterations of the Gan and Xiu Rivers occurred in 1968. The East Asian Summer Monsoon led to an increase of precipitation during the mid-1960s; The Xin, Rao Rivers were dominated by significant hydrological alterations in 1991. Increase of precipitation in the early 1990s is the main cause behind this hydrological alterations that occurred in the 1960s; (3) The increase of forest coverage and the construction of water conservancy are expected to improve the satisfaction rate of the ecological water requirement in the dry season. The satisfactory rate of ecological water requirement in the dry season is higher than that in the wet season in the Rao, Gan, and Xiu Rivers. However, the Fu and Xin Rivers do not follow this trend. The forestation and increased vegetation coverage can greatly alter the spatiotemporal distribution of water or runoff and can significantly increase the runoff during the dry seasons. Woodland has an important influence on the changes of runoff. Due to the large forest coverage, the ecological instream flow is greatly satisfied during dry seasons in the Rao River when compared to the other four rivers. A difference is found in the Gan River in terms of water requirements of ecological instream flow between wet and dry seasons. The number of reservoirs in the Gan River basin is high when compared to the other four tributaries of the Poyang Lake basin that were considered in this study. Forest coverage in the Xiu River basin accounts for 64.4% of the total area, which is ranked the second largest in the Poyang Lake. However, the difference between wet and dry seasons is small. The quantity and scale of the reservoir in the Xiu River basin falls far behind others. Therefore, the regulation activities of the reservoirs in Xiu River basin is not evident than other river basins. On the contrary, the satisfactory rate of ecological water requirements for the dry season is below that for the wet season in the Fu and Gan River. The rate of forest coverage in those two basins is far less than in other basins. The ability to regulate the forest is limited. These results will provide an important scientific basis for the planning and management of water resources within the Poyang Lake basin under a changing environment.

Key Words: Poyang Lake basin; ecological streamflow; hydrological alterations

在全球气候变化和人类活动共同作用下,河流水文过程发生显著变异^[1],改变了流域生态系统已适应了变异前的水文状态^[2]。为科学、合理计算河流生态需水,保障河流生态系统良性发展,有必要在水文变异的基础上对河流生态需水进行研究。崔瑛等^[3]回顾了国内外生态需水的研究进展,认为生态需水尚无统一认可的概念。李捷等^[4]提出逐月频率计算法,通过与 Tennant 法对比得出该方法的优缺点及适用范围。张华等^[5]运用水文平衡原理构建湖泊生态需水模型,估算了东居延海不同湖面面积下的生态需水量。李剑锋等^[6]提出考虑水文变异的河道内生态需水计算方法,对黄河干流各站的月平均流量序列进行生态需水计算。但相关研究尚未在鄱阳湖流域开展。鄱阳湖湿地是我国最大的淡水湖生态湿地,对维系区域和国家生态安全具有重要作用。受人类活动与气候变化影响,该流域气象水文过程发生显著变异,变异后势必会对当地以及鄱阳湖湖区生态系统造成不同程度的影响。国务院于 2009 年正式批复《鄱阳湖生态经济区规划》,这标志着鄱阳湖生态经济区正式上升为国家战略。因此,研究鄱阳湖流域生态需水更具有实践意义。

本文对鄱阳湖流域水文变异情况下,探讨:1)采用 M-K 检验法、累积距平法、有序聚类法等八种变异诊断方法对变异点进行系统检测,增加变异检验的可信度;2)选用 Log-Logistic 分布、Weibull 分布、Pearson-III 型分布等 15 种概率分布函数分别对各站点各月份变异前的日流量序列进行拟合分析;3)在拟合优度检验方面,采用 3 种拟合优度检验方法对概率分布函数进行拟合优度分析,更好的反映站点水文特征。并通过对变异前后生态需水满足率的变化,分析讨论水文变异对河道内生态需水的影响。该项研究对科学分析计算河道内生态需水具有重要理论意义,对鄱阳湖流域水资源管理具有重要参考价值。

1 研究区概况与数据来源

鄱阳湖是我国第一大淡水湖,流域面积 16.22 万 km²,占长江流域面积的 9%。鄱阳湖入湖水量主要受赣江、抚河、信江、饶河、修河五大支流(以下简称“五河”)影响,构成山江湖一体的核心-边缘结构体系^[7](图 1)。鄱阳湖地处亚热带季风气候区,降水量季节分配不均,流域大部分地区 4—6 月降水总量占全年降水总量的 45%—50%。鄱阳湖流域共建有大中型水库 208 座,总库容 204.2 亿 m³,10 个大中型引水灌溉渠系,其中大于 6 670 hm²以上的灌区有 7 个(图 1)。

本文数据为鄱阳湖流域水系“五河”主要控制站的日流量(表 1),数据来源于江西省水文局。部分缺失数据通过与相邻的水文站水文序列建立回归关系进行插补($R^2>0.8$)。

2 研究方法

受气候变化和人类活动的双重影响,水文序列往往发生变异,使水文序列分布发生改变。河流生态系统适应了变异前的水文状态,变异后势必影响当地生态系统。基于此,本文首先对研究区域河流水文序列进行变异检验分析,再结合生物系统基础理论对鄱阳湖流域生态需水进行研究。

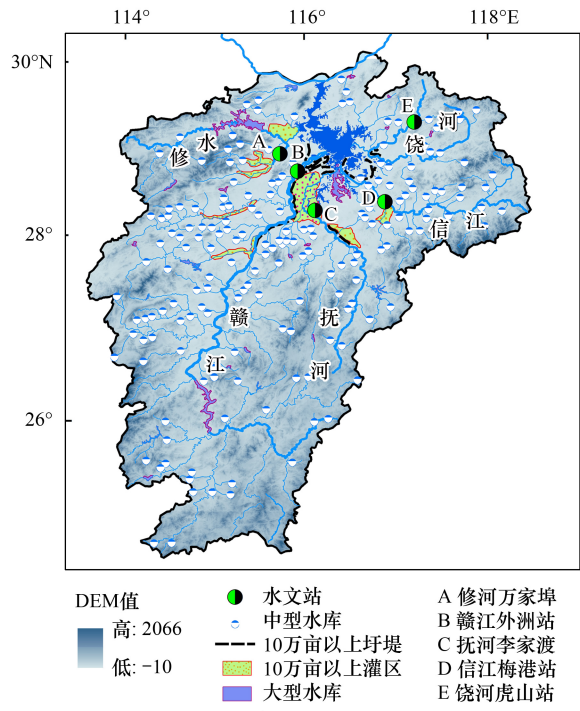


图 1 鄱阳湖流域、主要水文站点、水库、灌区位置示意图
Fig.1 Location of Poyang Lake, hydrological stations, water reservoirs and irrigation areas in the Poyang Lake Basin

表 1 鄱阳湖流域水文站流量数据

Table 1 Detailed information of hydrology station and stream flow in Poyang lake region					
河流 River	站名 Stations	集水面积/km ² Catchment area	资料长度 Length of data	缺失资料时期 Missing data period	多年平均径流量(×10 ⁸ m ³) Average annual runoff
赣江	外洲	80948	1955—2005		545.4
信江	梅港	15811	1953—2005		186.5
抚河	李家渡	15535	1955—2005		130.1
饶河	虎山	6374	1953—2005	1977—1978 年,1981 年的 1—8 月	69.1
修河	万家埠	3548	1955—2001		29.0

2.1 水文变异检验方法

变异点检验方法众多,李剑锋等^[6]使用滑动秩和检验法对黄河干流水文变异进行了分析,马岚等^[8]利用重新标度极差分析法对石羊河下游径流变异进行了检测。考虑到单一检测方法有其适用流域的局限性,本文采用 Hurst 系数法对变异程度进行初步分析,并选用 M-K 检验法、累积距平法、有序聚类法、Lee-heg 法、滑动 T 检验法、滑动 F 检验法、滑动游程检验法和滑动秩和检验法八种方法对水文变异进行综合诊断。

2.2 生态需水计算方法

若水文变异诊断存在变异点,则认为水文序列的总体分布不一致,不符合水文资料的一致性要求。可以认为流域生态环境适应了变异前的水文状态,因此计算河道内生态流量时,只考虑变异前的水文序列。若水文序列不存在变异点,则采用整个水文序列计算生态需水。

流量作为河流生态系统最重要的环境因子之一,可以作为河流生态环境的重要考察指标。生态适宜性理论^[9]认为,生物在适宜的环境中,生物数量最多,生长最好;随着生态因子偏离适宜值,生物生长繁殖速度减慢;当超过生物耐受区间,生物数量即会减少,直至消亡。长期的自然选择促使生物适应出现频率较高的环境因子。因此,本文取概率密度最大处流量作为适宜生物生长繁殖的生态流量。Green 等^[10]研究指出,任一种概率分布函数只可能对某种分布或者某个子样本容量的检验效果较好,并不存在一种占绝对优势的的概率分布函数。采用 Log-Logistic 分布、Weibull 分布、Pearson-III 型分布等^[11]15 种分布函数对 5 个站点变异前各月流量序列进行拟合,并采用 Kolmogorov-Smirnov (K-S)、Anderson Darling (A-D) 和 Chi-Squared (C-S)^[12]3 种检验方法进行拟合优度检验分析。

3 变异点检验及成因分析

3.1 变异点检测

采用 Hurst 系数法对变异程度作初步检验,虎山、李家渡、梅港、外洲、万家埠三站 Hurst 系数分别为 0.63、0.51、0.62、0.71、0.76,根据谢平等^[13]基于 Hurst 系数对变异程度的划分,虎山、李家渡、梅港三站为弱变异,外洲、万家埠两站为中变异。采用 M-K 检验法、累积距平法、有序聚类法等方法^[14]对具体变异点进行综合检测,将可能变异点中权重最高的年份作为最终变异点(表 2)。

表 2 变异点综合诊断结果

Table 2 Results of comprehensive diagnosis for variation

站点 Stations	变异点(年份) Variation point	变异点评分之和 Variation score	综合权重 Comprehensiveweight	检验方法 Testmethod
虎山	1991	4	0.57	累积距平法、有序聚类法、滑动游程检验法、滑动 T 检验法
李家渡	1962	3	0.50	累积距平法、有序聚类法、Lee-heg、有序聚类法、滑动 T 检验法
梅港	1991	2	0.40	Lee-heg、有序聚类法、滑动 T 检验法
万家埠	1968	4	0.57	滑动秩和检验、累积距平法、滑动 T 检验法、有序聚类法、Lee-heg
外洲	1968	2.5	0.42	累积距平法、有序聚类法、Lee-heg

虎山、梅港和李家渡三站的年径流量均发生了弱变异,变异点分别是 1991、1991、1962 年;万家埠和外洲两站年径流量发生了中变异,变异年份同为 1968 年。各站点水文序列变异点被多种方法同时检测出,增加了变异点存在的可信度。

3.2 水文变异成因分析

整个鄱阳湖流域近 50 年来气候变化明显。鄱阳湖流域降雨量呈增加趋势,蒸发量呈下降趋势,降雨量在 20 世纪 60 年代中后期以及 90 年代初发生突变增加,蒸发量明显减小^[15]。运用一元线性法对径流序列进行趋势分析,发现信江、饶河、赣江、修河四河径流序列都有不同程度的增加趋势,这与鄱阳湖流域降水量突变增加、蒸发量突变减少基本相符,水利工程等会引起径流量减小,因此,气候变化是上述四河径流突变增加的主要原因。相反,抚河径流序列的线性系数为-1.318,趋势减少,如果径流突变由气候变化主导,那径流变异应该是突变增加,因此,抚河水文变异主要受人类活动的影响。

各站点变异具体成因分析

(1)信江、饶河 鄱阳湖流域年降水量在 1990 年突变增加,夏季降水量和暴雨频率在 1992 年突变增加^[16],与梅港、虎山两站水文序列 1991 年变异时间点基本一致。饶河从水库数量、规模和级别上都落后于其他流域,水利工程对降雨径流的调蓄较少,径流量受水利工程影响较小。因此,气候变化是引起信江、饶河两河水文变异(增加)的主要原因。

(2)赣江、修河 东亚夏季风在 20 世纪 60 年代中后期发生了一次突变,由正常偏强夏季风转为弱夏季

风^[17]。夏季风减弱,南方降水增多,平均气温降低,蒸发量减少,导致年降水量在 60 年代中后期发生突变。年降水量的增加和蒸发量的减少是引起两河径流变异增加。这与本文检测出的赣江、修河径流变异时间大致相同。

(3) 抚河 李家渡上游有赣抚平原灌区(1958—1960)、洪门水库(1958—1961)。赣抚平原水利工程 1958 年动工,1960 年秋开始收益,东西灌渠设计引水流量分别为 $60\text{ m}^3/\text{s}$ 、 $107\text{ m}^3/\text{s}$,占抚河多年平均流量的 42%;洪门水库为江西四大水库之一,始建于 1958 年,1961 年开始蓄水,流域面积 2736 km^2 ,最大库容 12 亿 m^3 。本文检验出的变异时间与洪门水库和赣抚平原灌渠建成时间相近,表明人类活动是导致抚河水文变异的主要原因。

4 结果分析

4.1 生态需水计算结果

根据变异点发生年份将水文序列分段,选用变异前序列计算河道内生态需水。将概率密度最大处流量作为河道内生态流量,求概率密度最大处流量。以赣江外洲站 4 月份为例,选用上述 3 种检验方法对 15 种分布函数进行拟合优度分析,综合检验结果表明 Johnson SB 分布为外洲站 4 月份水文序列最优概率分布函数(表 3)。同时,以该月为例比较了几个概率分布函数的理论概率分布曲线与经验概率分布(图 2),认为 Johnson SB 法与经验概率分布吻合更好。

表 3 外洲站 4 月逐日流量的 15 种概率分布函数拟合优度检验表

分布函数 Distributionfunction	K-S 检验 Kolmogorov Smirnov		A-D 检验 Anderson Darling		C-S 检验 Chi-Squared	
	检验值 Testvalue	排序 Rank	检验值 Testvalue	排序 Rank	检验值 Testvalue	排序 Rank
Johnson SB 分布	0.028	1	0.388	1	10.5	1
三参数 Burr 分布	0.031	2	0.418	2	12.0	6
Pearson-III 型分布	0.033	3	0.456	3	11.7	5
Fatigue Life 分布	0.035	4	0.571	5	10.5	2
逆 Gaussian 分布	0.035	5	0.589	6	10.7	3
Weibull 分布	0.036	6	0.480	4	10.9	4
广义 Pareto 分布	0.040	7	64.6	12	N/A	
Log-Logistic 分布	0.046	8	1.31	7	11.8	6
Log-Gamma 分布	0.078	9	4.92	8	29.2	8
Hyper Secant 分布	0.108	10	6.76	9	29.4	9
Frechet 分布	0.139	11	17.0	10	67.2	10
Pareto 二型分布	0.246	12	41.0	11	132.0	11
Pareto 一型分布	0.393	13	93.0	13	623	12
Dagum 分布	0.513	14	148	14	N/A	
四参数 Burr 分布	N/A		N/A		N/A	

采用相同方法对其它各站点站逐月日流量序列进行拟合优度检验分析,得到相应水文序列最优分布函数与生态流量(表 4)。

选用 15 种分布函数对 5 个站点变异前水文序列进行系统分析,并采用 3 种检验方法对拟合优度综合检验。检验分析发现,不同子流域、不同月份最优分布函数存在差异。因此,按不同流域、不同月份水文序列分别进行概率分析是必要的。

在拟合优度综合检验过程中发现,某种分布函数在一种拟合优度检验方法下是最优的,但另外一种方法检验效果却非常差。例如对外洲站 5 月份水文序列分布函数的拟合检验, K-S 检验广义 Pareto 分布为最优, A-D 检验为最劣, C-S 检验拒绝。故选用 A-D 检验、C-S 检验最优的, K-S 检验第二的 Johnson SB 分布作为外洲站 5 月份最优分布函数。因此,采用多种方法对概率分布函数拟合优度进行综合检验更为合理。

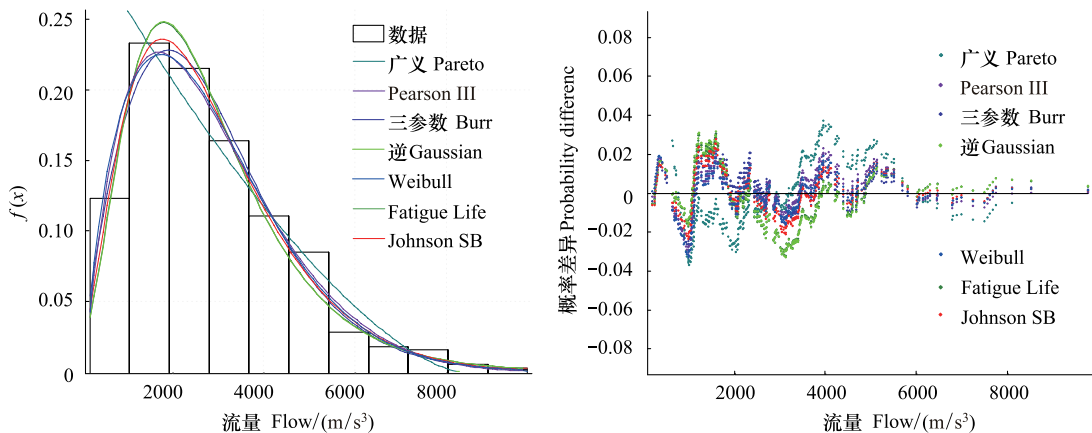


图 2 外洲站 4 月逐日流量的理论与经验概率分布曲线及相应的概率差异图

Fig.2 Probability distribution functions and Probability Difference for the respectively daily flow at the April of Waizhou station

4.2 与其它方法对比

将本文所采用的方法与最小月平均流量法、逐月最小流量法等常用方法比较。由于篇幅限制,只列出各方法所求得的年均生态流量(表 5)。最小月平均流量法与最枯月频率法所给出的生态流量各月相同,不能反映生态需水的月份差异;除外洲站外,各站生态流量的 Tennant 法^[18]等级基本处于差水平。逐月最小流量法与本文方法都能反映生态需水的月份差异,但最小月平均流量法考虑的是最小月平均流量这一极端条件,因

表 4 5 站点各月份水文序列最优分布函数及其对应的生态流量

Table 4 Optimal probability distribution functions and ecological flow for each month at every station										
月份 Month	李家渡		万家埠		梅港		虎山		外洲	
	分布函数 Function	流量 Flow/ (m ³ /s)	分布函数 Function	流量 Flow/ (m ³ /s)	分布函数 Function	流量 Flow/ (m ³ /s)	分布函数 Function	流量 Flow/ (m ³ /s)	分布函数 function	流量 flow/ (m ³ /s)
1	Burr(3P)	72	Burr(4P)	17	Log-logistic	49	Dagum	18	Dagum	349
2	FatigueLife	89	Burr(3P)	19	Pearson-III	105	Burr(4P)	17	FatigueLife	392
3	Welbull	141	Burr(3P)	26	Pearson-III	196	Burr(3P)	68	Johnson SB	867
4	Welbull	141	Dagum	40	FatigueLife	296	Burr(4P)	121	Johnson SB	1733
5	Pearson-III	523	逆 Gaussian	52	FatigueLife	329	Pearson-III	159	Johnson SB	2810
6	逆 Gaussian	373	Dagum	55	Dagum	327	Pearson-III	102	Johnson SB	1970
7	Dagum	112	Burr(3P)	19	Dagum	119	Burr(4P)	14	Frechet	769
8	Log-Gamma	91	Loglogistic	21	Burr(3P)	103	Burr(3P)	37	Log-logistic	620
9	Burr(4P)	66	Dagum	15	Burr(3P)	88	Burr(3P)	28	Pearson-III	379
10	Log-logistic	79	Burr(4P)	21	Burr(3P)	89	Log-Gamma	17	逆 Gaussian	356
11	Burr(3P)	79	Burr(3P)	19	Dagum	60	Burr(4P)	16	逆 Gaussian	417
12	Frechet	65	Burr(3P)	18	Burr(4P)	45	Burr(4P)	14	逆 Gaussian	329

表 5 与其它生态需水计算方法比较

Table 5 Compare with other calculating methods of ecological streamflow						
站点 Station	本文生态流量 Ecological streamflow/ (m ³ /s)	Tennant 等级 Tennant/ (m ³ /s)	最小月均流量法 Mininum monthly average flow method/ (m ³ /s)	逐月最小流量法 Monthly minimum streamflow method/ (m ³ /s)	最枯月频率法 Mininum monthly frequency method/ (m ³ /s)	逐月频率计算法 Monthly frequency calculation method/ (m ³ /s)
虎山	50.8	中	27.8	37.5	11.4	59
梅港	150.4	好	30.3	120.6	36.9	162.8
李家渡	152.4	好	50.4	40.1	25	66.4
外洲	915.9	好	506.3	619.7	299	846.8
万家埠	26.9	中	25	26.1	13.2	37.7

此,该方法下各月生态流量均小于本文生态流量。逐月频率计算法下生态流量与本文生态流量相当,逐月频率计算法在一定的保证率下对生态需水进行计算,其保证率的设定至今没有统一定论,计算结果主观性较强。本文方法计算频率最大处流量,计算结果在 Tennant 法等级中属于好或中水平,可以满足水生生物的正常需求,其计算结果具有确定性与合理性。

5 讨论

如果实测流量大于生态流量,则认为该流量满足生态需水的要求。各月生态需水得以满足的日数与序列相应月份总日数之比为生态需水满足率^[19]。通过对各流域生态需水满足率的对比分析来探讨气候变化与人类活动对生态需水的影响。

5.1 变异前后年生态需水满足率变化

除抚河李家渡外,其它四站水文变异后生态需水满足率均上升,平均上升幅度为 11%,河流生态系统的正常需水得到更好保障(表 6)。河流径流量增加使得变异后生态需水满足率提高。鄱阳湖流域 1961—2003 年饶河、信江、赣江中下游、信江中下游地区降水量呈增加趋势,暴雨、特大暴雨频次增加明显对年降水量增加贡献最大,同时流域内蒸发量的减少一定程度上也增加了河川径流^[20]。变异后蒸发量的减少,降水量的增加是径流量增加、生态需水满足率提高的主要原因。

抚河变异前,各月生态需水满足率绝大部分在 70%以上,说明抚河变异前 70%以上的时间河流流量满足生态需水的要求,能保障河流生态系统的正常需水。抚河流域水文变异后,各月生态需水满足率均下降,近半数月份生态需水满足率不到 50%,平均生态需水满足率下降 32%。抚河径流量的大量减少导致变异后生态需水满足率降低。沿线灌区从抚河干支流上大量引水用于工农业生产,造成河道内径流量大幅度减少,使抚河生态需水满足率变化方向与其它四河相反。李家渡生态需水满足率下降与沿途灌渠大量引水有直接关系。

表 6 水文变异前后生态需水满足率

Table 6 Assurance of Ecological Flow before and after hydrological variation													
站点 Station		月份 Month											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
李家渡	变异前/%	76	90	96	100	82	83	72	74	79	66	72	74
	变异后/%	63	57	69	84	64	65	19	32	68	40	54	58
万家埠	变异前/%	73	80	78	80	85	84	67	81	75	68	74	67
	变异后/%	82	83	92	75	92	79	94	92	93	86	82	87
梅港	变异前/%	83	81	86	81	86	81	81	74	76	71	78	83
	变异后/%	89	72	94	95	89	78	88	97	91	93	97	97
虎山	变异前/%	80	94	80	82	81	83	83	76	73	88	86	83
	变异后/%	95	91	76	91	82	89	100	97	87	100	97	100
外洲	变异前/%	76	86	74	69	66	78	79	75	85	85	74	79
	变异后/%	84	88	61	60	61	72	79	95	97	100	93	94

5.2 变异前后干湿季生态需水满足率变化差异

鄱阳湖流域 4—6 月是全年雨量最大的 3 个月份,所以把径流量最大的 4、5、6 月定义为湿季,把径流量最小的 11、12 月及次年 1 月定义为干季,对比分析变异后干湿季生态需水满足率的差异。饶河虎山、赣江外洲、修河万家埠 3 站干季生态需水满足率高于湿季,抚河李家渡、信江梅港两站生态需水满足率干季小于湿季。流域森林植被对径流变化有重要影响,森林可以起到蓄水、保水、保土作用,调节年际间枯水的流量,并且显著提高干季径流量。江西从 20 世纪 80 年代开始实行山江湖工程、退耕还林工程、中德造林工程、长(珠)防林工程以及各种人造林工程,大量植树造林使江西省的森林覆盖率迅速提高到 60.1%,居全国第二位。饶河流域森林覆盖率达 67.8%,修河流域为 64.4%,赣江流域 63.6%,信江流域为 54.3%,抚河流域为 53.0%。

饶河虎山站干季生态需水满足率与年生态需水满足率均为“五河”最高。饶河流域第一产业只占12.1%,农业用地在“五河”中最少,土地利用类型以林地为主,饶河流域森林覆盖率在“五河”中最高,占流域面积的67.8%,森林覆盖率明显增加干季径流量,增大干季生态需水满足率。饶河上游婺源、德兴一带是江西省的三大暴雨中心之一,该流域水资源量相当丰富。

赣江外洲站年生态需水满足率仅高于抚河,干季生态需水满足率高出湿季 39.1%,为“五河”干湿季生态需水满足率差别最大的河流。水库对径流量变化具有重要的调节作用,使下游河道枯水流量相对稳定,径流量年内分配较天然均匀,在一定程度上缓解干旱。赣江流域内有水库 107 座,库容达 75.13 亿 m^3 ,流域面积、水库数量和容量均居五河之首,尤其是 1990 年修建的赣江流域最大水库万安水库,其总库容达 22.16 亿 m^3 ,对枯水的调节发挥及其重要的作用。

修河流域森林覆盖率居鄱阳湖流域第二位,但干季生态需水满足率仅高出湿季 2.4%,这主要是由于万家埠上游的潦河流域只有 7 座中型水库,水库以灌溉型为主,流域内水库数量、规模和级别均落后于其它流域,水库调蓄功能小于其它流域。

而抚河李家渡站、信江梅港站干季生态需水满足率均低于湿季,分别低 8.5%、3.5%。抚河流域耕地资源丰富,相应的林业用地较少。抚河与信江两流域森林覆盖率远小于其它流域,森林调节能力有限是造成干季生态需水满足率小于湿季的主要原因。抚河干、湿两季生态需水满足率的差距大于信江,一方面是抚河流域森林覆盖率小于信江流域,另一方面抚河流域水库 18 座远小于信江流域的 35 座,抚河流域森林与水库的调节能力均小于信江。

6 结论

(1) 受气候变化和人类活动双重影响,河流水文状况发生不同程度变异。虎山、梅港水文序列均发生弱变异,变异年份为 1991 年,变异主要原因为 90 年代初降水量的突变增加。外洲、万家埠两站水文序列发生中变异,变异年份为 1968 年,变异主要是受 20 世纪 60 年代中期夏季风变化影响。抚河流域径流于 1962 年发生弱变异,变异原因是受水利工程建设影响。

(2) 鄱阳湖流域水文变异提高了生态需水满足率。另外,气候变化与人类活动对生态需水影响的程度均不同,水利工程降低年均生态需水满足率,而提高干季生态需水满足率;高森林覆盖率提高干季生态需水满足率,而对年均生态需水满足率影响不明显;修河、饶河、信江、赣江径流变异增加使年生态需水满足率上升,抚河径流变异减小使年生态需水满足率大幅度减小。高森林覆盖率与水利工程的大量建设使饶河虎山、赣江外洲、修河万家埠 3 站干季生态需水满足率高于湿季;低森林覆盖率使信江流域、抚河流域干季生态需水满足率小于湿季。

(3) 水文序列变异点检测符合水文资料一致性要求,选用最优分布函数所对应流量作为河流的生态流量,符合水生生物生长需求。与 Tennant 法、最小月流量法、逐月频率计算法等方法比较,本文计算结果更具确定性与合理性。本文研究对鄱阳湖流域各支流水资源管理与规划提供重要科学依据。

参考文献 (References):

- [1] Zhang Q, Xu C Y, Zhang Z X, Chen Y Q D. Changes of atmospheric water vapor budget in the Pearl River basin and possible implications for hydrological cycle. *Theoretical and Applied Climatology*, 2010, 102(1/2): 185-195.
- [2] Ziegler A D, Sheffield J, Maurer E P, Nijssen B, Wood E F, Lettenmaier D P. Detection of intensification in global and continental-scale hydrological cycles: temporal scale of evaluation. *Journal of Climate*, 2003, 16(3): 535-547.
- [3] 崔瑛, 张强, 陈晓宏, 江涛. 生态需水理论与方法研究进展. *湖泊科学*, 2010, 22(4): 465-480.
- [4] 李捷, 夏自强, 马广慧, 郭利丹. 河流生态径流计算的逐月频率计算法. *生态学报*, 2007, 27(7): 2916-2921.
- [5] 张华, 张兰, 赵传燕. 极端干旱区尾间湖生态需水估算——以东居延海为例. *生态学报*, 2014, 34(8): 2102-2108.
- [6] 李剑锋, 张强, 陈晓宏, 江涛. 考虑水文变异的黄河干流河道内生态需水研究. *地理学报*, 2011, 66(1): 99-110.
- [7] 崔丽娟, 赵欣胜. 鄱阳湖湿地生态能值分析研究. *生态学报*, 2004, 24(7): 1480-1485.

- [8] 马岚,魏晓妹. 石羊河下游年径流序列的变异点分析. 干旱地区农业研究, 2006, 24(2): 174-177.
- [9] Mackenzie A, Ball A S, Virdee S R. BIOS Instant Notes in Ecology (Instant Notes Series). 2nd ed. UK: BIOS Scientific Publishers Ltd., 2001: 20-63.
- [10] Green J R, Hegazy Y A S. Powerful modified-EDF goodness-of-fit tests. Journal of the American Statistical Association, 1976, 71(353): 204-209.
- [11] 屠其璞,丁裕国. 气象应用概率统计学. 北京: 气象出版社, 1984.
- [12] Sürücü B. A power comparison and simulation study of goodness-of-fit tests. Computers & Mathematics with Applications, 2008, 56(6): 1617-1625.
- [13] 谢平,雷红富,陈广才,李晶. 基于 Hurst 系数的流域降雨时空变异分析方法. 水文, 2008, 28(5): 6-10.
- [14] 谢平,陈广才,雷红富,武方圆. 水文变异诊断系统. 水力发电学报, 2010, 29(1): 85-91.
- [15] 郭华,苏布达,王艳君,姜彤. 鄱阳湖流域 1955-2002 年径流系数变化趋势及其与气候因子的关系. 湖泊科学, 2007, 19(2): 163-169.
- [16] Zhang Q, Peng J T, Xu C Y, Singh V P. Spatiotemporal variations of precipitation regimes across Yangtze River basin, China. Theoretical and Applied Climatology, 2014, 115(3/4): 703-712.
- [17] 郭其蕴,蔡静宁,邵雪梅,沙万英. 1873—2000 年东亚夏季风变化的研究. 大气科学, 2004, 28(2): 206-215.
- [18] Tennant D L. Instream flow regimens for fish, wildlife, recreation, and related environmental resources. American Fisheries Society, 1976, 1(4): 6-10.
- [19] 张强,李剑锋,陈晓宏,江涛. 水文变异下的黄河流域生态流量. 生态学报, 2011, 31(17): 4826-4834.
- [20] 孙鹏,张强,陈晓宏. 鄱阳湖流域枯水径流演变特征、成因与影响. 地理研究, 2011, 30(9): 1702-1712.