

洞庭湖出口径流变化及对生态系统的影响

程俊翔^{1, 2} 徐力刚^{1, 2} 姜加虎^{1, 2} 朱乾德³ 于丹丹⁴¹

(1. 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 中国科学院流域地理学重点实验室,

江苏南京 210008; 2. 中国科学院大学, 北京 100049;

3. 南京水利科学研究院, 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室,

江苏南京 210029; 4. 生态环境部南京环境科学研究所, 江苏南京 210042)

【摘要】: 为了阐明洞庭湖出口径流变化及生态效应, 根据城陵矶 1960~2016 年的日径流量数据, 采用生态盈余和生态赤字两个生态径流指标, 分别从年和季节尺度分析了洞庭湖出口径流变化, 并讨论了其对洞庭湖生态系统的影响。研究表明: 年生态盈余和年生态赤字的变化范围分别为 0~0.39 和 0~0.47, 且年生态赤字比年生态盈余的波动更加剧烈和频繁; 季节生态径流指标差异较大, 春季和冬季生态盈余波动比较频繁, 夏季和秋季生态盈余变化不大; 除冬季外, 春季、夏季和秋季生态赤字在水文变异后呈明显上升趋势, 且高于生态盈余; 季节生态变化总值整体呈上升趋势, 且在水文变异后更加离散, 表明生态系统受到了较大的扰动。气候变化和人类活动是导致径流变异的主要影响因素。降水对生态赤字的影响较大; 人类活动导致了高流量减少、低流量增加, 使季节生态径流指标发生较大改变。径流变化与生态系统关系的基本准则表明, 洞庭湖出口径流与生态系统具有紧密的联系, 且径流改变对生态系统产生了负面影响。

【关键词】: 洞庭湖 径流 生态盈余 生态赤字 生态系统影响

【中图分类号】: P343 **【文献标识码】:** A **【文章编号】:** 1004-8227(2019)05-1225-10

自然状态下的水文情势变化是河流、湖泊等水体的内在属性, 对水域生态系统的形成和演变具有重要的作用^[1,2]。近年来, 在气候变化和人类活动的双重影响下, 流域水文情势发生了巨大变化, 并导致水域生态系统随之发生改变^[3]。水文情势变化往往通过选择特定的水文指标来定量化表征, 是水文过程研究的重要基础, 特别是在涉及生态水文过程研究时就不得不考虑具有代表性的生态径流指标, 从而建立水文过程与生态过程之间的联系。所谓生态径流, 是保证天然状态下河流生态系统稳定和健康所需的径流量和径流过程, 以及伴随该过程所具有的温度、泥沙、水质、生物等特征^[4]。阐明生态径流变化既有利于理解径流演变规律, 又有利于厘清其与生态系统的响应关系, 在生态水文学研究中的重要意义。

作者简介: 程俊翔(1991-), 男, 博士研究生, 主要从事生态水文学和全球变化生态学方面研究. E-mail: chengjunxiang15@163.com; 徐力刚, E-mail: lgxu@niglas.ac.cn

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项(A类)(XDA230402); 中国科学院流域地理学重点实验室开放基金(WSGS2017002); 国家自然科学基金(41771235, 41601529); 中国水利水电科学研究院流域水循环模拟与调控国家重点实验室开放基金(IWHR-SKL-201602)。

为了探究径流变化及其可能的生态影响,学者们开展了广泛而深入的研究。Vogel 等^[5]基于流量历时曲线(Flow duration curve, FDC)提出了生态盈余和生态赤字两个生态径流指标,用来评估由于径流改变所导致的水域生态系统所需水量的多寡。根据生态径流指标、水文改变指标(Indicators of hydrologic alteration, IHA)等方法,Homa 等^[6]评估了美国马萨诸塞州各流域的水文情势变化,Li 等^[7]研究了跨国河流——湄公河的径流变化,Wang 等^[8]分析了大坝对长江径流变化的影响,Zhang 等^[9]、张宗娇等^[10]分析了黄河的径流变化特征及其生态效应。生态径流指标在我国东江流域的水文情势改变及其生态效应评估中有比较充分的研究,相关学者有 Zhang 等^[11]、顾西辉等^[12]、Lin 等^[13]。此外,Gao 等^[14]对比分析了生态径流指标和 IHA 两套代表性的水文指标,认为 IHA 虽然能较为全面的概括水文情势的变化特征,但是 IHA 的 33 个参数间存在冗余性问题,而生态径流指标也能够很好的表征水文情势的变化,这在 Zhang 等^[15]的研究中也得到了很好的验证。因此,采用生态径流指标分析水文情势变化及其生态效应可以有效地避免 IHA 的冗余性问题,是生态水文研究中的一种重要手段和方法。

洞庭湖位于复杂的“江-河-湖”系统中,加上长期以来受到气候变化和人类活动的共同影响,其水情变化极其复杂,是学者们的重点研究对象。洞庭湖出口是“江湖”的交汇点,其水情变化由长江和洞庭湖共同控制。目前,关于洞庭湖出口水情的研究主要集中在水位的时空变化特征^[16~18]、气候变化和人类活动对水位的影响^[19~22]、江湖水量交换^[23,24]等方面。然而,关于洞庭湖出口生态径流变化的研究鲜见报道,径流变化的生态效应也仍不清楚。因此,本研究分析了洞庭湖出口城陵矶近 60 年的径流变化特征,并讨论导致径流变化的主要影响因素以及径流变化的生态效应,以为洞庭湖的水资源管理和生态系统保护提供科学参考和依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

洞庭湖是我国目前仅存的两个大型通江湖泊之一,在调蓄洪水、保护生物多样性、提供生态系统服务等方面发挥着重要作用。洞庭湖水系极其复杂,入湖径流包括长江三口(松滋、太平、藕池)、湖南四水(湘江、资水、沅江、澧水)和区间径流(新墙河、汨罗江等)3 部分,其中长江三口来水占 37.1%,湖南四水来水占 54.6%^[25];经过湖泊调蓄后,再由唯一的出口——城陵矶排泄入江。城陵矶作为江湖的交汇点,其水文状况是反映江湖水情的重要指标^[16,17]。

1.2 数据

水文数据来源于湖南省水文水资源勘测局,为城陵矶 1960~2016 年逐日径流量数据。气象数据下载自中国气象数据网(<http://data.cma.cn/>),包括洞庭湖流域内 16 个气象站的逐日降水量,时间序列为 1960~2016 年。

1.3 研究方法

1.3.1 Mann-Kendall 检验

Mann-Kendall 检验(简称 MK 检验)可用于确定长时间序列水文参数的突变点。对数据序列 $x_1, x_2, \dots, x_n$, 设 m_i 为样本 $x_i > x_j$ 的累计数($1 \leq j \leq i$), 定义统计量:

$$d_k = \sum_{i=1}^k m_i \quad (1)$$

则 d_k 的均值和方差分别为:

$$E(d_k) = \frac{k(k-1)}{4} \quad (2)$$

$$\text{var}(d_k) = \frac{k(k-1)(2k+5)}{72} \quad (3)$$

将 d_k 标准正态化:

$$UF(d_k) = \frac{d_k - E(d_k)}{\sqrt{\text{var}(d_k)}} \quad (4)$$

给定显著性水平 $\alpha=0.05$, 当 $UF(d_k)>1.96$ 时, 表明有显著上升趋势; 当 $UF(d_k)<-1.96$ 时表明具有显著下降趋势。对于逆序列 $UB(d_k)$, 采样同样的计算方法。若 $UF(d_k)$ 和 $UB(d_k)$ 在置信区间内相交, 则交点即为可能的突变点^[26,27]。

1.3.2 生态径流指标

生态径流指标包括生态盈余和生态赤字, 可通过 FDC 计算得到。FDC 可以看作是某时段内的径流量 (Q_i) 为超过概率 (P_i) 的函数, 其中, P_i 根据 Q_i 按照降序排列得出:

$$P_i = \frac{i}{n+1} \quad (5)$$

式中: i 为秩次; n 为 Q_i 的样本大小。

将水文变异前的径流量作为基准, 分别计算出 25% 和 75% 分位数 FDC。当年或季节 FDC 超过 75% 分位数 FDC 时, 两者所围面积定义为生态盈余; 当年或季节 FDC 低于 25% 分位数 FDC 时, 两者所围面积定义为生态赤字 (图 1)。生态盈余和生态赤字可以反映水文变异导致的总体水量得失, 其中, 生态盈余代表满足河流生态系统需水所剩余的水量, 而生态赤字代表满足河流生态系统需水所缺乏的水量^[5,28]。季节生态变化总值是年内各季节生态盈余和生态赤字的总和, 可以从总体上反映径流改变对生态系统的影响^[14]。

1.3.3 径流变化与生态系统关系的基本准则

Bunn 等^[29]根据水文情势变化与水生生态系统的内在联系提出了四项基本准则: (1) 径流是河流自然生境的主要决定因素, 而这又是河流生态系统生物构成的主要决定因素; (2) 作为对自然径流变化的直接响应, 水生生物已经进化并拥有了独特的生命历程模式; (3) 保持河流的横向和纵向连通性的自然格局对大多数河流物种的生存力至关重要; (4) 改变的水文情势有利于外来入侵物种的生存。根据以上基本准则, 可以进一步阐明径流与生态系统的作用关系, 并分析改变的水文情势对生态系统的影响。

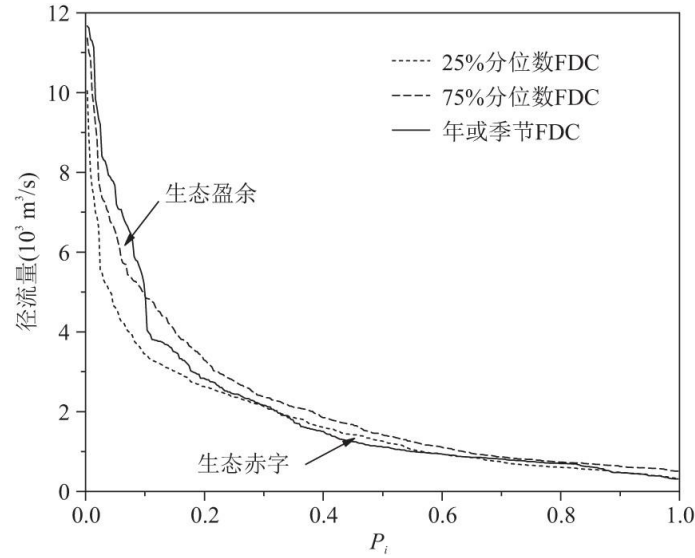


图 1 生态盈余和生态赤字的定义^[5, 28]

2 研究结果

2.1 径流突变点的确定

城陵矶 1960~2016 年径流量的 MK 检验结果如图 2 所示。自 20 世纪 70 年代以来,城陵矶径流量呈明显下降趋势,其中在 20 世纪 80 年代中期至 90 年代中期,以及 2005~2016 年均表现出了显著下降趋势。在 0.05 置信区间内,UF 与 UB 存在唯一的交点,位于 1975~1976 年之间,即为突变点。因此,将 1976 年作为城陵矶径流量发生变异的年份,并据此划分研究时段,即 1960~1975 年为水文变异前,1976~2016 年为水文变异后。

2.2 年生态径流指标变化

从年尺度来看,城陵矶的年生态盈余和年生态赤字均表现出较强的波动性,特别是年生态赤字的变幅明显强于年生态盈余(图 3)。年生态盈余和年生态赤字分别在 1982 年和 2011 年达到最大值,分别为 0.39 和 0.47。其中,2011 年为洞庭湖流域的极端干旱年,所以该年的低流量要显著低于 25%分位数 FDC,导致了该年的年生态赤字最大。年生态盈余在 20 世纪 60 年代中后期至 70 年代处于较低水平,而从 90 年代后一直处于较大的波动状态,经历了先下降再升高的变化趋势。不同于年生态盈余,年生态赤字在 20 世纪 70 年代之前一直维持在较低水平,平均值仅为 0.01,此后则处于高变幅状态下,最大变幅超过 0.46。年生态赤字经历了先上升再小幅度下降再上升的趋势。对比来看,年生态盈余(多年平均值为 0.06)小于年生态赤字(多年平均值为 0.09),且年生态赤字的波动性明显强于年生态盈余。

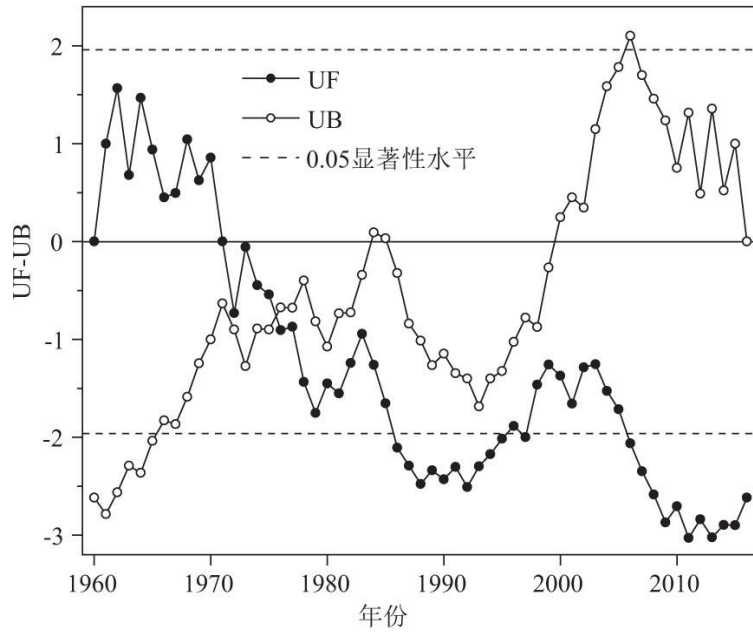


图2 年径流量的 MK 检验

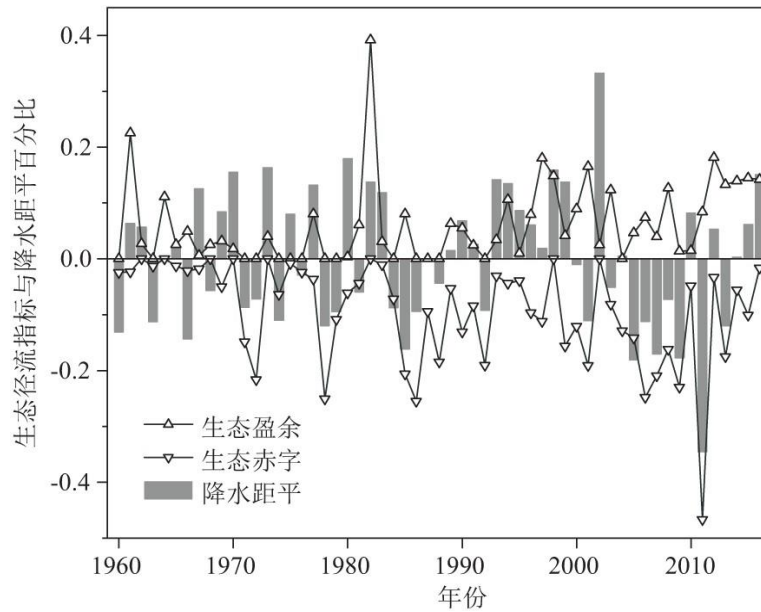


图3 年生态径流指标和年降水距平百分比的时间变化

2.3 季节生态径流指标变化

洞庭湖水文情势具有明显的季节特征^[24],因此有必要分析不同季节的生态径流指标变化。从图4可以看出,洞庭湖出口的季节生态盈余和生态赤字变化差异较大。春季、夏季、秋季和冬季生态盈余的多年平均值分别为0.09、0.02、0.03和0.13,春季和冬季生态盈余明显高于夏季和秋季,尤其是冬季生态盈余为四个季节生态盈余中最高的。与此相反,冬季生态赤字则是四个季节中最小的,多年平均值为0.08;秋季生态赤字最高,多年平均值为0.18;春季和夏季生态赤字的多年平均值分别为0.11和0.09。春季生态盈余始终处于波动状态,变幅为0~0.35,尤其是从20世纪70年代后期的变幅明显增大;夏季和秋季生态盈余总体上变

化不大,大致呈现出“高-低-高-低”的变化规律,其中,夏季生态盈余在 1971~1992 年和 2003~2013 年以及秋季生态盈余在 1970~1979 年、1989~1997 年和 2003~2016 年几乎都为 0;冬季生态盈余波动最为强烈,尤其是水文变异后的变幅是水文变异前的 4.86 倍。春季、夏季和秋季生态赤字都表现出了明显的上升趋势,且始终处于较高变幅状态下;冬季生态赤字则位于低水平的波动状态。水文变异前,季节生态赤字都是在较低的水平下变化,而水文变异后加剧了这一变化,春、夏、秋、冬四季生态赤字的变化范围分别为 $0\sim0.57$ 、 $0\sim0.40$ 、 $0\sim0.66$ 和 $0\sim0.32$ 。对比季节生态盈余和季节生态赤字,除冬季生态盈余高于冬季生态赤字外,其余季节生态盈余都低于生态赤字。其中,秋季的差值最大,为 0.15,秋季生态赤字是秋季生态盈余的 6 倍;春季的差值最小,为 0.02;夏季和冬季的差值分别为 0.07 和 0.05。此外,春季、夏季和秋季生态赤字比生态盈余的波动更加剧烈和频繁,而冬季则恰恰相反。

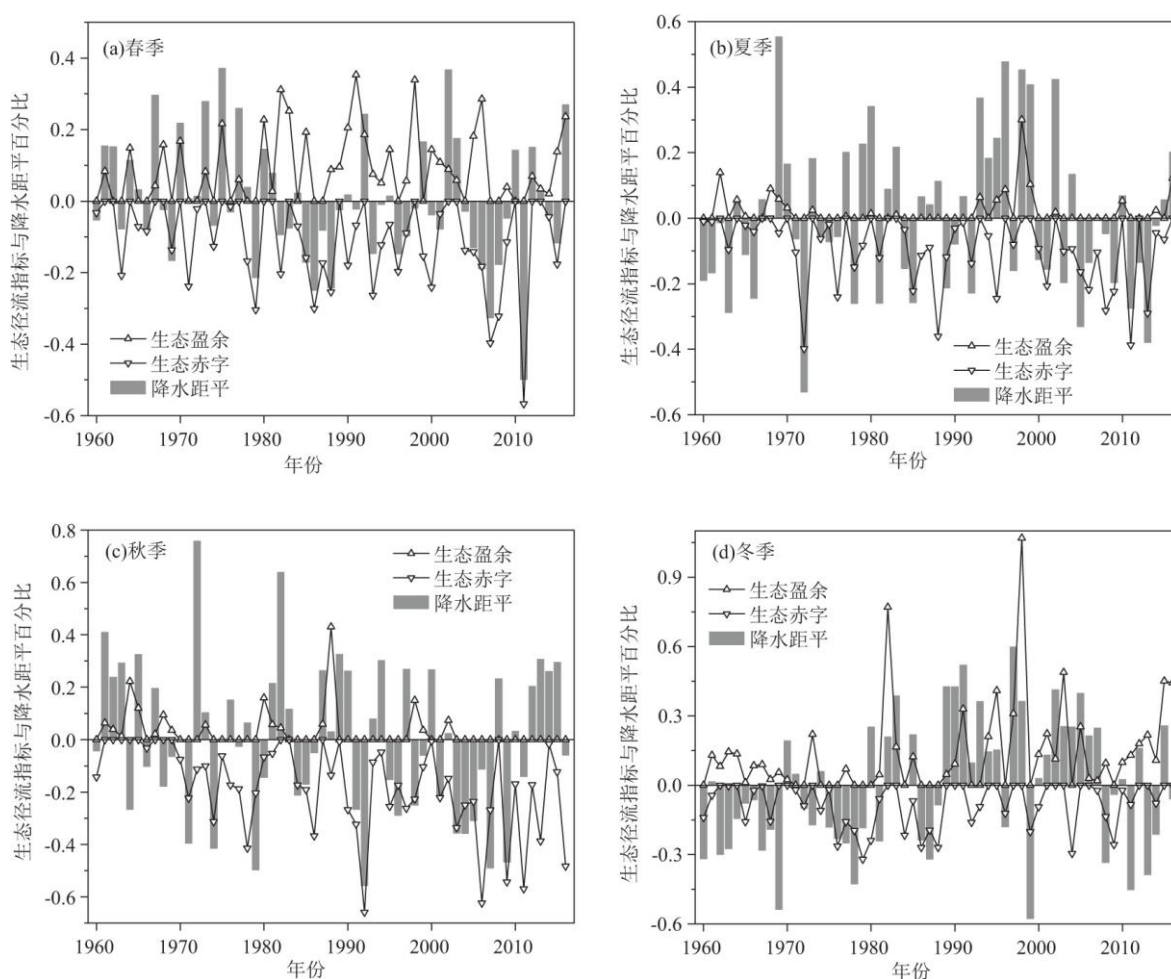


图 4 季节生态径流指标和季节降水距平百分比的时间变化

2.4 季节生态变化总值的变化

季节生态变化总值可以反映水量的总体得失及其对生态系统的影响。图 5 为季节生态变化总值的散点分布图,并通过局部加权回归方法(Loess 函数)进行拟合,进而观察其总体变化规律。从图 5 中可以看出,20 世纪 70 年代中期之前,季节生态变化总值比较集中;然而在水文变异后,季节生态变化总值则越来越离散。季节生态变化总值的变率明显增大,进一步说明了水文变异后的水情确实发生了较大的变化,并且对生态系统可能产生了比较大的扰动。从 Loess 平滑曲线来看,季节生态变化总值在整个研究时段内都保持着上升趋势,尤其是 20 世纪 60 年代中期至 90 年代以较快的速率增长,此后增长速率逐渐趋缓。

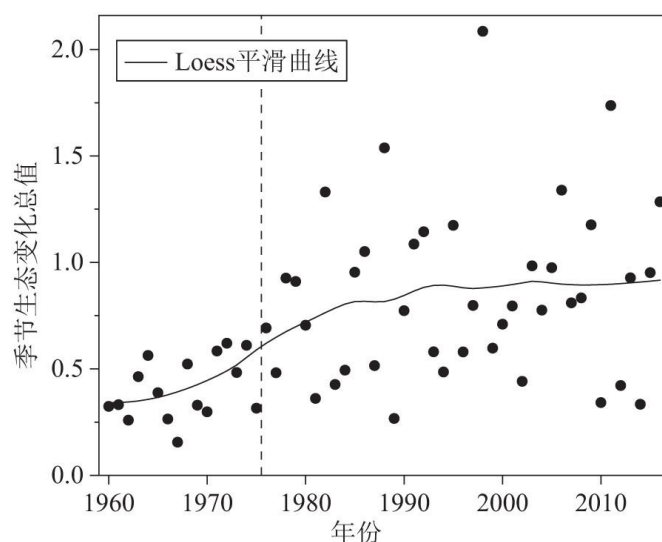


图 5 季节生态变化总值的时间变化

2.5 径流变化与生态系统的关系

基于径流变化与生态系统关系的四项基本准则,绘制了洞庭湖出口水文变异前后的水文情势与生态系统的关系图(图 6)。从图中可以看出,水文变异后(1976~2016 年)的日平均径流量整体上低于水文变异前(1960~1975 年),尤其是峰值流量被大大削弱;然而,在前 100d(1~3 月)的枯水期阶段,水文变异后的日平均径流量反而高于水文变异前。水库或大坝在洪水期拦蓄洪水,而在枯水期增加排泄量,可能是导致这一现象的主要原因。

与水文变异前相比,水文变异后的洪峰流量明显下降,而部分枯水流量增加,表明变异后的水情更加稳定、变率更小(图 6)。洪水和干旱事件的减少将会对河道形态、栖息地和斑块环境产生影响,其影响范围从藻类、植物到无脊椎动物、鱼类和水鸟,从而威胁生物多样性(准则 1)。水文情势的波动性趋缓,使得径流的季节性变化不明显,加上极端径流事件出现时间的提前或延后,都对水生生物的生命历程模式产生较大影响(准则 2)。例如,枯水流量出现时间的变化导致鱼类产卵活动发生紊乱,从而影响鱼类种群数量和群落结构^[30]。此外,洪水事件的发生频率和持续时间决定了洪泛平原的淹没时间和面积,进而影响自然生态系统的连通性(准则 3)。对于本地物种来说,其必然适应了自然状态下的水文情势,然而改变的水文特性则可能会更加有利于外来入侵物种的生存繁衍(准则 4)。由此可见,径流与生态系统具有密切关系,而生态系统也将随着径流特征的改变发生相应的变化。

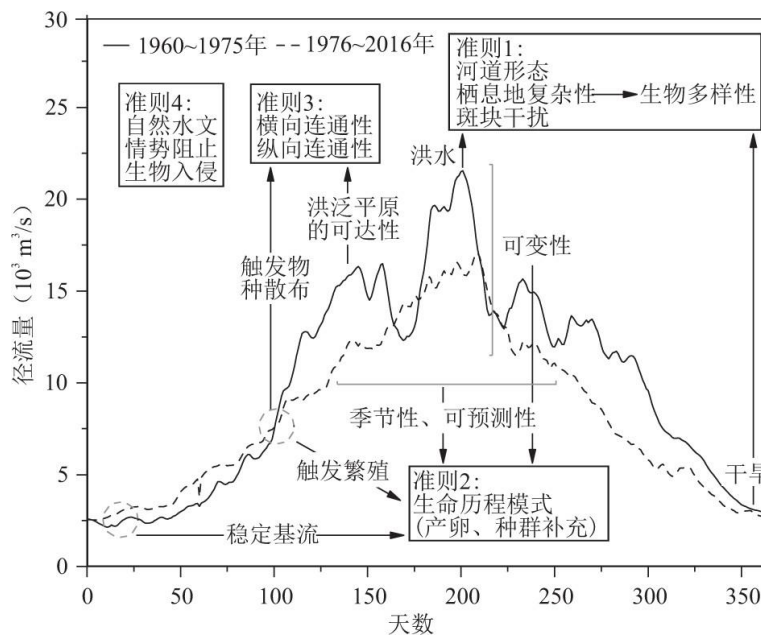


图6 水文变异前后的多年日平均径流量变化及其与生态系统的关系

3 讨论

3.1 径流变化的主要影响因素

3.1.1 气候变化对径流的影响

气候变化和人类活动是引起洞庭湖水文变化的两大主要因素,而洞庭湖的补给水源主要为降水转化的地表径流^[31],因此其径流变化可能与降水存在一定的联系。从图3和图4中可以看出,生态赤字变化与降水变化的一致性比生态盈余更好,尤其是春季生态赤字变化与降水变化几乎同步,而生态盈余变化与降水变化几乎不具有 consistency。从年尺度来看,生态赤字与降水的相关关系明显好于生态盈余;从季节尺度来看,生态赤字与降水的相关关系也明显好于生态盈余。由此看来,生态赤字受降水的影响比生态盈余更大。

近年来,洞庭湖流域洪涝和干旱灾害频繁发生,一年内约有2.8个月和2.4个月分别表现为流域性的洪涝和干旱^[32],出现了“枯洪并存”的新现象^[22]。据统计,洞庭湖流域在20世纪70~80年代和21世纪初期的旱灾发生频率相对较高,尤其是2000~2009年的特大旱灾频率最高,成灾年发生频率高达80%^[33]。水旱灾害的频繁发生使得高于75%分位数的高流量和低于25%分位数的低流量更多,所以年生态盈余和年生态赤字呈现出了较强的波动性特征,尤其是在水文变异后。洞庭湖流域降水量整体上呈现下降趋势(图3),且年内降水主要集中在3~8月,其中夏季降水量占全年降水量的36.78%^[34]。年、春季、夏季和秋季生态赤字与降水的相关性均较高,表明了低流量受降水影响较大。但是冬季生态赤字与降水的相关性并不明显,说明降水并非影响冬季生态赤字的主要因素。

3.1.2 人类活动对径流的影响

洞庭湖水情主要受到长江干流和湖南四水的影响。从20世纪50年开始,长江和湖南四水先后建设了一系列的水利工程。根据长江中上游水利工程建设时间,洞庭湖的水文事件大致可以分为6个时期:调弦口封堵前(1951~1958年),调弦口封堵后和荆江裁弯前(1959~1968年),荆江裁弯中(1969~1972年),荆江裁弯后和葛洲坝截流前(1973~1980年),葛洲坝截流后和三峡水库蓄

水前(1981~2002年),三峡水库蓄水后(2003~2018年)^[23]。此外,洞庭湖流域上水库建设从20世纪70年代中期也进入了快速增长阶段,特别是总库容超过 $10 \times 10^8 \text{ m}^3$ 的大型水库越来越多^[35](图7)。研究表明,城陵矶水文发生变异很可能是由于荆江裁弯、洞庭湖流域水库蓄水等水利工程建设导致的^[36]。

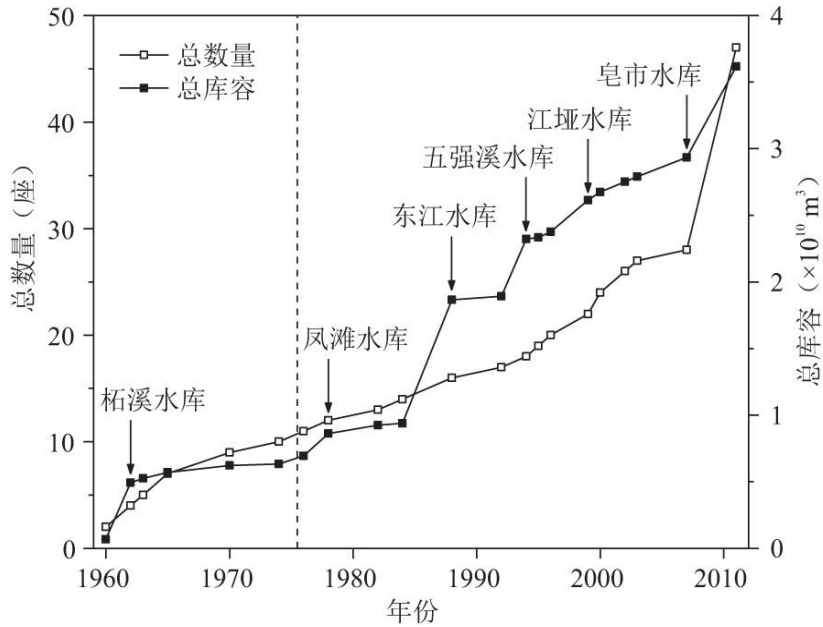


图7 湖南省大型水库(总库容 $\geq 1 \times 10^8 \text{ m}^3$)总数量和总库容的增长变化(根据文献[35, 41]中的数据绘制)

水利工程建设、土地利用/覆被变化等人类活动可以直接改变地表径流过程,会对洞庭湖出口径流变化产生重要影响。从图7可以看出,湖南省大型水库的总库容几乎呈指数曲线型增长。从20世纪70年代中期开始,水库建设步伐明显加快,特别是大型水库(总库容 $\geq 1 \times 10^8 \text{ m}^3$)越来越多,包括凤滩水库(总库容为 $16.76 \times 10^8 \text{ m}^3$)、东江水库(总库容为 $91.48 \times 10^8 \text{ m}^3$)、五强溪水库(总库容为 $42.90 \times 10^8 \text{ m}^3$)、江垅水库(总库容为 $17.41 \times 10^8 \text{ m}^3$)、皂市水库(总库容为 $14.40 \times 10^8 \text{ m}^3$)等^[35]。此外,长江干流上也实施了一系列的水利工程,如三峡大坝、葛洲坝等。如此众多的大坝和水库拦蓄了大量的水资源,而且大多数水库都采用了汛前放水、汛期过水、汛末蓄水的调度运行模式^[21, 35],导致了洞庭湖径流量的洪峰流量急剧减少,而枯水流量则有所增加。洪峰流量的减少会导致FDC整体下移,所以夏季和秋季的生态盈余明显减少,而秋季生态赤字有所增加。同样的,枯水流量的增加会导致FDC整体上移,所以冬季生态盈余明显变大,而且冬季生态赤字显著变小。

土地利用/覆被变化通过改变下垫面条件影响流域水循环过程。据湖南省林业厅的统计,湖南省的森林覆盖率在“十二五”期间从57%增长到60%。一方面,径流系数与森林植被覆盖度具有极显著的负相关关系,即随着植被覆盖度的增加,地表径流量反而降低^[37];另一方面,植被恢复改变了土壤的理化性质,促使土壤含水量增加以及更多的地表径流转变为壤中流和地下径流^[38, 39]。因此,水文变异后的年和季节生态径流指标(图3和图4)以及季节生态变化总值(图5)的波动性都更加剧烈,与这段时期内的大量水库兴建、下垫面改变等人类活动有很大的关系。有研究表明,人类活动对城陵矶径流变化的贡献率超过80%^[40],有力的说明了洞庭湖出口生态径流变化与人类活动存在很大联系。

3.2 径流变化对生态系统的影响

从洞庭湖的6个水文历史时期来看,调弦口封堵和荆江裁弯直接改变了三口入湖河流和长江的河道形态。加上长期受到泥沙淤积、建垸、筑堤等自然和人类活动的双重影响,洞庭湖湖体发生了剧烈演变,原来完整的洞庭湖已经分解为相对独立的东洞庭湖、南洞庭湖和西洞庭湖3个子湖体^[42]。与此同时,洞庭湖区域形成了以草尾-嵩竹河三角洲、藕池河东支三角洲、沅江三角洲、

澧水洪道三角洲、资水三角洲等为主的 5 大三角洲格局^[43], 导致了湖区的栖息地环境更加复杂, 斑块扰动较大。这些变化必然改变了洞庭湖的生境条件, 进而影响其生物多样性。有数据显示, 洞庭湖渔业资源产量自 20 世纪 50 年代以来并未发生较大变化, 始终稳定在 $2 \times 10^4 \sim 4 \times 10^4$ t, 但是鱼类构成比例发生了较大变化, 其中产漂流性卵的大型鱼类和江湖洄游性鱼类的比例分别下降了约 4% 和 22%, 而湖泊定居性鱼类的比例有所上升, 占比超过 80%^[44]。相对于水文变异前, 变异后的水文情势变率明显减小, 这为定居性鱼类的生存提供了有利的条件, 所以其占渔业资源的比例有所升高。径流变化不仅直接影响水生生态系统, 对陆生生态系统同样也会产生影响^[45, 46]。入湖水量的减少导致洞庭湖水位下降, 洲滩出露时间提前并延长, 加剧了湿地植被向湖心方向的正向演替^[47, 48]。水文情势变异为外来入侵物种的生长和扩张提供了有利条件, 特别是杨树的入侵, 挤占了原生湿地植被的生存空间, 使得高滩地植被逐渐向林地演变^[49]。植被群落结构的变化也促使鸟类的群落结构发生相应的改变, 特别是以宽阔水域或水草区域为栖息地和觅食地的湿地鸟类, 其生存空间因杨树的入侵而逐渐消失, 导致湿地鸟类数量减少, 而林地鸟类比例则增加到 62%^[50]。此外, 湿地植被群落结构和分布格局的改变还会影响水鸟的食物来源, 严重破坏了水鸟的栖息地环境^[51]。

4 结论

(1) 洞庭湖出口径流量在 1960~2016 年整体呈下降趋势, 并在 1976 年发生变异。洞庭湖出口的年生态径流指标均表现出较强的波动性, 尤其是水文变异后的变幅更大。年生态盈余和年生态赤字的多年变化范围分别为 0~0.39 和 0~0.47, 多年平均值分别为 0.06 和 0.09。

(2) 季节生态径流指标的变化特征差异较大。春季和冬季生态盈余表现出较强的波动性, 而夏季和秋季生态盈余变化不大; 春季、夏季和秋季生态赤字具有明显上升趋势, 而冬季生态赤字保持着低水平波动。除冬季外, 其他季节生态赤字都高于生态盈余, 且生态赤字的变化更频繁。季节生态变化总值在整个研究时段内呈上升趋势, 且在 1976 年后的分布越来越离散, 表明生态系统在水文变异后发生了剧烈变化。

(3) 洞庭湖出口径流变化主要受气候变化和人类活动的影响。生态赤字受降水的影响较大, 特别是在水文变异后。水利工程建设、土地利用/覆被变化等人类活动减少了高流量而增加了低流量, 所以对季节生态径流指标的影响较大。

(4) 洞庭湖出口水情在变异后更加稳定, 且洪峰流量明显下降, 而枯水流量增加。根据径流变化与生态系统关系的四项基本准则可知, 洞庭湖出口径流与生态系统的关系密切, 且生物多样性和群落结构会随着径流特征的改变发生相应的变化。

参考文献:

[1]POFF N L, ZIMMERMAN J K H.Ecological responses to altered flow regimes:a literature review to inform the science and management of environmental flows[J].Freshwater Biology, 2010, 55 (1) :194-205.

[2]GOOSEFF M N, WLOSTOWSKI A, MCKNIGHT D M, et al.Hydrologic connectivity and implications for ecosystem processes-Lessons from naked watersheds[J].Geomorphology, 2017, 277:63-71.

[3]WANG Y, RHOADS B L, WANG D.Assessment of the flow regime alterations in the middle reach of the Yangtze River associated with dam construction:potential ecological implications[J].Hydrological Processes, 2016, 30 (21) :3949-3966.

[4]李捷, 夏自强, 马广慧, 等. 河流生态径流计算的逐月频率算法[J]. 生态学报, 2007, 27 (7) :2916-2921.

[5]VOGEL R M, SIEBER J, ARCHFIELD S A, et al.Relations among storage, yield, and instream flow[J].Water Resources

Research, 2007, 43 (5) :W05403.

[6]HOMA E S, BROWN C, MCGARIGAL K, et al.Estimating hydrologic alteration from basin characteristics in Massachusetts[J].Journal of Hydrology, 2013, 503:196-208.

[7]LI D, LONG D, ZHAO J, et al.Observed changes in flow regimes in the Mekong River basin[J].Journal of Hydrology, 2017, 551:217-232.

[8]WANG Y, WANG D, LEWIS Q W, et al.A framework to assess the cumulative impacts of dams on hydrological regime:A case study of the Yangtze River[J].Hydrological Processes, 2017, 31 (17) :3045-3055.

[9]ZHANG H, SINGH V P, ZHANG Q, et al.Variation in ecological flow regimes and their response to dams in the upper Yellow River basin[J].Environmental Earth Sciences, 2016, 75 (11) :938.

[10]张宗娇, 张强, 顾西辉, 等. 水文变异条件下的黄河干流生态径流特征及生态效应 [J]. 自然资源学报, 2016, 31 (12) :2021-2033.

[11]ZHANG Q, GU X, SINGH V P, et al.Evaluation of ecological instream flow using multiple ecological indicators with consideration of hydrological alterations[J].Journal of Hydrology, 2015, 529 (3) :711-722.

[12]顾西辉, 张强, 孔冬冬, 等. 基于多水文改变指标评价东江流域河流流态变化及其对生物多样性的影响[J]. 生态学报, 2016, 36(19) :6079-6090.

[13]LIN K, LIAN Y, CHEN X, et al.Changes in runoff and eco-flow in the Dongjiang River of the Pearl River Basin, China[J].Frontiers of Earth Science, 2014, 8 (4) :547-557.

[14]GAO Y, VOGEL R M, KROLL C N, et al.Development of representative indicators of hydrologic alteration[J].Journal of Hydrology, 2009, 374 (1-2) :136-147.

[15]ZHANG Q, ZHANG Z J, SHI P J, et al.Evaluation of ecological instream flow considering hydrological alterations in the Yellow River basin, China[J].Global and Planetary Change, 2018, 160:61-74.

[16]丛振涛, 肖鹏, 章诞武, 等. 三峡工程运行前后城陵矶水位变化及其原因分析[J]. 水力发电学报, 2014, 33 (3) :23-28.

[17]孙昭华, 李奇, 严鑫, 等. 洞庭湖区与城陵矶水位关联性的临界特征分析[J]. 水科学进展, 2017, 28 (4) :496-506.

[18]HAN Q, ZHANG S, HUANG G, et al.Analysis of long-term water level variation in Dongting Lake, China[J].Water, 2016, 8 (7) :306.

[19]赖锡军, 姜加虎, 黄群. 三峡工程蓄水对洞庭湖水情的影响格局及其作用机制[J]. 湖泊科学, 2012, 24 (2) :178-184.

[20]YUAN Y, ZENG G, LIANG J, et al.Variation of water level in Dongting Lake over a 50-year period:Implications for the impacts of anthropogenic and climatic factors[J].Journal of Hydrology, 2015, 525:450-456.

-
- [21]LAI X, LIANG Q, HUANG Q, et al.Numerical evaluation of flow regime changes induced by the Three Gorges Dam in the Middle Yangtze[J].Hydrology Research, 2016, 47 (S1) :149-160.
- [22]HUANG Q, SUN Z, OPP C, et al.Hydrological drought at Dongting Lake:Its detection, characterization, and challenges associated with Three Gorges Dam in central Yangtze, China[J].Water Resources Management, 2014, 28 (15) :5377-5388.
- [23]OU C, LI J, ZHOU Y, et al.Evolution characters of water exchange abilities between Dongting Lake and Yangtze River[J].Journal of Geographical Sciences, 2014, 24 (4) :731-745.
- [24]何征, 万荣荣, 戴雪, 等. 近 30 年洞庭湖季节性水情变化及其对江湖水量交换变化的响应[J]. 湖泊科学, 2015, 27 (6) :991-996.
- [25]刘培亮, 毛德华, 周慧, 等. 1990-2013 年湖南四水入洞庭湖汛期径流量的变化规律[J]. 水资源保护, 2015, 31 (4) :52-61.
- [26]ZHANG D, ZHANG Q, QIU J, et al.Intensification of hydrological drought due to human activity in the middle reaches of the Yangtze River, China[J].Science of the Total Environment, 2018, 637:1432-1442.
- [27]SABZEVARI A A, ZARENISTANAK M, TABARI H, et al.Evaluation of precipitation and river discharge variations over southwestern Iran during recent decades[J].Journal of Earth System Science, 2015, 124 (2) :335-352.
- [28]GAO B, YANG D, ZHAO T, et al.Changes in the eco-flow metrics of the Upper Yangtze River from 1961 to 2008[J].Journal of Hydrology, 2012, 448:30-38.
- [29]BUNN S E, ARTHINGTON A H.Basic principles and ecological consequences of altered flow regimes for aquatic biodiversity[J].Environmental Management, 2002, 30 (4) :492-507.
- [30]YANG Y-C E, CAI X, HERRICKS E E.Identification of hydrologic indicators related to fish diversity and abundance:A data mining approach for fish community analysis[J].Water Resources Research, 2008, 44 (4) :W04412.
- [31]侯鹏, 蒋卫国, 陈自力, 等. 降水对洞庭湖湿地水文补给效应[J]. 地理研究, 2009, 28 (2) :371-378.
- [32]李景刚, 李纪人, 黄诗峰, 等. 基于 TRMM 数据和区域综合 Z 指数的洞庭湖流域近 10 年旱涝特征分析[J]. 资源科学, 2010, 32 (6) :1103-1110.
- [33]李景保, 代勇, 尹辉, 等. 1950-2009 年洞庭湖流域农业旱灾演变特征及趋势预测[J]. 冰川冻土, 2011, 33 (6) :1391-1398.
- [34]徐卫红, 葛德祥, 李娜, 等. 1960~2011 年洞庭湖流域降水量变化特征[J]. 湿地科学, 2016, 14 (1) :108-112.
- [35]覃红燕, 谢永宏, 邹冬生. 湖南省农业洪旱灾害演变趋势和成因及防灾减灾措施[J]. 农业现代化研究, 2011, 32 (2) :165-169.
- [36]梁婕, 彭也茹, 郭生练, 等. 基于水文变异的东洞庭湖湿地生态水位研究[J]. 湖泊科学, 2013, 25 (3) :330-334.

-
- [37] 龚诗涵, 肖洋, 方瑜, 等. 中国森林生态系统地表径流调节特征[J]. 生态学报, 2016, 36(22): 7472-7478.
- [38] 何斌, 黄承标, 秦武明, 等. 不同植被恢复类型对土壤性质和水源涵养功能的影响[J]. 水土保持学报, 2009, 23(2): 71-74, 94.
- [39] 赵自超, 夏振尧, 熊诗源, 等. 扰动边坡植被恢复过程中的土壤性质演变[J]. 水土保持通报, 2013, 33(5): 82-86.
- [40] 代稳, 吕殿青, 李景保, 等. 气候变化和人类活动对长江中游径流量变化影响分析[J]. 冰川冻土, 2016, 38(2): 488-497.
- [41] 湖南省水利厅, 湖南省统计局. 湖南省第一次水利普查公报[R]. 2013.
- [42] 孙占东, 黄群, 姜加虎, 等. 洞庭湖近年干旱与三峡蓄水影响分析[J]. 长江流域资源与环境, 2015, 24(2): 251-256.
- [43] 尹太举, 李宣玥, 张昌民, 等. 现代浅水湖盆三角洲沉积砂体形态特征以洞庭湖和鄱阳湖为例[J]. 石油天然气学报, 2012, 34(10): 1-7.
- [44] 谢平. 三峡工程对两湖的生态影响[J]. 长江流域资源与环境, 2017, 26(10): 1607-1618.
- [45] WU J, HUANG J, HAN X, et al. Three-Gorges Dam—Experiment in habitat fragmentation? [J]. Science, 2003, 300(5623): 1239-1240.
- [46] XIE P. Three-Gorges Dam: Risk to ancient fish [J]. Science, 2003, 302(5648): 1149-1151.
- [47] HU Y X, HUANG J L, DU Y, et al. Monitoring wetland vegetation pattern response to water-level change resulting from the Three Gorges Project in the two largest freshwater lakes of China [J]. Ecological Engineering, 2015, 74: 274-285.
- [48] WU H, ZENG G, LIANG J, et al. Responses of landscape pattern of China's two largest freshwater lakes to early dry season after the impoundment of Three-Gorges Dam [J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2017, 56: 36-43.
- [49] 侯志勇, 谢永宏, 陈心胜, 等. 洞庭湖湿地的外来入侵植物研究[J]. 农业现代化研究, 2011, 32(6): 744-747.
- [50] 邓学建, 米小其, 牛艳东, 等. 洞庭湖杨树林及原生湿地生态环境中鸟类的群落结构[J]. 农业现代化研究, 2008, 29(1): 108-111.
- [51] YANG G, ZHANG Q, WAN R, et al. Lake hydrology, water quality and ecology impacts of altered river-lake interactions: Advances in research on the middle Yangtze River [J]. Hydrology Research, 2016, 47(S1): 1-7.