

DOI: 10.5846/stxb201412122480

顾西辉,张强,孔冬冬,王月,刘剑宇.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.生态学报,2016,36(19):6079-6090.

Gu X H, Zhang Q, Kong D D, Wang Y, Liu J Y. Based on multiple hydrological alteration indicators evaluating the characteristics of flow regime with the impact on the diversity of hydrophilic biology. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(19): 6079-6090.

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

顾西辉^{1,2,3}, 张 强^{1,2,3,*}, 孔冬冬^{1,2,3}, 王 月^{1,2,3}, 刘剑宇^{1,2,3}

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 中山大学广东省城市化与地理环境空间模拟重点实验室, 广州 510275

摘要:新丰江、枫树坝和白盆珠 3 座大型水库的建立对东江流域河道流量和河流流态过程有了较大改变,威胁河道下游生态系统的健康。基于广义指标生态剩余和生态赤字评价了东江流域受水库影响后流域生态需水需求目标总的盈余和缺失变化过程,基于 IHA32 指标计算的 D_0 和 DHRAM 评价了水库对下游河段河流水文过程总的改变程度以及威胁河道生态系统健康的风险性大小,并进一步分析了对河道生物多样性的影响。研究结果如下:(1)水库对流量历时曲线(FDC)有显著影响,曲线上部下降,尾部上升,尤其体现在秋季和冬季。降水对年与夏季生态剩余影响较大,水库对各季节生态剩余和生态赤字均有较大影响;秋季和冬季生态赤字几乎为 0,生态剩余显著增加。生态剩余和生态赤字与大部分 IHA 中 32 个指标具有很强的相关性,可作为衡量东江流域年和季节径流变化的生态指标。(2)龙川、河源、岭下和博罗 4 站点总体改变程度分别为 58.48%、54.04%、54.32%和 52.47%。河流流态变化导致总季节生态剩余增加并维持在较高水平,进一步引起河流生物多样性下降,并维持在较低水平。龙川和河源两站河流流态的变化对河流生态系统造成了高风险性影响,岭下和博罗两站则为中等风险。

关键词:生态剩余;生态赤字;IHA;水文改变;东江流域

Based on multiple hydrological alteration indicators evaluating the characteristics of flow regime with the impact on the diversity of hydrophilic biology

GU Xihui^{1,2,3}, ZHANG Qiang^{1,2,3,*}, KONG Dongdong^{1,2,3}, WANG Yue^{1,2,3}, LIU Jianyu^{1,2,3}

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 Guangdong Provincial Key Laboratory of Urbanization and Geo-simulation, School of Geography and Planning, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China

Abstract: Dam-induced hydrological alterations and related ecological problems have created considerable concern for hydrologists, ecologists, and policy-makers. The East River basin in China is the primary provider of water resources for mega-cities within the Pearl River Delta and meets 80% of the annual water demand of Hong Kong. Daily streamflow data from 4 hydrological stations covering the period of 1954—2009 are analyzed with respect to eco-flow regimes of the East River basin using eco-flow metrics (ecosurplus and ecodeficit) and the Indicators of Hydrologic Alteration (IHA)

基金项目:国家杰出青年科学基金项目(51425903);国家自然科学基金重大国际合作研究项目(51320105010);香港特别行政区研究资助局项目(CUHK441313);中山大学滨海小流域自然地理综合过程观测与实验平台建设(2012年度);中央高校基本科研业务费专项资金;广东省教育部产学研结合项目(2012B091100471)

收稿日期:2014-12-12; 网络出版日期:2016-01-15

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

technique. In this study, ecodeficit and ecosurplus were analyzed to determine the ecological impact of water impoundments. In addition, D_o and DHRAM (Dundee Hydrological Regime Assessment Method) were employed to evaluate the degree of alteration of hydrological regimes, and ERHIs (Ecologically Relevant Hydrologic Indicators) were used to analyze the influence of hydrological alterations on ecological diversity. Results indicate that the flow duration curve (FDC) is significantly affected by water reservoirs, which is largely mirrored by the running down of the upper curve tail and running up of the lower curve tail, especially in autumn and winter. In this way, the magnitude and frequency of high flows decrease and those of low flows increase because of reservoir regulation. Precipitation exerts greater influence on annual and summer ecosurplus, whereas seasonal ecosurplus and ecodeficit are more influenced by the hydrological regulations of the reservoirs. The ecodeficit in the autumn and winter is nearly zero, whereas the ecosurplus in these same seasons increases significantly. In addition, ecodeficit and ecosurplus in other seasons, particularly autumn and winter, are more influenced by reservoir regulation. Impacts of reservoirs on hydrological regimes and eco-flow regimes differ from one station to another owing to varying degrees of influence from the reservoirs on hydrological processes. The longer the distance between a reservoir and hydrological station, the weaker the influence the water reservoir has on hydrological processes. Because of changes in the streamflow mechanism, the fluvial ecosystems are under a high risk of degradation at the Longchuan and Heyuan stations and a moderate risk of degradation at the Lingxia and Boluo stations. The general alteration degrees of hydrology are 58.48%, 54.04%, 54.32%, and 52.47% at the Longchuan, Heyuan, Lingxia, and Boluo stations, respectively. The changes in the streamflow mechanism tend to increase seasonal ecosurplus and trigger risk of a high level of ecosurplus that causes a further decline in biodiversity. Comparing the eco-flow and IHA metrics demonstrated that combining these two groups has the potential to provide a sufficient measure of the change in the flow regime. Ecodeficit and ecosurplus can be accepted in the evaluation of alterations of hydrological processes at annual and seasonal time scales. This study provides a theoretical background for water resource management with consideration of eco-flow variations in response to reservoir regulation in other highly regulated river basins of the globe.

Key Words: ecosurplus; ecodeficit; IHA; hydrology alteration; East River

河流流态和河道流量因跟水资源紧密相关,所以是水循环过程中最受关注的元素,并且是保持河道生态系统完整性的核心要素,因此研究河流流态变化特征对于流域水资源管理和生态系统保护具有重要意义。气候变化和人类活动导致水资源时空分布特征^[1]及河流流态^[2]发生变异,通过水库或大坝导致下游河道径流失去了原有的天然变化特征^[3],并进一步影响河道生态系统。因此在进行水资源开发与利用时,有必要考虑径流变化的生态效应。为了评价河流流态变化过程和对生态系统的影响,常常需要指标来量化水库或大坝对河流水文改变程度。Olden 和 Poff 总结了 170 多个水文指标,发现这些指标过于冗余且具有明显相关性^[4]。Richter 等总结并归纳了 33 个水文改变指标 (IHA, Indicators of Hydrologic Alteration) 来充分反映河流流态年内及年际变化特征^[5],并被广泛使用^[6-7]。尽管相比 170 多个水文指标, IHA 中的 33 个指标已有较大简化,但指标之间相关性仍然没有得到较好解决^[8],且不利于水库等基于生态河流流态的运行调度^[9]。为解决上述问题,本文采用基于流量历时曲线 (Flow Duration Curve, FDC) 的生态赤字、生态剩余等^[10]无维度指标评价河道流量需求总的缺失和盈余,并进一步利用基于 IHA32 指标计算的 D_o (Degree of hydrologic alteration)^[11]和 DHRAM (Dundee Hydrological Regime Assessment Method)^[12]计算水库对河流流态总体改变程度以及造成的河道生态系统的风险性大小。生态赤字、生态剩余、 D_o 和 DHRAM 等可以从总体角度分析河流流态变化过程,利于流域水资源管理。

东江流域内建有新丰江、枫树坝及白盆珠三大水库,且长期为广州、深圳等珠三角重要城市及香港供水。近几十年来,由于气候变化和人类活动影响,尤其是流域内三座控制型水库的影响,河道流量过程已有较大改变。以往的研究主要集中在河道流量年或者季节性趋势变化,较少有研究河流流态改变程度以及对河道生态系统的影响,尤其是 3 座大型水库对下游水文过程改变引起相关生态的风险性评价。因此本文研究目标如下:(1)利用生态赤字和生态剩余两个无维度指标分析水库影响下河道生态流量需求总的缺失和盈余变化过程;(2)基于 IHA32 指标计算 D_o 和 DHRAM 评价水库对下游水文过程总的改变程度以及造成的河道生态系

统风险性大小;(3)进一步分析水库引起流域水文改变后,对河道生物多样性的影响。

1 研究区域与数据

东江流域是珠江流域的重要支流,发源于江西省,主要河段位于广东省,全长 562 km,集水面积为 35340 km²。东江流域为广东省主要城市及香港等主要水源区,水资源得到高强度开发。另外,流域内建有 3 座控制性大型水库^[13],显著改变了东江流域河流流态、增加了水文过程复杂度^[13]。

本文选取东江流域主要控制性水文站点(龙川、河源、岭下和博罗 4 站)^[13] 1954—2009 年日流量数据进行分析,数据来源于广东省水文局,无缺测,并且经过系统整编,质量可靠。水文序列按照水库建成时间,划分为受水库影响前序列(天然序列)和受水库影响后序列(改变序列)。龙川站和河源站分别位于枫树坝和新丰江水库下游^[13],因此分别以两个水库建成时间 1974、1962 年作为分割点;岭下站和博罗站均位于枫树坝和新丰江水库下游^[13],张强等发现岭下和博罗两站径流在 1973 年有一个改变^[14],因此以枫树坝水库建成时间 1974 年作为分割点。另外选取分布在整个东江流域 29 个降水站点 1959—2009 年日降水数据,数据有少量缺测。

2 研究方法

2.1 生态剩余和生态赤字

Vogel 等人于 2007 年提出生态剩余和生态赤字两个广义指标来评价河道径流生态机制^[10]。生态剩余和生态赤字均以流量历时曲线(FDC)为基础。FDC 由选择时间段的日流量数据构造,衡量流量超过一个给定值的时间历时百分比。一段时间内日流量数据 Q_i 由大到小排列,其超过概率为^[10]:

$$p_i = i / (n + 1) \quad (1)$$

式中, i 为秩次, n 为日流量观测值 Q_i 的样本大小。FDC 可以表述为 Q_i 是 p_i 的函数。日流量序列既可以构造年尺度 FDC 也可以构造季节尺度 FDC。东江流域 1954—2009 年日流量数据,以水库建成时间为分割点,分割点前的序列代表天然机制径流,分别构造分割点前序列每一年年 FDC 和季节 FDC,然后求得 25% 和 75% 分位数的年 FDC 和季节 FDC,作为河流生态系统保护范围。一个给定年的年 FDC 或者季节 FDC 高于 75% 分位数 FDC,两个曲线围成的面积定义为生态剩余;一个给定年的年 FDC 或者季节 FDC 低于 25% 分位数 FDC,两个曲线围成的面积定义为生态赤字^[10]。生态剩余和生态赤字统一定义为生态径流(eco-flow)指标。

2.2 水文改变程度评价

IHA32 个指标用于量化河流流态变化特征^[15]。分割前序列每个参数的范围被分为 3 类,将默认分类分位数由 33%、67% 调整为 25% 和 75%,从而和 FDC 分类标准一致。用主成分分析从 IHA32 个指标中识别与生态最相关的水文指标,定量评价改变后河流流态与天然河流流态的偏差,水文改变程度计算如下^[11]:

$$D_i = \frac{N_{o,i} - N_e}{N_e} \times 100\% \quad (2)$$

式中, D_i 为第 i 个指标的水文改变程度, $N_{o,i}$ 为改变后径流序列 IHA 值在 25%—75% 分类范围内的年数, N_e 相应期望年数($N_e = P \times N_T$, P 为 50%, N_T 改变后径流序列的总年数)基于每个指标的改变程度 D_i ,改变后序列总的水文改变程度计算如下^[11]:

$$D_o = \left(\frac{1}{32} \sum_{i=1}^{32} D_i^2 \right)^{1/2} \quad (3)$$

Black 等人于 2005 年提出了另一个广义的水文改变指标 DHRAM 来衡量人类活动对水文机制改变的程度和范围^[12]。基于 IHA32 个指标改变前后变化百分比,DHRAM 计算一个分数值(变化范围为 0—30),分数值越大,河流流态改变程度越大,生态系统遭受破坏的风险越大。 D_o 和 DHRAM 共同作为衡量总的水文改变程度的指标,评价水文机制改变对河流生态系统的风险。

2.3 生物多样性影响评价

SI(Shannon Index, Shannon 指数)是运用最广泛的评价生物多样性指标^[16]:

$$SI = - \sum_i p_i \times \log p_i \tag{4}$$

式中, p_i 表示群落属于第 i 个物种的比例。 SI 越大表示生物多样性越丰富。Yang 等人用 GP (Genetic Programming) 算法, 基于 IHA32 个指标建立了 SI 与水文指标的最佳拟合关系^[17]:

$$SI = \frac{D_{\min}/\text{Min}7 + D_{\min}}{Q_3 + Q_5 + \text{Min}3 + 2 \times \text{Max}3} + R_{\text{rate}} \tag{5}$$

式中, D_{\min} 表示最小一天流量的“Julian”日期, Min3、Min7 分别表示为最小 3d 流量和最小 7 天流量, Max3 表示为最大 3d 流量, Q_3 、 Q_5 分别表示为 3、5 月流量, R_{rate} 表示为连续日流量之间正差异均值。由于缺乏东江流域河道生物群落和种类数量数据, 无法直接计算 SI 指标, 因此公式(5) SI 与水文指标构建的关系式, 则可以初步粗略预测水库建立后对河道生物多样性的影响程度, 但是还需要在以后的生物群落和种类数据实际测量中进行进一步验证。

3 研究结果

3.1 生态径流指标变化

图 1 为建库前后年和季节历年 FDC 散点分布特征。由图 1 看出, 年和夏季 FDC 建库前后 FDC 分布范围较一致, 建库后高流量和低流量能较好覆盖建库前高流量和低流量出现区域。对于春、秋以及冬季, 建库前后高流量和低流量出现范围具有较大差别, 尤其以秋、冬季最为明显。秋、冬季建库后高流量量级和次数明显降低, 低流量量级和次数明显增加, 这必然导致秋、冬季由低流量引起的生态剩余增加, 生态赤字减小。由 FDC 的变化可

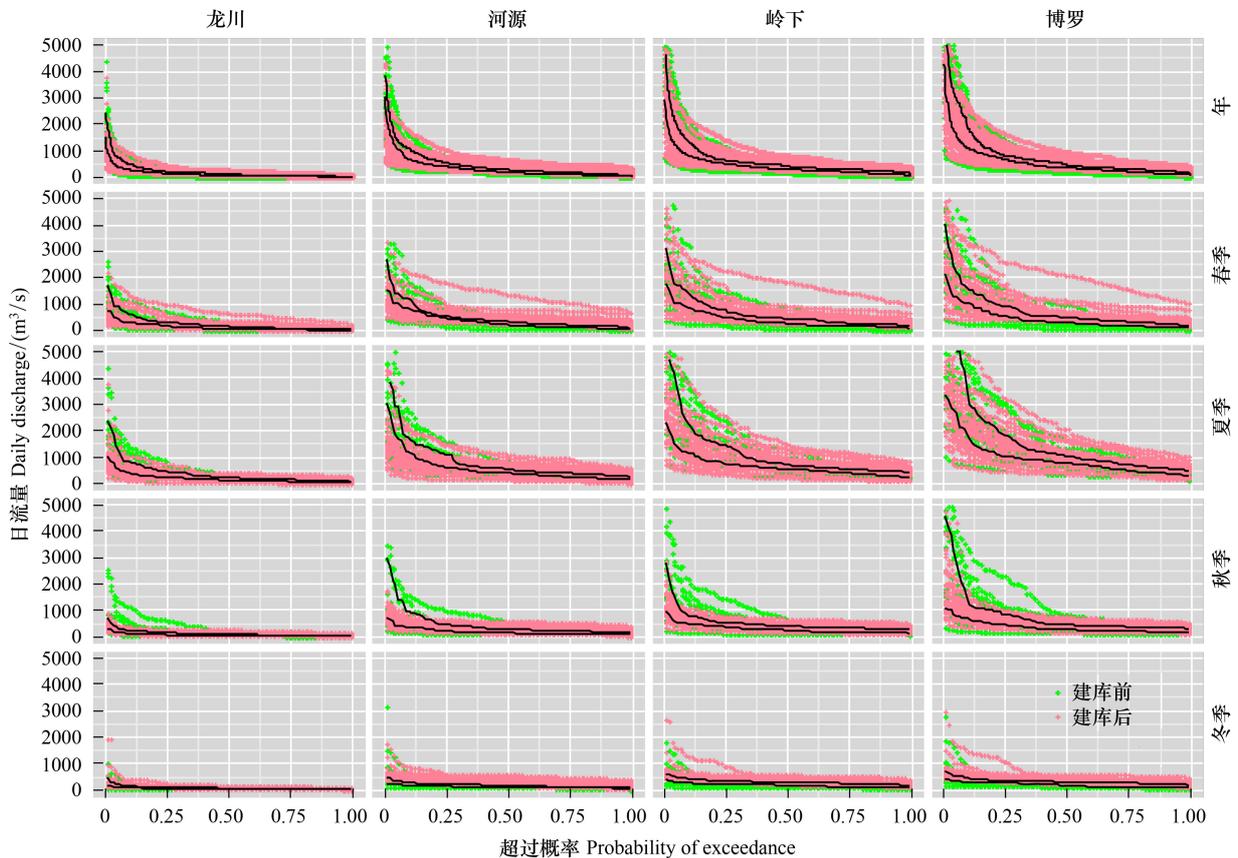


图 1 建库前和建库后历年 FDC 散点图

Fig.1 Annual flow duration curves on before and after completion of the reservoirs

图中两条黑色曲线由上到下依次表示 75% 和 25% FDC 曲线

以初步判断出水库对年和季节生态指标影响,然而生态指标的变化特征还受降水的影响(图 2,图 3)。

图 2 为通过年 FDC 和季节 FDC 得到年和季节生态指标(生态剩余和生态赤字)及 1959—2009 年间年和季节降水距平的时间变化特征。从年尺度来看,年生态剩余的时间变化与降水距平较为一致,受水库影响较少。降水增加导致年高流量增加,年 FDC 超过 75%分位数线的部分增加,生态剩余上升,东江流域河道生态需水处于过于满足状态。整个东江流域 20 世纪 70 年代中期到 80 年代中期,降水明显增加,生态剩余较为明显,20 世纪 80 年代中期之后,降水下降,生态剩余也呈下降趋势。相比年生态剩余,年生态赤字与降水距平并不完全一致,水库对年生态剩余的影响较大。降水减少,导致年低流量减少,年 FDC 低于 25%分位数线的部分增加,生态赤字上升,东江流域河道需水处于过于缺乏状态。年生态赤字与降水距平较一致的时间段集中在 1959—1965、1990—2009 年两个时间段。这两个时间段,降水明显减少,生态赤字同时明显增加。但是对于龙川、岭下和博罗站,1974—1985 年生态赤字的变化并未完全体现出降水的减少程度,这段时间由于枫树坝和新丰江两座大型水库的调蓄作用,年低流量的减少程度减缓了。

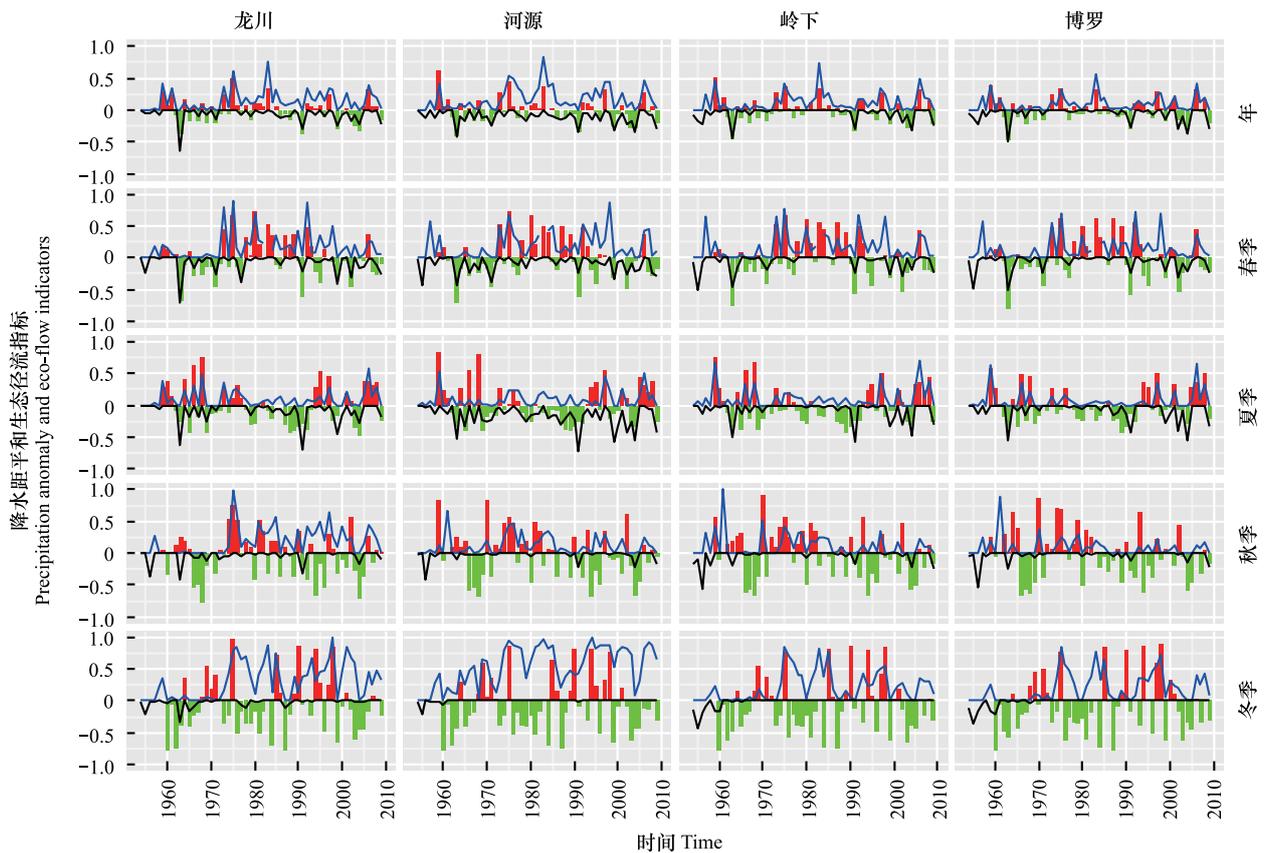


图 2 生态径流指标与降水距平百分率的时间变化

Fig.2 Changes in the annual and season eco-flow metrics and the annual precipitation anomaly in the period from 1954 to 2009

红色和绿色条形为降水距平百分率,蓝色曲线为生态剩余,黑色曲线为生态赤字

相比年生态指标变化,季节生态指标时间变化差异性较为明显,并且变化幅度较大,稳定性较小。季节生态剩余和生态赤字与降水距平的时间变化一致性较小,水库的影响更加明显(图 2)。在 4 个季节中,夏季生态指标与降水距平具有更好的一致性。但是对于河源站,1962—1970 年夏季降水明显增加,生态剩余却呈显著下降,新丰江水库的建成对河源站高流量有显著的影响。相比春季和夏季,枯水期秋季和冬季,东江流域生态指标受到水库的显著影响,降水的影响受到极大的削弱。河源、岭下和博罗站在 1962 年之后,不管降水如何变化,生态赤字一直稳定在 0 附近,新丰江水库对保持秋、冬季低流量在较高的水平具有重要的作用;由于降水的减少,加上枫树坝和新丰江两座水库的调节作用,秋季生态剩余在 1974 年之后呈稳定下降趋势,龙川

和河源两站冬季生态剩余则在高位震荡。

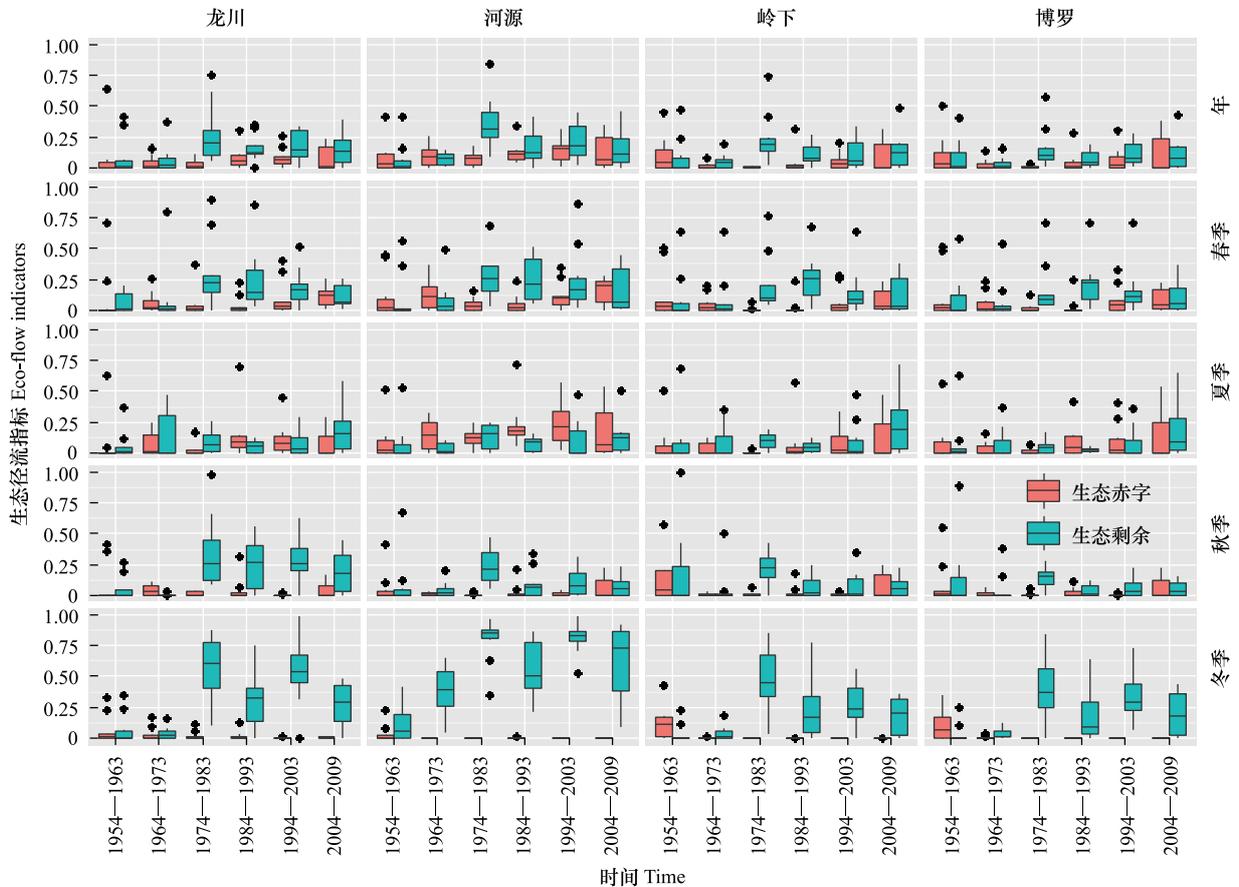


图3 年和季节生态指标 10a 年间变化箱型图

Fig.3 Boxplot of decadal changes in the seasonal ecosurplus and ecodeficit in the period from 1954 to 2009

图3展示了年和季节生态指标 10a 统计变化特征。4 个站点年生态剩余均表现为 1974 年之前处于较低水平,1974 年之后突然增加;年生态赤字变化幅度相比年生态剩余较小,龙川和河源两站年生态赤字呈缓慢增加趋势,岭下和河源两站 1964—1993 年维持在 0 值附近,1994—2009 年显著增加。4 个站点春季生态剩余 10a 统计中值呈现规律的抛物线形:1954—1983 年呈增加趋势,1983—2009 年呈下降趋势;河源站春季生态赤字 1954—1983 呈现“低-高-低”的循环,然后在最近的 20a 呈增加趋势,表明河源站丰水期径流有一个 10a 的周期,在 20 世纪 80 年代之后呈增加趋势;龙川、岭下和博罗在 20 世纪 90 年代之前春季生态赤字一直维持在稳定的低水平,然后在近 20a 呈突然增加趋势。

3.2 水文整体改变程度的评价

D_o 和 DHRAM 被用来衡量水文机制整体改变程度(表 1)。DHRAM 基于 IHA5 组 33 个参数,将每类参数的平均均值和离系数的变化程度分为 3 类(1 代表改变程度最低,3 代表改变程度最高),然后求出每类总的改变程度,进行总体评价,确定水文改变对河流生态系统造成的风险等级。从表 1 中可以看出,龙川站 IHA1、3、5 组(分别对应月径流、极端径流出现时间和径流改变频率)整体改变程度较大,达到中等及以上水平;河源站和岭下站均集中在 IHA1、3 组整体改变程度较大,博罗站仅 IHA 第 3 组整体改变程度较大,达到中等水平。DHRAM 将总体改变程度分为 5 级,1 级代表水文机制没有受到影响(生态系统无风险),5 级代表受到严重影响(生态系统有严重风险)。从 DHRAM 总体打分及评价结果来看,龙川和河源两站总得分均为 13 分,改变等级为 4 级——高风险影响;岭下和博罗两站总得分均为 9 分,改变等级为 3 级——中等风险影响。从 D_o 来看,龙川站水文机制改变程度最大,达到 58.48%,博罗站最小达到 52.47%。与 DHRAM 不同的是,河

源站和岭下站水文机制改变程度几乎相等,均在 54%左右。尽管 4 站点之间 D_o 值差别较小,但是均在 50%以上,说明东江流域水文机制均较建库前有较大改变。采用 D_o 值的另一个作用是可以用于水库调度中下游水文机制改变程度最小的调度目标,这在接下来的研究中继续进行。

表 1 水库建成前后水文改变的总体评价:DHRAM 和 D_o 结果

Table 1 The overall evaluation of hydrology alteration before and after completion of the reservoirs: DHRAM and D_o values

站点 Stations	IHA 分组 IHA groups	平均变化比例 Change in IHA group score/%		影响点数 Impact point		总点数 Total impact points	D_o Degree of hydrologic alteration/%
		均值 Mean	离差系数 Coefficient of dispersion	均值 Mean	离差系数 Coefficient of dispersion		
龙川	1	88.2	28.6	3	0	13(4)	58.48
	2	40.1	50.9	0	0		
	3	21.4	116.2	2	3		
	4	27.8	74	0	2		
	5	92.9	55.8	2	1		
河源	1	79.4	34.3	3	1	13(4)	54.04
	2	87.8	29	1	0		
	3	38.5	18.7	3	0		
	4	50.6	127.6	1	3		
	5	59.9	28.3	1	0		
岭下	1	48	28.6	2	0	9(3)	54.32
	2	51.5	15.3	1	0		
	3	29.2	35.5	2	1		
	4	34.6	86.7	0	2		
	5	37.9	50.5	0	1		
博罗	1	35.7	33.3	1	1	9(3)	52.47
	2	51.2	23.6	1	0		
	3	32.5	21.7	2	0		
	4	39	121.4	1	2		
	5	39.5	52.4	0	1		

3.3 生态径流的变化对生物多样性的影响

已经有 170 多个水文指标^[4]公开发表,尽管 IHA 总结了 32 个水文指标^[5],但是与生态最相关指标 (Ecologically Relevant Hydrologic Indicators, ERHIs) 的选择依然是关键问题。本文用 PCA 从 IHA32 个指标中选择 ERHIs 做进一步的分析。选择特征值大于 1 的主成分,保证结果中每个变量至少有更多的方差,共选择了 7 个主成分:PC1—PC7。因为在一个主成分下选择多个指标,代表河流流态相同的方程成分,所以在选择的 ERHIs 中,很多指标有较高的相关性例如:最小 7d、最小 30d 和最小 90d 等。因此在明显具有相关性的指标中,只选择一个最高荷载的指标:最小 7d 流量。在 4 个站点中出现次数最多的指标被选为东江流域 ERHIs:最小 7d 流量 (Min7)、最大 7 天流量 (Max7)、最小流量出现日期 (D_{\min})、最大流量出现日期 (D_{\max})、高流量平均历时 (High Pulse Count, HPC)。上述 ERHIs 与 Yang 等人用 GP 筛选出的 6 个 ERHIs 基本吻合^[17],两者相差水文转变数量 (Number of reversals, RV)、上升率 (Rise rates, R_{rate}) 两个指标。为了全面考虑,本文同样将 RV 和 R_{rate} 两个指标纳入 ERHIs 中分析 (图 4)。

从图 4 中可以看出,最小 7d 流量在 1974 年之后突然增加,然后维持在高位震荡。最大 7d 流量由 1974 年之前的高位震荡,突然减小,并且稳定在较低水平。最小日流量出现时间建库后序列震荡幅度明显增加,以岭下站和河源站最显著。最大日流量出现时间建库后序列较建库前更加稳定,震荡幅度显著减小。高流量天数 (HPC) 建库后均成缓慢震荡下降趋势。高流量量级和天数减少,直接减弱洪水对河道的冲刷作用,影响底层无脊椎生物生存与繁衍;河岸边湿地生态用水补充可能困难,湿地地下水也较难补充,并且影响湿地土壤营养补充,进而威胁湿地系统的生物多样性。 R_{rate} 建库后的变化很显著,均表现为突然下降,然后稳定在较低水平。RV 则相反,一直呈显著增加趋势。ERHIs 的变化特征必将引起总生态赤字和总生态剩余的变化 (图 5) 并且导致河道水生生态系统生物多样性的变化 (SI, 图 6)。

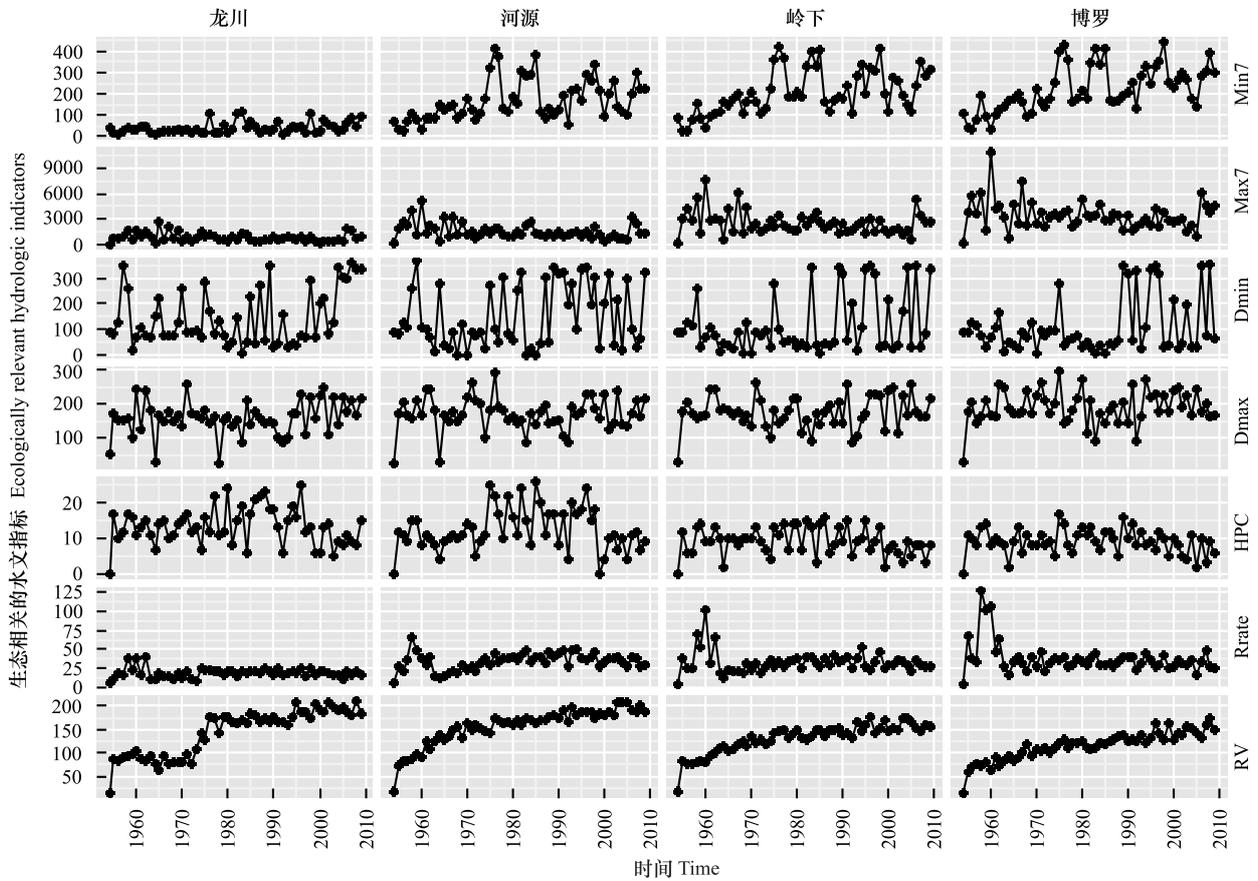


图 4 ERHIs 随时间变化特征

Fig.4 The time-varying characteristics of ERHIs

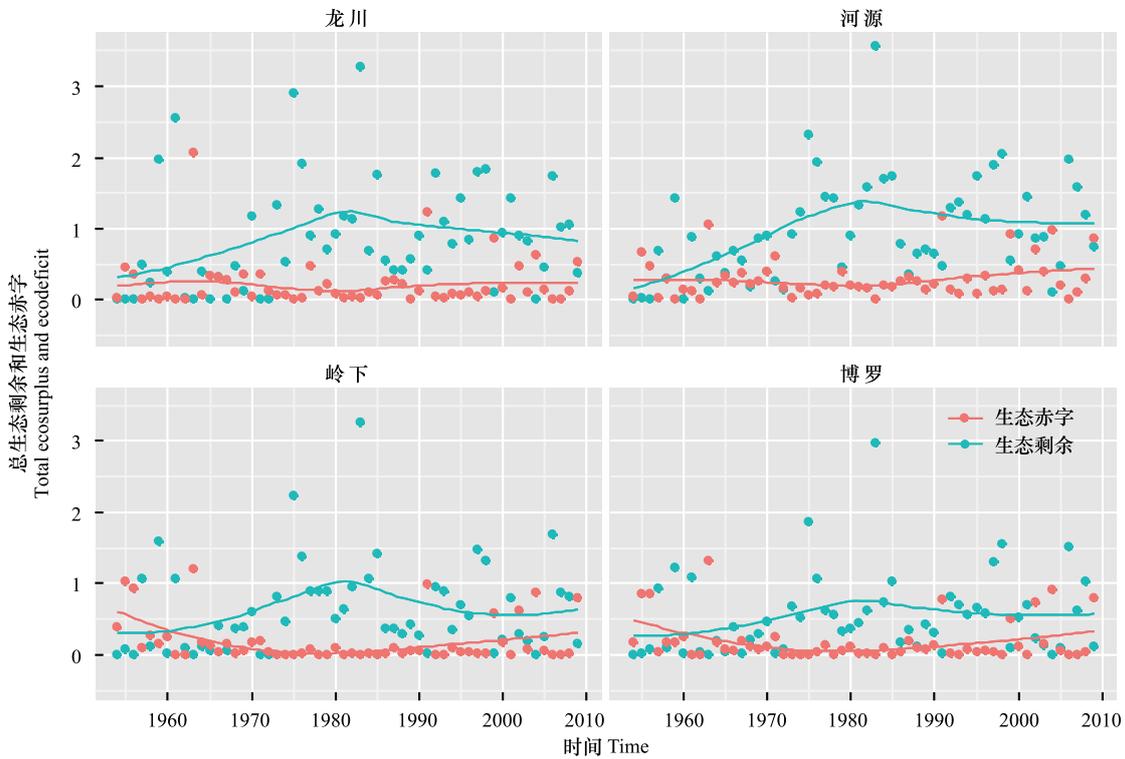


图 5 总季节生态剩余和总季节生态赤字的时间变化特征

Fig.5 The time-varying characteristics of total season ecosurplus and ecodeficit

图中阴影部分表示 loess 拟合曲线的 95%置信区间

总季节生态剩余和总季节生态赤字就是分别将各季节生态剩余和生态赤字求和(图 5)。总季节生态剩余和生态赤字可以反映出季节尺度生态变化在年尺度的影响,从而和年尺度的生态多样性指标 SI 值对应。总季节生态剩余和生态赤字用局部加权多项式(Loess 函数)回归进行拟合,并给出了 95%置信区间,以判断其变化趋势(图 5)。从图 5 中可以看出,4 个水文站点总季节生态剩余明显高于总季节生态赤字,并且总季节生态剩余和生态赤字均具有相似的变化特征。1980 年之前总季节生态剩余一直呈增加趋势,1980 年之后处于稳定状态。龙川站总季节生态赤字一直处于平稳状态,变化较小,河源、岭下和博罗三站总季节生态赤字 1974 年之前处于微弱的下降状态,1974 年之后反而处于缓慢的上升状态,其中夏季生态赤字的增加起到了关键的作用(图 2)。

图 6 给出了生物多样性指标 SI 的变化特征。从图 6 中可以看出,龙川、岭下和博罗 3 站 SI 值在 1974 年有一个明显的转折点:1974 年之前持续下降,1974 年之后缓慢上升,1990 年代之后在缓慢下降。相比建库前,龙川、岭下和博罗三站 SI 值均在下降,生物多样性减小,水库对河流生态系统造成了显著影响。河源站 SI 值在水库建成后 1990 年代呈显著下降趋势,生物多样性受到严重影响,这与河源站 1990 年代降水显著下降有显著关系(图 2)。比较图 5 和图 6,建库后总季节生态剩余和生态赤字的处于稳定性变化, SI 值也重新处于稳定状态,说明:建库后河流生态流态的重新平衡,对建库后的生物多样性的重新处于平稳状态具有重要作用。

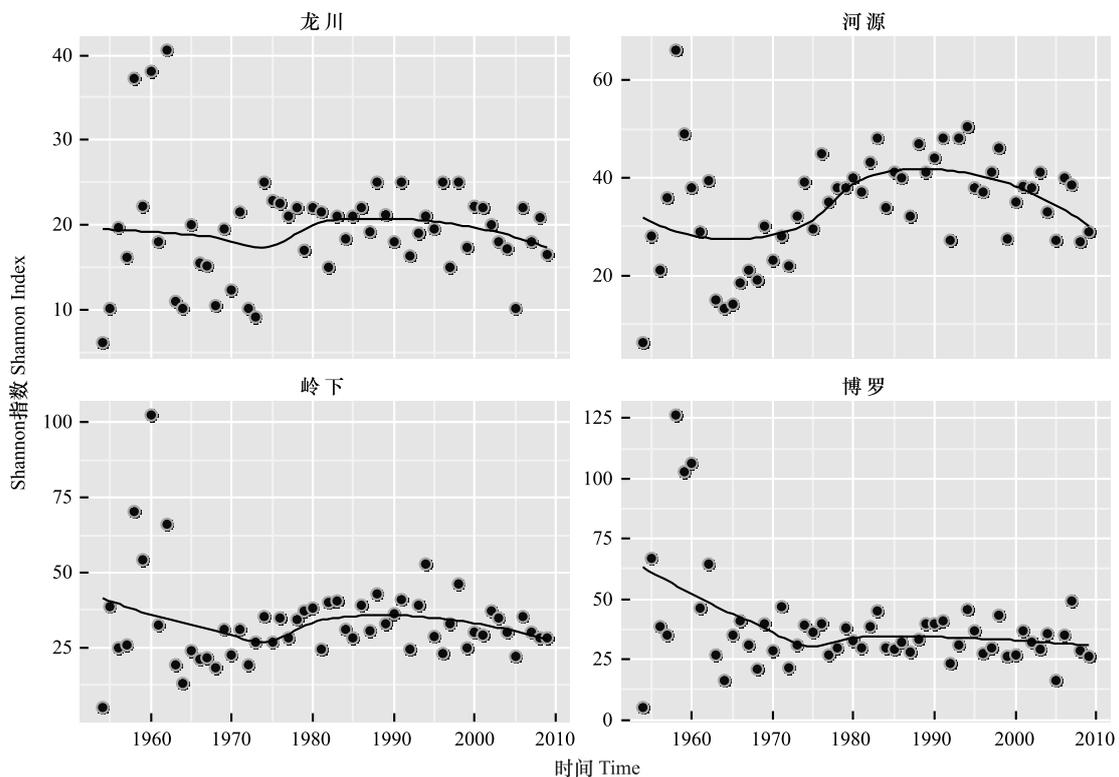


图 6 生物多样性指标 SI 时间变化特征

Fig.6 The time-varying characteristics of biodiversity indicators SI

黑色曲线表示 loess 函数拟合曲线,阴影部分表示 loess 拟合曲线的 95%置信区间

3.4 生态径流指标与 IHA32 指标比较

为了理解生态径流指标和 IHA32 指标之间的关系,IHA32 指标与各生态径流指标的相关关系如图 7 所示。大部分生态径流指标与 IHA32 指标具有很强的正或者负的相关关系(图 7)。冬季月径流(12—2 月)与冬季、年以、季节总生态剩余、总生态改变以及 SI 具有很强的正相关关系。最小 1、3、7、30d 和 90d 流量几乎与各生态指标(除去夏季和秋季生态剩余和生态赤字)均有较强的正相关关系。相比不同历时的最小流量,

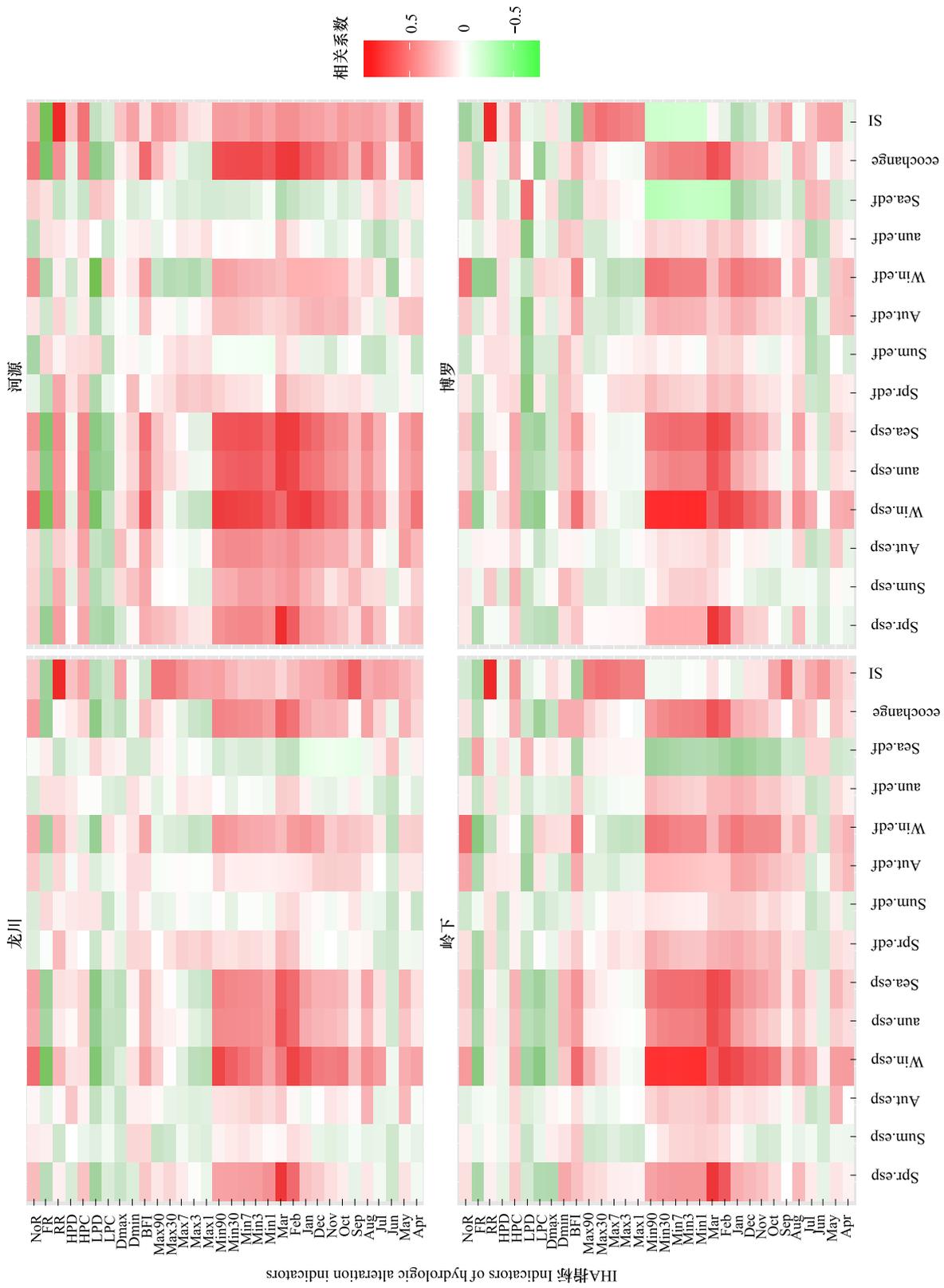


图 7 生态径流指标与IHA32指标相关系数
Fig. 7 Correlation coefficient between the eco-flow metrics and the IHA metrics

最大 1、3、7、30d 和 90d 流量与各生态径流指标相关关系较弱。FR(Fall rate)与 LPD(Low pulse duration)与大部分生态径流指标具有较强的负相关关系。在所有的生态径流指标中,冬季、年以及季节总生态剩余指标、秋季和冬季生态赤字、总生态改变以及 SI 与 IHA32 指标具有较好的相关关系,能够较好的表达 IHA32 指标的信息:例如冬季生态剩余增加,生态赤字减少,可以充分反映出冬季月径流增加,不用历时最小流量的增加等。在所有的生态指标中,夏季生态剩余和生态赤字与 IHA32 指标的相关关系最弱,表达 IHA32 指标的信息最少。通过以上的分析,生态径流指标可以很好的反映出 IHA32 指标的信息,生态剩余和生态赤字可以提供水文改变的一个好的评价标准。生态剩余和生态赤字与 IHA32 指标的计算是相互独立的,同时生态剩余和生态赤字的应用能够有效的解决大量水文指标之间的冗余与相关关系,可以作为衡量水文改变的很好的指标^[8,18]。

4 结论

用东江流域 1954—2009 年日流量数据计算生态剩余和生态赤字,并结合 D_0 和 DHRAM 评价东江流域水文整体改变程度,分析了 ERHIs、总季节生态剩余与生态赤字以及 SI 指标的变化,研究水文改变对生态多样性的影响。研究结果如下:

(1) 由于水库的影响,建库后高流量量级和次数明显降低,低流量量级和次数明显增加,导致 FDC 上端向下移动,尾部向上移动。FDC 的变化引起高流量部分低于 25% FDC,产生生态赤字,低流量部分高于 75% FDC,产生生态剩余。

(2) 年生态剩余的时间变化与降水距平较为一致,受水库影响较少,年生态赤字则受水库影响较大。夏季生态剩余和生态赤字与降水的变化较为一致,其他季节则受水库的影响较大,尤其是秋季和冬季,建库后生态赤字几乎为 0,生态剩余显著增加。

(3) 龙川和河源两站河流流态的变化对河流生态系统造成了高风险的影响,岭下和博罗两站则是中等风险(DHRAM 评价),龙川、河源、岭下和博罗 4 站点总体改变程度分别为 58.48%、54.04%、54.32% 和 52.47% (D_0)。河流流态变化导致总季节生态剩余增加并维持在较高水平,进一步引起河流生物多样性下降,并维持在较低水平。

(4) 生态径流指标(生态剩余和生态赤字)与 IHA32 指标具有较好的相关关系,能够体现大部分 IHA 参数的信息。生态剩余和生态赤字能够很好的应用与东江流域反映东江流域年和季节径流变化。

参考文献(References):

- [1] 张强,孙鹏,陈喜,陈晓宏. 1956—2000 年中国地表水资源状况:变化特征、成因及影响. 地理科学, 2011, 31(12): 1430-1436.
- [2] Barnett T P, Pierce D W, Hidalgo H G, Bonfils C, Santer B D, Das T, Bala G, Wood A W, Nozawa T, Mirin A A, Cayan D R, Dettinger M D. Human-Induced changes in the hydrology of the western united states. Science, 2008, 319(5866): 1080-1083.
- [3] Poff N L, Olden J D, Merritt D M, Pepin D M. Homogenization of regional river dynamics by dams and global biodiversity implications. The National Academy of Sciences of the USA, 2007, 104(14): 5732-5737.
- [4] Olden J D, Poff N L. Redundancy and the choice of hydrologic indices for characterizing streamflow regimes. River Research and Applications, 2003, 19(2): 101-121.
- [5] Richter B D, Baumgartner J V, Powell J, Braun D P. A method for assessing hydrologic alteration within ecosystems. Conservation Biology, 1996, 10(4): 1163-1174.
- [6] Zhang Q, Xiao M H, Liu C L, Singh V P. Reservoir-induced hydrological alterations and environmental flow variation in the East River, the Pearl River basin, China. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, 2014, 28(8): 2119-2131.
- [7] Chen Y Q D, Yang T, Xu C Y, Zhang Q, Chen X, Hao Z C. Hydrologic alteration along the Middle and Upper East River (Dongjiang) basin, South China: a visually enhanced mining on the results of RVA method. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, 2010, 24(1): 9-18.
- [8] Gao Y X, Vogel R M, Kroll C N, Poff N L, Olden J D. Development of representative indicators of hydrologic alteration. Journal of Hydrology, 2009, 374(1/2): 136-147.

- [9] Shiau J T, Wu F C. Compromise programming methodology for determining instream flow under multiobjective water allocation criteria. *Journal of the American Water Resources Association*, 2006, 42(5) : 1179-1191.
- [10] Vogel R M, Sieber J, Archfield S A, Smith M P, Apse C D, Lee A H. Relations among storage, yield, and instream flow. *Water Resources Research*, 2007, 43(5) : W05403.
- [11] Shiau J T, Wu F C. Pareto-optimal solutions for environmental flow schemes incorporating the intra-annual and interannual variability of the natural flow regime. *Water Resources Research*, 2007, 43(6) : W06433.
- [12] Black A R, Rowan J S, Duck R W, Bragg O M, Clelland B E. DHRAM: a method for classifying river flow regime alterations for the EC Water Framework Directive. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems*, 2005, 15(5) : 427-446.
- [13] Zhou Y, Zhang Q, Li K, Chen X H. Hydrological effects of water reservoirs on hydrological processes in the East River (China) basin: complexity evaluations based on the multi-scale entropy analysis. *Hydrological Processes*, 2012, 26(21) : 3253-3262.
- [14] 张强, 崔瑛, 陈永勤. 水文变异条件下的东江流域生态径流研究. *自然资源学报*, 2012, 27(5) : 790-800.
- [15] The Nature Conservancy. Indicators of hydrologic alteration version 7.1 user's manual; 2009. (2009-04). <http://www.conservationgateway.org/ConservationPractices/Freshwater/EnvironmentalFlows/MethodsandTools/IndicatorsofHydrologicAlteration/Pages/IHA-Software-Download.aspx>.
- [16] Kuo S R, Lin H J, Shao K T. Seasonal changes in abundance and composition of the fish assemblage in Chiku Lagoon, southwestern Taiwan. *Bulletin of Marine Science*, 2001, 68(1) : 85-99.
- [17] Yang Y C E, Cai X M, Herricks E E. Identification of hydrologic indicators related to fish diversity and abundance: A data mining approach for fish community analysis. *Water Resources Research*, 2008, 44(4) : W04412.
- [18] Gao B, Yang D W, Zhao T G, Yang H B. Changes in the eco-flow metrics of the Upper Yangtze River from 1961 to 2008. *Journal of Hydrology*, 2012, 448-449: 30-38.