

水文变异条件下的黄河干流生态径流特征及生态效应

张宗娇¹, 张强^{2*}, 顾西辉¹, 孔冬冬¹, 李彬^{3,4}, 刘廷玺⁴

(1. 中山大学 a. 水资源与环境系, b. 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;

2. 北京师范大学 a. 环境演变与自然灾害教育部重点实验室, b. 地表过程与资源生态国家重点实验室,

c. 减灾与应急管理研究院, 北京 100875; 3. 内蒙古自治区水利厅, 呼和浩特 010020;

4. 内蒙古农业大学水利与土木建筑工程学院, 呼和浩特 010018)

摘要: 黄河流域地表水文过程受气候变化与如水库拦蓄等人类活动的严重影响, 发生显著变化, 多次出现断流现象。深入理解水文变异条件下的径流特征及生态效应, 对于黄河流域水资源管理及水资源可持续开发利用具有重要意义。基于此, 论文利用多水文指标研究水文变异过程, 结合基于流量历时曲线(FDC)的生态剩余和生态赤字等生态径流指标以及水文变异总体评价指标 D_o 和DHRAM (Dundee Hydrological Regime Alteration Method) 来描述黄河干流大中型水利工程对下游河道水文情势的改变程度, 并根据多样性指标 SI 和IHA (Indicators of Hydrologic Alteration) 的拟合关系, 进一步分析水文变异的生态效应。研究表明: 1) 水文情势变异后, FDC整体下移, 低于25%FDC流量部分大幅增加, 产生生态赤字; 2) 从上游到下游, 降水对各站生态径流指标的影响逐步减小, 水库对生态径流指标的影响愈益增大; 3) 各生态径流指标与大部分IHA指标具有较好的相关关系, 能够体现IHA参数的主要信息, 可作为衡量黄河流域年和季节径流变化的生态径流指标; 4) 综合 D_o 和DHRAM的评价结果, 径流过程变异对各站生态风险的影响为: 花园口、孙口和利津站为高风险, 头道拐和兰州为中等风险, 唐乃亥和龙门为低风险; 各水文站 SI 值在20世纪80年代之后均出现下降趋势, 其中花园口、孙口和利津3个站的下降幅度较大, 生物多样性锐减。

关键词: 生态径流指标; IHA; 生物多样性; 黄河; 水文变异

中图分类号: P333.1

文献标志码: A

文章编号: 1000-3037(2016)12-2021-13

DOI: 10.11849/zrzyxb.20160068

水文过程变异会在不同程度上改变生物栖息地条件, 打破生态系统平衡, 因而, 水文过程变化作为影响水生态环境的重要因素而备受关注^[1]。近几十年来, 随着我国各大流域水库群建设, 社会经济效益凸显, 但水库通过对地表水文过程的影响进而影响到流域生态系统, 从而导致一系列水生态环境问题^[2-5]。科学探讨径流变化的生态效应对水资源的合理配置和生态环境的建设具有重要意义^[6]。

关于水文变异的量化和生态效应已经引起人们的广泛关注, Richter等构建评估生态

收稿日期: 2016-01-18; 修订日期: 2016-06-18。

基金项目: 国家杰出青年科学基金项目 (51425903); 安徽省自然科学基金项目 (1508085MD65)。[Foundation items: National Natural Science Foundation of China, No. 51425903; Anhui Provincial Natural Science Foundation, No. 1508085MD65.]

第一作者简介: 张宗娇 (1993-), 女, 湖北黄冈人, 硕士, 主要从事流域地表水文过程研究。E-mail: 1347902753@qq.com

***通信作者简介:** 张强 (1974-), 男, 山东沂水人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事流域气象水文学研究、旱涝灾害机理、流域地表水文过程及其对气候变化的响应机制与机理以及流域生态需水等领域的研究工作。E-mail: zhangq68@bnu.edu.cn

水文变化的IHA (Indicators of Hydrologic Alteration) 方法, 指标共分5类, 包括月平均流量指标、极限流量指标、频率、持续时间和变化速率等33个水文指标^[7], 这些指标被广泛应用于河流水文变异及生态效应研究^[8-11]。Yang等利用IHA法、Mann-Kendall法和直方图匹配(HMA)法对黄河下游水文情势的变异进行研究, 结果表明黄河下游的流量在1984年之后有显著减小趋势, 为保护黄河流域的生态系统, 一些重要的水文特征值如月径流量、高(低)流量平均持续时间以及高流量洪峰数和低流量谷底数可以作为水资源管理的关键指标^[12]; Yang等采用变化范围法(Range of Variability Approach, RVA)评价黄河中下游水文情势的变异程度, 重点分析小浪底水库、三门峡水库等水利工程对水文情势的影响, 结果表明小浪底水库严重改变黄河下游的水文情势, 而三门峡水库影响相对较小^[13]; 朱记伟等采用RVA评价西安市灞河下游IHA指标特征, 量化河流受影响程度, 结论是河流水文情势整体变异度为63.98%, 属于中度变异^[14]。但值得注意的是, 很多研究仅仅关注了年或者季节性河流流量的趋势及流态的变化, 这种变化对河流生态系统的影响则较少涉及, 尤其是大型水库引起的水文改变对生态的影响。因此本文的研究聚焦于以下三个方面: 1) 生态剩余和生态赤字评价黄河流域在水库建成后, 河道流量相对于天然状态下, 总的生态需水的缺失和盈余; 2) 分析水文改变引起的河道生物多样性的变化; 3) 以IHA指标为基础, 利用 D_h 和DHRAM (Dundee Hydrological Regime Alteration Method) 评价水文总体改变程度以及河道生态系统受影响的风险等级。

本文采用多个广义的指标, 以期全面评价气候变化与人类活动影响下, 黄河干流水文情势的变化以及生态系统的风险级别, 为科学理解黄河流域生态径流机制、优化基于生态的水库调度以及合理供水取水提供理论依据。

1 研究区与数据

黄河是中国的第二大河, 流域面积约752 443 km², 多年平均径流量 580×10^8 m³, 多年平均降水量为466 mm, 由东南向西北递减; 流域大部分地区属于干旱半干旱地区, 水资源紧缺。近年来, 随着流域经济的发展, 水资源需求不断扩大, 而20世纪80年代以来, 流域一直处于降水偏枯期, 导致黄河水资源紧缺问题更加突出, 干支断流现象频繁发生。同时, 全流域共建成各类水库3 000多座, 其中大中型水库170多座, 流域水文过程显著受水库调节的影响, 黄河流域的水生态系统出现了严重的退化现象。

本文选取位于黄河干流7个主要水文控制站点(唐乃亥、兰州、头道拐、龙门、花园口、孙口和利津, 图1)的日径流量观测数进行分析, 径流数据由黄河水利委员会的水文年鉴等资料提供。对于个别

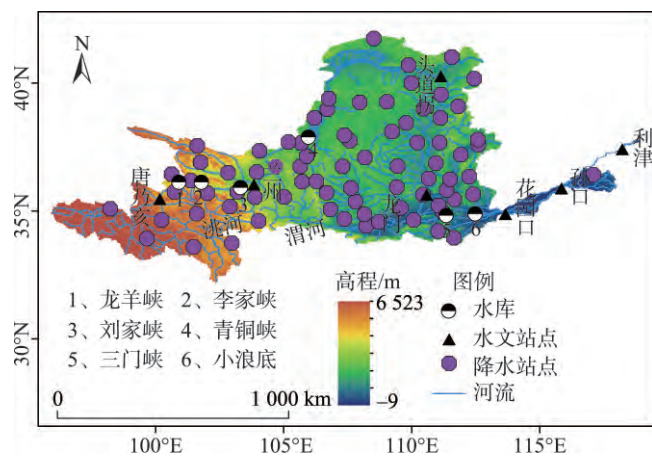


图1 黄河流域水文站点和水库的地理分布

Fig. 1 The locations of hydrology stations, precipitation stations and reservoirs in the Yellow River Basin

缺测数据, 本文选用上下游相关分析法来插补 (相关系数达0.85以上), 以确保序列的完整性和连续性。选取黄河干流主要的水利工程 (表1), 分析其建库后所带来的水文变异及水生态系统的变化。另外选取分布在整个黄河流域77个降水站点1960—2013年日降水数据 (图1), 数据有少量缺测。选取的有效灌溉面积 (1978—2005年) 和水库总库容 (1987—2005年) 的数据来源于中国水资源公报, 地表取水量 (是指从黄河干、支流引的包括输水损失在内的新鲜水量) (1998—2005年) 的数据来源于黄河水资源公报。

根据李剑锋等^[15]和李文文等^[16]对黄河干流水文变异的分析结果, 将水文序列划分为变异前和变异后序列 (表2)。

表1 黄河干流主要水利工程详细信息

Table 1 Detailed information of the primary dam project on the Yellow River

编号	大坝名称	建造时期	集水面积/km ²	总库容/10 ⁸ m ³
1	龙羊峡	1979—1986年	131 420	24.7
2	李家峡	1988—1996年	136 747	1.65
3	刘家峡	1958—1974年	181 766	6.4
4	青铜峡	1958—1968年	275 010	0.62
5	三门峡	1958—1960年	688 800	36
6	小浪底	1992—1997年	694 000	12.65

表2 日流量站点的详细信息

Table 2 Detailed information of the stream flow gauging stations

站点	经度	纬度	集水面积/km ²	变异前序列	变异后序列
唐乃亥	100°09'E	35°29'N	121 972	1956—1989	1990—2005
兰州	103°50'E	36°03'N	222 551	1967—1986	1987—2005
头道拐	111°08'E	40°17'N	367 898	1958—1985	1986—2005
龙门	110°35'E	35°39'N	497 552	1965—1985	1986—2005
花园口	113°40'E	34°54'N	730 036	1949—1990	1991—2005
孙口	115°51'E	35°54'N	734 146	1949—1985	1986—2005
利津	118°14'E	37°26'N	751 869	1949—1985	1986—2005

唐乃亥站上游受人类活动影响较小, 变异的主要原因是气候变化, 黄河上游和源区降水从20世纪90年代有所减小, 气温明显上升, 导致了黄河源区和上游径流量锐减。

兰州上游有刘家峡、龙羊峡、李家峡。龙羊峡工程1979年12月29日截流, 1986年10月15日下闸蓄水。根据李剑锋等^[15]采用的滑动秩和检验进行水文变异分析的结果表明, 兰州站第一次水文变异时间与龙羊峡下闸蓄水时间一致。

由于青铜峡调节能力较小, 对年径流量的影响不大, 所以对头道拐站的调控没有产生显著的水文变异。同时, 头道拐也受到龙羊峡、李家峡、刘家峡的影响, 其变异时间与兰州相近。龙门站水文序列变异成因也和头道拐相似。

花园口、孙口和利津三站属于黄河下游, 其变异原因相似, 根据李文文等^[16]的研究表明其成因来自两个方面: 1) 气候变化影响。近年来, 黄河流域气温明显升高, 降水量有所减少, 从1960年到2007年, 大部分地区降雨呈下降趋势, 且显著变异主要发生在黄河中下游38°N以南地区, 变异时间主要发生在1963—1998年。2) 人类活动影响。流域水土保持活动是变异产生的主要影响因素之一, 1980—1985年是水保措施发挥显著作用的阶段; 干流大型水利工程建设运行是变异产生的另一个主要因素。1961年开始, 黄河上游干流相继修建了盐锅峡、青铜峡、刘家峡、龙羊峡等一系列水利枢纽, 及受其他引黄灌溉措施的影响, 黄河干流来水来沙条件发生了较大幅度的调整, 尤其是龙羊峡水库投入运用以后。

2 研究方法

2.1 生态剩余和生态赤字

Vogel等基于流量历时曲线(Flow Duration Curve, FDC)提出一种无量纲的生态径流(eco-flow)指标——生态剩余和生态赤字来评价水文情势变化^[17]。FDC由选择时间段的日流量数据计算,其定义为在某个时段内某个流量与等于或大于该流量所对应的时间之间的相关关系,可以简单直观地表现径流大小和频率的关系。一段时间内日流量数据 Q_i 由大到小排列,其超过概率为:

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

式中: i 为秩次; n 为日流量观测值 Q_i 的样本大小。

Gao等^[10]对Vogel等关于生态剩余和生态赤字的定义做了改进,首先,根据各水文站实测的日流量资料得到变异点之前时段内每一年的年、季节FDC。对变异点之前所有年份的年或季节流量进行排序,得到75%及25%分位数对应的年份,将这两个年份的年或季节FDC分别定义为75%和25%FDC。对于每一年,其FDC高于75%FDC,则将该FDC与75%FDC围成的面积与多年平均的年或季节流量的比值定义为生态剩余,该值代表的意义为该水文要素超过河流生态系统对该要素需求值;若其FDC低于25%FDC,则将该FDC与25%FDC围成的面积与多年平均流量的比值定义为生态赤字,该值代表的意义为该水文要素低于河流生态系统对该要素的需求值。两者之和称为生态变化总值(ecochange),表示整个时间段内的水文变化情况。关于生态径流指标更加详细的定义,读者可参考文献[10]和[17],在此不再赘述。

2.2 水文变异程度量化

为定量描述单个水文指标受影响后的变异程度,Richter等^[18]在IHA的基础上提出了RVA法,通常将受影响前各指标发生频率的75%和25%作为能够满足河流生态需求的变动范围,即RVA阈值。各指标的具体水文变异度由下面公式量化得到:

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

式中: D_i 为第 i 个指标的水文变异程度; $N_{o,i}$ 为变异后的径流序列IHA值在25%~75%分类范围内的年数; N_e 相应的期望年数($N_e = P \times N_T$, P 为50%, N_T 变异后径流序列的总年数)基于每个指标的变异程度 D_i ,变异后序列总的水文变异程度计算如下:

$$D_o = \left(\frac{1}{33} \sum_{i=1}^{33} D_i^2 \right)^{1/2} \quad (3)$$

Black等于2005年提出了另一个广义水文变异指标DHRAM^[19],基于IHA方法,用来评估人类活动对河流或者湖泊造成的变化。DHRAM假设生态系统结构破坏的风险与水文情势的累积变形成比例,并通过风险的概念建立IHA 33个指标的统计参数(平均值和变异系数)和生态影响之间的联系。基于IHA的33个指标的统计参数变异前后变化百分比,DHRAM计算一个分数值(变化范围为0~30),分数值越大,径流机制变异程度越大,生态系统遭受破坏的风险越大。关于DHRAM的具体定义和用法,由于篇幅有限,不再赘述,读者可以参考文献[19]。 D_o 和DHRAM共同作为衡量总的水文变异程度的指标,评价水文机制变异对河流生态系统的风险。

2.3 生物多样性影响评价

香浓指数 SI 是运用最广泛的评价生物多样性的指标^[20]:

$$SI = - \sum_i p_i \times \log p_i \quad (4)$$

式中: p_i 表示为群落属于第 i 个物种的比例; SI 越大表示生物多样性越丰富。Yang 等^[21] 用 GP (Genetic Programming) 算法, 基于 IHA 的 33 个指标建立了 SI 与水文指标的最佳拟合关系:

$$SI = \frac{D_{\min}/Min7 + D_{\min}}{Q_3 + Q_5 + Min3 + 2 \times Max3} + R_{rate} \quad (5)$$

式中: D_{\min} 表示为最小一天流量的儒略日期; $Min3$ 、 $Min7$ 分别表示为最小 3 d 流量和最小 7 d 流量; $Max3$ 表示为最大 3 d 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的均值。

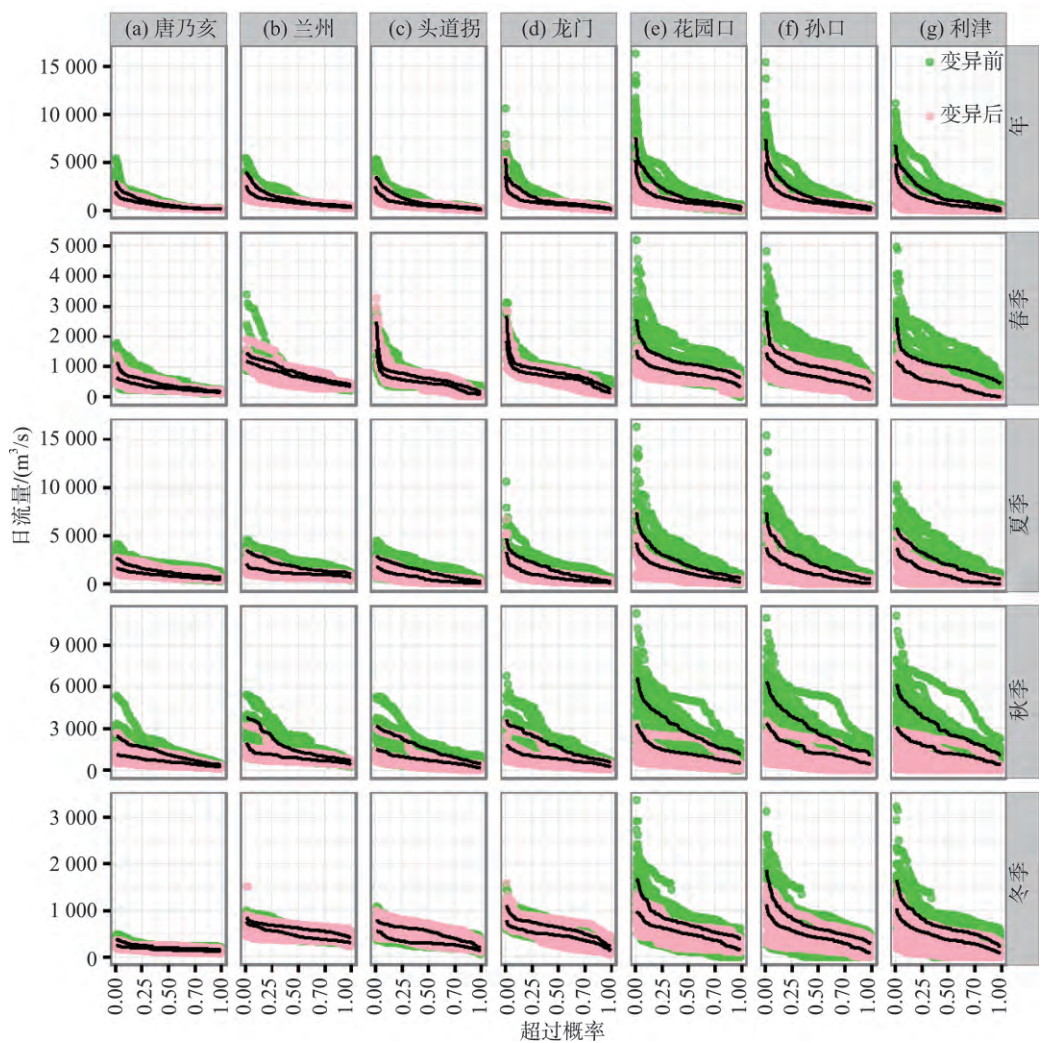
3 研究结果

3.1 生态径流指标的变化

图 2 为变异前后年和季节历年 FDC 散点图。整体上, 水文情势变异前后高流量和低流量的出现范围差异较大。从各水文站的年和季节分布特征来看, 夏和秋两个季节的变异前后差异更为明显。从年和季节各站的分布特征来看, 花园口、孙口和利津 3 个站的变异前后差异最为明显。变异后, 高流量量级和次数明显降低, 而低流量量级相对于变异年之前减小, 次数增加, 这很可能会导致高流量减小引起的生态赤字的增加。产生这种结果, 主要有两方面原因: 1) 气候变化: 黄河流域温度升高, 降雨量呈下降趋势, 导致天然年径流量的减少。2) 人类活动: 近半个世纪以来, 黄河流域经济飞速发展, 工业农业用水增加, 河道内径流量减少。同时黄河干流不断兴建重大水利工程, 这改变了当地水文季节规律, 人类用水不再是靠天吃饭, 在枯水期也能够按照需要用水, 这导致用水量增加。气候变化和人类活动共同作用下, 年径流量大幅减少且流量的季节变化趋于平稳。

变异后, 唐乃亥夏季和秋季满足河流生态适宜的流量范围减少的幅度相对其他 6 站少。这是因为唐乃亥位于黄河上游, 没有受到水利枢纽的调控影响, 而且上游地区经济发展速度较慢, 工农业用水量增加较少。其他 6 站水文变异后受调控影响, 水库把汛期多余水量储存, 在枯水期泄水, 使得流量的季节变化趋于平稳。受调控前枯水期是不能正常取水的, 受调控后枯水期也能够正常取水, 使得调控后的用水量增加。同时, 黄河中下游经济发展速度相对唐乃亥较快, 工农业用水、生活用水增长较快。这加速了年径流量的减少。通过 FDC 的变化, 可以初步判断出水库对年和季节生态径流指标的影响。

图 3 为通过年 FDC 和季节 FDC 得到年和季节生态径流指标 (生态剩余和生态赤字) 及各水文站的年和季节降水距平时间变化特征。从年尺度来看, 唐乃亥站生态径流指标的时间变化与降水距平较一致, 而黄河中下游, 生态径流指标与降水距平的差异愈加明显。20 世纪 80 年代至 21 世纪初, 从上游站到下游站, 河流生态赤字的程度有逐级加深的趋势, 而生态剩余保持为 0, 黄河流域河道生态需水处于过于缺乏状态。降水减少导致流量减小, 但是降水减少量并不显著, 可见, 年 FDC 低于 25% 分位数线部分增加, 生态赤字上升受水库调控的影响较大。



注：图中两条黑色曲线由上到下依次表示75%和25% FDC曲线。

图2 变异前后历年FDC散点图

Fig. 2 Annual flow duration curves before and after alterations

从季节尺度来看，生态径流指标与降水距平差异则更加明显，尤其是春、秋和冬三个季节。各水文站中，除了唐乃亥站，其他6站生态径流指标与降水距平分布特征表明，20世纪80年代之前，生态径流指标与降水距平时间变化一致性较好，80到90年代，降水增多，但是生态剩余则几乎为0，90年代之后，各水文站都以生态赤字为主，尤其以利津站的生态赤字最为显著，生态赤字的增加幅度远远超过降水距平。而冬季，90年代之前，从各水文站变化特征来看，降水增加的多少对生态剩余的影响不大，此时，水库的调蓄作用得到了充分的发挥。而到90年代之后，黄河下游3个站花园口、孙口和利津，降水虽然增加，但生态剩余依旧维持在0附近，生态赤字增加的幅度远远超过降雨的减少幅度。三门峡和小浪底两大水利工程对河道水文情势的变异有不小的贡献。

图4显示了年和季节生态径流指标10 a统计变化特征。7个站点的年生态赤字20世纪80年代之后均呈显著上升趋势，年生态剩余则一直在减少，到80年代之后维持在0附近。



注：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。

图3 生态径流指标与降水距平百分率的时间变化

Fig. 3 Changes in the annual and season eco-flow metrics and the annual precipitation anomaly

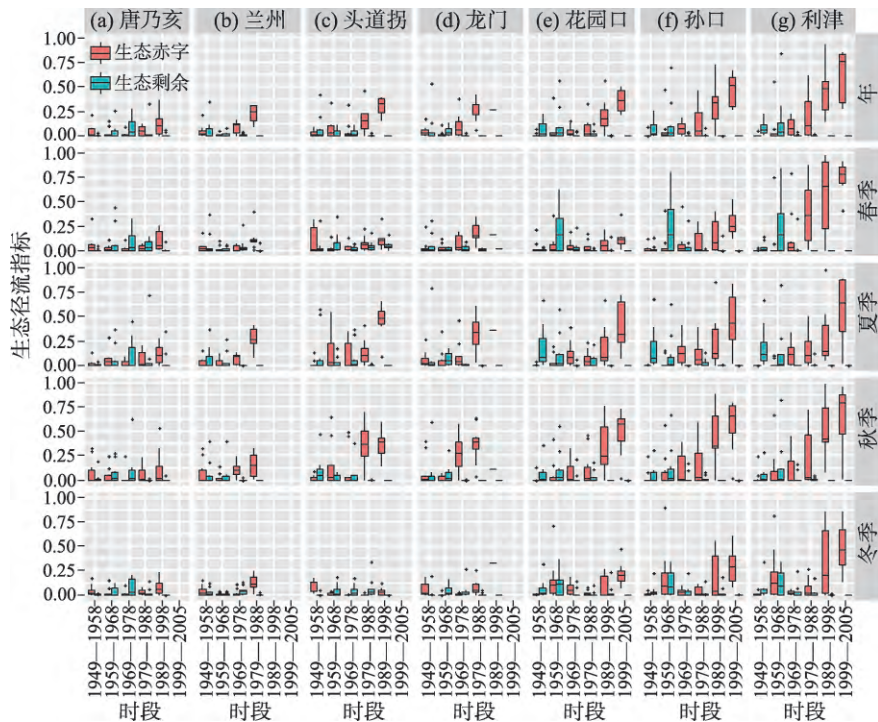


图4 年和季节生态径流指标10 a年际间变化箱型图

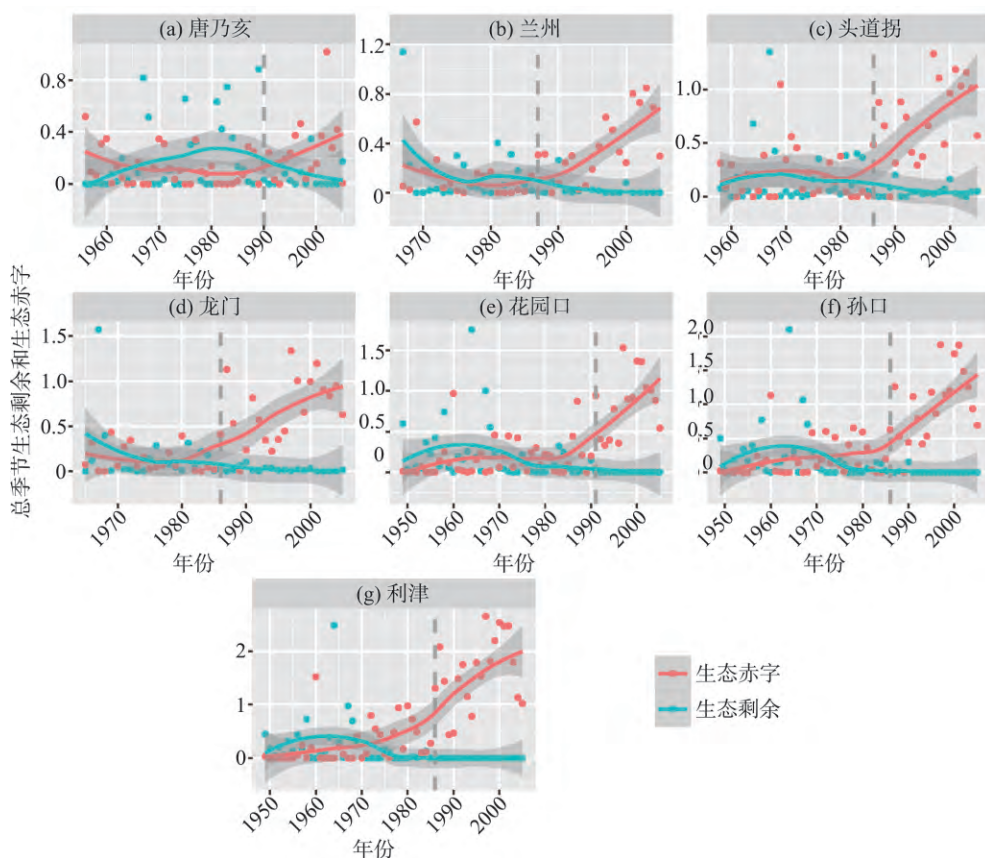
Fig. 4 Boxplot of decadal changes in the seasonal ecosurplus and eco-deficit

从各水文站的各季节生态径流指标变化特征来看,夏季和秋季生态赤字增加最为显著,尤其是花园口、孙口和利津三个站,而生态剩余则均在减小,直到80年代之后维持在0附近。

3.2 生态径流的变化对生物多样性的影响

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。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可以看出,7个水文站总季节生态剩余和生态赤字均具有相似的变化特征。各站的生态剩余在变异年之后都呈现下降趋势,并最终稳定在0值附近,各站的生态赤字则在变异年之后呈现显著增长趋势。

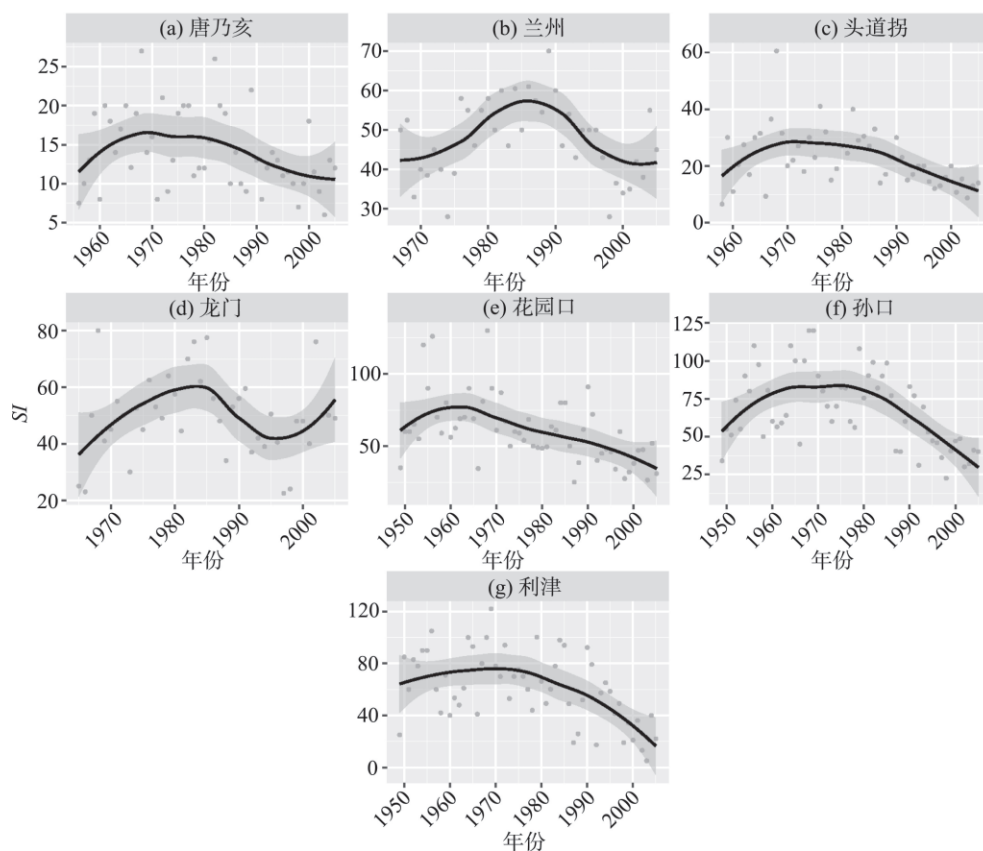
图6给出生物多样性指标 SI 的变化特征。各水文站 SI 值在20世纪80年代都有下降的趋势,黄河下游的3个站下降的趋势最为明显,可见三门峡和小浪底等水利工程建设以及水资源的过度开发很大程度上改变了该河段的水文情势,对河流生态系统产生了严重的负面影响。有研究表明,由于梯级水利工程建设、水量锐减、水污染加重等原因,致使黄河鱼类在种类、种群分布和数量上均呈减少、衰退趋势,大多数鱼类产卵场遭到



注: 图中阴影部分表示 Loess 拟合曲线的 95% 置信区间。

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 Temporal variations of the total seasonal ecological surplus and the total seasonal ecological deficit



注: 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。

图6 生物多样性指标 SI 时间变化特征

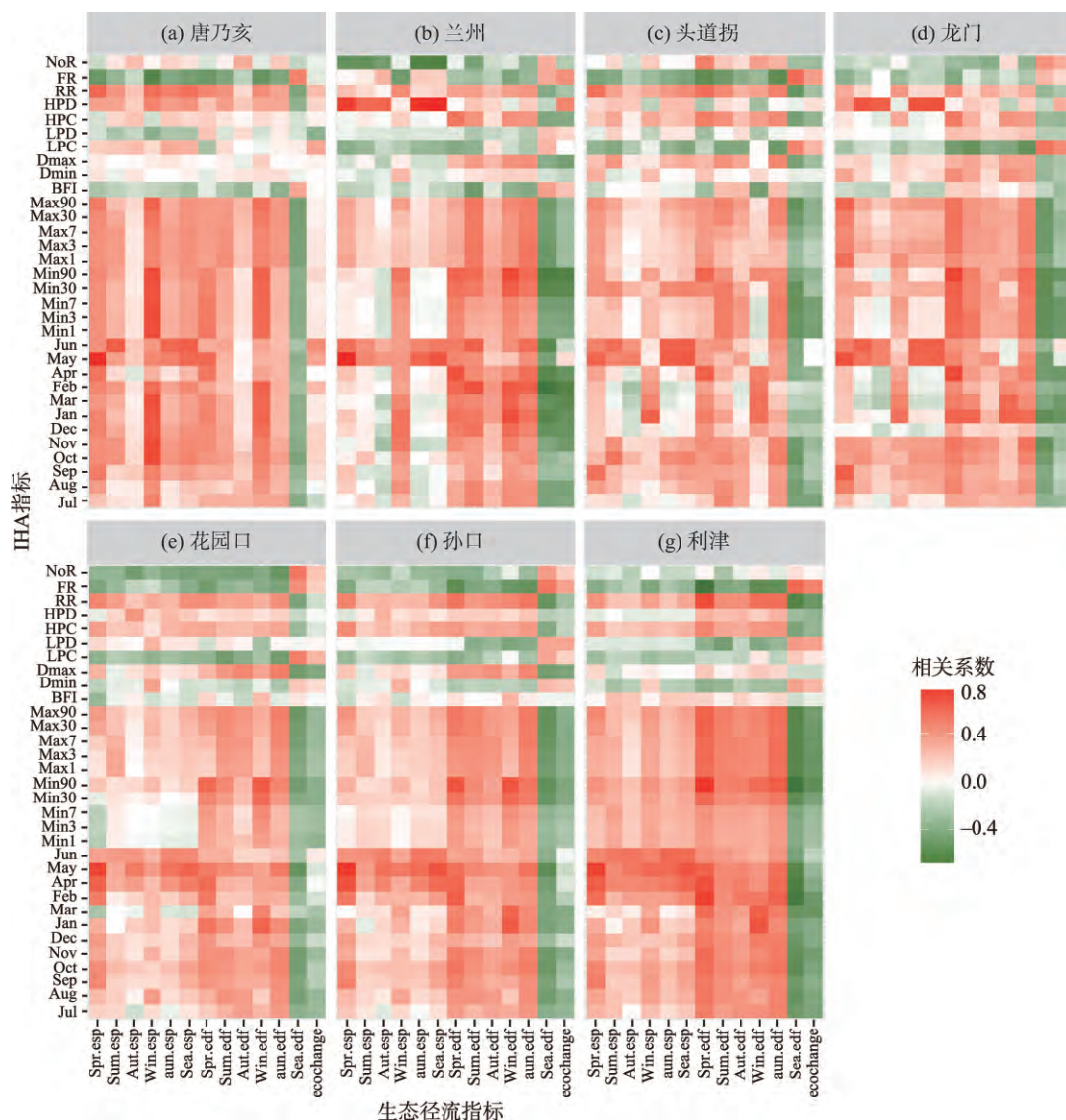
Fig. 6 Temporal variations of the Shannon Index

破坏^[22]; 黄河干流中上游河段土著鱼类濒危加剧, 鱼类逐渐小型化^[23]。30 a来黄河下游河段整体鱼类物种多样性下降明显, 其中小浪底水库的运行改变了水文条件, 是导致该现象产生的主要原因之一, 洄游型、急流型、产漂浮性卵的鱼类因无法完成其生命过程而从本河段消失^[24]。

比较图5和图6, 建库后总季节生态赤字一直在增加, 各站 SI 值也不断在变化, 这反映出河流生态径流机制的不平衡对建库后的河道内生物多样性的稳定状态有一定的影响。

3.3 生态径流指标与 IHA 指标比较

图7是 IHA 指标与各生态径流指标的相关系数图。由于唐乃亥、兰州、头道拐和龙门四个站没有断流现象, 将忽略 IHA 的 33 个指标中的零流量天数 (Number of zero-flow days)。大部分生态径流指标与 IHA 指标具有很强的正或者负的相关关系。如冬季 (12—2月) 的径流量均值与冬季节生态赤字有较强的正相关关系, 各季节生态赤字和年生态赤字与最大 1、3、7、30 和 90 d 流量、最小 1、3、7、30 和 90 d 流量以及各月份径流量均值也呈现正相关, 总季节生态赤字和生态变化总值与大部分 IHA 指标呈负相关。有少部分 IHA 指标与生态径流指标相关性较弱, 包括低流量谷底数, 低流量历时, 流量涨落变化次数、年最大最小流量到来时刻等。这表明生态径流指标无法反映一些较小时间尺



注: Spr.esp (edf) 指春季生态剩余 (赤字); Sum.esp (edf) 指夏季生态剩余 (赤字); Aut.esp (edf) 指秋季生态剩余 (赤字); Win.esp (edf) 指冬季生态剩余 (赤字); aun.esp (edf) 指年生态剩余 (赤字); Sea.esp (edf) 指季节总生态剩余 (赤字); ecochange 指总生态改变; NoR 指涨落变化次数; FR (RR) 指年均涨 (落) 水速率; HPD (LPD) 指高 (低) 流量平均持续时间; HPC (LPC) 指高流量洪峰数/低流量谷底数; Dmax (Dmin) 指年最大 (小) 流量出现日期; BFI 指基流指数; Jun、May、Apr、Feb、Mar、Jan、Dec、Nov、Oct、Sep、Aug、Jul 分别指 6、5、4、2、3、1、12、11、10、9、8、7 月流量均值。

图7 生态径流指标与IHA指标相关系数

Fig. 7 Correlations between the ecological instream flow indicators and IHA32-based indicators

度的水文情势变化信息。因为生态径流指标是基于FDC得到,而FDC无法反映某一流量事件的历时及流量事件发生时刻等信息。通过以上分析,生态径流指标可以较好地反映出IHA指标的信息,生态剩余和生态赤字可以提供水文变异的评价标准。生态剩余和生态赤字与IHA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,可以作为衡量水文变异的定性指标。

3.4 水文整体改变程度的评价

从DHRAM总体打分及评价结果来看(表3):唐乃亥和龙门两站改变等级为2级,即低风险影响;兰州和头道拐改变等级为3级,即中等风险影响;花园口和孙口由于出现断流现象,风险等级在原来的基础上增加一级为4级,即高风险影响;而利津站也在变异后时常断流,风险等级由4级上升为5级,即严重影响。从 D_o 来看,利津站水文机制改变程度最大,达到71.73%,唐乃亥站最小达到35.36%,这也能验证上述DHRAM对风险的判断。综合DHRAM和 D_o 的评价结果,可以看出黄河下游的花园口、孙口和利津的风险等级较高。 D_o 和DHRAM评价方法的结果为定量值,具有可比性。按照以上评价值可考虑依其制定与生态效益挂钩的管理制度,进而提高生态环境风险管理水平,减少风险的潜在威胁。

表3 黄河干流7个站点水文变异的总体评价

Table 3 Integrated hydrological alteration indicators, DHRAM and D_o before and after alterations

站点	$D_o/\%$	总点数	风险等级
唐乃亥	35.36	2	2
兰州	51.51	6	3
头道拐	48.77	5	3
龙门	42.07	3	2
花园口	56.01	6	4
孙口	53.60	8	4
利津	71.73	11	5

4 结论

- 1) 水文情势变异后,高流量量级和次数明显减小,而低流量的量级相对于变异前在减小,次数增加,导致FDC整体向下移动。FDC的变化引起低于25% FDC的流量部分大幅增加,产生生态赤字。相对于年尺度,季节尺度变异前后FDC的差异更加明显,尤其是夏季和秋季。而相对于黄河上游,黄河下游的花园口、孙口和利津站变异前后FDC的差异更加明显。
- 2) 季节降水距平与生态径流指标的一致性较差,尤其是春、秋和冬季。20世纪80年代之后,生态赤字的增加幅度远大于降水距平,而生态剩余在80年代之后受降水影响较少,并一直维持在0附近。各站的生态径流指标对降水距平的响应从黄河上游到下游程度依次减小,受水库的影响则逐渐加大。
- 3) 生态径流指标(生态剩余和生态赤字)与IHA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地应用于黄河流域,反映黄河流域年和季节径流变化。
- 4) 综合 D_o 和DHRAM的评价结果,花园口、孙口和利津三站径流机制的变化对河流生态系统造成了高风险的影响,头道拐和兰州属于中等风险影响,唐乃亥和龙门则是低等风险的影响。径流机制变化导致总季节生态赤字增加并维持在较高水平,各站SI值则进一步表明80年代之后,河流生物多样性普遍下降,花园口、孙口和利津站表现尤为明显。

参考文献(References):

[1] POFF N L R, ALLAN J D, BAIN M B, et al. The natural flow regime [J]. BioScience, 1997, 47(11): 769-784.
[2] NILSSON C, BERGGREN K. Alterations of riparian ecosystems caused by river regulation: Dam operations have caused global-scale ecological changes in riparian ecosystems. How to protect river environments and human needs of rivers remains one of the most important questions of our time [J]. BioScience, 2000, 50(9): 783-792.

- [3] ZHANG Q, GU X H, 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.
- [4] ZHANG Q, XIAO M Z, LIU C L, et al. Reservoir-induced hydrological alterations and ecological instream flow in the East River, the Pearl River Basin, China [J]. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 2014, 28(8): 2119-2131.
- [5] 王姣妍, 路京选. 伊犁河流域水资源开发利用的水文及生态效应分析 [J]. *自然资源学报*, 2009, 24(7): 1297-1307. [WANG J Y, LU J X. Hydrological and ecological impacts of water resources development in the Yili River Basin. *Journal of Natural Resources*, 2009, 24(7): 1297-1307.]
- [6] 王改玲, 王青杵, 石生新. 山西省永定河流域林草植被生态需水研究 [J]. *自然资源学报*, 2013, 28(10): 1743-1753. [WANG G L, WANG Q C, SHI S X. Vegetation's ecological water requirement in Yongding River watershed in Shanxi Province. *Journal of Natural Resources*, 2013, 28(10): 1743-1753.]
- [7] RICHTER B D, BAUMGARTNER J V, POWELL J, et al. A method for assessing hydrologic alteration within ecosystems [J]. *Conservation Biology*, 1996, 10(4): 1163-1174.
- [8] 邹振华, 李琼芳, 夏自强, 等. 丹江口水库对下游汉江径流情势的影响分析 [J]. *水电能源科学*, 2007, 25(4): 33-35. [ZOU Z H, LI Q F, XIA Z Q, et al. Human-induced alterations in the flow regime of the Hanjiang. *River Water Resources and Power*, 2007, 25(4): 33-35.]
- [9] ZHANG Q, GU X H, 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: 711-722.
- [10] GAO B, YANG D W, 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.
- [11] YAN Y, YANG Z F, LIU Q, et al. Assessing effects of dam operation on flow regimes in the lower Yellow River [J]. *Procedia Environmental Sciences*, 2010, 2: 507-516.
- [12] YANG Z F, YAN Y, LIU Q. Assessment of the flow regime alterations in the Lower Yellow River, China [J]. *Ecological Informatics*, 2012, 10: 56-64.
- [13] YANG T, ZHANG Q, CHEN Y D, et al. A spatial assessment of hydrologic alteration caused by dam construction in the middle and lower Yellow River, China [J]. *Hydrological Processes*, 2008, 22(18): 3829-3843.
- [14] 朱记伟, 解建仓, 杨柳, 等. 西安市灞河下游水文情势变化及生态影响分析 [J]. *西北农林科技大学学报 (自然科学版)*, 2013, 41(4): 227-234. [ZHU J W, XIE J C, YANG L, et al. Downstream hydrological changes and ecological impacts of Bahe River in Xi'an. *Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition)*, 2013, 41(4): 227-234.]
- [15] 李剑锋, 张强, 陈晓宏, 等. 考虑水文变异的黄河干流河道内生态需水研究 [J]. *地理学报*, 2011, 66(1): 99-110. [LI J F, ZHANG Q, CHEN X H. Study of ecological instream flow in Yellow River, considering the hydrological change. *Acta Geographica Sinica*, 2011, 66(1): 99-100.]
- [16] 李文文, 傅旭东, 吴文强, 等. 黄河下游水沙突变特征分析 [J]. *水力发电学报*, 2014, 33(1): 108-113. [LI W W, FU X D, WU W Q, et al. Study on runoff and sediment process variation in the lower Yellow River. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2014, 33(1): 108-113.]
- [17] VOGEL R M, SIEBER J, ARCHFIELD S A, et al. Relations among storage, yield and instreamflow [J]. *Water Resources Research*, 2007, 43, W05403, doi: 10.1029/2006WR005226.
- [18] RICHTER B D, BAUMGARTNER J V, BRAUN D P, et al. A spatial assessment of hydrologic alteration within a river network [J]. *Rivers Research and Management*, 1998, 14(4): 329-340.
- [19] BLACK A R, ROWAN J S, DUCK R W, et al. DHRAM: A method for classifying river flow regime alterations for the EC Water Framework Directive [J]. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems*, 2005, 15(5): 427-446.
- [20] KUO S R, LIN J H, SHAO K T. Seasonal changes in abundance and composition of the fish assemblage in Chiku Lagoon, south-western Taiwan [J]. *Bulletin of Marine Science*, 2001, 68: 85-99.
- [21] 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 [J]. *Water Resources Research*, 2008, 44, W04412, doi: 10.1029/2006WR005764.
- [22] 黄锦辉, 史晓新, 张蔷, 等. 黄河生态系统特征及生态保护目标识别 [J]. *中国水土保持*, 2007(12): 14-17. [HUANG J H, SHI X X, ZHANG Q, et al. Characteristics of ecological system and target identification of ecological protection of the Yellow River. *Soil and Water Conservation in China*, 2007(12): 14-17.]

- [23] 袁永锋, 李引娣, 张林林, 等. 黄河干流中上游水生生物资源调查研究 [J]. 水生态学杂志, 2009, 2(6): 15-19. [YUAN Y F, LI Y D, ZHANG L L, et al. Investigation and research on hydrobios resources in the middle and upper reaches of main Yellow River. Journal of Hydroecology, 2009, 2(6): 15-19.]
- [24] 吕彬彬. 黄河干流小浪底至垦利段鱼类群落结构和物种多样性研究 [D]. 西安: 西北大学, 2012. [LV B B. Community Structure and Biodiversity of Fish from Xiaolangdi to Kenli in the Main Stream of Yellow River. Xi'an: Northwest University, 2012.]

Changes of Eco-flow due to Hydrological Alterations in the Yellow River Basin

ZHANG Zong-jiao¹, ZHANG Qiang², GU Xi-hui¹, KONG Dong-dong¹,
LI Bin^{3,4}, LIU Ting-xi⁴

(1. a. Department of Water Resources and Environment, b. Guangdong Provincial Key Laboratory of Urbanization and Geo-simulation, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China; 2. a. Key Laboratory of Environmental

Change and Natural Disaster, b. State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology,

c. Academy of Disaster Reduction and Emergency Management, Beijing Normal University, Beijing 100875, China;

3. Water Conservancy and Civil Engineering College, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, China;

4. Water Resources Department of Inner Mongolia Autonomous Region, Hohhot 010020, China)

Abstract: Streamflow changes of the Yellow River Basin are heavily influenced by climate changes and human activities such as construction of water reservoirs, hence significant hydrological alterations and even dry-up events happened. In this case, deep understanding of eco-flow changes as a result of hydrological alterations is of great scientific and practical merits in scientific water management and sustainable exploitation of water resources of the Yellow River Basin. Therefore, this study attempts to quantify eco-flow and ecohydrological processes, and describes changes of streamflow downstream to hydraulic facilities in the Yellow River Basin using integrated ecological evaluation index, D_o and DHRAM. Besides, SI and IHA 33 are used to analyze ecological effects of hydrological alterations. The results indicated that: 1) FDC is subject to general decrease due to hydrological alterations, and most streamflow components are lower than 25% FDC. Ecodeficit is evident in this case. 2) Impacts of precipitation on ecoflow indices are generally decreasing from upper to the lower Yellow River Basin while water reservoirs have enhancing influences on ecoflow indices. 3) ecohydrological indices are all in good relations with IHA, showing that ecohydrological variations are closely related to hydrological alterations in the Yellow River Basin. 4) Based on evaluation results with D_o and DHRAM, ecological environmental risks caused by hydrological alterations are higher at Huayuankou, Sunkou and Lijin stations, moderate at Toudaoguai and Lanzhou stations and lower at Tangnaihai and Longmen stations. Ecological diversity is in significant decrease from upper to the lower Yellow River Basin. The results of this study shed new light on sustainable exploitation of water resources and ecological health of the Yellow River Basin. Human activities should be adapted to eco-flow changes.

Key words: ecohydrological indices; IHA; Ecological diversity; Hydrological alterations