

1960 年以来气候变化与人类活动对鄱阳湖流域生态径流改变的影响^{*}

曹宇贤^{1,2}, 徐力刚^{1**}, 范宏翔¹, 毛智宇^{1,3}, 程俊翔¹, 王殿常⁴, 吴亚坤⁵

(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,南京 210008)

(2:中国科学院大学,北京 100049)

(3:南昌工程学院水利与生态工程学院,南昌 330000)

(4:中国长江三峡集团有限公司,北京 100038)

(5:安徽工业大学,马鞍山 243002)

摘 要: 基于鄱阳湖流域五河水文站 1960—2013 年逐日径流量和 14 个国家级气象站的日气象数据,本文利用长短记忆模型框架构建神经网络模型来开展鄱阳湖流域的径流过程模拟,结合生态赤字与生态盈余等生态径流指标,定量分析了鄱阳湖流域的水文变异特征。同时,利用差异化的情景模拟方式,定量区分了人类活动和气候变化对鄱阳湖流域生态径流变化的贡献分量。研究结果表明:(1)5 个站点的夏季径流贡献率达到 40% 以上,年内的生态盈余主要发生在夏季,基准期的夏季径流贡献率大于实测期和模拟期,可能的原因是水利工程的蓄水调水在时间上分摊了夏季的径流压力。(2)生态径流指数与降水在年尺度上有较好的一致性,相关系数均在 0.7 以上,但各生态流量指标与春、秋、冬季降水的一致性较差,相关系数均小于 0.6,降水最多的夏季与年际变化最相似。(3)年内变化上,气候变化引起生态赤字的减少,春、冬季节减少最为强烈;人类活动引起生态赤字的增加,在秋、冬季节增加最多,而在冬季引起生态盈余的减少。(4)年际上,生态盈余的变化中,除了赣江以外(气候变化的影响贡献为 26%),其他河流中气候因素是影响生态盈余的主要原因(60%~85%),对生态赤字而言,除了饶河(25%)和抚河(52%),赣江、信江和修水气候因素的影响贡献都达到了 95% 以上。研究结果为更好地了解气候变化与人类活动对流域水文变化的影响提供了一种新的研究方法,为鄱阳湖流域水资源管理提供了理论支持。

关键词: 生态径流;气候变化;人类活动;鄱阳湖

Impact of climate change and human activities on the changes of ecological flow indicators in the Lake Poyang Basin since 1960s^{*}

Cao Yuxian^{1,2}, Xu Ligang^{1**}, Fan Hongxiang¹, Mao Zhiyu^{1,3}, Cheng Junxiang¹, Wang Dianchang⁴ & Wu Yakun⁵

(1: Key Laboratory of Watershed Geographic Sciences, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, P.R.China)

(2: University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, P.R.China)

(3: School of Water Conservancy and Ecological Engineering, Nanchang Institute of Technology, Nanchang 330000, P.R.China)

(4: China Three Gorges Corporation, Beijing 100038, P.R.China)

(5: Anhui University of Technology, Maanshan 243002, P.R.China)

^{*} 2021-03-22 收稿;2021-06-03 收修改稿。

国家重点研发计划项目(2018YFE0206400)、国家自然科学基金项目(42001109,41971137)、江苏省自然科学基金项目(BK20201102)、中国长江三峡集团有限公司项目(201903145)和中国科学院流域地理学重点实验室开放基金项目(WSCS2020003)联合资助。

^{**} 通信作者;E-mail: lgxu@niglas.ac.cn.

Abstract: Based on the daily runoff data of the hydrological station in the Lake Poyang Basin (from 1960 to 2013) and the daily meteorological data of 14 national meteorological stations, this paper applied the long-short-term Memory network (LSTM) to simulate the runoff dynamics in the basin and attribute the contributions of human activities and climate change on eco-flow variations using eco-flow indices. The results show that: (1) The contribution rate of summer runoff in the five stations reached more than 40%, and the ecological surplus was mainly in summer. The contribution rate of summer runoff in S0 was higher than that in S1 and S2, which may be due to the water storage project. (2) Annually, the changes in the eco-flow indices and precipitation are relatively consistent in the entire period (with correlation coefficients above 0.7), however, the correlation between the eco-flow indices and precipitation is lower at the seasonal scale. (3) Inter-annually, climate change dominant the variation of ecological surplus (60%–85%) in the basin except for the Ganjiang River (26%). Except for the Raohe River (25%) and Fuhe River (52%), the contribution of climate change on the variations of eco-flow indices are 25% in Raohe River, 52% in Fuhe River, 95% in Ganjiang River, 98% in Xinjiang River, and 99% in Xiushui River, respectively. (4) At seasonal scale, climate change causes the reduction of eco-deficit and the reduction is strongest in spring and winter. Whereas the eco-surplus increased in most cases. Human activities cause the increase of eco-deficit, mostly in autumn and winter, and it causes a decrease in eco-surplus in winter. Our research proposed a new method for attributing the impact of climate change and human activities on hydrological changes. The results should provide theoretical support for water resources management in the Lake Poyang Basin.

Keywords: Eco-flow indicators; climate change; human activities; Lake Poyang

广义上的生态需水可理解为在特定的生态目标下,维持特定时空范围内的生态系统水分平衡所需要的总水量^[1],生态需水在不同的时间和场景中往往是不同的,在河湖生态系统中,为了维持湖泊水体和河道的基本生态功能,径流过程需要满足河湖生态系统所需的水量,这一部分水量被称为生态流量^[2].近年来关于生态流量计算的方法有很多,主要分为水文学方法、水力学方法、生境模拟法以及整体评价法 4 大类.其中,通过分析历史径流序列的频率分布特征来计算生态流量的水文学方法运用最广泛,如 IHA 法、7Q10 法、流量持续曲线法、Tennant 法、月平均最小流量法等.1995 年,Richter 等^[3]构建了 33 个水文改变指标(IHA, indicators of hydrologic alteration),从月平均流量指标、极限流量指标、频率、持续时间和变化速率 5 个方面来描述河流水文变异和生态效应,但 33 个指标之间仍存在很大的相关性^[4],随后,顾西辉等^[5]发现生态剩余和生态赤字的应用能够有效地解决大量水文指标之间的冗余与相关关系,温庆志等应用生态径流指标,发现淮河流域水文变异后生态剩余减少,生态赤字增多,淮河流域生物多样性正在逐年下降^[2].相比于其他方法,生态径流指标能克服水文变异指标之间的冗余性问题,同时需要指出的是实际情况下湖泊的需水是随着湖泊生态系统的需求多样化变动的,生态径流指标值也是根据每一年的径流过程变动的,相比于计算一个具体的生态流量最小值,它更能体现湖泊水体需水变化过程.因此本文选用流量持续曲线法,首先确定了生态流量的变化范围,基于流量历时曲线计算生态盈余和生态赤字,由于研究对象为河湖水体,生态盈余和生态赤字分别代表的内涵为实际径流超过或低于湖泊水体和河道生态系统对径流的需求值,两者统称为生态径流指标.河湖生态功能主要包括维持河湖形态、保护生物栖息地、自净、输沙等,然而,近年来受气候变化和人类活动的影响,水文循环和水量平衡在时空和数量上已经发生了不可忽视的变化,变异后的水文情势破坏了当地的生态系统平衡,引发了一系列的水生态危机^[6].鄱阳湖作为中国最大的淡水湖,流域面积为长江流域面积的 9%,多年平均降雨量为 1620 mm,蒸发量为 700~800 mm,近年来径流变化显著,引发的洪旱灾害呈现增加的趋势,1990s 鄱阳湖多次出现洪水事件,而 2003 年以来多次发生干旱灾害^[7-8],水文条件的改变必然影响着湿地景观格局分布和演替趋势,此外还会对鸟类栖息地和鱼类的产卵地产生影响^[9],近年来鄱阳湖出现了生物多样性衰减、水土流失、环境污染等一系列的生态环境问题^[10],因此从水文变化的角度出发,进行生态径流的归因分析以及探索导致的生态现象显得十分必要.

目前,国内外学者采用了多种研究方法从不同的研究角度对水资源问题及其驱动因素进行了研究,在以往的研究中,绝大多数通过水库修建作为研究时段的分割点,通过对比建库前后水文或生态指标的变化来阐明其水文生态效应^[11-13],这种观点将生态径流的改变仅归因于人类活动里的建坝,忽视了气候变化和其他人类活动对生态径流的影响.人类活动和气候变化作为影响流域水文循环过程的两大重要因素,其对生态径流的影响也是十分巨大的^[14],如何区分气候变化与人类活动对生态径流的影响是目前的研究热点与

难点. 最近,有学者通过引入基准期的概念,利用长短记忆神经网络,定量区分了气候变化以及人类活动对流域径流以及湖泊水动力过程的影响贡献^[15],其结果表明,长短记忆模型可以简单高效地对流域—湖泊水文过程进行精准化模拟,并且能够在年内的精细尺度区分不同因素对水文改变的影响贡献. 鄱阳湖作为我国第一大淡水湖,高强度的人类活动和显著的气候变化引发了鄱阳湖明显的水文变异过程,其生态环境效应也发现了剧烈的改变,如何定量区分气候变化和人类活动对鄱阳湖生态流量的影响程度,从而为保障鄱阳湖的生态系统可持续发展提供科学支撑是目前国内外学者关注的研究热点之一.

综上所述,本文研究目的是(1)基于年际和年内的日流量值,比较不同情境下径流的变化特征;(2)生态

径流与降水距平相比较,揭示降水量和生态径流指标之间的相关关系;(3)定量揭示气候变化和人类活动对鄱阳湖生态径流改变的贡献率. 研究结果能够为鄱阳湖流域水资源管理提供理论支持,同时也能为鄱阳湖的生态系统可持续发展与保障提供方法支撑.

1 材料与方法

1.1 数据

鄱阳湖(28°22′~29°45′N,115°47′~116°45′E)位于江西省北部,是我国第一大淡水湖,也是世界六大湿地之一,汇聚了五河“赣江”、“信江”、“抚河”、“饶河”、“修水”的来水,经过湖区调蓄后汇入长江,是长江中下游具有重要代表性的调蓄湖泊(图1).

本文选取了鄱阳湖流域时间序列最长的14个国家级气象站的气象数据以及五河下游出口断面流量监测站的径流数据,表1描述了气象数据和径流数据的基本信息,径流数据由中国科学院鄱阳湖湖泊湿地观测研究站提供,气象数据由中国气象数据共享网提供,气象数据和水文数据的缺测数据采用最临近的3个站点进行插补.

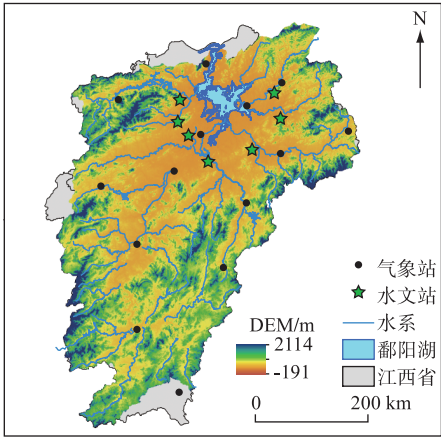


图1 鄱阳湖流域地理位置及水文站、气象站分布

Fig.1 Location of Lake Poyang Basin and the hydrological and meteorological stations inside the basin

表1 水文、气象数据基本信息

Tab.1 Summary of the hydrological and meteorological data

数据类型	站点名称	数据分类	资料序列
气象数据	14个国家级气象站	降水	1955—2013年
		气温、气压、湿度、日照时数、风速、饱和水汽压	1960—2013年
径流数据	外洲	径流	1960—2013年
	李家渡		1960—2013年
	梅港		1960—2013年
	虎山		1960—2013年
	渡峰坑		1978—2013年
	万家埠		1960—2013年
	虬津		1978—2013年

1.2 研究方法

1.2.1 生态赤字与盈余 Vogel等^[16]提出了基于流量持续曲线(flow duration curve, FDC)的无量纲生态流量指标——生态盈余和生态赤字,生态盈余表示满足河流生态系统需水量后所多余的水量,生态赤字表示满足河流生态系统需水量所缺乏的水量,两者统称为生态径流指标. 生态径流指标的计算以FDC曲线为基础,FDC曲线由日流量数据构造,表示流域在研究时段内流量的超过率与流量之间的关系,通过日流量时间序

列也可构造年尺度或季节尺度的 FDC^[17]. 超过率 P_i 为日流量数据 Q_i 降序排列计算得出:

$$P_i = i/(n + 1) \tag{1}$$

式中, i 为秩次, n 为日流量 Q_i 的样本大小.

Gao 等^[4]对生态盈余和生态赤字的定义做了改进:(1)将水文变异前的时段作为基准期,其 75% 和 25% 分位数的年和季节 FDC 作为河流生态系统的保护目标;(2)若某一给定年的年或季节 FDC 高于 75% 分位数 FDC,那么 75% 分位数 FDC 与其上方的年或季节 FDC 所围成的面积定义为生态盈余;如果低于 25% 分位数 FDC,那么 25% 分位数 FDC 与其下方的年或季节 FDC 所围成的面积定义为生态赤字,如果位于 75% 和 25% 分位数 FDC 之间,则认为是河流生态系统已经适应了的正常范围. 本研究参考 Gao 等^[4]作出的改进,将鄱阳湖 1960—1969 年日流量数据作为基准期,代表天然机制下的产流,求出 25% 和 75% 分位数的年 FDC 和季节 FDC,作为鄱阳湖流域生态系统保护范围. 此外,为了消除数量级差别较大的影响,生态盈余和生态赤字分别除以 75% 分位数 FDC 下方的面积和 25% 分位数 FDC 下方的面积作归一化处理.

1.2.2 长短时间序列 长短记忆模型(long short term memory)是一种特殊的循环神经网络(recurrent neural network)结构,旨在解决传统循环神经网络在学习长期依赖问题上的不足,最早由 Hochreiter 等^[18]提出,并在最近被 Graves 等^[19]推广和改进. 本文参考范宏翔等^[15]提出的利用长短记忆模型构建的鄱阳湖气象—径流模型,该模型能够很好地区分气象因子和人类活动对径流的影响,具体在此不做赘述.

1.2.3 情景设置 为了探明人类活动和气象因子对鄱阳湖生态径流的影响,拟设定 3 个情景来定量区分两者的贡献率,具体情景设置方案如表 2 所示. 有大量研究将 1960—1969 年的径流当作基准期^[15,20],这段时期的径流受人类活动影响小,可以当作自然情况下的径流情况. 本文将 1960—1969 年的径流当作基准期 S0,将鄱阳湖气象—径流模型模拟出的 1970—2013 年鄱阳湖流域五河多年平均日流量过程作为 S1,以实测的 1970—2013 年鄱阳湖流域五河多年平均日流量过程作为 S2,以基准期的 FDC 计算出 25% 和 75% 分位数的年 FDC 和季节 FDC,S1 和 S2 以基准期的分位数 FDC 分别计算出年和季节的生态径流,通过对比 S0 和 S1 可以定量计算气候变化影响下鄱阳湖的生态径流 Q1,对比 S0 和 S2 可以定量计算实际情况下鄱阳湖的生态径流 Q2,通过对比 Q1 和 Q2,可以定量区分人类活动下鄱阳湖的生态径流 Q3,由此得到气候变化和人类活动对鄱阳湖生态径流的影响贡献.

表 2 情景设置方案
Tab.2 Model scenarios

情景	流量过程
S0	1960—1969 年鄱阳湖流域五河多年平均日流量过程
S1	模型模拟的 1970—2013 年鄱阳湖流域五河多年平均日流量过程
S2	实测的 1970—2013 年鄱阳湖流域五河多年平均日流量过程
Q1	气候变化影响下鄱阳湖的生态径流变化
Q2	实测情况下鄱阳湖的生态径流变化
Q3	人类活动影响下鄱阳湖的生态径流变化

2 研究结果

2.1 不同情景下的径流变化特征

将 5 个子流域在率定期和验证期的日流量观测值与模拟值进行对比(图 2),图 2A 为基准期、模拟期、实测期(S0、S1、S2)的逐日径流序列值. 从年际上来看,鄱阳湖五湖径流量的变化比较稳定,利用 NSE 指标和 R^2 评价五条河流的模拟效果,NSE 值均达到了 0.9 以上, R^2 均达到了 0.89 以上. 说明 5 个流域的模拟效果都比较可靠. 其中观测值的峰值大于模拟值,其中高流量事件的量级和次数高于模拟值,同时低流量事件的量级低于模拟值,说明人类活动影响下径流量的变化幅度在增大,高流量发生的频率和量级都在增加,这可能增加了洪灾的风险.

图 2B 是年内五河基准期、观测值与模拟值的比较,年内来看,五河的径流过程都呈现出单峰的趋势,基

准期赣江、抚河、饶河、信江、修水的日均峰值分别为 8188.2、1987.6、2060.2、2305.4、1921.5 m^3/s , 实测期日均峰值依次为 5476.3、1576.3、1514.1、2209.3、1002.1 m^3/s , 模拟期日均峰值为 5105.8、1441.6、1479.9、2011.8、1062.2 m^3/s , 基准期的峰值显著超过实测期和模拟期的峰值, 其中赣江的峰值超出 80.8%, 赣江是五河最大的河流, 径流占鄱阳湖流域的 49.5%。春、夏、秋、冬季的径流贡献率在 3 种情景下的贡献率如图 3 所示, 高流量事件主要集中在夏季 4—6 月, 高流量的增多导致超过 75% 分位线 FDC 的部分增多, 在年尺度上, 生态盈余的贡献时间集中在夏季, 低流量事件主要集中在冬季 10—12 月, 低流量的增多导致低于 25% 分位线 FDC 的部分增多, 在年尺度上, 生态赤字的贡献时间集中在冬季。3 种情景相比较, 基准期夏季的贡献率总是高于模拟期和实测期, 其中的原因可能是后期水利工程的蓄水调水在时间上分摊了夏季的径流压力。

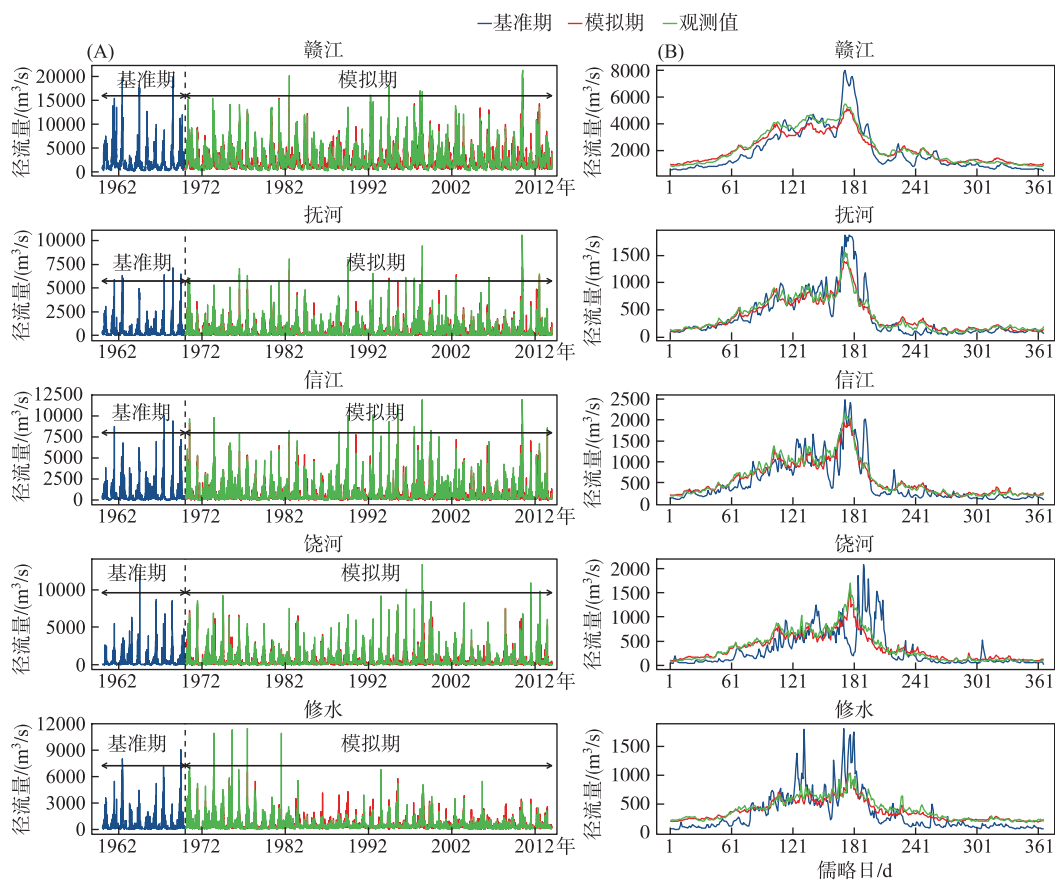


图 2 不同情景下的径流变化特征

Fig.2 Runoff pattern under different scenarios

2.2 生态径流指标变化

由气象—径流模型模拟出 5 条河流在气象因子影响下的日径流, 基于基准期的日径流以及 FDC 分位数画出年和季节尺度的历年 FDC 散点图。图 4 是气候因素影响下年和季节历年 FDC 散点分布特征 (S1 与 S0), 图 5 为实测情况下 (S2) 与基准期 (S0) 的年和季节历年 FDC 散点图分布特征。总体来说, 在年尺度上 S1 和 S2 的 FDC 分布情况与 S0 的 FDC 分布情况基本一致, 两种情况下的 FDC 高、低流量出现的范围能够较好地覆盖 S0 高流量和低流量出现的区域。此外, 从 5 条河流来看, 赣江年和季节的高、低流量出现的范围要大于其他河流, 其余河流其他尺度的 FDC 曲线变化前后的分布范围较为一致, 主要是因为其余河流集水面积和径流量相对较小, 受人类活动影响较小。

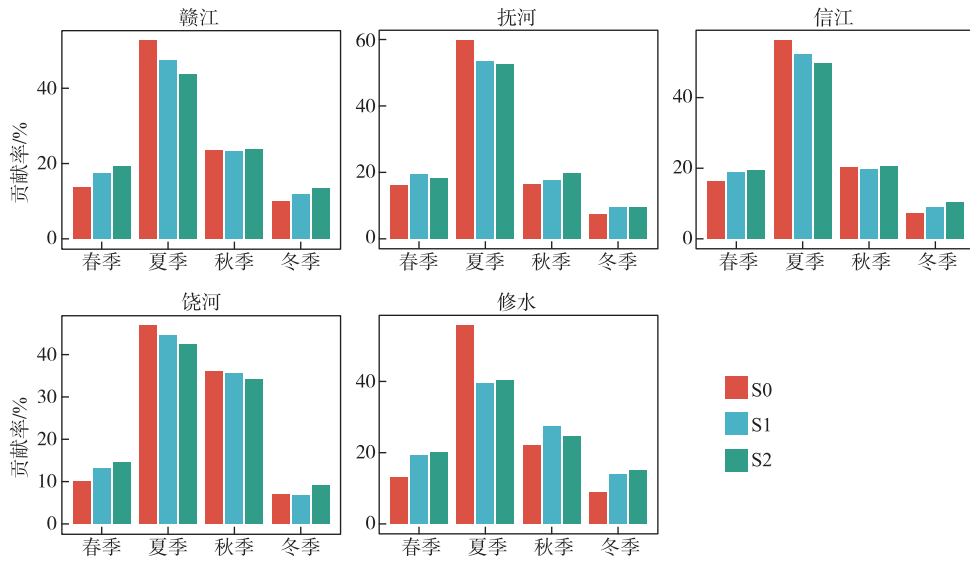


图 3 不同情景下的多年平均季节径流贡献率

Fig.3 Contribution rate of seasonal runoff under different scenarios

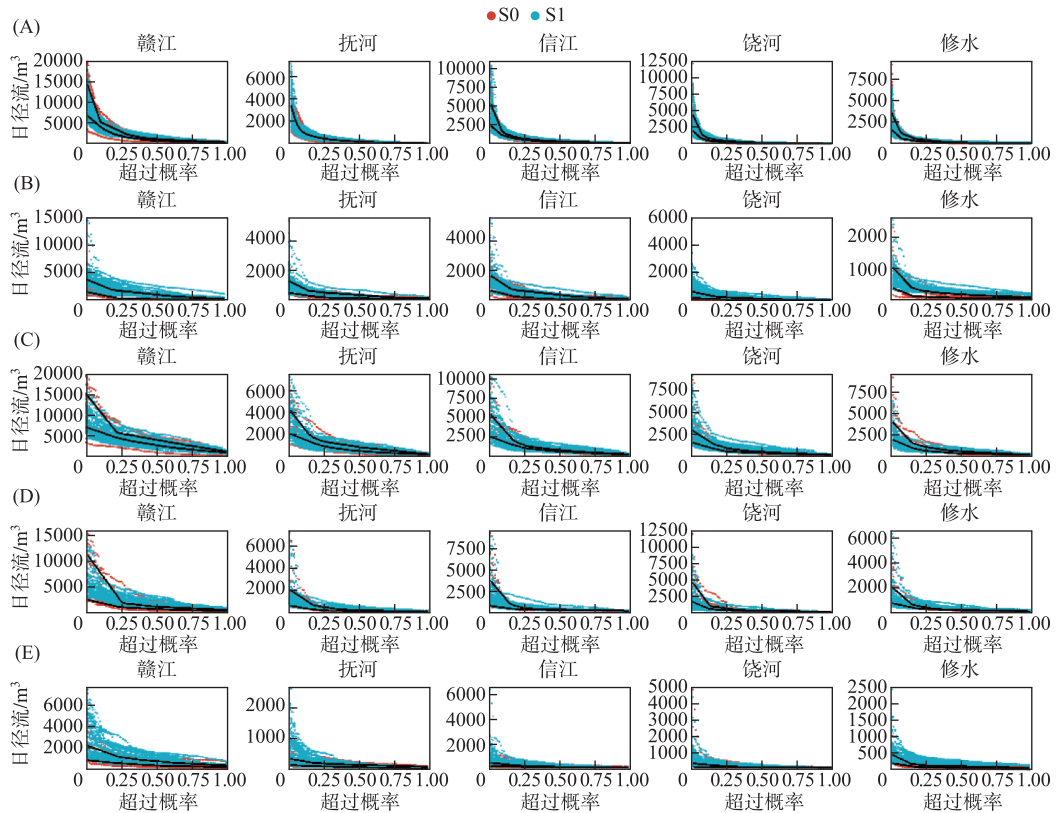


图 4 S1 情景下年和季节尺度 FDC 分布特征 (A~E 分别表示年际、春季、夏季、秋季和冬季)

Fig.4 Annual and seasonal FDC pattern under scenario S1

(A-E denotes annual, spring, summer, autumn and winter, respectively)

从图4可以看出,在季节尺度上S1和S0高、低流量出现的范围有较大的差别,尤其体现在春季和冬季,与S0相比,S1高流量在春季和冬季出现的量级和频率都明显增加,超过FDC 75%分位数的部分增多,说明气象因素在春、冬季节引起生态盈余的增加.图5为实测情况下年和季节尺度的FDC分布特征.图4和图5相比较,可以看出S2高、低流量出现的次数大于S1,并且高、低流量的量级小于S1,在春、冬季节最显著,这表明与气候变化相比,人类活动在春、冬季节引起了生态盈余的减少和生态赤字的增加,可能的原因是春、冬季河道处于枯水期,人类活动在冬季的工农业用水导致了生态盈余的减少.两种情景下的FDC变化曲线可以初步判断年和季节生态径流的变化特征,同时生态指标的变化离不开降水的影响,考虑降水距平和生态指标的相关性可以为气候变化对生态指标的分析做初步铺垫.

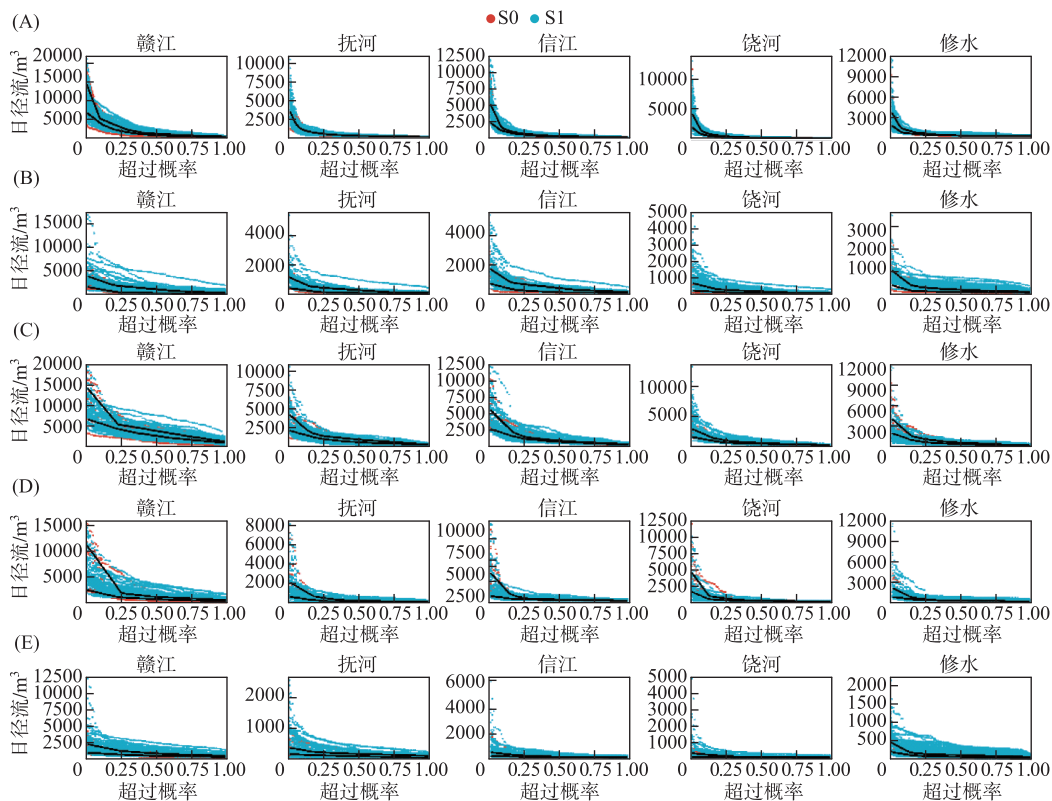


图5 S2情景下年和季节尺度FDC分布特征(A~E分别表示年际、春季、夏季、秋季和冬季)

Fig.5 Annual and seasonal FDC pattern under scenario S2
(A-E denotes annual, spring, summer, autumn and winter, respectively)

从两种情境下生态径流指标的回归拟合曲线(图6,7)可以看出,两种情景下的生态径流指标表现出一些相似的规律,从年际上来看,除了抚河以外,其他站点的生态盈余均大于生态赤字,生态盈余从1970年呈现下降的趋势,到1980年开始缓慢增加,1998年之后又开始下降,所有站点的生态赤字呈现缓慢上升的趋势,在抚河的上升趋势明显,在2005年以后抚河的生态赤字大于生态盈余,生态需水的矛盾明显.从季节上来看,春、冬季节的生态盈余相对较大,在2000年后,春、冬季的生态盈余呈现出持续增加的趋势,夏季的生态盈余相对最小,原因可能是夏季降水丰富,水库的蓄水降低了高流量的频率和量级.生态赤字的变化在夏季呈现增加的趋势,在2010年以后,抚河、赣江夏季的生态赤字大于生态径流,其他站点的生态赤字处于较稳定的状态,接近于0.

图8,9为S1和S2情景下通过年FDC和季节FDC得到年和季节生态指标Q1与Q2(生态盈余和生态赤字)及1970—2013年间年和季节降水距平的时间变化特征.从年尺度上来看,两种情景下生态径流与年降

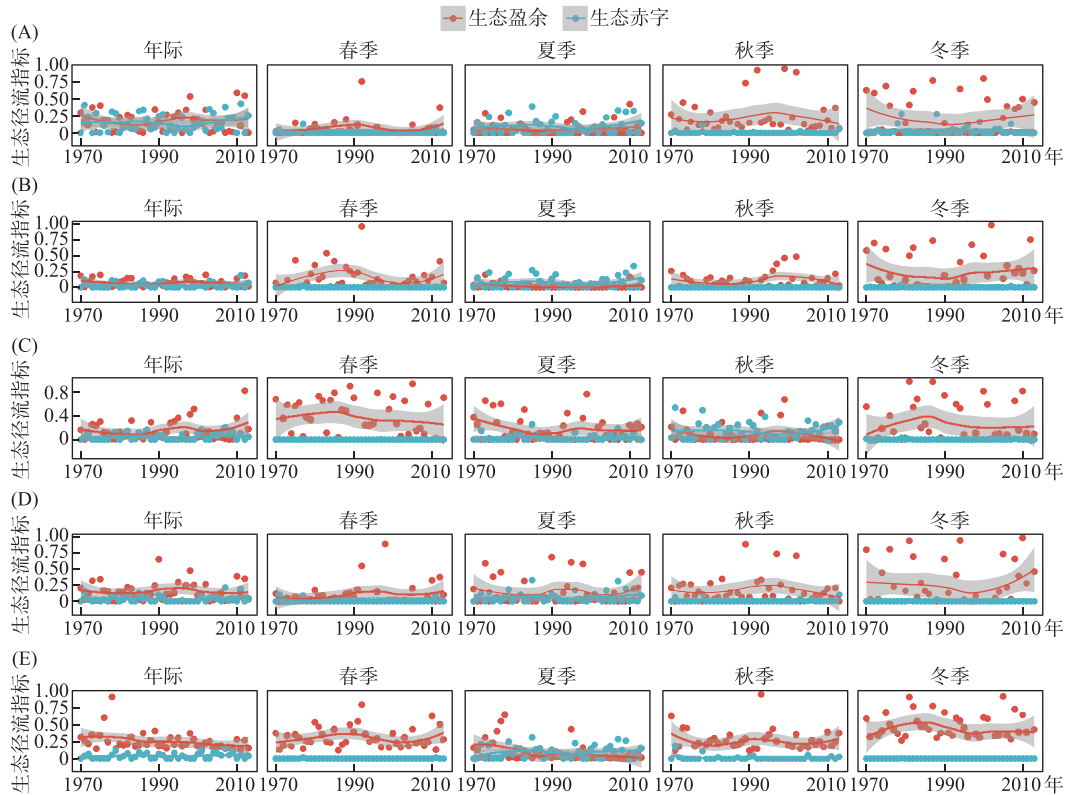


图 6 S1 情景下的生态径流年际变化特征 (A~E 分别表示赣江、抚河、信江、饶河和修水)

Fig.6 Annual eco-flow index pattern under scenario S1 (A-E denotes Ganjiang River, Fuhe River, Xinjiang River, Raohe River and Xiushui River, respectively)

水距平变化幅度较为一致,年生态盈余的变化幅度远大于年生态赤字.从季节的变化上,Q1 在冬、春季的生态盈余最大,尤其是冬季生态盈余远大于生态赤字,生态赤字总体变化幅度较小,夏、秋季节变化幅度大于秋、冬季节,从 5 条河流来看,修水的年生态盈余高于其余河流,生态需水一直处于满足的状态. Q2 在季节之间的降水变化并没有引起季节生态径流指标的显著变化,生态赤字在春季的变幅最小,生态盈余的季节性变化不明显,5 条河流中抚河的生态赤字最大,变化幅度和变化范围最大,其余河流的生态赤字远小于生态盈余.

从年尺度上看,S1 和 S2 两种情景下各生态径流指标与降水的一致性较好,除了修水站,其余相关系数均为 0.7 以上,并通过了显著性检验.但各生态流量指标与春、秋、冬季降水的一致性较差,相关系数均小于 0.6,降水最多的夏季与年尺度变化最相似(图 10).

2.3 生态径流归因分析

根据实测情况下与纯气候影响情况下的鄱阳湖五河生态径流计算出人类活动影响下的生态径流,将其标准化,得到年际和季节尺度上鄱阳湖流域五河生态径流的变化情况(图 11).从年际尺度来看,气象因素和人类活动对生态径流的影响都稳定在相对较小的范围内(都小于 0.14),而季节上来看,气象因素对生态径流指标的影响较大,其中对生态赤字多为负相关影响,这是由于降水的减少会导致低流量增加,引起生态赤字的增加,观察到气象因素对生态盈余的影响多为正相关影响,然而在某些季节下两者也呈现负相关性,例如饶河的冬季,气候因素会导致生态盈余减少 0.49.在生态赤字中,气候变化在年际和季节都导致了生态赤字的减少(0~0.22),在春季减少最多(0.22),夏季减少最少(-0.03).人类活动引起了生态赤字的增加(0~0.09),在秋、冬季人类活动使生态赤字增加了 0.084.

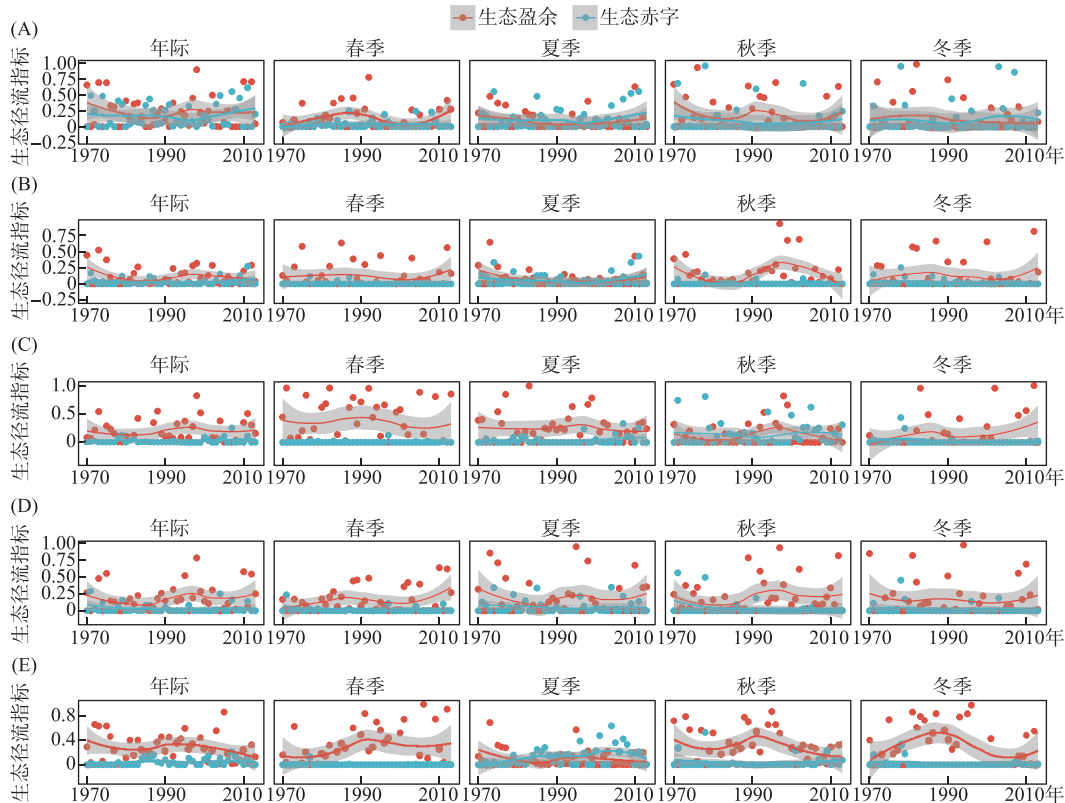


图 7 S2 情景下的生态径流年际变化特征 (A~E 分别表示赣江、抚河、信江、饶河和修水)

Fig.7 Annual eco-flow index pattern under scenario S2 (A-E denotes Ganjiang River, Fuhe River, Xinjiang River, Raohe River and Xiushui River, respectively)

为了更清楚地比较气候因素和人类活动对生态径流的影响,将两者的贡献以百分比的形式表示出来(图 12). 从年际来看,生态盈余的变化中,除了赣江以外(气候变化的影响贡献为 26%),其他河流中气候因素是影响生态盈余的主要原因(60%~85%). 在季节变化中,春季抚河和信江的生态盈余主要受人类活动的影响达到 96%,其余季节气候变化的影响为 52%~98% 不等. 对生态赤字而言,除了饶河(25%)和抚河(52%),赣江、信江和修水气候因素的影响贡献都达到了 95% 以上. 从季节尺度上来看,人类活动对生态赤字的影响贡献在夏季达到最大,赣江、信江、修水中,人类活动影响的贡献均在 82% 以上,其余季节气候变化对生态赤字的影响均大于人类活动.

3 讨论

气候变化大多数情况下引起生态盈余的增加和生态赤字的减少,引起生态径流变化可能的原因主要有降水增多和蒸发减少,近年来,鄱阳湖流域的降雨量和暴雨日数呈现上升的趋势^[21],表明高流量发生的次数和量级在增多,这必然会导致生态盈余的增加. 霍雨等^[22]研究提出,1950—2005 年间鄱阳湖冬季降水量在增加,并且增加趋势比夏季更加明显,冬季枯水期是低流量事件发生的高频时期,冬季降水量的增加引起径流增加,导致低流量出现的数量在减少,低于 25% 分位数 FDC 分位数的部分变小,这很好地解释了生态赤字的减少趋势. 同时鄱阳湖的蒸发量也发生了显著变化,刘健等^[23]的研究结果表明由于太阳净辐射和风速的下降,近年来鄱阳湖实际蒸发量在逐步下降,蒸发量的减少引起径流的增多,这很好地解释了生态盈余的增加趋势.

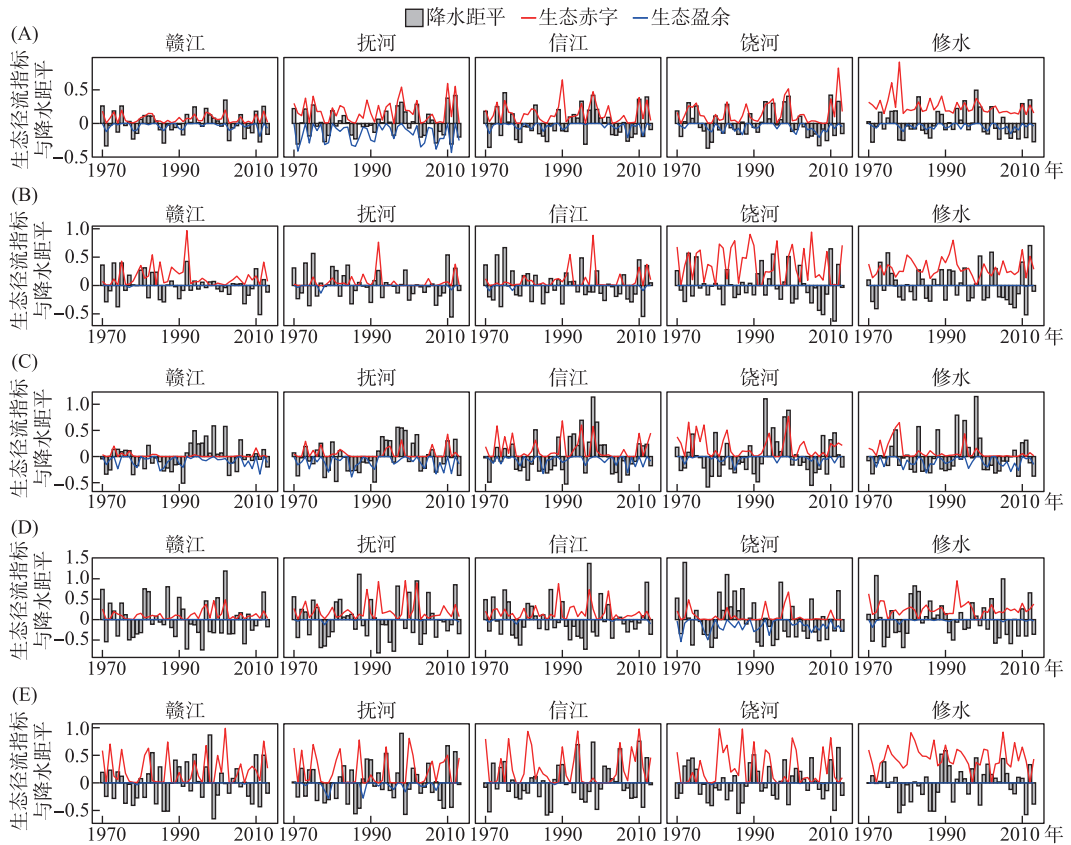


图 8 S1 情景下的生态径流指标与降水距平 (A~E 分别表示年际、春季、夏季、秋季和冬季)

Fig.8 Eco-flow index and precipitation anomaly under scenario S1 (A-E denotes annual, spring, summer, autumn and winter, respectively)

而人类活动在冬季引起生态盈余的减少,在年际和季节尺度上都引起生态赤字的增加. 鄱阳湖流域的下垫面近年来发生了巨大的变化,总体上内陆水体和城镇建设用地面积在增加,水田和旱地面积呈减少趋势^[24]. 1960 年以来,鄱阳湖流域的流域森林覆盖率由 34.73% 上升到 63.00%^[25],丰水期下垫面蓄水能力增强,区域发生极端降雨时,产流过程的波峰变小,波长变长,这导致了高流量发生的量级减少,必然会引起生态盈余的减小. 同时农业用水在赣江平原灌区的比例达到 83.2%,用水主要集中在 4—10 月,而且 7—8 月的用水量更大,在枯水年份,农业用水量比平常年份要大 30%^[26-27],这很好地解释了降水产生的生态盈余被用于农业用水,所以观察到某些年份在赣江的夏季,降水量的增加不能引起生态盈余的增加. 此外水库、大坝等水利设施的修建对径流过程产生了强烈的影响,三峡水库从 9 月中旬开始蓄水,Zheng 等^[28]指出三峡水库汛后蓄水加速了鄱阳湖水位下降的幅度,同时赵军凯等^[29]的研究表明,2000 年后人工采砂活动致使湖盆侵蚀,导致鄱阳湖水位下降,尤其是在枯水季下降趋势明显,水位下降引起径流量减少,这也印证了本文的结论,在冬季水库蓄水使径流量减小引起生态盈余的减少.

生态流量在不同流域和水体中发挥着不同的作用. 在以往的研究中,有学者多采用栖息地法将研究区重点保护物种与生态流量结合,例如王瑞玲等^[30]在黄河流域依据径流条件与鲤鱼的栖息地状况,提出了鱼类保护的最小适宜生态流量,彭为等^[31]在澜沧江中下游识别了优先保护鱼类并估算了最适生态流量,发现任何自然状态下的流量变化都会对生态系统产生影响,在本文中,将 25% 和 75% 分位数的年和季节 FDC 作为河湖生态系统稳定发挥功能的动态区域,以生态盈余和生态赤字来反映人类活动和气候变化两种情景下

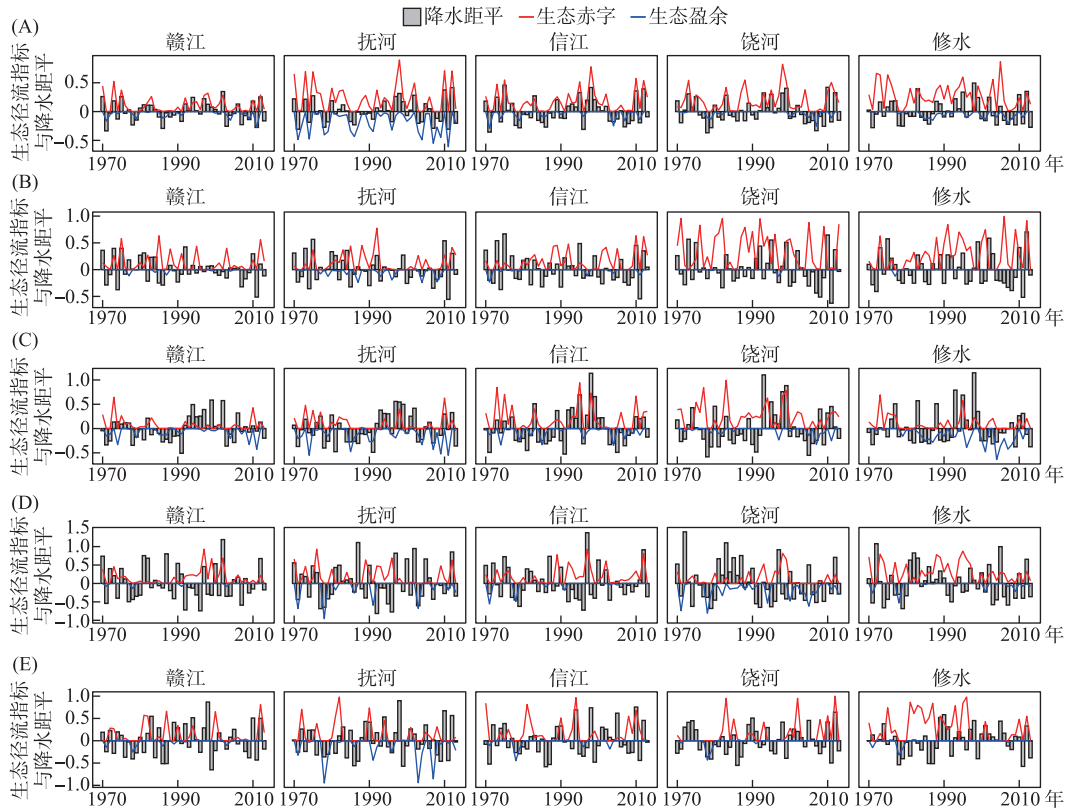


图 9 S2 情景下的生态径流指标与降水距平 (A~E 分别表示年际、春季、夏季、秋季和冬季)

Fig.9 Eco-flow index and precipitation anomaly under scenario S2 (A-E denotes annual, spring, summer, autumn and winter, respectively)

生态径流的变化特征,湿地生态系统对生态径流的变化非常敏感,鄱阳湖作为一个大型吞吐性湖泊,分布着广泛的湿地类型,湿地的生态服务价值体现在水环境净化、调蓄洪水、维持生物多样性等方面,由于越冬候鸟的多样性很高,鄱阳湖又被称作“候鸟天堂”,鄱阳湖湿地生态系统受到生态流量变化的调控,主要表现为湿地植物空间分布和演替变化,同时鸟类栖息地和多样性也受到影响,根据鄱阳湖湿地的生态系统特点,生态流量的重点应侧重于满足典型植被和鸟类的需水。

生态赤字的变化主要反映出低流量的水情变化,在年际上,生态赤字的增加意味着鄱阳湖的低流量变小了,在枯水期这可能表现为鄱阳湖连续多年来出现超低水位,导致洲滩出露的时间提前了 1~2 个月^[32],这有利于取食底栖动物的鸕鹚类和取食沉水植物根茎类的天鹅获取食物^[33],然而如果生态赤字持续常年增加,这并不利于候鸟的保护^[34],主湖区水位太低导致碟形湖水位快速消退,影响候鸟的栖息地。对植被而言,湿地内原有的湿生植物群落会逐渐演替为偏旱生的群落类型,植物群落例如茵陈蒿—狗牙根群落、芦苇—南荻群落和藃草—藃草群落等的生长产生向低处延伸的趋势^[35],水域面积的减少给植物群落的生长提供了空间,稀疏草洲面积和浓密草洲面积呈现增加的趋势^[36],这会引起鄱阳湖湿地整体的萎缩。而生态盈余的变化则对应着高流量的水情变化,生态盈余的增加意味着鄱阳湖的流量增加和持续时间变长,这可能表现为丰水期的水位变高和径流量增大,沉水植被生长茂盛,鱼类、底栖动物生存条件较好。但生态盈余过大或持续增加时,过高水位会导致植物生长率下降,比如导致芦苇和南荻的提前死亡,湖水的持续高水位会对沉水植物的生存空间产生不利影响^[37],降低沉水植物的生物量,这对候鸟的食物来源不利,影响最大的是雁、鸭类等候鸟^[33]。总体来说,生态赤字和生态盈余过大都将对生态系统产生不利影响。

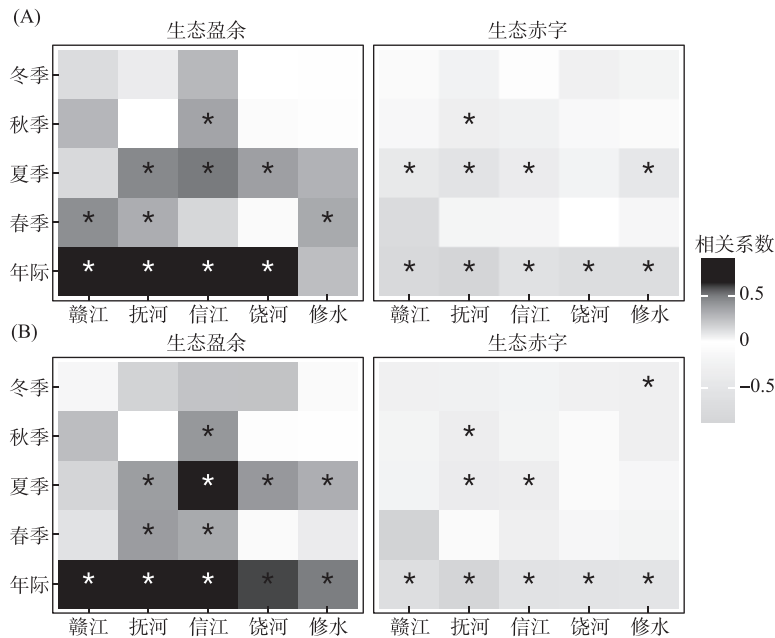


图 10 降水距平和生态径流的相关系数(A 表示 S1 情景, B 表示 S2 情景; * 表示 5% 显著性水平)

Fig.10 Correlation between precipitation anomaly and eco-flow index

(A denotes scenario S1, B denotes scenario S2; * denotes correlated at 5% significance level)

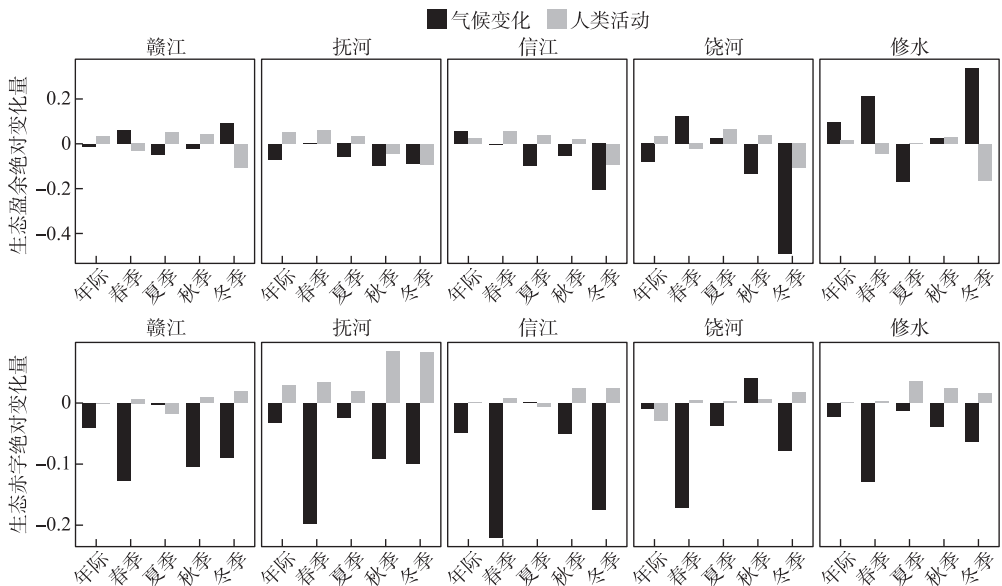


图 11 人类活动和气候变化对生态径流指标的绝对影响程度

Fig.11 Absolute contributions of human activities and climate change on intra-annual eco-flow variations

近年来突显的生态环境问题已经受到了学者们的广泛关注,本文分析了生态径流的变化特征并对其进行归因分析,然而在研究方法上仍存在一些不足,比如笔者认为对于维持研究区的生态功能稳定发挥,设

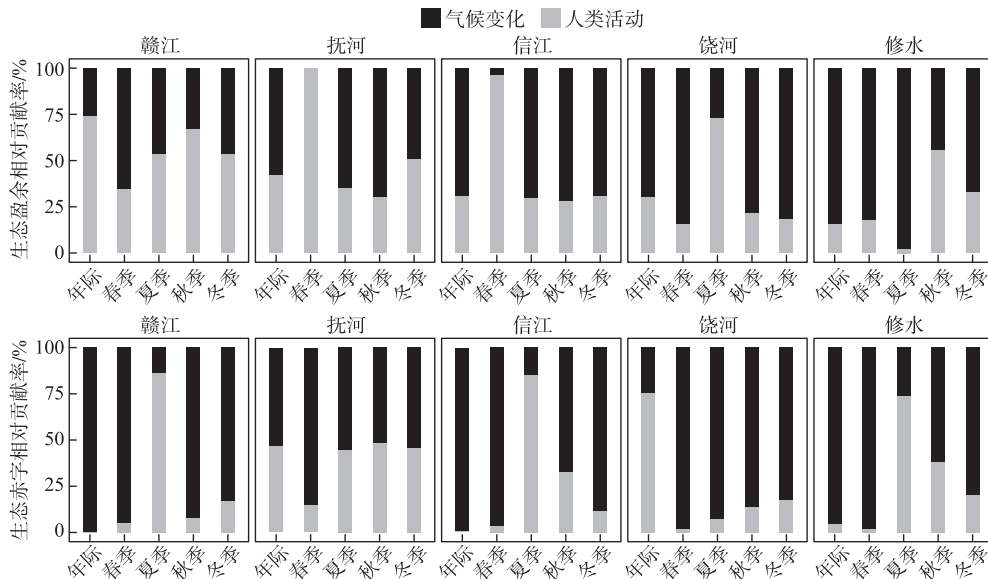


图 12 人类活动和气候变化对生态径流指标的相对影响贡献率

Fig.12 Relative contributions of human activities and climate change on intra-annual eco-flow variations

置 25%~75% 分位数的 FDC 从长期来看是合理的,但 FDC 无法反映具体流量事件的历时及流量事件发生时刻等信息,无法从管理角度给出具体的流量保护范围,同时水文变化与生态系统息息相关,模拟值的变化过程难以从水文学角度进行解释,目前笔者只考虑了气候变化和人类活动对生态径流指标的影响贡献,可以从其他角度进一步分析二者对生态系统的影响贡献.今后,需要根据鄱阳湖生态保护的具体要求,提高研究方法的准确度,提高数据的精度和及时性,进一步分析水文变化引发的生态效应.

4 参考文献

- [1] Liu CM, Men BH, Zhao CS. Ecohydrology: environmental flow and its driving factors. *Advances in Water Science*, 2020, **31**(5): 765-774. [刘昌明, 门宝辉, 赵长森. 生态水文学: 生态需水及其与流速因素的相互作用. 水科学进展, 2020, **31**(5): 765-774.]
- [2] Wen QZ, Yao R, Sun P *et al.* Change characteristics and driving factors in nonstationary ecological flow condition across the Huai River Basin, China. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, **40**(8): 2621-2635. [温庆志, 姚蕊, 孙鹏等. 变异条件下淮河流域生态径流变化特征及驱动因子. 生态学报, 2020, **40**(8): 2621-2635.]
- [3] Richter BD, Baumgartner JV, Powell J *et al.* A method for assessing hydrologic alteration within ecosystems. *Conservation Biology*, 1996, **10**(4): 1163-1174. DOI: 10.1046/j.1523-1739.1996.10041163.x.
- [4] Gao YX, Vogel RM, Kroll CN *et al.* Development of representative indicators of hydrologic alteration. *Journal of Hydrology*, 2009, **374**(1/2): 136-147. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2009.06.009.
- [5] Gu XH, Zhang Q, Kong DD *et al.* 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. DOI: 10.5846/stxb201412122480. [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. 生态学报, 2016, **36**(19): 6079-6090.]
- [6] Zhang Q, Cui Y, Chen YQ. Ecological flow evaluation based on hydrological alterations in the Dongjiang River Basin. *Journal of Natural Resources*, 2012, **27**(5): 790-800. [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.]
- [7] Liu J, Zhang Q, Xu CY *et al.* Characteristics of runoff variation of Poyang Lake watershed in the past 50 years. *Tropical Geography*, 2009, **29**(3): 213-218, 224. [刘健, 张奇, 许崇育等. 近 50 年鄱阳湖流域径流变化特征研究. 热带地

- 理, 2009, **29**(3): 213-218, 224.]
- [8] Guo H, Zhang Q, Wang YJ. Annual variations in climatic and hydrological processes and related flood and drought occurrences in the Poyang Lake Basin. *Acta Geographica Sinica*, 2012, **67**(5): 699-709. [郭华, 张奇, 王艳君. 鄱阳湖流域水文变化特征成因及旱涝规律. 地理学报, 2012, **67**(5): 699-709.]
- [9] Zhang FP, Hu ST, Zhang MH. Research on principal problems and their driving factors in Poyang Lake wetland. *Journal of Nanchang Institute of Technology*, 2020, **39**(1): 53-59. [张范平, 胡松涛, 张梅红. 鄱阳湖湿地面临的主要问题及原因分析. 南昌工程学院学报, 2020, **39**(1): 53-59.]
- [10] Tang GH, Lin YR, Hu ZP *et al.* Characteristics of distribution, transfer and subtraction of nitrogen and phosphorus contaminants in Poyang Lake. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2017, **26**(9): 1436-1445. [唐国华, 林玉茹, 胡振鹏等. 鄱阳湖区氮磷污染物分布、转移和削减特征. 长江流域资源与环境, 2017, **26**(9): 1436-1445.]
- [11] Wu LH. The study on effects of Three Gorge Project to entironment of Poyang Lake. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2007, **38**(S1): 586-591. [吴龙华. 长江三峡工程对鄱阳湖生态环境的影响研究. 水利学报, 2007, **38**(S1): 586-591.]
- [12] Li B, Yang GS, Wan RR. Multidecadal water quality deterioration in the largest freshwater lake in China (Poyang Lake): Implications on eutrophication management. *Environmental Pollution*, 2020, **260**: 114033. DOI: 10.1016/j.envpol.2020.114033.
- [13] Yin X, Zhang JY, Chen J. The impact of multi-projects on the alteration of the flow regime in the middle and lower course of the Hanjiang River, China. *Water*, 2020, **12**(8): 2301. DOI: 10.3390/w12082301.
- [14] Johnson AC, Acreman MC, Dunbar MJ *et al.* The British river of the future; How climate change and human activity might affect two contrasting river ecosystems in England. *Science of the Total Environment*, 2009, **407**(17): 4787-4798. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2009.05.018.
- [15] Fan H, He H, Xu L *et al.* Simulation and attribution analysis based on the Long-Short-Term-Memory network for detecting the dominant cause of runoff variation in the Poyang Lake Basin (PYLB). *J Lake Sci*, 2021, **33**(3): DOI: 10.18307/2021.0319. [范宏翔, 何菡丹, 徐力刚等. 基于长短期记忆模型的鄱阳湖流域径流模拟及其演变的归因分析. 湖泊科学, 2021, **33**(3): DOI: 10.18307/2021.0319.]
- [16] Vogel RM, Sieber J, Archfield SA *et al.* Relations among storage, yield, and instream flow. *Water Resources Research*, 2007, **43**(5): W05403. DOI: 10.1029/2006wr005226.
- [17] Vogel RM, Fennessey NM. Flow duration curves ii: A review of applications in water resources planning. *Journal of the American Water Resources Association*, 1995, **31**(6): 1029-1039. DOI: 10.1111/j.1752-1688.1995.tb03419.x.
- [18] Hochreiter S, Schmidhuber J. Long short-term memory. *Neural Computation*, 1997, **9**(8): 1735-1780. DOI: 10.1162/neco.1997.9.8.1735.
- [19] Graves A, Schmidhuber J. Framewise phoneme classification with bidirectional LSTM and other neural network architectures. *Neural Networks*, 2005, **18**(5/6): 602-610. DOI: 10.1016/j.neunet.2005.06.042.
- [20] Ye XC, Zhang Q, Liu J *et al.* Distinguishing the relative impacts of climate change and human activities on variation of streamflow in the Poyang Lake catchment, China. *Journal of Hydrology*, 2013, **494**: 83-95. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2013.04.036.
- [21] Wang Hq, Zhao Gn, Peng J *et al.* Precipitation characteristics over five major river systems of Poyang drainage areas in recent 50 years. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2009, **18**(7): 615-619. [王怀清, 赵冠男, 彭静等. 近 50 年鄱阳湖五大流域降水变化特征研究. 长江流域资源与环境, 2009, **18**(7): 615-619.]
- [22] Huo Y, Wang LC, Chen XL *et al.* Long-term trend and persistence of precipitation over Lake Poyang basin since 1950s. *J Lake Sci*, 2011, **23**(3): 454-462. DOI: 10.18307/2011.0320. [霍雨, 王腊春, 陈晓玲等. 1950s 以来鄱阳湖流域降水变化趋势及其持续性特征. 湖泊科学, 2011, **23**(3): 454-462.]
- [23] Liu J, Zhang Q, Xu Cy *et al.* Change of actual evapotranspiration of Poyang Lake watershed and associated influencing factors in the past 50 years. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2010, **19**(2): 139-145. [刘健, 张奇, 许崇育等. 近 50 年鄱阳湖流域实际蒸发量的变化及影响因素. 长江流域资源与环境, 2010, **19**(2): 139-145.]
- [24] Wang JL, Ran YY, Zhang YJ *et al.* Land cover and landscape pattern changes in Poyang Lake region of China in 1980-2010. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2013, **24**(4): 1085-1093. DOI: 10.13287/j.1001-9332.2013.0263. [王卷乐, 冉盈盈, 张永杰等. 1980—2010 年鄱阳湖地区土地覆盖与景观格局变化. 应用生态学报, 2013, **24**(4): 1085-1093.]

- [25] Tang GH, Xu WT, Hu ZP. Effect from forest vegetation improvement on runoff and sediment transport processes within Poyang Lake Watershed. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2017, **48**(2): 12-21. [唐国华, 许闻婷, 胡振鹏. 森林植被改善对鄱阳湖流域径流和输沙过程的影响. 水利水电技术, 2017, **48**(2): 12-21.]
- [26] Zhang Y. Optimum allocation of water resources of Ganfu Plain Irrigation Area. *Jiangxi Hydraulic Science & Technology*, 2008, **34**(3): 227-229. [张煜. 浅析赣抚平原灌区水资源优化配置. 江西水利科技, 2008, **34**(3): 227-229.]
- [27] Xiong J, Li H. Analysis on the calculation method of agricultural water intake for water conservancy survey in Jiangxi province. *Pearl River*, 2014, **35**(1): 45-47. [熊剑英, 李慧婧. 江西省水利普查农业取用水量计算方法浅析. 人民珠江, 2014, **35**(1): 45-47.]
- [28] Zheng LL, Xu JY, Wang DD *et al.* Acceleration of vegetation dynamics in hydrologically connected wetlands caused by dam operation. *Hydrological Processes*, 2021, **35**(2): e14026. DOI: 10.1002/hyp.14026.
- [29] Zhao JK, Li LX, Li JF *et al.* Response of stage variation of the Poyang Lake to human activities. *Journal of China Hydrology*, 2020, **40**(4): 53-60. [赵军凯, 李立现, 李九发等. 人类活动对鄱阳湖水位变化的影响. 水文, 2020, **40**(4): 53-60.]
- [30] Wang RL, Huang JH, Ge L *et al.* Study of ecological flow based on the relationship between cyprininus carpio habitat hydrological and ecological response in the lower Yellow River. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2020, **51**(9): 1175-1187. [王瑞玲, 黄锦辉, 葛雷等. 基于黄河鲤栖息地水文-生态响应关系的黄河下游生态流量研究. 水利学报, 2020, **51**(9): 1175-1187.]
- [31] Peng W, Liu BJ, Qiu JC *et al.* The ecological flow of the middle and lower reaches of the Lancang River based on priority protection fishes identification. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, 2020, **59**(3): 43-50. [彭为, 刘丙军, 邱江潮等. 基于优先保护鱼类识别的澜沧江中下游生态流量. 中山大学学报: 自然科学版, 2020, **59**(3): 43-50.]
- [32] Zhong Z, Wu Y, Duan M. Effect of low water level on Poyang Lake wetlands and migratory birds. *Jiangxi Hydraulic Science & Technology*, 2014, **40**(3): 182-184, 216. [钟正, 吴瑶, 段明. 浅谈低枯水位对鄱阳湖湿地和候鸟的影响. 江西水利科技, 2014, **40**(3): 182-184, 216.]
- [33] Hu ZP, Ge G, Liu CL. Response of wintering migratory birds to hydrological processes in Poyang Lake. *Journal of Natural Resources*, 2014, **29**(10): 1770-1779. DOI: 10.11849/zrzyxb.2014.10.012. [胡振鹏, 葛刚, 刘成林. 越冬候鸟对鄱阳湖水文过程的响应. 自然资源学报, 2014, **29**(10): 1770-1779.]
- [34] Qi SH, Zhang QM, Jiang F *et al.* Study on the effects on the landscape spatial pattern of the wintering birds' habitat from lake level in Poyang Lake wetland. *Journal of Natural Resources*, 2014, **29**(8): 1345-1355. DOI: 10.11849/zrzyxb.2014.08.007. [齐述华, 张起明, 江丰等. 水位对鄱阳湖湿地越冬候鸟生境景观格局的影响研究. 自然资源学报, 2014, **29**(8): 1345-1355.]
- [35] Tan ZQ, Zhang Q, Li YL *et al.* Distribution of typical vegetation communities along elevation in Poyang Lake wetlands. *Wetland Science*, 2016, **14**(4): 506-515. [谭志强, 张奇, 李云良等. 鄱阳湖湿地典型植物群落沿高程分布特征. 湿地科学, 2016, **14**(4): 506-515.]
- [36] Pan YW, Ying ZX, Li HH *et al.* Landscape patterns and their changes of Poyang Lake wetlands under hydrological process and sand mining activities. *Wetland Science*, 2019, **17**(3): 286-294. [潘艺雯, 应智霞, 李海辉等. 水文过程和采砂活动下鄱阳湖湿地景观格局及其变化. 湿地科学, 2019, **17**(3): 286-294.]
- [37] Zhang M, Ni LY, Xu J *et al.* Annual dynamics of the wetland plants community in Poyang Lake in response to water-level variations. *Research of Environmental Sciences*, 2013, **26**(10): 1057-1063. [张萌, 倪乐意, 徐军等. 鄱阳湖草滩湿地植物群落响应水位变化的周年动态特征分析. 环境科学研究, 2013, **26**(10): 1057-1063.]