

基于集对分析的清流河流域蓝绿水分类分析

刘俊杰¹, 高峰², 刘翠善^{3,4,5,6}, 王国庆^{3,4,5,6}, 冯仲恺^{1,3}

(1. 河海大学水文水资源学院, 江苏 南京 210098; 2. 安徽省滁州市水文水资源局, 安徽 滁州 239000; 3. 南京水利科学研究院水灾害防御全国重点实验室, 江苏 南京 210029; 4. 河海大学长江保护与绿色发展研究院, 江苏 南京 210098; 5. 河海大学水安全与水科学协同创新中心, 江苏 南京 210098; 6. 水利部应对气候变化研究中心, 江苏 南京 210029)

摘要:运用 SWAT 模型模拟厄尔尼诺和拉尼娜事件影响时段内清流河流域蓝绿水资源的时空分布规律, 并利用集对分析法解析了多时间尺度下清流河流域蓝绿水资源丰枯演变特性。结果表明:厄尔尼诺和拉尼娜事件影响时段内清流河流域绿水资源分别比多年平均值高 12.0 mm 和 69.7 mm, 蓝水资源分别比多年平均值低 115.7 mm 和 138.2 mm, 绿水系数分别比多年平均值高 9.3% 和 12.9%; 厄尔尼诺和拉尼娜事件影响时段内清流河流域蓝水资源均属于枯类, 绿水资源属于丰类和平类; 清流河流域蓝水资源在 1967—1979 年、1980—1992 年、1993—2005 年、2006—2018 年 4 个阶段分别属于枯、平、枯、平类, 绿水资源分别属于丰、平、丰、平类, 蓝绿水资源丰枯演变具有一定的波动性。

关键词:蓝水资源; 绿水资源; 厄尔尼诺事件; 拉尼娜事件; SWAT 模型; 集对分析; 清流河流域

中图分类号: TV213.4

文献标志码: A

文章编号: 1004-6933(2024)05-0095-09

Classification analysis of blue and green water based on set pair analysis in the Qingliu River Basin// LIU Junjie¹, GAO Feng², LIU Cuishan^{3,4,5,6}, WANG Guoqing^{3,4,5,6}, FENG Zhongkai^{1,3} (1. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Chuzhou Hydrology and Water Resources Bureau of Anhui Province, Chuzhou 239000, China; 3. The National Key Laboratory of Water Disaster Prevention, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China; 4. Yangtze Institute for Conservation and Development, Hohai University, Nanjing 210098, China; 5. Cooperative Innovation Center for Water Safety and Hydro Science, Hohai University, Nanjing 210098, China; 6. Research Center for Climate Change, Ministry of Water Resources, Nanjing 210029, China)

Abstract: Using the SWAT model to simulate the spatiotemporal distribution patterns of blue and green water resources in the Qingliu River Basin during the impact periods of El Niño and La Niña events, and using set pair analysis to analyze the evolution characteristics of blue and green water resources in the Qingliu River Basin at multiple time scales. The results showed that during the impact periods of El Niño and La Niña events, the green water resources in the Qingliu River Basin were 12.0 mm and 69.7 mm higher than the annual average, the blue water resources were 115.7 mm and 138.2 mm lower than the annual average, and the green water coefficient was 9.3% and 12.9% higher than the annual average, respectively. During the periods affected by El Niño and La Niña events, the blue water resources in the Qingliu River Basin belong to the dry category, while the green water resources belong to the wet and normal categories. The blue water resources in the Qingliu River Basin belong to the dry, normal, dry, and normal categories during the four stages of 1967–1979, 1980–1992, 1993–2005, and 2006–2018, respectively. The green water resources belong to the wet, normal, wet, and normal categories, indicating that the evolution of blue and green water resources in the Qingliu River Basin has certain fluctuations.

Key words: blue water resources; green water resources; El Niño event; La Niña event; SWAT model; set pair analysis; Qingliu River Basin

水资源作为重要的自然资源之一,随着世界经济的发展,水资源短缺问题已经成为当今人类社会

面临的严峻挑战^[1-2]。在全球气候变化与人类活动加剧的双重影响下^[3], 河川径流量的演变规律及丰

基金项目:国家自然科学基金项目(U2240203, 52121006); 国家重点研发计划项目(2022YFC3202301); 内蒙古自治区“揭榜挂帅”项目(2023JBGS0007)

作者简介:刘俊杰(1999—),女,硕士研究生,主要从事水文水资源研究。E-mail:jjliuhhu@163.com

通信作者:王国庆(1971—),男,正高级工程师,博士,主要从事气候变化及水文水资源研究。E-mail:gqwang@nhri.cn

枯特性随着气候条件和下垫面的变化也发生了不同程度的改变,直接影响流域生态环境需水与社会生产、生活供水等水资源开发利用关键环节^[4]。因此,科学管理与评估水资源对变化环境下流域水资源可持续发展具有重要指导作用。

水循环过程和陆地生态系统是一个紧密相连的有机耦合体,二者以蓝绿水为纽带将水文过程与生态过程相结合^[5-6]。蓝绿水概念首先由 Falkenmark^[7]提出,蓝水资源指以地表径流、壤中流、地下径流形式储存在河湖及含水层中的水,绿水资源可分为绿水流(实际蒸散发)和绿水储量(土壤含水量)^[8-9],二者是维持陆地生态系统健康与功能完整及人类社会生活与发展的重要水资源保障^[10]。近年来,国内外学者围绕蓝绿水时空分布规律及其对气候变化与土地利用变化响应等方面进行了大量研究^[11-12],但针对不确定性水资源系统中蓝绿水在变化环境下的丰枯分类研究较少。集对分析法通过构建不确定系统中各集合间集对,从整体与局部角度动态刻画复杂系统中的综合不确定性^[13],该方法由赵克勤^[14]提出,现已广泛应用于数学、资源与环境、信息安全、水利科学等领域^[15-17]。目前,已有学者尝试将集对分析法应用于蓝绿水丰枯分类,如 Li 等^[18]使用 MIKE SHE 水文模型模拟分析雅砻江流域 2006—2015 年蓝绿水资源演变规律,采用集对分析法计算不同丰枯类别蓝绿水集合联系系数以解析研究时段内蓝绿水资源丰枯情况。

厄尔尼诺和拉尼娜事件通过大气环流以遥相关的形式影响季风,其通过影响中国季风气候区的降水与气温^[19]进而影响蓝绿水的时空分布与丰枯特性。童凯等^[20]的研究表明广西南流江流域在典型厄尔尼诺(拉尼娜)年存在蓝水增多(减少)、绿水无显著改变的现象。然而,探讨厄尔尼诺事件对长江下游流域蓝绿水影响的研究较少。

基于此,本文以长江下游典型支流清流入为研究对象,分析厄尔尼诺和拉尼娜事件影响时段内清流河流域蓝绿水资源时空分布模式,利用集对分析法对流域蓝绿水进行丰枯划分,解析多时间尺度下流域蓝绿水的丰枯演变特性,以期为长江中下游区域水资源规划配置与开发利用提供科学依据。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

清流入是长江下游支流滁河水系的左岸支流(图 1),位于安徽省滁州市境内,32°13'N~32°40'N、117°59'E~118°25'E。清流入发源于滁州市内西北部磨盘山和麓仙店子北仙居涧,流域水系形状呈树

状,盈福河、百道河和二道河汇入水系左支,大、小沙河汇入水系右支,河流长度为 84 km,流域面积为 1070 km²。清流河流域属于亚热带季风气候,气候温和湿润,雨热同季。流域多年平均气温为 16℃,年降水量为 529~1696 mm,夏季降水量占比接近全年降水量的 50%;流域多年平均径流量为 2.87 亿 m³,多年平均蒸散发量为 878 mm。流域内土地利用类型主要为耕地、林地与草地,植被类型以境内山区的人工针叶林为主。滁州水文站(32°18'N、118°20'E)设立于 1957 年,位于清流入下游,为清流入下游控制站点。

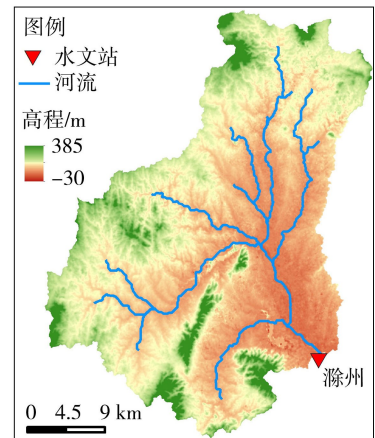


图 1 清流河流域概况

Fig. 1 Overview of the Qingliu River Basin

1.2 数据来源

SWAT 模型是由美国农业部开发的基于物理计算机制的分布式水文模型,广泛应用于水文领域的研究^[21]。本文构建清流河流域 SWAT 模型需要的输入数据分为空间数据与属性数据两类。空间数据主要包含 DEM 数据、土地利用数据、土壤数据,其中 DEM 数据空间分辨率为 30 m,来自地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn/>),土地利用数据(2000 年)空间分辨率为 30 m,来自中国科学院资源环境科学数据中心(<https://www.resdc.cn/>),土壤数据(1:100 万)来自联合国粮农组织 HWSO 土壤数据库(<https://gaez.fao.org/pages/hwsd>);属性数据主要包含实测径流数据和气象数据,其中径流数据为 1966—2018 年逐月数据,来自长江流域水文年鉴和安徽省滁州市水文水资源局,气象数据为 1964—2018 年 CN05.1 逐日网格数据,分辨率为 0.25°×0.25°,该数据集是吴佳等^[22]基于中国境内约 2400 个台站的观测资料,使用距平逼近法,经气候场和距平场分别插值后叠加得到。

2 研究方法

2.1 趋势分析诊断方法

采用 Sen 斜率估计法分析时间序列的变化趋势

及程度^[23], Mann-Kendall (M-K) 非参数检验法检验时间序列的趋势及显著性^[24], 根据 M-K 统计检验量 Z 值正负检测上升或下降趋势。显著性水平为 0.05 时 Z 值为 1.96, 若 Z 值的绝对值大于 1.96, 则可认为时间序列趋势显著。

2.2 蓝绿水资源量计算

利用 SWAT 模型的输出模块计算蓝绿水资源量^[25], 计算公式为

$$W_G = ET + W_S \quad (1)$$

$$W_B = W_Z + W_R \quad (2)$$

$$C_G = \frac{W_G}{W_G + W_B} \times 100\% \quad (3)$$

式中: W_G 为绿水资源量; ET 为实际蒸散发量; W_S 为土壤含水量; W_B 为蓝水资源量; W_Z 为子流域产水量; W_R 为深层含水层补给量; C_G 为绿水系数。

2.3 集对分析法

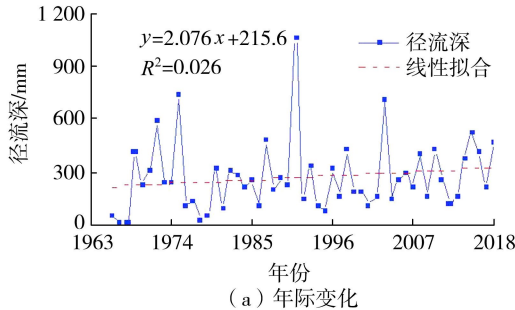
集对分析法的原理是将两个具有一定联系的集合 A 、 B 组合成一个基本单位, 即集对^[26], 记为 $H(A, B)$, 通过构建联系度方程统一描述集对特性系统中集合 A 、 B 的同一性、差异性与对立性^[27]。联系度方程为

$$\mu_{A-B} = \frac{S}{N} + \frac{F}{N}I + \frac{P}{N}J \quad (4)$$

式中: μ_{A-B} 为集对 $H(A, B)$ 的联系度, 当式中 I 、 J 取合理数值时, μ_{A-B} 的取值称为联系系数; N 为集合特性总数, $N = S + F + P$; S 为集合 A 、 B 中的同一性个数; F 为集合 A 、 B 中的差异性个数; P 为 A 、 B 中的对立性个数; I 为差异不确定性系数, $I \in [-1, 1]$, 有时仅作为差异标记; J 为对立系数, $J \in [-1, 1]$, 常取 $J = -1$, 有时仅作为对立标记。

本文采用四元联系度方程进行集对分析^[28], 将蓝绿水资源的丰枯类别划分为特枯(Ⅰ)、枯(Ⅱ)、平(Ⅲ)、丰(Ⅳ)、特丰(Ⅴ)5类, 具体步骤^[28]如下:

步骤 1 确定分类标准, 符号化集合。将集合 $(x_{k1}, x_{k2}, \dots, x_{km})$ ($k = 1, 2, \dots, n$) 记作集合 A_k , 其中 n 为水资源研究时段的年数, m 为总指标数, 根据



(a) 年际变化

不同的时间尺度, m 可为 4 季、12 月或 365 d, A_k 的元素即为对应时间尺度的蓝绿水资源量。首先计算第 k 年 m 个元素的均值 \bar{x} 与标准差 σ , 按照 $[0, \bar{x} + i_1\sigma)$, $[\bar{x} + i_1\sigma, \bar{x} + i_2\sigma)$, $[\bar{x} + i_2\sigma, \bar{x} + i_3\sigma)$, $[\bar{x} + i_3\sigma, \bar{x} + i_4\sigma)$, $[\bar{x} + i_4\sigma, +\infty)$ 的区间分类标准将时段内水资源进行分类, 完成集合 A_k 元素符号化, 其中 $i_1 \sim i_4$ 为各区间标准差的不同倍数。

步骤 2 构建丰枯类别集对。将 5 类丰枯类别用符号化集合 B_l ($l = 1, 2, \dots, 5$) 表示, 例如: 特枯(Ⅰ)类集合为 $B_1 = \{I, I, \dots, I\}$, 枯(Ⅱ)类集合为 $B_2 = \{II, II, \dots, II\}$, 以此类推。在此基础上分别构建集合 A_k 与 B_l 的集对 $H(A_k, B_l)$ 。

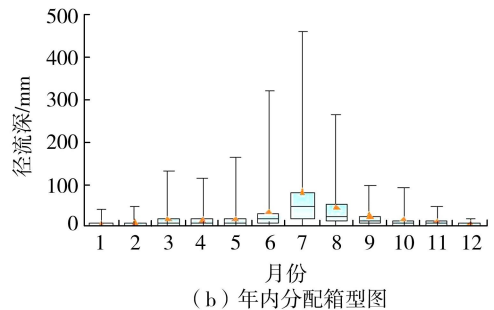
步骤 3 构建联系度方程, 分析集合所属类别。对比分析集合 A_k 与 B_l 中元素符号, 统计相差不同级数的符号个数, 对于级数相同的符号, 其个数记为 S ; 级数相差 1 级的符号, 个数记为 F_1 ; 级数相差 2 级的符号, 个数记为 F_2 ; 级数相差 3 级及以上的符号, 个数记为 P 。选取差异不确定性系数 I_1 、 I_2 , 构建集对 $H(A_k, B_l)$ 的联系度方程(式(5)), 计算各丰枯类别的联系系数, 联系系数愈大, 集合 A_k 属于该类别的可能性愈大。

$$\mu_{A_k-B_l} = \frac{S}{N} + \frac{F_1}{N}I_1 + \frac{F_2}{N}I_2 + \frac{P}{N}J \quad (5)$$

3 结果与分析

3.1 水文要素演变规律分析

基于清流河流域下游控制站点滁州站 1966—2018 年的径流资料, 统计分析年径流深逐年演变趋势及年内分配情况。由图 2(a) 可见, 1966—2018 年清流河流域年径流深的多年平均值为 260.3 mm, M-K 趋势检验统计 Z 值为 1.79, 年径流深总体呈不显著上升趋势, 具有年际变化较大的特性, 序列最大、最小值分别为 1059.6、7.8 mm。受亚热带季风气候影响, 清流河流域径流的主要气候影响因子为降水因子, 由图 2(b) 可见, 1966—2018 年流域径流深的年内分配总体态势表现为先增高后降



(b) 年内分配箱型图

图 2 清流河流域径流深逐年变化

Fig. 2 Inter-annual variability of runoff depth in the Qingliu River Basin

低,在夏季(6—8月)径流深的年内分配相对较高,7月达到峰值,可见径流深年内分配不均的现象较为突出,还具有显著的年际分异特性,例如,年内分配中7月的最大径流深为460.9 mm,约为7月多年平均值的6倍,为7月最小径流深的153倍。

3.2 蓝绿水资源量模拟

3.2.1 参数敏感性分析

不同的参数组合和取值对模型径流模拟结果的影响不同,本文采用SWAT-CUP内置的SUFI-2算法进行SWAT模型参数全局敏感性分析,通过敏感性排序结果选取的11个模型参数见表1,在此基础上利用滁州站实测逐月流量对SWAT模型的月尺度模拟进行率定与验证。模型参数敏感性的识别基于T检验法中的t-stat和p-value两个指标,其中t-stat表示参数变化对模型影响程度的大小,t-stat的绝对值越大,则参数相对灵敏度越高,p-value可用于参数灵敏度的直接比较,p-value越接近0,则该参数灵敏度越高。参数敏感性分析的结果表明,CN2、RCHRG_DP、CANMX、GW_DELAY等参数具有较高的灵敏度。

3.2.2 径流模拟分析

选用确定性系数 R^2 、纳什效率系数 N_{SE} 、相对误差 P_B 评估SWAT模型在研究区的适应性, R^2 和 N_{SE} 越接近1、 P_B 越接近0说明模拟效果越好。 $0.5 <$

$N_{SE} \leq 0.65$ 表示模型模拟结果合格, $0.65 < N_{SE} \leq 0.75$ 表示模型模拟结果良好, $0.75 < N_{SE} \leq 1$ 表示模型模拟结果优秀^[29]。

根据滁州站的月径流资料,模型预热期选取1964—1965年,率定期选取1966—2000年,验证期选取2001—2018年,率定期和验证期模拟的径流结果见图3。SWAT模拟的径流结果在率定期与验证期的评价指标 R^2 、 N_{SE} 和 P_B 分别为0.88、0.86、-10.36%和0.82、0.80、-17.96%,均满足要求,表明模型模拟径流与实测径流在月尺度上拟合度较高,具有良好的 consistency。综上分析可知,SWAT模型在清流河流域具有良好的适应性,可用于流域蓝绿水资源时空分布的研究。

3.3 蓝绿水资源时空变化特征

3.3.1 蓝绿水空间分布特征

选取1966—2018年最强的一次厄尔尼诺事件与仅出现一次的强拉尼娜事件进行研究,厄尔尼诺事件发生时间为1997年4月至1998年3月,拉尼娜事件发生时间为1988年5月至1989年4月^[30]。根据SWAT模型输出模块对蓝绿水对应变量进行面积加权计算,得到1966—2018年清流河流域蓝绿水资源量及绿水系数多年平均值空间分布以及厄尔尼诺和拉尼娜事件影响时段的空间分布,结果见图4。由图4可见,1966—2018年清流河流域多年

表1 SWAT模型参数初始范围及敏感性排序

Table 1 Initial range and sensitivity sequencing of SWAT model parameters

参数名	参数含义	初始范围	敏感性排序
V_GW_REVAP	浅层地下水再蒸发系数	0.02~0.2	7
V_ESCO	土壤蒸发补偿系数	0.01~1	9
V_GW_DELAY	地下水延迟时间	0~500 d	4
R_CN2	湿润条件II下的初始SCS径流曲线数	-0.2~0.2	1
V_REVAPMN	浅层含水层“再蒸发”或渗透到深层含水层的阈值深度	0~500 mm	6
V_CH_K2	主河道河床有效水力传导度	0.01~500 mm/h	11
R_SOL_AWC	土壤层有效水容量	0~1 mm/mm	5
V_ALPHA_BF	浅层含水层产生基流的阈值深度	0~1 mm	10
V_CANMX	最大冠层截留量	0~100 mm	3
V_GWQMN	浅层含水层产生基流的阈值深度	0~5000 mm	8
V_RCHRG_DP	深含水层渗透比	0~1	2

注:参数名中V表示以替换方式进行参数率定,R表示在原参数基础上倍乘系数进行参数率定。

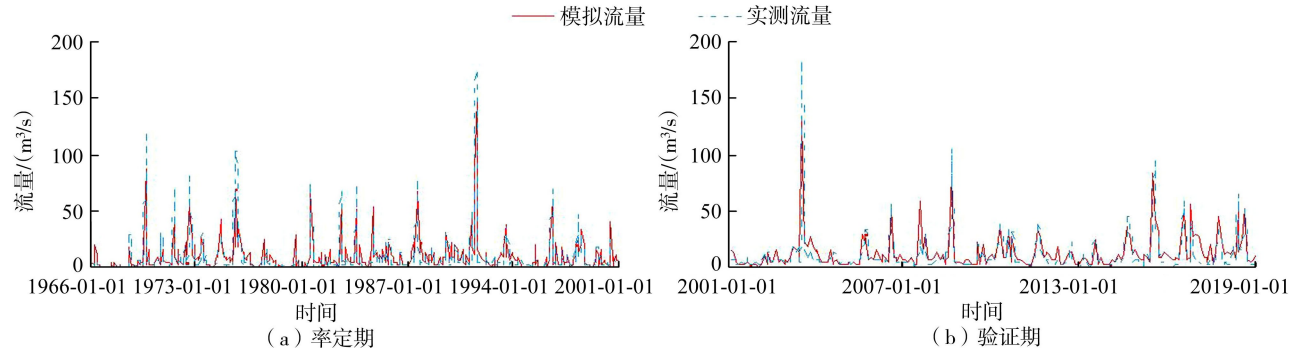
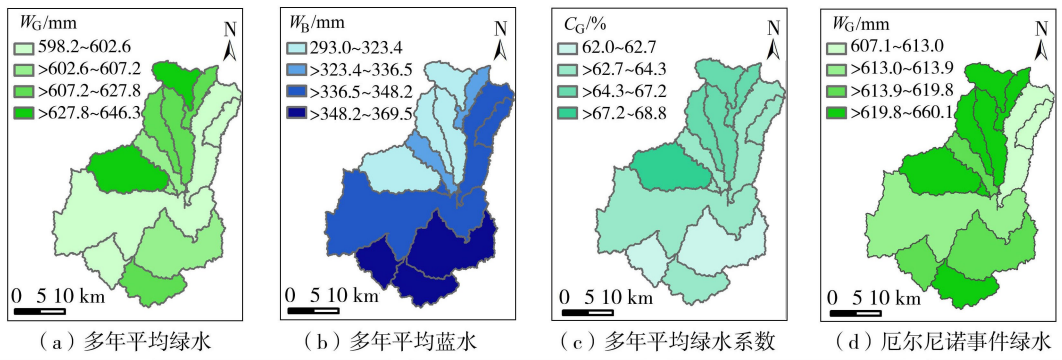


图3 滁州站率定期和验证期月实测径流与模拟径流拟合结果

Fig. 3 Fitting results of monthly observed and simulated runoff at Chuzhou Station in calibration and validation periods

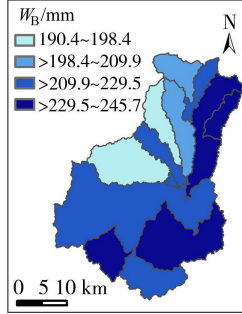


(a) 多年平均绿水

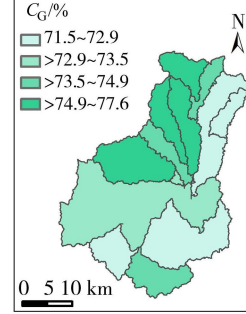
(b) 多年平均蓝水

(c) 多年平均绿水系数

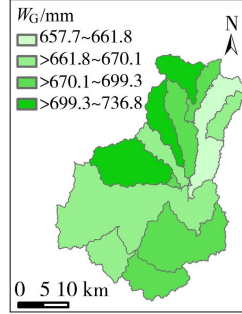
(d) 厄尔尼诺事件绿水



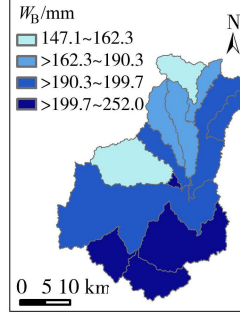
(e) 厄尔尼诺事件蓝水



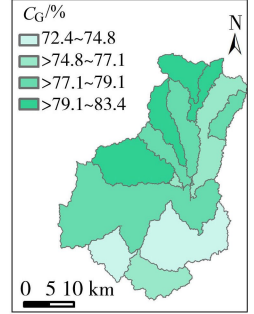
(f) 厄尔尼诺事件绿水系数



(g) 拉尼娜事件绿水



(h) 拉尼娜事件蓝水



(i) 拉尼娜事件绿水系数

图4 清河流域蓝绿水资源量及绿水系数空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of blue water resources, green water resources, and green water coefficient in the Qingliu River Basin

平均绿水资源量为 611.7 mm,厄尔尼诺、拉尼娜事件影响时段绿水资源量分别为 623.7、681.4 mm,二者高出多年平均绿水资源量 12.0、69.7 mm,分布特性与多年平均绿水资源相同,均从流域西北向东南先减后增。流域多年平均蓝水资源量为 337.5 mm,厄尔尼诺、拉尼娜事件影响时段蓝水资源量分别为 221.8、199.3 mm,二者低于多年平均蓝水资源量 115.7、138.2 mm,厄尔尼诺影响时段蓝水资源量更为丰富,拉尼娜影响时段蓝水资源空间分布与流域多年平均蓝水资源量分布更为接近,均从西北向东南递增。流域多年平均绿水系数为 64.5%,厄尔尼诺、拉尼娜事件影响时段绿水系数分别为 73.8%、77.4%,二者较多年平均值高出 9.3%、12.9%,空间分布均从西北向东南递减。由于厄尔尼诺和拉尼娜事件对气温与降水的影响具有显著时滞效应,并且两事件对当年与次年的季节降水影响存在明显差异,这可能是厄尔尼诺和拉尼娜事件影响时段蓝绿水资源不同于多年平均蓝绿水资源的原因之一。

3.3.2 蓝绿水资源量年际变化规律

1966—2018年清河流域蓝绿水资源量及绿水系数年际变化见图5,采用M-K趋势检验法分析1966—2018年蓝绿水资源量的年际变化特征。结果表明,绿水资源量的Z值为0.30,Sen斜率估计值为 $-0.14 a^{-1}$,年际变化呈不显著上升趋势,波动性较小,在2013年和1989年分别出现最大值与最小值,二者比例和差值分别为1.3:1和166 mm。蓝

水资源量的Z值为2.22,Sen斜率估计值为 $2.81 a^{-1}$,可认为在1966—2018年蓝水资源的年际变化具有显著上升趋势,具有一定波动性,其中蓝水资源最大值与最小值比例为20.9:1,出现年份分别为1991年和1967年。绿水系数的Z值为-2.05,Sen斜率估计值为 $-0.21 a^{-1}$,通过了95%的显著性检验,即绿水系数在1966—2018年呈显著下降趋势,蓝绿水资源分布模式表现为绿水资源在流域中占比逐渐下降,蓝水资源与绿水资源的比值逐渐上升。

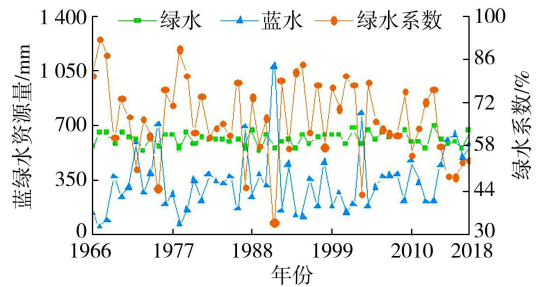


图5 1966—2018年清河流域蓝绿水资源量及绿水系数年际变化

Fig. 5 Inter-annual variability of blue water resources, green water resources, and green water coefficient in the Qingliu River Basin from 1966 to 2018

3.4 蓝绿水分类分析

3.4.1 厄尔尼诺和拉尼娜事件影响时段蓝绿水丰枯分类

基于四元联系度方程,计算1966—2018年各月

蓝绿水资源量均值 \bar{x} 与标准差 σ , 按照 $[0, \bar{x}-0.9\sigma)$ 、 $[\bar{x}-0.9\sigma, \bar{x}-0.3\sigma)$ 、 $[\bar{x}-0.3\sigma, \bar{x}+0.3\sigma)$ 、 $[\bar{x}+0.3\sigma, \bar{x}+0.9\sigma)$ 、 $[\bar{x}+0.9\sigma, +\infty)$ 的区间取值范围^[18] 将蓝绿水资源分为特枯、枯、平、丰、特丰 5 类, 分类标准见表 2。依据经验取值法^[28] 取差异不确定系数, $I_1 = 0.25, I_2 = -0.5$, 厄尔尼诺和拉尼娜事件影响时段内各月绿水和蓝水资源符号集合分别记为 $G_e = \{g_{e,1}, g_{e,2}, \dots, g_{e,m}\}$ 、 $B_e = \{b_{e,1}, b_{e,2}, \dots, b_{e,m}\}$ 与 $G_1 = \{g_{1,1}, g_{1,2}, \dots, g_{1,m}\}$ 、 $B_1 = \{b_{1,1}, b_{1,2}, \dots, b_{1,m}\}$, 其中 $m=12$ 。 G_e, B_e, G_1, B_1 与 5 类丰枯蓝绿水资源符号集合 $C_L (L=1, 2, \dots, 5)$ 构成对应集对 $H(G_e, C_L)$ 、 $H(B_e, C_L)$ 、 $H(G_1, C_L)$ 、 $H(B_1, C_L)$ 。统计厄尔尼诺和拉尼娜事件影响时段内各月蓝绿水资源分类, 结果见表 3、表 4。式 (6) 为厄尔尼诺事件绿水联系度方程, 联系系数计算结果见表 5。

$$\begin{cases} \mu_{G_e-C_1} = 3/12 + 2/12I_1 + 1/12I_2 + 6/12J \\ \mu_{G_e-C_2} = 2/12 + 4/12I_1 + 5/12I_2 + 1/12J \\ \mu_{G_e-C_3} = 1/12 + 7/12I_1 + 4/12I_2 + 0/12J \\ \mu_{G_e-C_4} = 5/12 + 2/12I_1 + 2/12I_2 + 3/12J \\ \mu_{G_e-C_5} = 1/12 + 5/12I_1 + 1/12I_2 + 5/12J \end{cases} \quad (6)$$

表 2 清流河流域蓝绿水分类标准

Table 2 Classification standard blue and green water resources in the Qingliu River Basin

月份	绿水资源量/mm					蓝水资源量/mm				
	特枯	枯	平	丰	特丰	特枯	枯	平	丰	特丰
1	≤8	>8~12	>12~15	>15~18	>18	≤4	>4~12	>12~20	>20~28	>28
2	≤12	>12~16	>16~21	>21~26	>26	≤6	>6~13	>13~20	>20~26	>26
3	≤23	>23~28	>28~34	>34~39	>39	≤6	>6~19	>19~31	>31~43	>43
4	≤40	>40~48	>48~56	>56~64	>64	≤4	>4~15	>15~25	>25~36	>36
5	≤54	>54~64	>64~74	>74~84	>84	≤4	>4~14	>14~27	>27~40	>40
6	≤84	>84~97	>97~111	>111~125	>125	≤4	>4~23	>23~51	>51~80	>80
7	≤78	>78~92	>92~106	>106~119	>119	≤13	>13~49	>49~96	>96~143	>143
8	≤82	>82~95	>95~108	>108~122	>122	≤7	>7~28	>28~56	>56~85	>85
9	≤39	>39~50	>50~62	>62~73	>73	≤8	>8~20	>20~36	>36~53	>53
10	≤22	>22~28	>28~35	>35~41	>41	≤4	>4~16	>16~31	>31~46	>46
11	≤13	>13~20	>20~26	>26~33	>33	≤5	>5~16	>16~27	>27~39	>39
12	≤7	>7~11	>11~15	>15~20	>20	≤4	>4~12	>12~21	>21~29	>29

表 3 厄尔尼诺事件影响时段内各月蓝绿水分类结果

Table 3 Classification results of blue and green water resources in months during impact period of El Niño events

分类对象	1997年 4月	1997年 5月	1997年 6月	1997年 7月	1997年 8月	1997年 9月	1997年 10月	1997年 11月	1997年 12月	1998年 1月	1998年 2月	1998年 3月
绿水	特枯	枯	丰	丰	丰	特枯	丰	特丰	平	特枯	枯	丰
蓝水	枯	枯	枯	枯	平	枯	特枯	枯	平	特丰	丰	特丰

表 4 拉尼娜事件影响时段内各月蓝绿水分类结果

Table 4 Classification results of blue and green water resources in months during impact period of La Niña events

分类对象	1988年 5月	1988年 6月	1988年 7月	1988年 8月	1988年 9月	1988年 10月	1988年 11月	1988年 12月	1989年 1月	1989年 2月	1989年 3月	1989年 4月
绿水	丰	丰	特丰	丰	枯	枯	枯	枯	平	平	枯	平
蓝水	丰	平	枯	枯	平	枯	特枯	枯	枯	丰	枯	枯

厄尔尼诺和拉尼娜事件影响时段内绿水资源月份数量占比最大的类别分别为丰类和枯类, 主要集中于夏秋季与秋冬季, 特丰类分别出现于当年 11 月、7 月; 两事件中蓝水资源属枯类月数均超过影响时段的 1/2, 分别集中于当年春夏秋季与当年夏冬及次年春季。罗剑锋等^[19] 研究表明, 长江中下游区域在东部型厄尔尼诺事件影响下当年夏、秋、冬季降水分别偏多、偏少、偏多, 次年春季降水异常偏多, 东部型拉尼娜事件影响下当年夏季降水偏多, 秋冬及次年春季降水偏少。降水、气温等多种气象因素对蓝绿水的直接或间接影响可能是本文厄尔尼诺和拉尼娜事件影响时段内蓝绿水各月丰枯变化原因之一。总体上, 强厄尔尼诺事件影响时段绿水、蓝水资源属于丰类、枯类, 强拉尼娜事件影响时段绿水、蓝水资源属于平类、枯类, 其中绿水资源在两类事件出现的差异可能源于厄尔尼诺较拉尼娜影响时段流域内降水更多、气温更高, 致使蒸发较大, 以及集对分析考虑水资源时程分配、差异不确定系数的选择等因素。

3.4.2 多时段蓝绿水丰枯分类

根据蓝绿水资源量计算分类标准, 绿水资源量的特枯、枯、平、丰、特丰类分类标准为 $[0, 577.7)$ 、

表 5 厄尔尼诺和拉尼娜事件影响时段各类别蓝绿水资源量联系数

Table 5 Connection number between various categories of blue and green water resources during impact period of El Niño and La Niña events

类别	厄尔尼诺事件		拉尼娜事件	
	绿水	蓝水	绿水	蓝水
特枯	-0.25	-0.13	-0.35	-0.02
枯	-0.04	0.35	0.27	0.56
平	0.06	0.19	0.38	0.31
丰	0.13	-0.17	0.13	-0.17
特丰	-0.27	-0.48	-0.40	-0.71

[577.7, 601)、[601, 624.3)、[624.3, 647.6)、[647.6, +∞)mm, 蓝水资源量的特枯、枯、平、丰、特丰类分类标准为[0, 161.9)、[161.9, 281.6)、[281.6, 401.2)、[401.2, 520.9)、[520.9, +∞)mm。在此基础上将 1967—2018 年划分为 1967—1979 年、1980—1992 年、1993—2005 年、2006—2018 年 4 个时段, 记为 T_1 、 T_2 、 T_3 、 T_4 , 各时段逐年分类结果见表 6。 $T_1 \sim T_4$ 时段蓝绿水资源符号集合记为 G_k 、 B_k ($k=1, 2, 3, 4$), 分别构建 $T_1 \sim T_4$ 时段蓝绿水资源与丰枯符号集合 C_L ($L=1, 2, \dots, 5$) 的集对 $H(G_k, C_L)$ 、 $H(B_k, C_L)$ 并计算相应联系数, 结

表 6 1967—2018 年清流河流域蓝绿水分类结果

Table 6 Classification results of blue and green water resources in the Qingliu River Basin from 1967 to 2018

年份	绿水	蓝水	年份	绿水	蓝水
1967	特丰	特枯	1993	平	丰
1968	丰	特枯	1994	特枯	特枯
1969	枯	平	1995	丰	特枯
1970	特丰	枯	1996	枯	平
1971	丰	平	1997	丰	枯
1972	平	特丰	1998	丰	丰
1973	特枯	枯	1999	丰	枯
1974	平	平	2000	丰	枯
1975	特枯	特丰	2001	枯	特枯
1976	丰	枯	2002	特丰	枯
1977	丰	枯	2003	枯	特丰
1978	特枯	特枯	2004	特丰	枯
1979	特丰	特枯	2005	平	平
1980	枯	平	2006	特丰	平
1981	丰	枯	2007	平	平
1982	平	平	2008	丰	平
1983	平	平	2009	特丰	枯
1984	平	平	2010	枯	丰
1985	枯	平	2011	平	平
1986	平	枯	2012	特枯	枯
1987	特枯	特丰	2013	特丰	枯
1988	特丰	枯	2014	平	丰
1989	特枯	平	2015	枯	特丰
1990	丰	平	2016	枯	特丰
1991	特枯	特丰	2017	特枯	丰
1992	枯	特枯	2018	特丰	特丰

果见表 7。由表 6、表 7 可见, 总体上, $T_1 \sim T_4$ 时段绿水、蓝水资源量分别属于丰、平、丰、平类与枯、平、枯、平类。从丰枯类别角度来看, 绿水资源在 T_1 、 T_3 时段相对丰于 T_2 、 T_4 时段, 蓝水资源在 T_2 、 T_4 时段相对丰于 T_1 、 T_3 时段。 $T_1 \sim T_4$ 时段绿水、蓝水资源丰枯类别占比最大的类别分别为丰、平、丰、特丰类与特枯/枯、特枯、枯、平类。流域各时段内蓝绿水资源丰枯演变具有一定波动性, 1967—2018 年流域内绿水资源呈丰平交替演变趋势, 绿水资源相对丰富, 蓝水资源呈枯平交替演变趋势, 水资源量相对较枯。

表 7 $T_1 \sim T_4$ 时段各类别蓝绿水资源量联系数

Table 7 Connection number between various categories of blue and green water resources during $T_1 \sim T_4$ period

类别	绿水				蓝水			
	T_1	T_2	T_3	T_4	T_1	T_2	T_3	T_4
特枯	-0.37	-0.1	-0.48	-0.29	-0.12	-0.83	0.02	-0.56
枯	-0.21	0.21	-0.06	-0.02	0.29	0.23	0.33	-0.04
平	0.02	0.25	0.19	0.08	0.08	0.48	0.13	0.31
丰	0.13	-0.1	0.27	-0.06	-0.37	-0.02	-0.21	0.25
特丰	-0.08	-0.5	-0.13	-0.17	-0.58	-0.42	-0.58	-0.10

4 结论

a. 率定期 SWAT 模型模拟结果的 R^2 、 N_{SE} 、 P_B 分别为 0.88、0.86、-10.36%, 验证期分别为 0.82、0.80、-17.96%, 说明 SWAT 模型在清流河流域具有较好的适应性, 可用以进行流域蓝绿水时空分布规律的分析。

b. 1966—2018 年清流河流域绿水资源、蓝水资源、绿水系数的多年平均值为 611.7 mm、337.5 mm、64.5%。空间分布上, 绿水资源从流域西北向东南部先减后增, 蓝水资源从流域东南向西北递减, 绿水系数由从流域西北向东南先减后增。厄尔尼诺和拉尼娜事件影响时段清流河流域绿水资源均高于多年平均值, 为 623.7、681.4 mm; 蓝水资源均低于多年平均值, 为 221.8、199.3 mm; 绿水系数均高于多年平均值, 为 73.8%、77.4%; 1966—2018 年, 清流河流域绿水、蓝水资源分别呈不显著上升与显著上升趋势, 绿水系数的年际变化呈显著下降趋势, 蓝绿水的分布模式表现为流域中蓝水资源与绿水资源比值逐渐上升。

c. 厄尔尼诺和拉尼娜事件影响时段内清流河流域蓝水资源均属于枯类, 绿水资源属于丰类和平类; 清流河流域蓝水资源在 1967—1979 年、1980—1992 年、1993—2005 年、2006—2018 年 4 个时段分别属于枯、平、枯、平类, 绿水资源分别属于丰、平、丰、平类, 表明清流河流域蓝绿水资源丰枯演变具有一定波动性。

参考文献:

- [1] HOEKSTRA A Y. Water scarcity challenges to business [J]. Nature Climate Change, 2014, 4 (5) : 318-320.
- [2] 李轶, 万芬芬, 张文龙. 长三角地区工业园区水资源高效利用的发展趋势与策略 [J]. 淮海大学学报(自然科学版), 2023, 51 (3) : 1-9. (LI Yi, WAN Fenfen, ZHANG Wenlong. Development trend and strategy of efficient utilization of water resources for industrial parks in Yangtze River Delta Region [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2023, 51 (3) : 1-9. (in Chinese))
- [3] 王乐扬, 张建云, 宁忠瑞, 等. 环境变化对澜沧江出境水文过程变异的影响 [J]. 水科学进展, 2024, 35 (2) : 313-324. (WANG Yueyang, ZHANG Jianyun, NING Zhongrui, et al. Impact of environmental changes on variability of outlet hydrological process of the Lancang River basin [J]. Advances in Water Science, 2024, 35 (2) : 313-324. (in Chinese))
- [4] 王国庆, 张建云. 环境变化的径流效应研究进展及黄河水源涵养区研究展望 [J]. 水资源保护, 2024, 40 (2) : 1-8. (WANG Guoqing, ZHANG Jianyun. Research progress on runoff effects of environmental changes and prospects for research on the Yellow River water source conservation area [J]. Water Resources Protection, 2024, 40 (2) : 1-8. (in Chinese))
- [5] 杨大文, 雷慧闽, 丛振涛. 流域水文过程与植被相互作用研究现状评述 [J]. 水利学报, 2010, 41 (10) : 1142-1149. (YANG Dawen, LEI Huimin, CONG Zhentao. Overview of the research status in interaction between hydrological processes and vegetation in catchment [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2010, 41 (10) : 1142-1149. (in Chinese))
- [6] LIU Junguo, ZEHNDER A J B, YANG Hong. Global consumptive water use for crop production; the importance of green water and virtual water [J]. Water Resources Research, 2009, 45 (5) : W05428.
- [7] FALKENMARK M. Freshwater as shared between society and ecosystems: from divided approaches to integrated challenges [J]. Philosophical Transactions of the Royal Society B, Biological Sciences, 2003, 358 (1440) : 2037-2049.
- [8] HOFF H, FALKENMARK M, GERTEN D, et al. Greening the global water system [J]. Journal of Hydrology, 2009, 384 (3/4) : 177-186.
- [9] 程国栋, 赵文智. 绿水及其研究进展 [J]. 地球科学进展, 2006, 21 (3) : 221-227. (CHENG Guodong, ZHAO Wenzhi. Green water and its research progresses [J]. Advances in Earth Science, 2006, 21 (3) : 221-227. (in Chinese))
- [10] 林长清, 周天逸, 任立良, 等. 绿水评估方法研究进展 [J]. 水资源保护, 2014, 30 (3) : 85-89. (LIN Changqing, ZHOU Tianyi, REN Liliang, et al. Advances in methods for green water assessment [J]. Water Resources Protection, 2014, 30 (3) : 85-89. (in Chinese))
- [11] YAN Wenhui, LI Fawen, ZHAO Yong. Integrating reasonable proportion of blue and green water into land use planning: a new ecological perspective [J]. Ecohydrology, 2022, 15 (7) : e2459.
- [12] 李文婷, 杨肖丽, 任立良. 赣江流域气候和土地利用变化对蓝绿水的影响 [J]. 水资源保护, 2022, 38 (5) : 166-173. (LI Wenting, YANG Xiaoli, REN Liliang. Effects of climate and land use changes on blue and green water in the Ganjiang River Basin [J]. Water Resources Protection, 2022, 38 (5) : 166-173. (in Chinese))
- [13] SU Fengmei, LI Peiyue, HE Xiaodong, et al. Set pair analysis in earth and environmental sciences: development, challenges, and future prospects [J]. Exposure and Health, 2020, 12 (3) : 343-354.
- [14] 赵克勤. 集对分析及其初步应用 [M]. 杭州: 浙江科学技术出版社, 2000.
- [15] 周亮广, 金菊良, 周玉良, 等. 基于集对分析的江淮丘陵区农业水土资源匹配分析 [J]. 水资源保护, 2023, 39 (4) : 118-125. (ZHOU Lianguang, JIN Juliang, ZHOU Yuliang, et al. Matching of agricultural water and soil resources in Jianghuai Hilly Area based on set pair analysis [J]. Water Resources Protection, 2023, 39 (4) : 118-125. (in Chinese))
- [16] 周戎星, 金菊良, 崔毅, 等. 基于联系数集对势置信区间估计的旱灾风险分析模型 [J]. 水资源保护, 2023, 39 (1) : 73-78. (ZHOU Rongxing, JIN Juliang, CUI Yi, et al. Drought risk analysis model based on confidence interval estimation of connection number set pair potential [J]. Water Resources Protection, 2023, 39 (1) : 73-78. (in Chinese))
- [17] 金菊良, 李蔓, 周戎星, 等. 减法集对势法在河流生态健康评价与诊断中的应用 [J]. 水资源保护, 2022, 38 (1) : 198-204. (JIN Juliang, LI Man, ZHOU Rongxing, et al. Application of subtraction set pair potential method in river ecological health evaluation and diagnosis [J]. Water Resources Protection, 2022, 38 (1) : 198-204. (in Chinese))
- [18] LI Yutong, CAI Yanpeng, WANG Xuan, et al. Classification analysis of blue and green water quantities for a large-scale watershed of southwest China [J]. Journal of Environmental Management, 2022, 321 : 115894.
- [19] 罗剑锋, 陈敏, 李煜, 等. 两类 ENSO 事件对长江中下游地区季节降水的影响 [J]. 南水北调与水利科技, 2018, 16 (4) : 82-89. (LUO Jianfeng, CHEN Min, LI Yu, et al. Influence of the two types of ENSO events on seasonal precipitation over middle and lower reaches of the Yangtze River [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2018, 16 (4) : 82-89. (in Chinese))

- [20] 童凯,赵银军,胡宝清,等. 基于 SWAT 模型的典型厄尔尼诺/拉尼娜年广西北部湾南流江蓝绿水评估[J]. 水电能源科学, 2023, 41(10): 46-49. (TONG Kai, ZHAO Yinjun, HU Baoqing, et al. Assessment of blue/green water in typical El Niño/La Niña years in the Nanliu River Basin, beibu gulf based on SWAT model [J]. Water Resources and Power, 2023, 41(10): 46-49. (in Chinese))
- [21] 李发文,陶仁杰. 变化环境下子牙河流域水文过程影响要素分析[J]. 水资源保护, 2023, 39(5): 9-17. (LI Fawen, TAO Renjie. Analysis of factors influencing hydrological processes in the Ziya River Basin under changing environment [J]. Water Resources Protection, 2023, 39(5): 9-17. (in Chinese))
- [22] 吴佳,高学杰. 一套格点化的中国区域逐日观测资料及与其他资料的对比[J]. 地球物理学报, 2013, 56(4): 1102-1111. (WU Jia, GAO Xuejie. A gridded daily observation dataset over China region and comparison with the other dataset [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2013, 56(4): 1102-1111. (in Chinese))
- [23] 蔡涛. 基于 Mann-Kendall 方法的大凌河中上游 1956—2016 年降水变化特性分析[J]. 人民珠江, 2018, 39(11): 83-88. (CAI Tao. Analysis of precipitation variations in the middle and upper reaches of the Dalinghe river basin from 1956 to 2016 based on the Mann-Kendall method [J]. Pearl River, 2018, 39(11): 83-88. (in Chinese))
- [24] 李常斌,王帅兵,杨林山,等. 1951—2010 年洮河流域水文气象要素变化的时空特征[J]. 冰川冻土, 2013, 35(5): 1259-1266. (LI Changbin, WANG Shuaibing, YANG Linshan, et al. Spatial and temporal variation of main hydrologic meteorological elements in the Taohe river basin from 1951 to 2010 [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2013, 35(5): 1259-1266. (in Chinese))
- [25] 占杨英,汤军,高贤君,等. 二元驱动下泾河流域蓝绿水变化归因分析[J]. 中国农村水利水电, 2022(12): 93-100. (ZHAN Yangying, TANG Jun, GAO Xianjun, et al. Attribution analysis of blue-green water change in Jinghe River Basin driven by duality [J]. China Rural Water and Hydropower, 2022(12): 93-100. (in Chinese))
- [26] 吴振,徐丹丹,王开然,等. 主成分分析耦合集对分析的区域初始水权分配效果后评价[J]. 人民黄河, 2023, 45(10): 62-66. (WU Zhen, XU Dandan, WANG Kairan, et al. Post-evaluation for regional initial water rights allocation effect based on PCA and SPA [J]. Yellow River, 2023, 45(10): 62-66. (in Chinese))
- [27] 张金萍,王宇昊. 郑州市降雨-径流关系不确定性分析[J]. 水资源保护, 2021, 37(6): 1-6. (ZHANG Jinping, WANG Yuhao. Uncertainty analysis of rainfall-runoff relationship in Zhengzhou City [J]. Water Resources Protection, 2021, 37(6): 1-6. (in Chinese))
- [28] 李继清,郑威,李建昌,等. 基于集对分析的径流丰枯分析[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2019, 40(1): 16-26. (LI Jiqing, ZHENG Wei, LI Jianchang, et al. Runoff wetness-dryness analysis based on set pair analysis [J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition), 2019, 40(1): 16-26. (in Chinese))
- [29] 何旭,缪子梅,田佳西,等. 基于 CMIP 6 多模式的长江流域气温、降水与径流预估[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2024, 48(2): 1-8. (HE Xu, MIAO Zimei, TIAN Jiayi, et al. Temperature, precipitation and runoff prediction in the Yangtze River basin based on CMIP 6 multi-model [J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Science Edition), 2024, 48(2): 1-8. (in Chinese))
- [30] 赵宗慈,罗勇,黄建斌. 全球变暖和厄尔尼诺事件[J]. 气候变化研究进展, 2023, 19(5): 663-666. (ZHAO Zongci, LUO Yong, HUANG Jianbin. Global warming and El Niño events [J]. Climate Change Research, 2023, 19(5): 663-666. (in Chinese))

(收稿日期:2023-11-24 编辑:王芳)

(上接第 68 页)

- [19] ZHEN Nahui, RUTHERFURD I, WEBBER M. Ecological water, a new focus of China's water management [J]. Science of the Total Environment, 2023, 879: 163001.
- [20] BARRETT C R, MAURICE S. On a generalisation of the Gini coefficient [J]. Mathematical Social Sciences, 1995, 30(3): 235-244.
- [21] 吴宇哲,鲍海君. 区域基尼系数及其在区域水土资源匹配分析中的应用[J]. 水土保持学报, 2003, 17(5): 123-125. (WU Yuzhe, BAO Haijun. Regional Gini coefficient and its uses in analyzing to balance between water and soil [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2003, 17(5): 123-125. (in Chinese))
- [22] 刘欢,左其亭. 基于洛伦茨曲线和基尼系数的郑州市用水结构分析[J]. 资源科学, 2014, 36(10): 2012-2019. (LIU Huan, ZUO Qiting. Analysis of water consumption structure in Zhengzhou based on Lorenz curves and Gini coefficients [J]. Resources Science, 2014, 36(10): 2012-2019. (in Chinese))
- [23] 许继军,曾子悦. 适应高质量发展的南水北调工程水资源配置思路与对策建议[J]. 长江科学院院报, 2021, 38(10): 27-32. (XU Jijun, ZENG Ziyue. Towards high-quality development: ideas, strategies and suggestions for water resources allocation of the South-to-North Water Diversion Project [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2021, 38(10): 27-32. (in Chinese))

(收稿日期:2023-12-06 编辑:施业)