

DOI:10.11705/j.issn.1672-643X.2023.05.05

嘉陵江流域潜在蒸散发时空演变特征及其影响因素

赵宾华^{1,2}, 马方铭¹, 李占斌¹, 李鹏^{1,2}, 黄金华¹, 高蓓³, 孙虎¹

(1. 西安理工大学 省部共建西北旱区生态水利国家重点实验室, 陕西 西安 710048; 2. 旱区生态水文与灾害防治
国家林业局重点实验室, 陕西 西安 710048; 3. 西安市水利规划勘测设计院, 陕西 西安 710054)

摘要: 为研究嘉陵江流域潜在蒸散发 (ET_0) 的时空格局变化特征以及变化气候条件对流域潜在蒸散发量的影响, 选择 45 个国家气象测站的 1970—2019 年逐日气象数据计算 ET_0 , 采用线性倾向率、Mann-Kendall 趋势检验和反距离加权插值分析时空变化特征, 通过敏感性分析和贡献率量化 ET_0 变化的主导因子, 用地理探测器分析其影响因子的交互作用。结果表明: 年尺度上, 嘉陵江流域平均气温以 $0.20\text{ }^\circ\text{C}/10\text{a}$ 的速率呈上升趋势, 相对湿度、平均风速和日照时数分别以 $0.239\%/10\text{a}$ 、 $0.048\text{ (m}\cdot\text{s}^{-1})/10\text{a}$ 和 $0.100\text{ (h}\cdot\text{d}^{-1})/10\text{a}$ 的速率下降。年 ET_0 以 $0.133\text{ mm}/10\text{a}$ 的速率减小, 春、冬季 ET_0 呈上升趋势, 夏、秋季相反, 空间上年 ET_0 整体北高南低。年 ET_0 变化主导因子为平均气温, 嘉陵江流域 ET_0 变化是多因子共同作用的结果, 平均气温和相对湿度交互作用下的空间解释度达到 68.4% 。研究结果可为研究区生态水文过程变化深入分析提供一定的科学依据。

关键词: 潜在蒸散发; 时空演变; 贡献率; 影响因素; 嘉陵江流域

中图分类号: P426.2

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2023)05-0043-09

Temporal and spatial evolution characteristics of potential evapotranspiration and its influencing factors in Jialing River Basin

ZHAO Binhua^{1,2}, MA Fangming¹, LI Zhanbin¹, LI Peng^{1,2}, HUANG Jinhua¹, GAO Bei³, SUN Hu¹

(1. State Key Laboratory of Eco-hydraulics in Northwest Arid Region of China, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 2. Key Laboratory of National Forestry and Grassland Administration on Ecological Hydrology and Disaster Prevention in Arid Regions, Xi'an 710048, China; 3. Xi'an Water Conservancy Planning Survey and Design Institute, Xi'an 710054, China)

Abstract: In order to study the spatio-temporal pattern of potential evapotranspiration (ET_0) in Jialing River Basin (JRB) and the influence of changing climate conditions on potential ET_0 in the basin, the daily meteorological data from 1970 to 2019 were collected from 45 national meteorological stations in JRB for the calculation of ET_0 . The spatio-temporal variation characteristics were analyzed by linear trend rate, Mann-Kendall trend test and inverse distance weighted (IDW) interpolation. The sensitivity analysis and contribution rate were used to quantify the leading factors influencing the change of ET_0 , and the interactions between the influencing factors were analyzed by the geographic detector. The results show that at the annual scale, the mean air temperature in the JRB increased at the rate of $0.20\text{ }^\circ\text{C}/10\text{a}$, while the relative humidity, average wind speed and sunshine duration decreased at the rates of $0.239\%/10\text{a}$, $0.048\text{ (m}\cdot\text{s}^{-1})/10\text{a}$ and $0.10\text{ (h}\cdot\text{d}^{-1})/10\text{a}$, respectively. Moreover, the annual ET_0 decreased at the rate of $0.133\text{ mm}/10\text{a}$, which increased in spring and winter, but decreased in summer and autumn. Spatially, annual ET_0 was higher in the north but lower in the south. In conclusion, the leading factor of annual ET_0 change was mean air temperature; however, the change of ET_0 in JRB was the result of the interactions of multiple factors, and the explanatory power of the interaction between mean air temperature and relative humidity reached 68.4% . The results can help understand the deep analysis of ecological and hydrological processes in the study area.

收稿日期: 2023-04-04; 修回日期: 2023-07-17

基金项目: 国家自然科学基金项目 (U2040208, 42007070); 陕西省教育厅重点实验室项目 (20JS100, 08JZ57)

作者简介: 赵宾华 (1990—), 男, 陕西宝鸡人, 博士, 讲师, 研究方向为流域生态水文水动力过程与水土保持。

Key words: potential evapotranspiration; spatio-temporal variation; contribution rate; influencing factor; Jialing River Basin

1 研究背景

水是关乎生态系统功能和人类社会福祉的重要自然资源,在全球干旱事件频发的影响下,水资源量的匮乏成为制约生态向好和社会可持续发展的一大挑战性因素,而潜在蒸散发作为水循环的关键部分,在不同影响因子的作用下,与降水共同决定着地区的干湿程度^[1]。因此,了解区域潜在蒸散发的时空格局演变及其驱动因子的变化,是解决全球气候变化背景下区域水资源问题的重要途径。

目前可采用多种方法或模型计算潜在蒸散发(ET_0),根据其估算机理主要分为温度法、辐射法、质量传输法和综合法等,不同的方法对输入资料的要求有所不同,部分学者对于不同估算方法在研究区域的适用性也做了一定的探讨^[2-4]。目前,联合国粮农组织(Food and Agriculture Organization of the United Nations, FAO)推荐的 Penman - Monteith 公式作为标准计算方法已得到广泛应用^[5-9],该公式引入空气动力学和冠层阻力系数,具有严格的物理基础,较全面地考虑了包括植物气孔导度和气象因素对蒸散发结果的影响作用,具有较高的精度和适用性。潜在蒸散发的时空变化受多种因子的影响,不同地区的地理位置差异及气候特征不同,导致各类型因子对潜在蒸散发的贡献程度也存在较大差异,Tang 等^[1]使用综合 Penman - Monteith 模型、基于辐射的 Priestley - Taylor 模型和基于温度的 Hamon 模型对 1975—2014 年西伯利亚大流域 ET_0 变化及驱动因素进行了综合分析,研究表明饱和水汽压差的增加和风速的减小对潜在蒸散发的贡献十分重要;Yang 等^[10]根据祁连山 5 个气象站的实测数据研究分析得出气象因子随海拔变化显著,净辐射敏感程度最高;毕彦杰等^[11]以京津冀地区为研究区域,分析得出 ET_0 整体呈下降趋势且春季减幅最为明显, ET_0 对相对湿度最为敏感,风速变化对京津冀地区 ET_0 变化的贡献最大。

本研究基于 Penman - Monteith 计算方法,选取长江支流中面积最大的嘉陵江流域内部及周边气象观测站点 1970—2019 年的逐日气象数据作为分析计算基础,以流域潜在蒸散发不同时空格局的演变特征以及平均气温、相对湿度、平均风速和日照时数 4 个气象因子对潜在蒸散发变化的影响为研究核心,量化了这些气象因子对潜在蒸散发的贡献率,并借助地理探测器分析了 4 个气象因子在空间上的交互作用,以期

为流域干旱研究和水资源规划利用提供一定的理论支撑,从而对长江流域水资源循环利用以及整个长江经济带的可持续发展起到推动作用。

2 数据来源与研究方法

2.1 研究区概况

嘉陵江流域(102.59°E ~ 109.02°E, 29.29°N ~ 34.47°N)面积为 $15.98 \times 10^4 \text{ km}^2$,干流全长 1 120 km,平均比降 2.05‰,是长江支流中面积最大的流域,发源于秦岭并自北向南流经陕西、甘肃、四川、重庆 4 省(市)纵贯四川盆地中部,流域内水资源丰富,支流众多,主要包括嘉陵江干流、渠江、涪江三大水系。流域大部分属亚热带湿润季风气候,四季分明,多年平均气温约为 10 °C,多年平均最高气温为 19.4 °C,多年平均最低气温为 4.3 °C。流域多年平均降水量为 912.8 mm,时空分配不均匀,整体上由西北至东南递增^[12]。流域形似扇形洪水向心汇聚,多年平均径流量约为 $700 \times 10^8 \text{ m}^3$,研究流域概况见图 1。

2.2 数据来源

本研究气象数据均来自中国气象数据网(<http://data.cma.cn>),通过剔除缺测或无观测数据较多的部分站点后选择嘉陵江流域内部及周边 45 个气象站点 1970—2019 年日气象数据,主要包括逐日平均气温、最高最低气温、相对湿度、平均风速、日照时数等。流域数字高程模型(digital elevation model, DEM)分辨率为 30 m,数据来源于地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn>)。

2.3 研究方法

2.3.1 潜在蒸散发计算 本研究采用联合国粮农组织(FAO)1998 年推出的修正 Penman - Monteith 公式进行潜在蒸散发估算,该式适用于任何研究区域及不同气候类型区的每日气象数据^[13],其表达式为:

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma\left(\frac{900}{T + 273}\right)u_2(e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad (1)$$

式中: ET_0 为潜在蒸散发量,mm/d; Δ 为饱和水汽压曲线斜率,kPa/°C; γ 为干湿常数,kPa/°C; u_2 为 2 m 高处风速,m/s; R_n 为净辐射,MJ/($\text{m}^2 \cdot \text{d}$); G 为土壤热通量,MJ/($\text{m}^2 \cdot \text{d}$),一般忽略不计; T 为日平均气温,°C; e_s 为饱和水汽压,kPa; e_a 为实际水汽压,kPa。

2.3.2 敏感性分析 本研究采用 McCuen^[14]引入

的 ET_0 对气象因子变化响应的敏感系数即气候敏感系数(潜在蒸散发量变化率与气象因子变化率之比),分析嘉陵江流域潜在蒸散发对气象因子的敏感性,其表达式为:

$$Sx_i = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{\Delta ET_0 / ET}{\Delta x / x} = \frac{\partial ET_0}{\partial x_i} \cdot \frac{x_i}{ET_0} \quad (2)$$

式中: ET_0 为潜在蒸散发量,mm/d; Sx_i 为 ET_0 对各气象因子 x_i 的敏感系数,无量纲,用于评估不同气象因子对 ET_0 的影响程度。当 Sx_i 为正时表明 ET_0 与影响因子 x_i 保持一致的变化趋势,当 Sx_i 为负时表明 ET_0 与影响因子 x_i 为相反的变化趋势,| Sx_i | 越大表明影响因子对 ET_0 的影响等级越高。

2.3.3 气象因子贡献率计算 本研究采用因子贡

献率表示气象因子变化所引起的 ET_0 变化,即将气象因子的敏感系数与该因子的多年相对变化率相乘。当贡献率为正(负)时表明该气象因子对 ET_0 的贡献为正(负)向作用,即会引起 ET_0 的增加(减少),贡献率的绝对值可以表示出由该因子的相对变化所引起的 ET_0 变化,其表达式为^[15]:

$$Con_{x_i} = Sx_i \cdot RC_{x_i} \quad (3)$$

$$RC_{x_i} = \frac{n \cdot a_{x_i}}{|\bar{x}_i|} \times 100\% \quad (4)$$

式中: Con_{x_i} 为气象因子 x_i 对 ET_0 变化的贡献率; Sx_i 为 ET_0 对气象因子 x_i 的敏感系数; RC_{x_i} 为气象因子 x_i 的多年相对变化率,% ; n 为样本序列长度; a_{x_i} 为气象因子多年线性倾向率; \bar{x}_i 为气象因子的多年平均值。

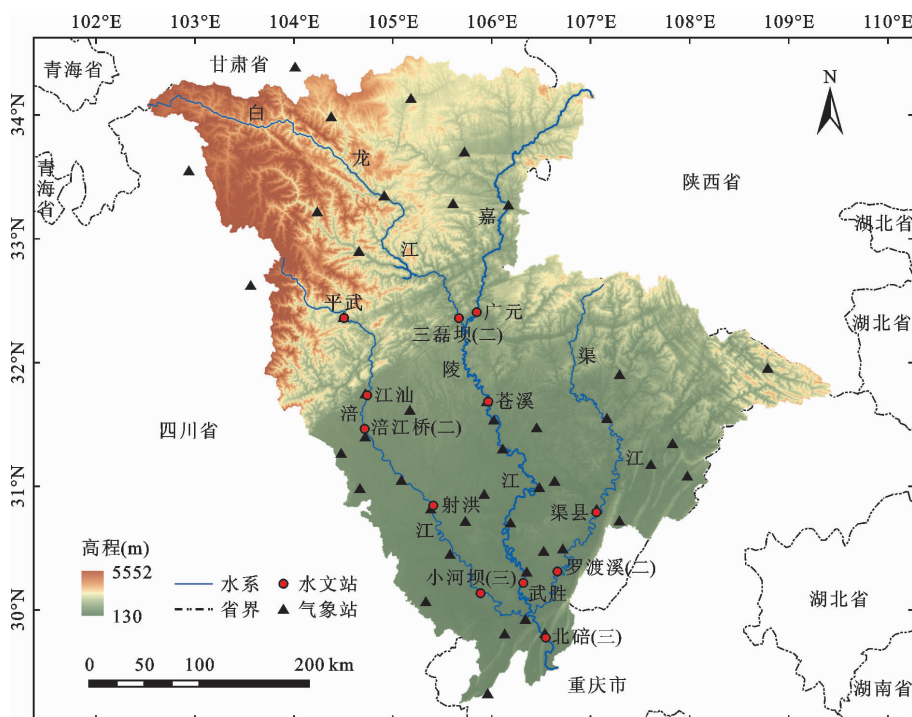


图 1 嘉陵江流域概况

2.3.4 地理探测器 地理探测器包括因子、风险、交互作用和生态探测器 4 种^[16]。可以利用其中的交互作用探测器计算得到各单因子及两因子相互叠加后的 q 值,并且可以通过比较来分析选取的两因子间是否存在交互作用以及交互作用的大小、方向、线(非线性)性等。本研究借助交互作用探测器 q 统计量衡量因子的空间分异性,其公式为:

$$q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2}{N \sigma^2} = 1 - \frac{SSW}{SST} \quad (5)$$

$$SSW = \sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2 \quad (6)$$

$$SST = N \sigma^2 \quad (7)$$

式中: q 为自变量 x 对因变量的解释力,其取值范围为 0 ~ 1, q 值越大代表解释力越强; h 为自变量 x 的分层; N_h 和 N 分别为层内和区域内的单元数; σ_h^2 和 σ^2 分别为层内和全流域 Y 值的方差; SSW 和 SST 分别为层内和全流域的区域总方差。

3 结果与分析

3.1 嘉陵江流域气象因子时间变化特征

1970—2019 年嘉陵江流域年尺度和季节尺度不同气象因子的倾向率如表 1 所示。由表 1 可知,在年尺度上,除平均气温以 0.20 °C/10a 的倾向率显著上

升外,相对湿度、平均风速和日照时数均呈减小趋势,倾向率分别为0.239%/10a、0.048 (m·s⁻¹)/10a和0.100 (h·d⁻¹)/10a,在研究时间序列内流域整体上有变暖、变干的趋势。在季节尺度上,平均气温均呈上升趋势,春、冬两季的温度增幅相对较高;相对湿度

除秋季外其他季节均呈现下降趋势;平均风速虽在2000年左右有明显的转折点,但是整体波动范围集中在0.6~2.0 m/s,整体来说在四季均呈现减小趋势,尤其在春季变化更显著;日照时数除春季外其他季节均表现为减少趋势且变化幅度相差不大。

表1 1970—2019年嘉陵江流域4个气象因子的倾向率

时段	平均气温		相对湿度		平均风速		日照时数	
	倾向率/ (°C·(10a) ⁻¹)	Z值	倾向率/ (%·(10a) ⁻¹)	Z值	倾向率/ (m·s ⁻¹ ·(10a) ⁻¹)	Z值	倾向率/ (h·d ⁻¹ ·(10a) ⁻¹)	Z值
春季	0.30	3.83***	-0.473	-2.17*	-0.065	-3.90***	0.003	0.07
夏季	0.13	2.09	-0.308	-1.27	-0.040	-2.31*	-0.194	-2.29*
秋季	0.22	3.55***	0.111	0.69	-0.027	-1.76 ⁺	-0.131	-2.43*
冬季	0.23	2.76**	-0.250	-1.29	-0.015	-0.94	-0.071	-1.64
年平均	0.20	4.38***	-0.239	-2.01*	-0.048	-2.91**	-0.100	-2.43*

注:(1)根据时间尺度划分标准,3—5月划分为春季,6—8月划分为夏季,9—11月划分为秋季,12—次年2月划分为冬季;(2)Z值为Mann-Kendall(M-K)检验的统计量,“+”表示因子变化趋势通过90%的置信水平,“*”表示因子变化趋势通过95%的置信水平,“**”表示因子变化趋势通过99%的置信水平,“***”表示因子变化趋势通过99.9%的置信水平。

3.2 嘉陵江流域 ET₀ 时空变化规律

3.2.1 嘉陵江流域 ET₀ 时间变化特征 1970—2019年嘉陵江流域年 ET₀ 及不同季节 ET₀ 的变化过程分别如图2、3所示,ET₀ 变化 M-K 趋势检验结果见表2。分析图2、3可知,全流域 ET₀ 在年尺度上总体呈不显著减小趋势,根据 Pettitt 检验结果可知,在研究序列内 ET₀ 变化的突变点出现在1979年,1970—1979年 ET₀ 呈现减小趋势,1979年之后为增加趋势。流域多年平均 ET₀ 为895.75 mm,线性变化率为-0.133 mm/10a。季节尺度上夏季和秋季 ET₀ 分别以2.209、0.455 mm/10a的速率减少,春季和

冬季 ET₀ 均表现为上升趋势,多年倾向率分别为1.946和0.585 mm/10a。由表2可知,嘉陵江流域不同季节尺度上的 ET₀ 变化趋势均不显著。

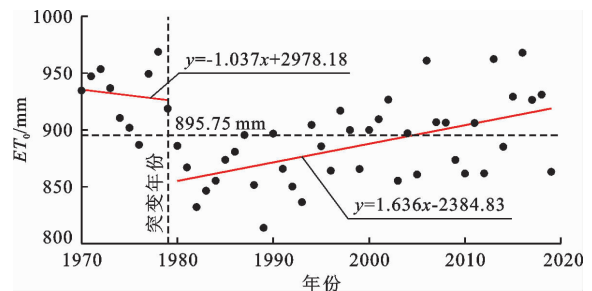


图2 1970—2019年嘉陵江流域年 ET₀ 变化过程

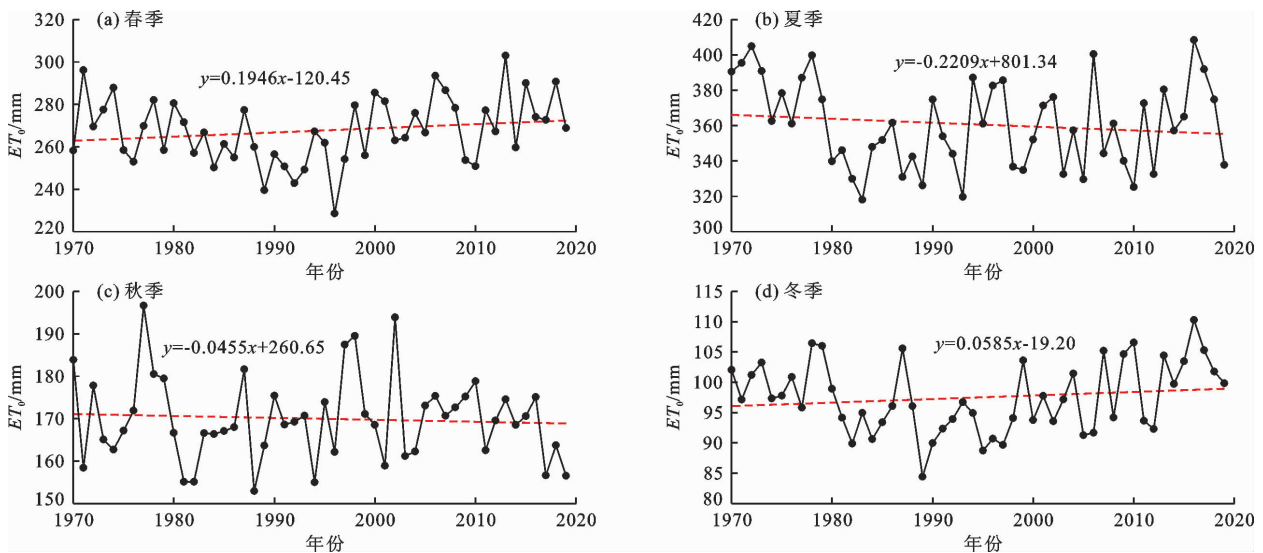


图3 1970—2019年嘉陵江流域不同季节 ET₀ 变化过程

表 2 1970—2019 年嘉陵江流域 ET_0 变化 M-K 趋势检验结果

时段	均值/ mm	倾向率/ (mm · (10a) ⁻¹)	Z 值
春季	263.5	1.946	1.10
夏季	357.4	-2.209	-0.95
秋季	167.9	-0.455	-0.02
冬季	95.6	0.585	0.57
年平均	884.5	-0.133	-0.17

3.2.2 嘉陵江流域 ET_0 空间变化规律 利用 ArcGIS10.5 平台,采用反距离加权 (inverse distance weight, IDW) 插值得到嘉陵江流域 ET_0 的空间分布。结果表明,1970—2019 年嘉陵江流域多年平均 ET_0 最高值为 1 061.4 mm,出现在北部陇南市武都区附近,

主要为以九寨沟县、武都区 and 文县形成的高值圈,多年平均最低值出现在东部城口县附近,为 805.3 mm,同时围绕 ET_0 高值圈形成以成县、文县等为代表的低蒸散发能力圈,流域多年平均 ET_0 分布整体上呈现北高南部低的特征,与流域高程分布大致相似,高值圈站点平均海拔高度超过 1 100 m。

1970—2019 年嘉陵江流域各季节多年平均 ET_0 空间分布如图 4 所示。图 4 表明,流域春、冬季 ET_0 分布规律与流域年 ET_0 分布规律较为一致,均为北部高南部低,而夏、秋季流域内 ET_0 分布规律整体上与其他季节相反。流域 ET_0 的最高值均出现在九寨沟县、武都区 and 文县附近,春、夏季流域 ET_0 最低值出现在东部城口县附近,秋、冬季流域 ET_0 最低值出现在北部成县附近。

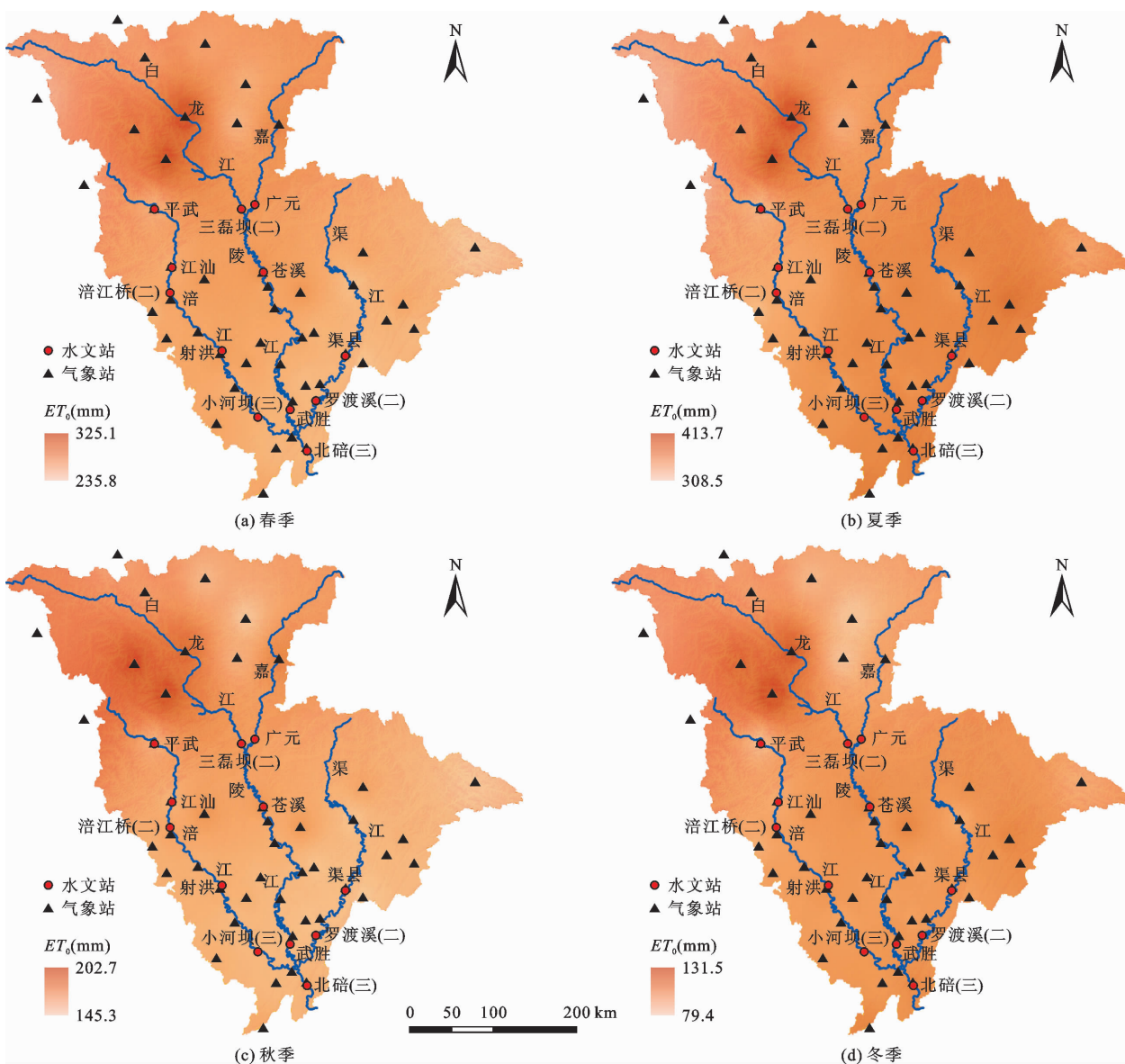


图 4 1970—2019 年嘉陵江流域各季节多年平均 ET_0 空间分布

3.3 ET_0 影响因子分析

计算得到的嘉陵江流域不同时间尺度 ET_0 对 4 个气象因子的敏感系数见表 3。由表 3 可以看出,除相对湿度敏感系数为负值外,平均气温、平均风速和日照时数的敏感系数均为正值,即 ET_0 与相对湿度呈负相关关系,与平均气温、平均风速和日照时数呈正相关关系。当流域呈现变湿趋势时潜在蒸散发有一定程度的下降,而增温会提升潜在蒸散发。在年尺度上,嘉陵江流域 ET_0 对相对湿度的敏感度较高(-0.505),其次为平均气温(0.402)和日照时数(0.171),而 ET_0 对风速变化的响应程度不高,敏感系数仅为 0.096。在季节尺度上,4 个因子在不同季节对 ET_0 的作用均保持一致,平均风速在春季、秋季的敏感系数与年平均敏感系数相一致,均为 0.09 左右;平均气温敏感系数夏季最高(0.554),冬季最低

(0.193);日照时数敏感系数夏季最高(0.269),而冬季 ET_0 对日照时数呈现弱敏感(0.073);相对湿度敏感系数四季变化较小,敏感系数最高和最低值分别出现在冬季(-0.648)和夏季(-0.343),整体上均表现为较高敏感性。

表 3 嘉陵江流域不同时间尺度 ET_0 对 4 个气象因子的敏感系数

时段	平均风速	平均气温	日照时数	相对湿度
春季	0.098	0.432	0.197	-0.444
夏季	0.060	0.554	0.269	-0.343
秋季	0.085	0.426	0.143	-0.588
冬季	0.143	0.193	0.073	-0.648
年平均	0.096	0.402	0.171	-0.505

利用反距离加权插值得到嘉陵江流域 ET_0 对各气象因子的敏感程度分布,如图 5 所示。

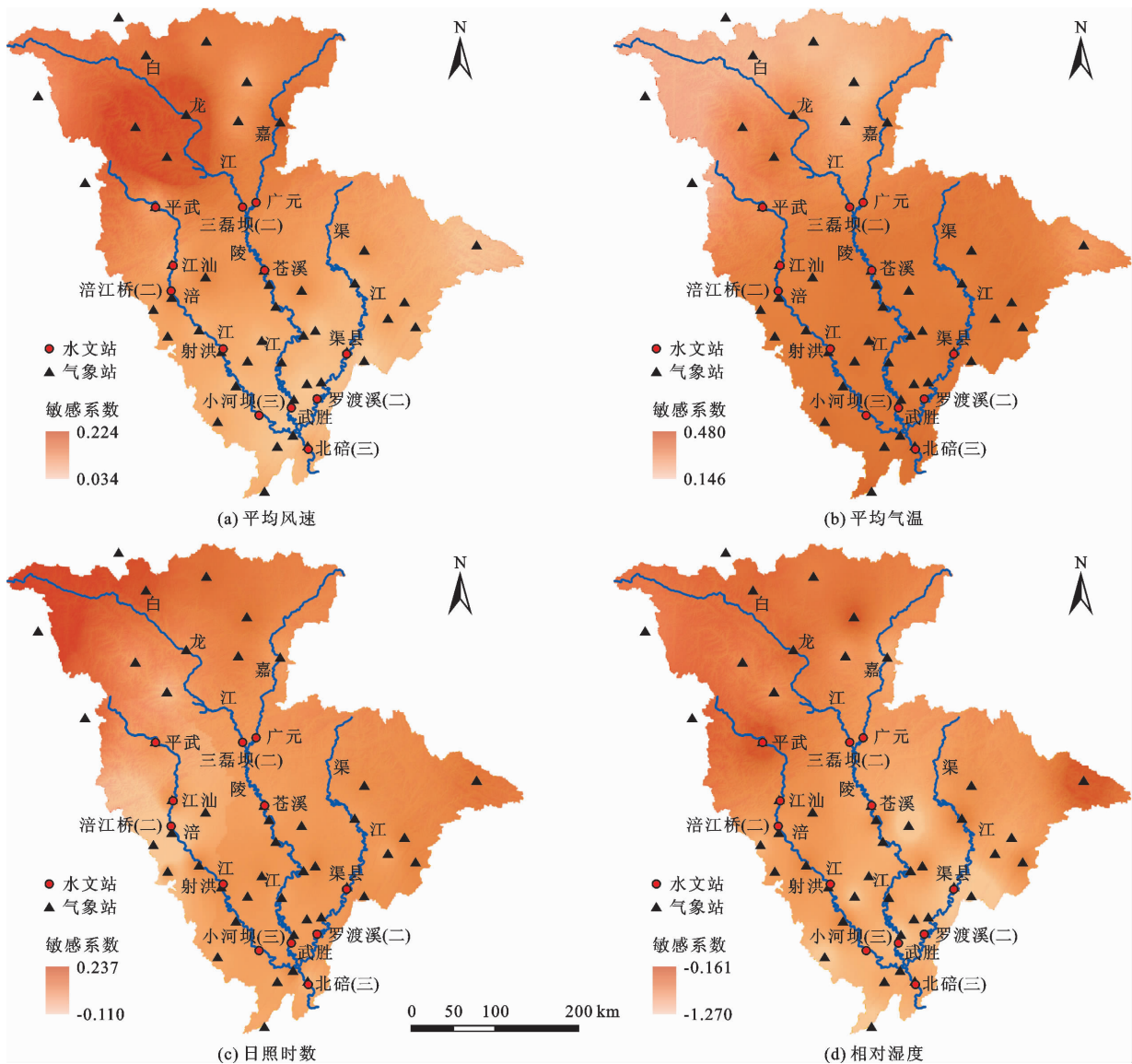


图 5 嘉陵江流域 ET_0 对各气象因子敏感系数的空间分布

由图 5 可以看出,流域内 ET_0 对不同因子变化的响应程度分布不一致。 ET_0 对平均风速的敏感程度较大值集中在九寨沟县、武都区 and 文县一带,敏感程度在流域内整体上由北部向南部呈递减趋势; ET_0 对平均气温的敏感性与对平均风速的敏感程度分布相反,呈现由南部向北部衰减的趋势,最低值(0.146)出现在若尔盖县附近地区,平武县以南地区平均气温敏感系数差别不大; ET_0 对日照时数的敏感程度变化幅度不大,相对湿度的敏感程度整体上分布较为一致,低值区域主要集中在流域内仪陇县以南。

3.4 ET_0 影响因子贡献率

贡献率计算有助于分析确定流域 ET_0 变化的主导因子,表 4 为嘉陵江流域气象因子对在不同时间尺度下 ET_0 的贡献率。由表 4 可以看出,年尺度和季节尺度下主导因子表现不一致。流域内年平均风速、平均气温、日照时数和相对湿度对 ET_0 的贡献率分别为 -1.72%、2.84%、-2.13% 和 0.81%,平均气温占据主导地位,其中平均气温和相对湿度对 ET_0 的变化起正向促进作用,而平均风速和日照时数对 ET_0 的变化与之相反,4 个因子的共同作用使流域潜在蒸散发呈现不显著的减小趋势。季节尺度上,平均风速对 ET_0 的变化在不同季节内均为负向作用,即该因子会引起 ET_0 的减小,各季节贡献率变化范围

为 -2.02% ~ -0.86%;平均气温均为正贡献,贡献率相对来说表现为春、冬季高(4.40%、4.86%)、而夏季较低(1.57%)的特征;日照时数贡献率在各季节变化程度较大,其中春季最低,为 0.06%,夏季最高,为 -4.81%,在夏季和秋季均为影响 ET_0 变化的主导因子;相对湿度在秋季对 ET_0 的贡献率为 -0.41%,整体贡献率在不同季节变化幅度不大。

表 4 嘉陵江流域 4 个气象因子在不同时间尺度下对 ET_0 的贡献率 %

时段	平均风速	平均气温	日照时数	相对湿度	总计
春季	-2.02	4.40	0.06	1.51	3.95
夏季	-0.86	1.57	-4.81	0.69	-3.41
秋季	-0.97	3.13	-2.93	-0.41	-1.18
冬季	-0.90	4.86	-0.90	1.13	4.19
年平均	-1.72	2.84	-2.13	0.81	-0.20

3.5 ET_0 影响因子交互作用

通过地理探测器中的交互作用探测可以识别并评估空间上不同气象因子同时作用时对 ET_0 的解释力相比于单个因子对 ET_0 的解释力是否有差异,通过判断两个自变量对因变量交互作用的类型(表 5),得到嘉陵江流域气象因子之间对 ET_0 空间分异性的解释力(图 6)。

表 5 因子交互作用类型

编号	判据	交互作用类型
1	$q(X_1 \cap X_2) < \min(q(X_1), q(X_2))$	非线性减弱
2	$\min(q(X_1), q(X_2)) < q(X_1 \cap X_2) < \max(q(X_1), q(X_2))$	单因子非线性减弱
3	$q(X_1 \cap X_2) > \max(q(X_1), q(X_2))$	双因子增强
4	$q(X_1 \cap X_2) = q(X_1) + q(X_2)$	独立
5	$q(X_1 \cap X_2) > q(X_1) + q(X_2)$	非线性增强

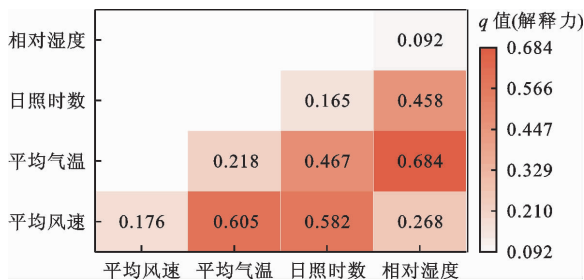


图 6 交互作用探测器对单、双因子作用 q 值计算结果

由图 6 可见,平均风速和相对湿度独立发挥作用时的 q 值分别为 0.176 和 0.092,交互作用下的 q 值为 0.268,分析可得其交互作用类型为双因子增强,说明平均风速和相对湿度交互作用的影响力均大于各单

一因子的影响力。其他因子两两交互作用的 q 值也均大于其单一作用下的 q 值之和,属于非线性增强类型,其中平均气温和相对湿度、平均风速、日照时数的交互作用相对于其单一作用下对 ET_0 的解释力大幅提高,分别达 68.4%、60.5% 和 46.7%,平均风速和日照时数交互作用的解释力为 58.2%,表明嘉陵江流域 ET_0 的变化是多因子共同作用的结果。

4 讨论

蒸散发是水文循环过程中的重要环节,以探究潜在蒸散发时空变化作为全面了解气候变化背景下区域水文气象变化的载体,对解决区域水资源短缺

及管理等问题意义重大。在本研究中,以嘉陵江流域若干气象站的实测气象数据为基础分析了流域气象要素的变化特征,并基于 Penman - Monteith 公式计算了嘉陵江流域长序列的潜在蒸散发量。得出“在 1970—2019 年随着嘉陵江流域平均气温以 $0.02\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{a}$ 的速率升高,潜在蒸散发变化以 1979 年为突变点、在高-低-高变化趋势下整体却以 $0.133\text{ mm}/10\text{a}$ 的速度减少”的结论,这与吕明权等^[17]的研究结果相一致,说明在全球增温背景下,虽然变暖后的大气能够容纳更多的水分,从而导致潜在蒸散发量更高,但是实际研究中全球部分区域的潜在蒸散发变化速率却在减小^[18-20],嘉陵江流域同样也存在“蒸发悖论”现象。同时,Herath 等^[21]对嘉陵江流域的研究也表明年潜在蒸散发呈现微弱的减小趋势,而在流域空间上呈现北部最高、西部最低的分布特征,本研究中潜在蒸散发在空间上的分布与流域平均高程的分布较一致,存在北部高、南部低的分布特征,这与该学者的研究结论基本一致。

关于影响潜在蒸散发变化的驱动因素,在本研究中通过敏感系数及贡献率分析量化了不同气象因子的敏感程度,发现 1970—2019 年嘉陵江流域年潜在蒸散发变化的主导因子为平均气温,刘昌明等^[22]对中国十大流域片区的潜在蒸散发进行了相关研究,结果表明长江流域片区的潜在蒸散发对最高气温最为敏感,吕明权等^[17]也认为 1982 年后随着气候变暖,温度上升也成为了影响嘉陵江流域潜在蒸散发的主导因子。正如不同计算模型的输入资料所表现得一样,驱动潜在蒸散发变化的因素不仅包括气温、风速、水汽压和辐射等,植被变化以及水-能-植被间的相互作用也值得研究,例如杨铭珂等^[23]分析了黔中地区 1995—2015 年的土地利用结构变化情况,认为草地以及耕地向林地转移会使潜在蒸散发增大,林地、草地以及耕地向建设用地、未利用地转移会使潜在蒸散发减小;Xu 等^[24]以黄河上游地区为研究区分析了流域长期蒸散发变化特征,认为气温和风速是潜在蒸散发减少的主要驱动因素,同时植被绿化也是影响蒸散发的主要因子。而本文仅分析讨论了 4 个气象因子对潜在蒸散发的影响,对于其他可能影响潜在蒸散发时空变化格局的因素还有待进一步深入研究。

5 结 论

(1)1970—2019 年 4 个气象因子除平均气温升高外,相对湿度、平均风速和日照时数均呈下降趋

势。流域年潜在蒸散发以 $0.133\text{ mm}/10\text{a}$ 的速率呈不显著下降趋势,突变点发生在 1979 年。季节尺度上春季和冬季 ET_0 呈上升趋势,夏季和秋季呈下降趋势。空间上,年 ET_0 分布北高南低,变化范围为 $805.3\sim 1\,061.4\text{ mm}$ 。

(2)年尺度上潜在蒸散发对相对湿度最为敏感(敏感系数 -0.505),平均气温次之(敏感系数 0.402),其次是日照时数(敏感系数 0.171)和风速(敏感系数 0.096)。季节尺度上,在春、夏季对平均气温最敏感,在秋、冬季对相对湿度最敏感。流域内年平均气温、相对湿度、平均风速和日照时数对 ET_0 的贡献率分别为 2.84% 、 0.81% 、 -1.72% 和 -2.13% ,平均气温占据主导地位,多气象因子的共同作用引起了流域 ET_0 的下降趋势。

(3)平均气温和相对湿度交互作用下对潜在蒸散发的解释力达到 68.4% ,远大于二者独立发挥作用时的解释力,与贡献率分析中平均气温和相对湿度总贡献率值最大的结果相一致;平均气温和平均风速交互作用次之,解释力为 60.5% ;平均风速和日照时数交互作用的解释力为 58.2% 。

参考文献:

- [1] TANG Yin, TANG Qihong. Variations and influencing factors of potential evapotranspiration in large Siberian river basins during 1975—2014 [J]. Journal of Hydrology, 2021, 598: 126443.
- [2] 张晓琳,熊立华,林琳,等. 五种潜在蒸散发公式在汉江流域的应用[J]. 干旱区地理,2012,35(2):229-237.
- [3] 赵玲玲,夏军,许崇育,等. 六种基于能量的潜在蒸散发估算方法在海河流域的适用性[J]. 水电能源科学,2015,33(1):1-6.
- [4] 伍海. 多种陆面潜在蒸散发估算方法在中国的适用性初步研究[D]. 西安:西北大学,2020.
- [5] ZHANG Xuelei, XIAO Weihua, WANG Yicheng, et al. Sensitivity analysis of potential evapotranspiration to key climatic factors in the Shiyang River Basin [J]. Journal of Water and Climate Change, 2021, 12(7): 2875-2884.
- [6] 马小燕,朱晓雯,赵金涛,等. 1995—2015 年宁夏沿黄城市带蒸散发时空变化特征[J]. 水资源与水工程学报,2022,33(2):216-224.
- [7] 郭雯雯,黄生志,赵静,等. 渭河流域潜在蒸散发时空演变与驱动力量化分析[J]. 农业工程学报,2021,37(3): 81-89.
- [8] 钟巧,焦黎,李稚,等. 博斯腾湖流域潜在蒸散发时空演变及归因分析[J]. 干旱区地理,2019,42(1):103-112.
- [9] 姚天次,卢宏伟,于庆,等. 近 50 年来青藏高原及其周边地区潜在蒸散发变化特征及其突变检验[J]. 地球科

- 学进展,2020,35(5):534-546.
- [10] YANG Yong, CHEN Rensheng, SONG Yaoxuan, et al. Sensitivity of potential evapotranspiration to meteorological factors and their elevational gradients in the Qilian Mountains, northwestern China[J]. *Journal of Hydrology*, 2019, 568: 147-159.
- [11] 毕彦杰,赵晶,赵勇,等. 京津冀地区潜在蒸散量时空演变特征及归因分析[J]. *农业工程学报*, 2020, 36(5):130-140.
- [12] 杨军,张会兰,庞建壮. 嘉陵江流域降水集中度的时空变异与驱动因素研究[J]. *长江流域资源与环境*, 2021, 30(4):849-860.
- [13] ALLEN R G, PEREIRA L S, RAES D, et al. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements—FAO irrigation and drainage paper [M]. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1998.
- [14] MCCUEN R H. A sensitivity and error analysis of procedures used for estimating evapotranspiration[J]. *Journal of the American Water Resources Association*, 1974, 10(3): 486-497.
- [15] LI Chong, WU Pute, LI Xiaolei, et al. Spatial and temporal evolution of climatic factors and its impacts on potential evapotranspiration in Loess Plateau of Northern Shaanxi, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 589: 165-172.
- [16] 王劲峰,徐成东. 地理探测器:原理与展望[J]. *地理学报*, 2017, 72(1):116-134.
- [17] 吕明权,张磊,吴胜军. 嘉陵江流域参考蒸散的年际变化趋势及成因分析[J]. *水土保持研究*, 2019, 26(3): 77-85.
- [18] CONG Zhentao, YANG Dawen, NI Guangheng. Does evaporation paradox exist in China? [J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2009, 13(3): 357-366.
- [19] 韩松俊,王少丽,杨大文. 农业活动对中国区域“蒸发悖论”规律的影响[J]. *农业工程学报*, 2010, 26(10):1-8.
- [20] 姚天次,卢宏伟,于庆,等. 近50年来青藏高原及其周边地区潜在蒸散发变化特征及其突变检验[J]. *地球科学进展*, 2020, 35(5):534-546.
- [21] HERATH K I, YE Xuchun, WANG Jianli, et al. Spatial and temporal variability of reference evapotranspiration and influenced meteorological factors in the Jialing River Basin, China[J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 2018, 131(3-4): 1417-1428.
- [22] 刘昌明,张丹. 中国地表潜在蒸散发敏感性的时空变化特征分析[J]. *地理学报*, 2011, 66(5):579-588.
- [23] 杨铭珂,贺中华,任荣仪,等. 黔中地区潜在蒸散发的时空变化及对土地利用变化的响应[J]. *水资源与水工程学报*, 2021, 32(3):106-117.
- [24] XU Shiqin, YU Zhongbo, YANG Chuanguo, et al. Trends in evapotranspiration and their responses to climate change and vegetation greening over the upper reaches of the Yellow River Basin [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2018, 263: 118-129.

(上接第42页)

- [18] 李国平,延步青,王奕淇. 黄河流域污染治理的环境规制策略演化博弈研究[J]. *北京工业大学学报(社会科学版)*, 2022, 22(2):74-85.
- [19] 李正升,王俊程. 基于政府间博弈竞争的越界流域水污染治理困境分析[J]. *科学决策*, 2014(12):67-76.
- [20] 田应东,杨文胜,王亚萌,等. 电子优惠券营销市场参与主体决策行为演化博弈研究[J]. *软科学*, 2020, 34(8):123-132.
- [21] 张桂玉,丁继勇,乔然. 水资源配置PPP项目运营期风险管理行为博弈分析[J]. *水资源与水工程学报*, 2022, 33(3):58-64.
- [22] 杨苏,林浩东. 考虑公众参与的公共工程项目应急管理演化分析[J]. *运筹与管理*, 2021, 30(5):95-101.
- [23] 王仁超,陈宏运,毛三军,等. 长江大保护工程建设主体策略选择演化博弈研究[J]. *水资源与水工程学报*, 2023, 34(1):110-120.
- [24] 杨松,张言彩,王爱峰. 多主体参与下食品安全社会共治演化博弈稳定性研究[J/OL]. *中国管理科学*. (2022-04-01) [2023-02-25]. <https://doi.org/10.16381/j.cnki.issn1003-207x.2021.1008>.
- [25] LIU Jiaguo, WANG Xiaoye, TAN Zhijia, et al. A tripartite evolutionary game analysis of Japan's nuclear wastewater discharge[J]. *Ocean & Coastal Management*, 2021, 214: 105896.
- [26] 杨悦,刘翼,卢全莹,等. 河流水污染跨区域合作治理机制研究——基于三方演化博弈方法[J/OL]. *系统工程理论与实践*. (2023-01-06) [2023-05-18]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2267.N.20230106.1345.001.html>.
- [27] 杨志,牛桂敏,兰梓睿. 左右岸跨界水污染治理演化博弈与政策路径研究[J]. *中国环境科学*, 2021, 41(11): 5446-5456.
- [28] 李国平,王奕淇. 地方政府跨界水污染治理的“公地悲剧”理论与中国的实证[J]. *软科学*, 2016, 30(11):24-28.