

DOI: 10.20103/j.stxb.202309121970

庞金凤, 门宝辉. 嫩江流域生态干旱影响因素及其时空演变格局. 生态学报, 2024, 44(13): 5646-5657.

Pang J F, Men B H. Influencing factors of ecological drought in Nenjiang River Basin and its spatial and temporal evolution pattern. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(13): 5646-5657.

嫩江流域生态干旱影响因素及其时空演变格局

庞金凤, 门宝辉*

华北电力大学水利与水电工程学院, 北京 102206

摘要: 近几十年来, 嫩江流域湿地大面积萎缩、土地盐碱化严重, 干旱频发, 严重威胁生态安全、水环境安全和社会经济可持续发展。为量化嫩江流域干旱对生态系统的影响, 利用标准化生态缺水指数 (SEWDI), 结合旋转经验正交函数、累积和曲线和 Pearson 相关性分析法分析嫩江流域 1980—2017 年生态干旱的时空演变规律, 并利用游程理论提取生态干旱特征。结果表明: (1) 生态干旱与影响因子间的相关系数排序为相对湿度>归一化植被指数>径流>降水>气温, 其中生态干旱和相对湿度相关系数最大且大于 0.5, 呈现显著相关性, 其余因子的相关系数均小于 0.5, 呈现低度相关性; (2) 从 SEWDI 变化曲线上看, 1980—1999 年干湿交替呈现出一定的周期性, 生态干旱以轻旱和中旱为主, 总体呈加剧趋势; 2000—2017 年极端干旱和极端湿润事件频发, 生态干旱总体呈缓解趋势。从累积和曲线上看, 1980—1995 年为嫩江流域生态干湿状态的正常波动时期, 1996—2009 年为嫩江流域生态干旱期, 2012—2017 年为生态湿润期; (3) 生态干旱的干旱历时和烈度显示流域西南部严重程度较大, 长期干旱风险较高, 而流域北部干旱强度较大, 较易发生单次较为严重的短期干旱。

关键词: 生态干旱; 累积和曲线; 旋转经验正交函数; 嫩江流域; 干旱演变

Influencing factors of ecological drought in Nenjiang River Basin and its spatial and temporal evolution pattern

PANG Jinfeng, MEN Baohui*

College of Water Resources and Hydropower Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China

Abstract: In the past few decades, the wetlands in the Nenjiang River basin have shrunk significantly, with serious soil salinization and frequent droughts, posing a severe threat to ecological security, water environment safety, and socio-economic sustainable development. Consequently, these issues have presented a serious challenge to the ecosystem in the Nenjiang River basin, resulting in a significant impact on the ecological balance. To gain a better understanding of the impacts of drought on ecosystems in the Nenjiang River Basin, this study analyzed the spatial and temporal evolution of ecological drought in the Nenjiang River Basin from 1980—2017 using the standardized ecological water deficit index (SEWDI) combined with the rotated empirical orthogonal function, cumulative sum, and Pearson correlation analysis, and extracted ecological drought characteristics using the runs theory. The findings revealed the following: Firstly, the correlation coefficients between ecological drought and the influencing factors ranked as relative humidity > normalized difference vegetation index > runoff > precipitation > temperature. The correlation coefficients of ecological drought and relative humidity were the largest and greater than 0.5, showing significant correlation, while the correlation coefficients of the rest of the factors were less than 0.5, showing a low degree of correlation. Secondly, from the change curve of the standardized ecological water deficit index, the alternation of wet and dry from 1980 to 1999 showed periodicity, and the ecological

基金项目: 国家“十三五”重点研发计划专题(2016YFC0401406)

收稿日期: 2023-09-12; 网络出版日期: 2024-04-25

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: menbh@ncepu.edu.cn

drought was dominated by mild and moderate drought, with a general trend of intensification; The extreme drought and extreme wet events occurred frequently from 2000 to 2017, but with an overall mitigating trend. The cumulative sum analysis revealed that 1980—1995 was the ecological normal fluctuation period of ecological dry and wet status in the Nenjiang River basin, 1996—2009 was the ecological dry period, and 2012—2017 was the ecological wet period. Thirdly, the drought duration, severity and intensity characteristics of ecological droughts show large differences in different spatial compartments. The ecological drought duration and intensity showed that the southwest part of the basin was more severe, with a higher risk of long-term drought, while the north part of the basin was more drought-intensive, and was more susceptible to a single, more severe short-term drought. Therefore, since different regions experience varying degrees of ecological impact from drought, it is necessary to tailor drought mitigation measures to the specific characteristics and needs of each region. Consequently, this approach will enhance the effectiveness of ecological system protection and ensure the sustainable development of the respective areas.

Key Words: ecological drought; cumulative sum; rotated empirical orthogonal function; Nenjiang River Basin; drought evolution

联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)第六次报告指出^[1],在全球气候变暖加剧的大背景下,干旱频率和强度呈现增加趋势,水资源长期短缺引起的干旱可能导致土壤水分不足和地下水下降^[2],影响植物生长和物种更替^[3-5],从而改变生态系统的结构和功能^[6]。近年来,愈来愈多的学者聚焦于评估干旱的生态影响,生态干旱的概念也由此提出。Crausbay 等^[7]定义 21 世纪的生态干旱为由于间歇性的供水不足,导致生态系统超出其脆弱性阈值,影响生态系统服务,并触发人类和自然系统的反馈。我国学者粟晓玲等^[8]在此基础上提出生态干旱是由自然与人类活动引发的生态系统可获得的水量低于其需水阈值,影响生态系统服务,并在自然和/或人类系统中触发反馈。目前国内外学者针对生态干旱监测和评估的研究已经取得了一定的进展。如 Bradford 等^[9]基于 SOILWAT2 生态系统水平衡模型,结合年平均温度、年平均降水以及年均降水与潜在蒸散发的比值三个指标,来监测生态干旱的地理格局和变化趋势。Park 等^[10]基于河流鱼类生态系统生态流量,建立生态干旱监测指标。然而,基于水文、气象要素构建的生态干旱监测指标无法定量估计生态干旱。一些学者通过构建植被指数如植被状况指数^[11]、温度植被干旱指数^[12-13]等量化生态干旱。Chang 等^[14]基于降水量和潜在蒸散量之差得出生态系统的可用水量,构建归一化生态干旱指数来量化干旱的严重程度。Zhang 等^[15]基于蒸散发、气候和生态系统的直接联系,构建标准化蒸散差干旱指数来评估干旱对生态系统的影响,对比发现该指数比降水和温度指数更能突出气候干旱演变过程中的植被效应以及植被对干旱强度变化的响应。然而,由于植被对干旱的响应具有滞后性,只能反映生态系统的长期状态,忽略了生态系统对短期干旱的响应,例如,当存在温度适宜的短期降水时,土壤水分并不会立刻恢复,植被缺水 and 死亡可能仍在继续^[16]。基于植被生态用水量的供需平衡关系,Jiang 等^[17]提出的标准化生态缺水指数能够实时识别生态干旱事件,确定干旱特征以制定应对措施。研究表明^[18-20],该指数能够较好地描述中国区域生态干旱特征。

20 世纪 50 年代以来,嫩江流域源头区、嫩江平原等地区遭受大面积垦殖、毁林开荒,水文调蓄和水土保持功能显著降低,生态系统供水量与需水量间存在不平衡关系,极易造成生态缺水,从而引发生态干旱。目前,已有研究从气象、水文等角度分析嫩江流域的干旱分布特征及演变规律^[21-22],但无法揭示干旱影响生态系统的机制。近年来,有研究聚焦于干旱影响下嫩江流域植被的动态变化^[23],但无法实时监测生态系统用水量的供需平衡关系,反映生态干旱的演变规律。此外,干旱指数一般反映月、季或年尺度下的短期干湿交替变化,难以反映长期干湿期对单次干湿事件的影响^[24]。基于此,本研究以嫩江流域作为研究区域,构建 1980—2017 年标准化生态缺水指数序列,并结合旋转经验正交函数和游程理论分析该指数序列及其干旱特征的时空演变规律。此外,本研究利用 Pearson 相关系数分析生态干旱与气象水文影响因子间的相关关系,并利用累积和曲线识别嫩江流域生态干湿期。研究结果旨在为生态干旱和生态脆弱性的长期监测提供参考,为嫩江

流域应对气候变化和生态环境保护提供科学理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

嫩江发源于内蒙古境内的伊勒呼里山,主要流经内蒙古、吉林及黑龙江边界,全长约 1370km,是松花江的最大支流。嫩江流域位于我国松嫩平原的农牧交错带,面积约 29.7 万 km^2 ,占松花江流域总面积的 52%。流域地处全球气温变暖增幅最大的北方高纬度地带,属大陆性季风气候,夏季高温多雨,降水量可占全年降水量 70%以上,冬季寒冷干燥。根据地形地貌特征,嫩江流域可分为上、中、下游三段。嫩江流域上游森林密布,湿地众多,具有多个我国重点森林湿地自然保护区。嫩江中下游河网密布,有广阔的平原地带,是良好的农牧业产区。研究区区域概况如图 1 所示。

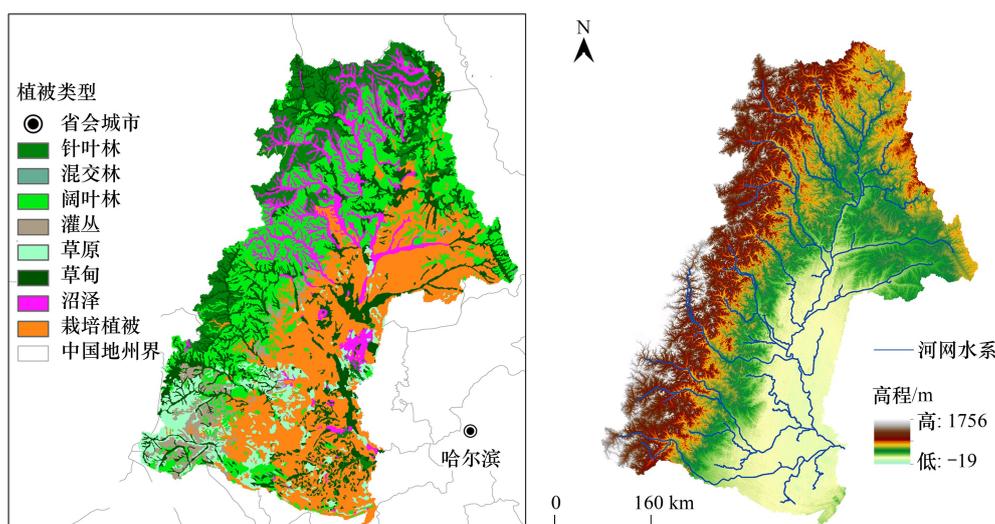


图 1 嫩江流域植被类型分布及区域概况

Fig.1 Distribution of Vegetation Types and regional overview of the Nenjiang River Basin

1.2 数据收集与处理

本文使用的 1980—2017 年 2m 风速、2m 处温度、降水、径流、相对湿度和太阳净辐射等数据来自于欧洲中期天气预报中心 (ECMWF) 的 ERA5 再分析数据集 (<https://cds.climate.copernicus.eu/>), 并采用双线性插值法将空间分辨率统一为 $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ 。本文采用的 1980 年、1990 年、2000 年、2010 年 30m 精度土地利用数据、归一化植被指数 NDVI 数据以及中国 100 万植被类型空间分布数据来源于中国科学院资源环境科学与数据中心 (<https://www.resdc.cn/>)。本文采用 1980—2017 年全球陆地实际蒸散发数据^[25] 来源于国家青藏高原科学数据中心 (<http://data.tpdc.ac.cn/>), 原始空间分辨率为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$, 双线性插值后分辨率为 $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ 。

1.3 研究方法

本研究首先计算标准化生态缺水指数 SEWDI, 并计算其与水文、气象因子间的 Pearson 相关系数。其次根据旋转经验正交函数计算所得载荷向量的空间分布对嫩江流域进行分区, 并分析各分区下 SEWDI 序列的年度变化特征及变化趋势。由于 SEWDI 序列只能显示了短期干旱或湿润情况, 本研究利用累积和曲线识别 SEWDI 的长期干旱期或湿润期及其转换, 从而更清晰的辨别单次干湿事件的影响。

1.3.1 标准化生态干旱指数

标准化生态缺水指数(standardized ecological water deficit index, SEWDI)是基于陆地生态系统中植被供水关系构建的反映生态干旱状况的指数^[17],采用植被的实际耗水量表征生态系统供水量,根据生态需水量与生态系统供水量之差得到生态系统缺水量。计算公式如下:

$$EWD = EWC - EWR \quad (1)$$

式中,EWD 代表生态缺水量,mm;EWC 代表生态耗水量,mm;EWR 代表生态需水量,mm。

根据联合国粮食与农业组织(FAO)的定义,在土壤水分、盐分、病虫害对植物生长或蒸发无限制的标准条件下,生态需水量在数值上可表示为最大植被蒸散发。本研究采用 FAO-56 推荐的单作物系数法计算植被生态需水量,其中作物参考蒸散发 ET_0 采用 FAO-56 推荐的 Penman-Monteith 法计算。参考 Jiang 等^[17] 的研究,根据 NDVI 值最大的月份及其前后两个月作为生长中期,生长初期为生长中期前一个月,生长后期为生长中期后一个月。嫩江流域每年 NDVI 值最大的月份均为每年 6 月,因此本文拟定生长初期为 3 月,生长发育期为 4 月,生长中期为 5—7 月,生长后期为 8—9 月。计算公式如下:

$$EWR = k_c \times ET_0 \quad (2)$$

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad (3)$$

$$k_c = k_{c(\text{tab})} + [0.04(u_2 - 2) - 0.004(RH_{\min} - 45)] \left(\frac{h}{3} \right) \quad (4)$$

式中, k_c 为作物系数,根据 FAO-56 确定 $k_{c(\text{tab})}$,并通过式 4 进行气象修正; Δ 为饱和水汽压曲线的斜率; R_n 为作物表面的净辐射, $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$; G 为土壤热通量, $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$; T 为 2m 处平均气温, $^{\circ}\text{C}$; u_2 为 2m 处风速 m/s ; e_s 为饱和水汽压, kPa ; e_a 为实际水汽压, kPa ; $e_s - e_a$ 为饱和水汽压差, kPa ; r 为湿度计常数, $\text{kPa}/^{\circ}\text{C}$ 。 RH_{\min} 为相对湿度, h 为植被株高。

SEWDI 指数干旱划分标准参考标准化降水蒸散发指数 SPEI。

表 1 生态干旱等级划分标准

Table 1 Ecological drought level classification standards

序号 Number	标准生态缺水指数值 SEWDI	干旱程度 Drought severity	序号 Number	标准生态缺水指数值 SEWDI	干旱程度 Drought severity
1	$-0.5 < \text{SEWDI}$	无旱	4	$-2.0 < \text{SEWDI} \leq -1.5$	重旱
2	$-1.0 < \text{SEWDI} \leq -0.5$	轻旱	5	$\text{SEWDI} \leq -2.0$	特旱
3	$-1.5 < \text{SEWDI} \leq -1.0$	中旱			

SEWDI: 标准化生态缺水指数值 Standardized ecological water deficit index

1.3.2 旋转正交经验函数

本研究采用旋转正交经验函数对 SEWDI 序列进行特征分区,以分析不同分区的生态干旱时空分布特征。经验正交函数(Empirical Orthogonal Function, EOF)是由 Pearson 等^[26]首次提出的能够分离气象变量场的时空变化,提取变量场主要特征的方法,其基本原理为将随时间变化的气象变量场分解为相互正交的空间模态和时间系数的组合,计算公式参考文献^[27]。然而,EOF 分离的空间分布结果无法清晰表示不同地理区域的特征。针对该问题,旋转经验正交函数(Rotated Empirical Orthogonal Function, REOF)在 EOF 的基础上对载荷特征向量场进行方差极大旋转变换,可以较好地反映不同地域的变化和相对分布状况,克服 EOF 的局限性,目前广泛应用于气候和气象^[28-30]、水文^[31]、海洋^[32-33]等学科以及干旱^[34-35]的研究中。

1.3.3 累积和曲线

为放大 SEWDI 序列中的微小变化,识别生态干旱的干湿变化期及其转换,本研究计算 SEWDI 序列累积和并绘制累积和曲线(Cumulative Sum, CUSUM)。累积和是一种通过信号的均值和方差来检测信号波动异常

值的统计方法,能够对突变点是否发生变化及发生时刻进行估计,在质量控制、故障检测、经济学和医学等领域应用广泛^[36-38]。累积和通过对微小变化的累积,放大微小波动对整个序列的影响,计算方法如下^[39]:

对于随机时间序列 $X = \{x(k)\}, k = 1, 2, \dots$, 其中

$$x(k) = \mu + A_k I(k < \tau) + (D + B_k) I(k \geq \tau) \quad (5)$$

式中, μ 为序列 X 的均值; A_k 和 B_k 均为随机变量; τ 为发生突变的时间; D 为均值变化量; β 为白噪声。

$$\begin{cases} g_0^+ = 0 \\ g_k^+ = \max(0, g_{k-1}^- + x_k - (\mu_0 + \beta)) \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{cases} g_0^- = 0 \\ g_k^- = \max(0, g_{k-1}^- - x_k + (\mu_0 - \beta)) \end{cases} \quad (7)$$

式中, g 为非参数化 CUSUM 算法中的统计函数; μ_0 为稳态下的均值; g_k^+ 和 g_k^- 分别代表在均值为 0 附近波动的随机变量。

2 结果与分析

2.1 生态干旱相关性分析

为比较生态干旱和气象水文因子间的变化关系,图 2 为 SEWDI 分别与气温(T)、降水(P)、相对湿度(RH)、径流(R)、归一化植被指数(NDVI)和生态需水量(EWD)各因子的 1980—2017 年变化,图 3 为 Pearson 相关性检验结果。由于时间序列较长,从图 2 中可以看出,1980—2017 年嫩江流域总体呈现除气温升高外,

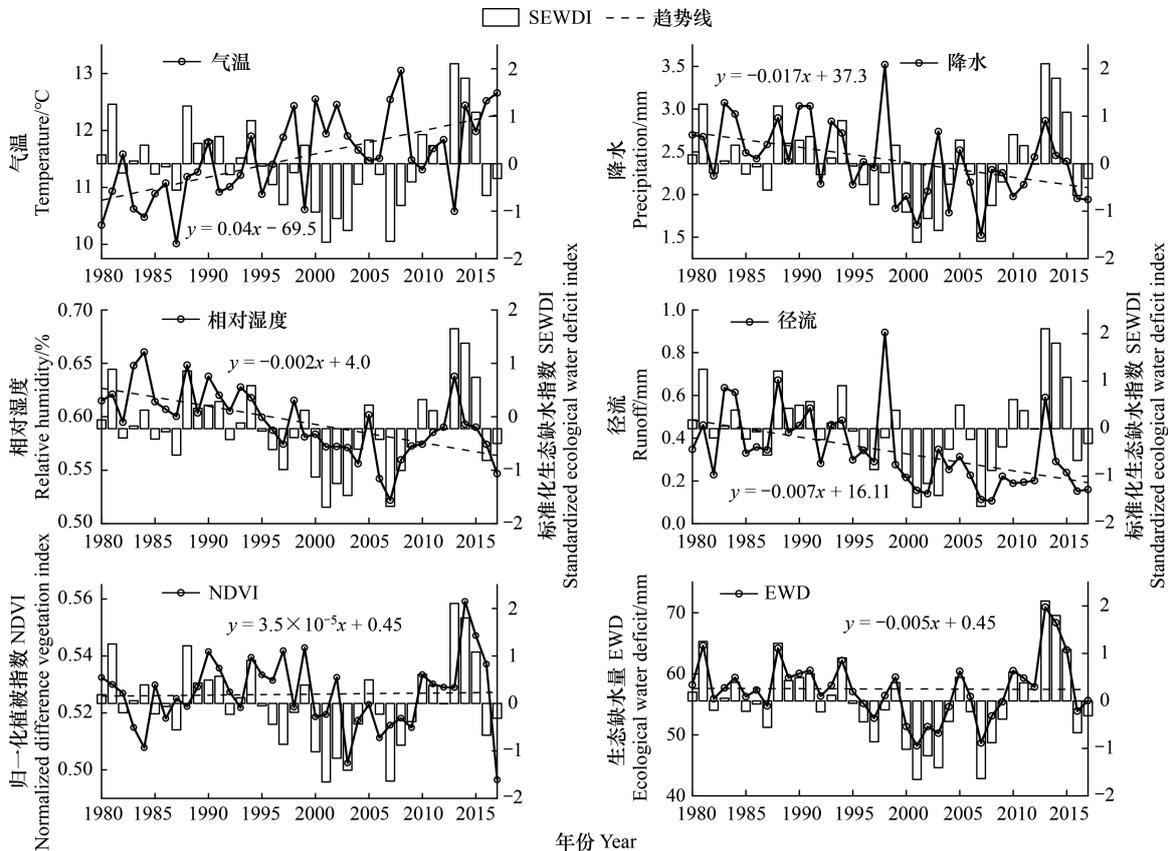


图 2 嫩江流域 SEWDI 与水文气象因子的年际变化

Fig.2 Interannual variability of SEWDI and hydrometeorological factors in the Nenjiang River Basin

SEWDI: 标准化生态缺水指数值 Standardized ecological water deficit index

其余因子如降水、相对湿度、归一化植被指数和生态需水量均呈减少趋势。其中,气温和降水的趋势线斜率最大,分别为 0.04 和 0.017。结合气温、降水与 SEWDI 的变化关系来看,年均气温高、降水量少的年份,往往同时伴有生态干旱的发生。根据 Pearson 相关性检验结果,各因子与 SEWDI 指数间的 Pearson 相关性分析排序为相对湿度>NDVI>径流>降水>气温,相关系数分别为 0.59、0.47、0.46、0.46、-0.36。相对湿度与 SEWDI 相关性系数大于 0.5,呈显著线性关系,其余相关系数均小于处于 0.3 至 0.5 之间,为低度线性关系。相对湿度与生态干旱相关最为密切,在较大程度上能够反映生态干旱。NDVI、径流和降水的相关系数接近,且均为正相关,说明这三个因子一定程度上能够反映生态干旱。而气温与 SEWDI 为负相关关系,说明随着气温的升高,SEWDI 降低,生态干旱呈加剧趋势。

2.2 生态干旱指数的时空特征

2.2.1 REOF 分区结果

为突出流域的干湿特征区的时空分布特征,本文基于 REOF 方法对嫩江流域年尺度下的 SEWDI 进行分解,得出嫩江流域干湿状况分布,表 2 显示了 REOF 分解后前 4 种模态的方差贡献率和累计方差贡献率。由表 2 可知,各旋转模态的方差贡献率呈现较为均匀的分布规律,4 个模态的累积方差贡献率为 60.2%,能够基本代表嫩江流域生态干旱指数的时空变化特征^[31,35]。其中,第一旋转模态的方差贡献率最大,为 19.4%,代表嫩江流域生态干旱指数最主要的信息。图 2 展示了各旋转模态的空间模态值的空间分布图。从图中可以看出,经过极大方差旋转后分离出的各空间模态在一块区域有高载荷区,其余区域空间模态值接近于 0。根据各模态的高载荷区分布特征,对 SEWDI 进行区域划分,结果如图 2 所示。分区 I 代表嫩江流域源区和上游地区,分区 II 为嫩江流域东部远离干流地区,分区 III 和 IV 基本可代表流域中游地区和下游地区。

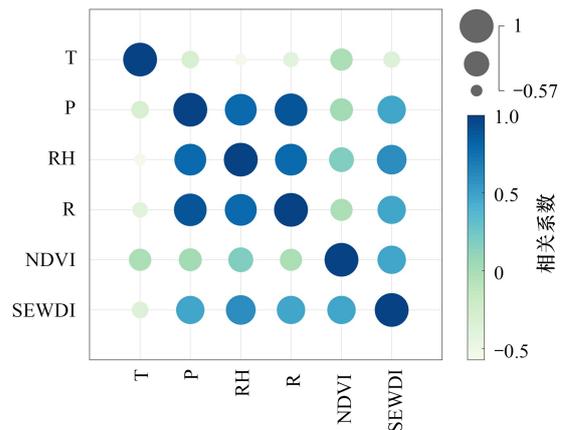


图 3 嫩江流域 SEWDI 与水文气象因子的相关关系
 Fig.3 Bubble plot of correlation between SEWDI and hydrometeorological factors in the Nenjiang River Basin
 T:气温; P:降水; RH:相对湿度; R:径流; NDVI:归一化植被指数; SEWDI:标准化生态缺水指数

表 2 SEWDI 序列分解后前 4 种模态的方差贡献率

Table 2 Variance contribution of the first four modes after decomposition of the SEWDI series

模态 Modal	方差贡献率/% Variance contribution	累计方差贡献率/% Cumulative variance contribution	模态 Modal	方差贡献率/% Variance contribution	累计方差贡献率/% Cumulative variance contribution
1	19.4	19.4	3	12.9	50.0
2	17.7	37.1	4	10.2	60.2

2.2.2 各分区下 SEWDI 序列时空变化特征

根据 REOF 分区结果,得出 1980—2017 年各分区的月尺度下 SEWDI 指数年际变化如图 5 所示。为进一步分析流域生态干旱的年际变化特征,图 6 为年尺度下 SEWDI 的时间变化图。21 世纪以来,嫩江流域多地区陆续被列入自然保护区,生态保护取得一定成效。因此,本文以 2000 年为分界点,将时间序列分为前期(1980—1999 年)和后期(2000—2017 年),并分别作前期和后期的变化趋势线,对比分析 2000 年前后流域生态干旱的演变趋势。

图 5 显示了四个分区的月尺度 SEWDI 值时间变化特征,对比发现各分区 SEWDI 值变化趋势较为类似,大部分时段下几乎同时出现序列的波峰或波谷。前期(1980 年—1999 年)生态干旱以轻旱和中旱为主,其中分区 II 和 IV 在 1982—1983 年间、分区 II 在 1990—1991 年间、分区 IV 在 1997—1998 年间均出现序列的波谷,

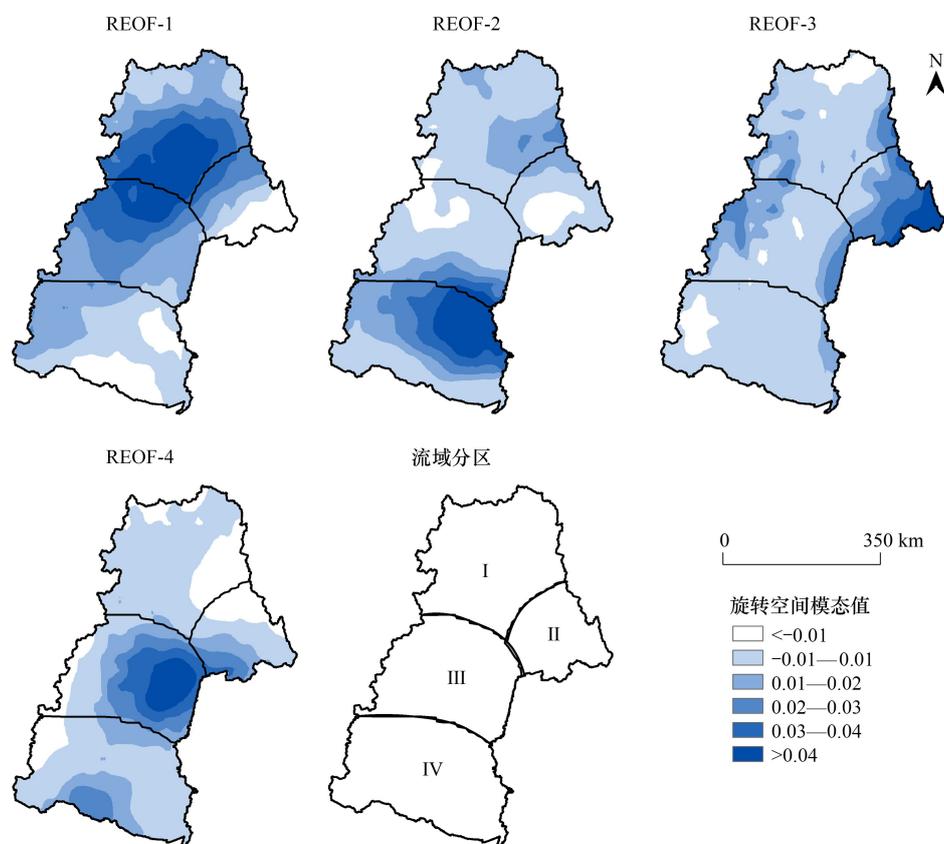


图4 嫩江流域前4个模态载荷向量空间分布及分区

Fig.4 Spatial distribution of the first 4 modal load vectors and regional division in the Nenjiang River Basin

REOF: 旋转正交经验函数

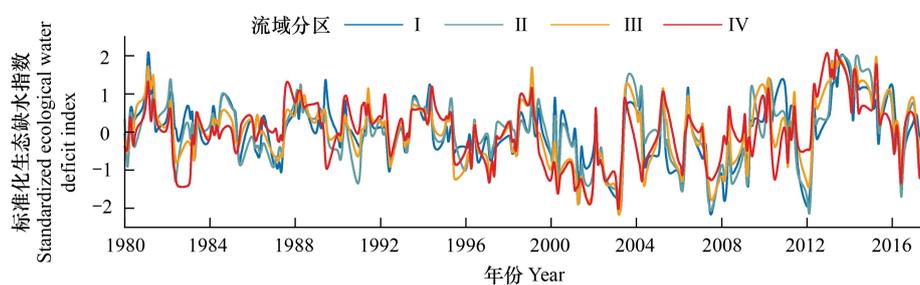


图5 月尺度下嫩江流域四个分区 SEWDI 的年内变化

Fig.5 Interannual variation of SEWDI in four subregions of the Nenjiang River Basin at monthly time scales

SEWDI 值为 -1.5 左右,说明对应分区在这些时段内可能发生中旱或重旱,且以分区IV持续时间最长。从图中可以看出,后期(2000年—2017年)嫩江流域生态干旱频率和严重性显著增加,尤其是发生重旱和特旱的频率明显增加。在2000年—2004年间,四个分区均发生多次不同程度的生态干旱。2003—2004年间,四个分区均出现 $SEWDI > -2$,即流域发生特旱。2007—2008年间以及2012—2013年间,流域内各分区出现不同程度的生态干旱,其中分区I和II均出现特旱,分区III重旱,分区IV中旱或轻旱。2012—2016年间,SEWDI值基本在0以上,流域出现频繁的极端湿润事件。以上结果表明,从月尺度上看,2000年以前,生态干旱指数SEWDI值基本上在0线上下波动,干旱程度较轻,而2000年后,SEWDI值波动显著增加,流域频繁出现极端干旱或

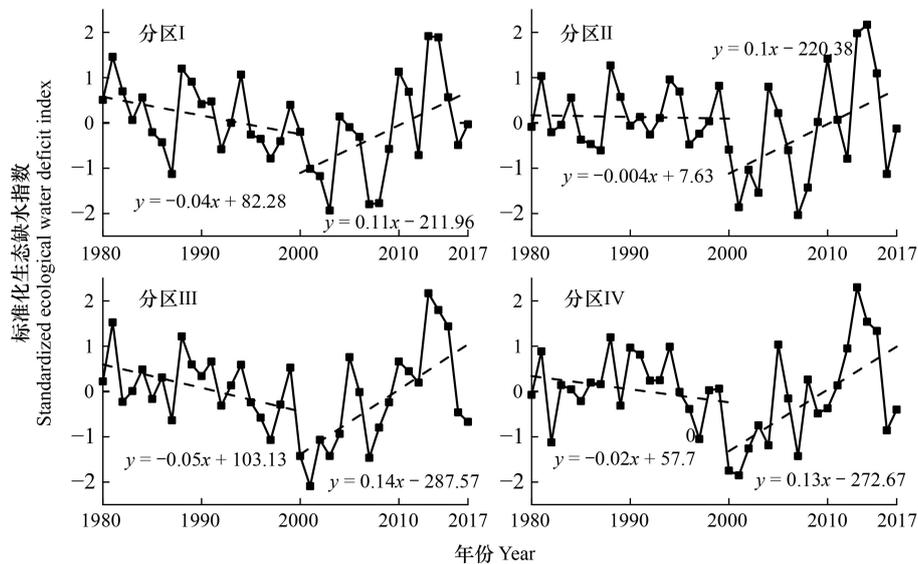


图6 年尺度下嫩江流域四个分区 SEWDI 的年际变化

Fig.6 Interannual variation of SEWDI in four subregions of the Nenjiang River Basin at annual time scales

极端湿润的情况。

从图6中可以看出,1980—1999年四个分区SEWDI指数呈现递减趋势,说明前期生态干旱主要呈现加剧的变化特征。2000—2017年嫩江流域90%的分区SEWDI指数趋势线为增加趋势,说明2000年后生态干旱总体有所缓解。从趋势线斜率上看,SEWDI序列的变化幅度存在前期分区Ⅲ>分区Ⅰ>分区Ⅳ>Ⅱ,后期分区Ⅲ>分区Ⅳ>分区Ⅰ>分区Ⅱ的分布特征。然而,总体趋势分析忽略了序列极值对分析结果的影响,而SEWDI值的大小只能反映单次干旱的特征,忽略了微小变化的累加影响,无法反映流域整体的干湿变化,难以准确代表干旱的影响性。例如,当流域处在较长的湿润期时,短期干旱的发生可能不会改变流域地表径流和土壤水分。反之,当流域长期处于干旱期时,短期湿润对流域干旱的影响较小,但轻旱或中旱对流域干旱的影响将被放大。因此,利用累积和曲线识别干旱开始前流域的干湿状况,对于确定流域发生干湿变化的时间,提高干旱监测的准确性具有重要意义。

从累积和曲线(图7)上看,1980—1995年间SEWDI累积和曲线在0线上下波动,说明SEWDI值处于正常波动状态,流域没有明显的偏湿或偏干特征。1995年后曲线开始下降,表明生态干旱期开始。1996—2009年间,虽然曲线在2004—2006年间有短暂的上升期,但总体仍以下降为主,说明该时段下流域生态总体出现偏干趋势。2009年—2012年流域出现短暂的湿润期后转变为干旱期,直到2012年,流域持续较长的时间均表现为偏湿润特征。因此,1996—2009年是嫩江流域的生态干旱期,2010—2012年为转折期,2012—2017年为生态湿润期。以上结果表明,累积和曲线能够更进一步地观察到SEWDI序列的持续变化,以及微小变化对整个序列的影响,从而进一步识别嫩江流域生态干旱的持续性,以及干湿期间的转换。

2.3 生态干旱特征

为进一步研究生态干旱的干旱特征及其空间分布,本研究采用游程理论提取嫩江流域生态干旱历时、干旱强度和干旱烈度。干旱历时代表生态干旱开始至结束的持续时间;干旱烈度和干旱强度分别代表干旱发生

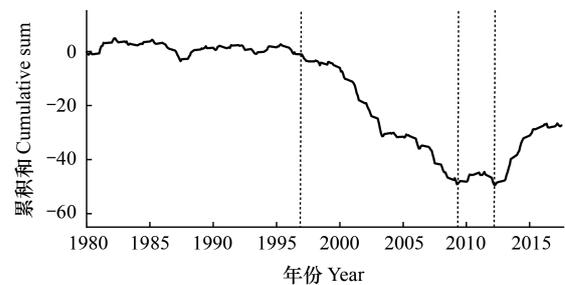


图7 嫩江流域 SEWDI 的累积和曲线

Fig.7 Cumulative Sum of SEWDI in the Nenjiang River Basin

的严重性以及干旱的强度,其值越大代表该区域生态干旱越严重。各分区的平均干旱历时、平均干旱强度、平均干旱烈度空间分布特征如图 8 所示,后期干旱特征较前期变化比例如图 9 所示。

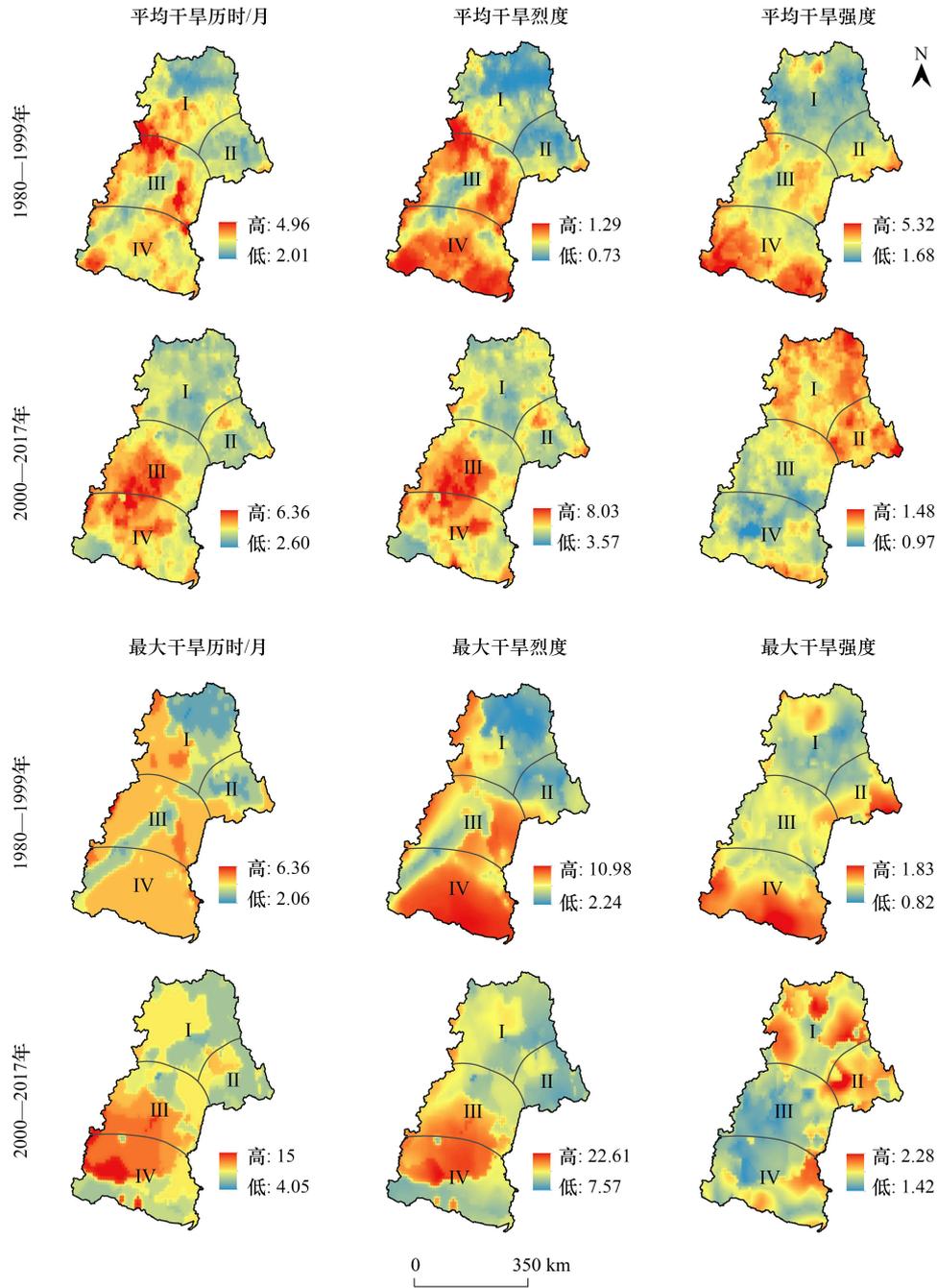


图 8 嫩江流域生态干旱特征的空间分布

Fig.8 Spatial distribution of ecological drought characteristics in the Nenjiang River Basin

图 8 显示了 1980—2017 年嫩江流域生态干旱特征。从图中可以看出,干旱烈度与干旱历时的空间分布特征基本一致,流域南部Ⅲ区和Ⅳ区的干旱历时和干旱烈度均大于北部Ⅰ区和Ⅱ区,且干旱强度较大的区域位于Ⅳ区南部,说明生态干旱的严重性呈现流域北部<南部的特点。从图 8 显示的 2000—2017 年嫩江流域生态干旱特征中可以看出,2000—2017 年嫩江流域基本也呈现流域生态干旱严重性北部<南部的特点。与前期不同的是,后期流域南部干旱强度明显降低,甚至低于流域北部,而流域北部干旱强度基本不变。对比前期和

后期生态干旱特征的空间分布,发现 2000 年后流域干旱历时和干旱烈度均有不同幅度的增加。嫩江流域生态干旱最长时间达近 15 个月,最大干旱烈度达 22.61,均位于Ⅳ区的中部,发生于 2000—2017 年。

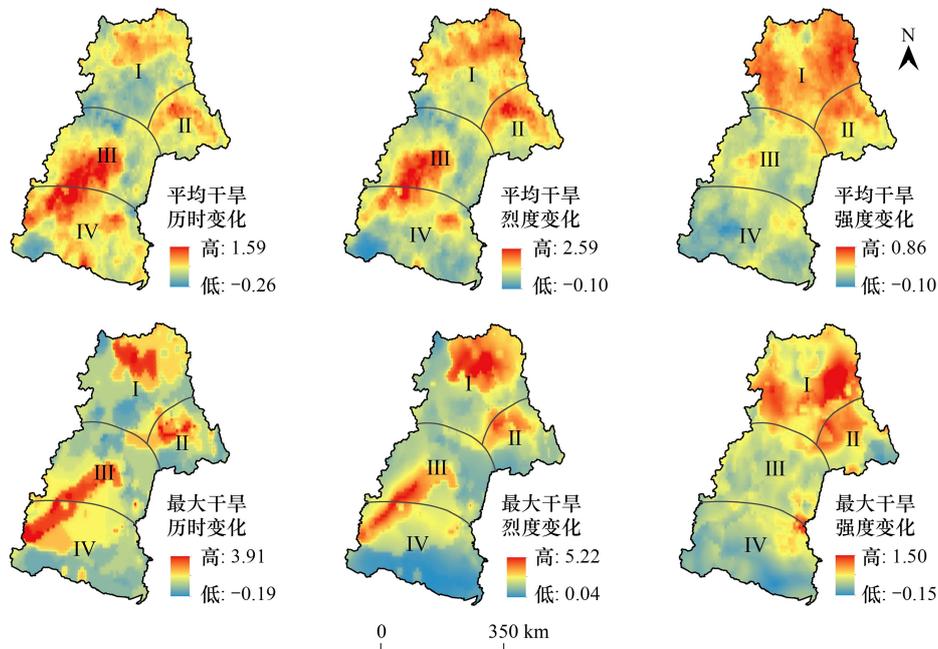


图 9 嫩江流域 2000 年前后生态干旱特征变化比例

Fig.9 Proportion of changes in ecological drought characteristics in the Nenjiang River Basin before and after 2000

从图 9 中可以看出,Ⅰ区和Ⅱ区北部以及Ⅲ、Ⅳ区中部干旱历时和干旱烈度均出现大幅增加,增加比例最高可达 1.59 倍和 3.91 倍、2.59 倍和 5.22 倍。嫩江流域最南部区域增长比例为负值,即干旱历时和干旱烈度均减少。就干旱强度而言,Ⅰ区和Ⅱ区呈现增长趋势,而Ⅲ区和Ⅳ区呈现不变或微小减少趋势。总体来看,嫩江流域中部偏南部区域生态干旱最为严重,较易发生中长期干旱,且可能存在加剧趋势。而嫩江流域北部较易发生单次强度较大的生态干旱,但每次干旱历时较短,且同样在 2000 年后加剧。

3 讨论与结论

3.1 讨论

本研究基于嫩江流域 1980—2017 年气象数据构建标准化生态缺水指数 SEWDI,并利用 Pearson 相关分析法分析 SEWDI 与年均降水、年均气温、相对湿度、径流、NDVI 的相关性。其次,本研究利用 REOF 对嫩江流域生态干旱进行分区,并利用游程理论提取干旱特征,分析嫩江流域生态干旱特征的空间分布。从时间上看,根据吴燕锋等^[40]对松花江流域气象水文干旱演变特征的研究,发现嫩江流域在 1996—2010 年间气象干旱频发,这与本研究中 1996—2009 年为生态干旱期的结果基本一致,说明该时段内生态干旱的发生可能受到气象干旱的影响。从空间上看,该研究中指出嫩江流域中下游平均气象干旱持续时间最长,再结合以往对嫩江流域水文干旱的研究中指出,流域水文干旱呈现从上游到下游逐渐增加趋势^[22,41],与本研究中生态干旱的空间分布特征类似。根据朱光磊等^[42]的研究,1970—2019 年嫩江流域西北部参考作物蒸散量呈显著增加趋势,东南部松嫩平原处呈减少趋势,与本研究中生态干旱特征变化趋势的空间分布基本一致。本研究中造成嫩江流域干湿期转换以及 2000 年后极端干旱和极端湿润事件增加的原因尚不明确,可能有:(1)自然气候如降水的影响;(2)农田开垦、植被破坏或退耕还林、湿地保护等人类活动对生态的影响具有滞后性等原因,可作进一步分析。

根据游程理论对干旱烈度的定义,干旱持续时间内干旱指数之和即为干旱烈度,因此,干旱历时长度的区域

往往烈度较大,干旱历时与干旱烈度的空间分布基本一致。而干旱强度为干旱烈度除以持续时间,更能代表单次干旱对植被生态系统影响的严重性。本研究中,干旱历时较长的区域位于流域西南部,而干旱强度大的区域集中在嫩江流域北部。因此,嫩江流域西南部地区应加强干旱监测的长期部署,北部地区应注意应对发生短期强度较大干旱的破坏性。

3.2 结论

(1)从相关性分析结果来看,生态干旱与各影响因子的相关系数大小排序为:相对湿度>NDVI>径流>降水>气温,除相对湿度外,其余因子相关系数均小于0.5,呈低度线性关系,相对湿度呈显著线性相关。其中气温与 SEWDI 为负相关关系,其余因子均为正相关关系。

(2)根据月尺度下 SEWDI 序列的年际变化,发现 1980—1999 年序列基本处于正常波动状态,生态干旱以轻旱和中旱为主,而 2000—2017 年流域极端干旱和极端湿润事件显著增加,且多次出现重旱和特旱。结合累积和曲线,可划分出 1980—1995 年为正常波动期,1996—2009 年为生态干旱期,2010—2012 年为转折期,2012—2017 年为生态湿润期。

(3)结合 REOF 四个分区分析年尺度 SEWDI 序列的演变规律,发现 1980—1999 年生态干旱总体呈现加剧趋势,而 2000 年后生态干旱总体呈现缓解趋势,这是因为在极端干旱事件增多的同时,流域极端湿润事件也增加。

(4)嫩江流域生态干旱不同特征空间分布存在较大差异,且后期干旱程度明显加剧。流域西南部干旱历时和干旱烈度均大于其他区域,较易发生长期干旱,而干旱强度较大的区域则集中于流域北部,该区域需提高对单次强度较大生态干旱的预防。

参考文献 (References):

- [1] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Weather and Climate Extreme Events in a Changing Climate. In *Climate Change 2021-The Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. 2023; 1513-1766.
- [2] Prugh L R, Deguines N, Grinath J B, Suding K N, Bean W T, Stafford R, Brashares J S. Ecological winners and losers of extreme drought in California. *Nature Climate Change*, 2018, 8: 819-824.
- [3] Jiang X Y, Rauscher S A, Ringler T D, Lawrence D M, Williams A P, Allen C D, Steiner A L, Cai D M, McDowell N G. Projected future changes in vegetation in western North America in the twenty-first century. *Journal of Climate*, 2013, 26(11): 3671-3687.
- [4] 刘海, 姜亮亮, 刘冰, 刘睿, 肖作林. 近 40 年中国干旱特征及其对植被变化影响研究. *生态学报*, 2023, 43(19): 7936-7949.
- [5] 闫明, 刘志萍, Mukti Ram Subedi, 梁林峰, 奚为民. 特大干旱对树木死亡的影响——以美国德克萨斯州东部森林为例. *生态学报*, 2022, 42(3): 1034-1046.
- [6] Sankaran M. Droughts and the ecological future of tropical savanna vegetation. *Journal of Ecology*, 2019, 107(4): 1531-1549.
- [7] Crausbay S, Ramirez A, Carter S L, Cross M S, Hall K, Bathke D, Betancourt J, Colt S, Cravens A E, Dalton M S, Dunham J, Hay L, Hayes M, McEvoy J, McNutt C, Moritz M, Nislow K, Raheem N, Sanford T. Defining ecological drought for the twenty-first century. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2017, 98: 2543-2550.
- [8] 粟晓玲, 姜田亮, 牛纪苹. 生态干旱的概念及研究进展. *水资源保护*, 2021, 37(4): 15-21, 28.
- [9] Bradford J B, Schlaepfer D R, Lauenroth W K, Palmquist K A. Robust ecological drought projections for drylands in the 21st century. *Global Change Biology*, 2020, 26(7): 3906-3919.
- [10] Park S Y, Sur C, Lee J H, Kim J S. Ecological drought monitoring through fish habitat-based flow assessment in the Gam River Basin of Korea. *Ecological Indicators*, 2020, 109: 105830.
- [11] Marumbwa F M, Cho M A, Chirwa P W. Geospatial analysis of meteorological drought impact on Southern Africa biomes. *International Journal of Remote Sensing*, 2021, 42(6): 2155-2173.
- [12] 杜灵通, 刘可, 胡悦, 朱玉果, 宫菲. 宁夏不同生态功能区 2000—2010 年生态干旱特征及驱动分析. *自然灾害学报*, 2017, 26(5): 149-156.
- [13] 黄静, 张运, 汪明秀, 王芳, 汤志, 何好. 近 17 年新疆干旱时空分布特征及影响因素. *生态学报*, 2020, 40(3): 1077-1088.
- [14] Chang K Y, Xu L Y, Starr G, Paw U K T. A drought indicator reflecting ecosystem responses to water availability: the Normalized Ecosystem

- Drought Index. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2018, 250/251: 102-117.
- [15] Zhang X, Li M X, Ma Z G, Yang Q, Lv M X, Clark R. Assessment of an evapotranspiration deficit drought index in relation to impacts on ecosystems. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2019, 36(11): 1273-1287.
- [16] Feng X, Ackerly D D, Dawson T E, Manzoni S, Skelton R P, Vico G, Thompson S E. The ecohydrological context of drought and classification of plant responses. *Ecology Letters*, 2018, 21(11): 1723-1736.
- [17] Jiang T L, Su X L, Singh V P, Zhang G X. A novel index for ecological drought monitoring based on ecological water deficit. *Ecological Indicators*, 2021, 129: 107804.
- [18] 刘轩, 粟晓玲, 刘雨翰, 梁晓萱. 西北地区生态干旱脆弱性评估. *水资源保护*, 2023, 39(03): 65-73.
- [19] Jiang T L, Su X L, Singh V P, Zhang G X. Spatio-temporal pattern of ecological droughts and their impacts on health of vegetation in Northwestern China. *Journal of Environmental Management*, 2022, 305: 114356.
- [20] Shi M Q, Yuan Z, Shi X L, Li M X, Chen F, Li Y. Drought assessment of terrestrial ecosystems in the Yangtze River Basin, China. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 362: 132234.
- [21] 孙嘉琪, 王小军, 李鸿雁. 嫩江流域中下游径流量变化的时空特征. *水电能源科学*, 2018, 36(10): 17-21.
- [22] 门宝辉, 庞金凤, 张腾, 蒋美彤. 嫩江流域水文干旱归因分析及未来演变规律. *水力发电学报*, 2023, 42(10): 60-74.
- [23] 朱光磊. 嫩江流域植被动态变化及其对气象干旱的响应研究. 延吉: 延边大学, 2021.
- [24] Wu J F, Yao H X, Chen X H, Wang G X, Bai X Y, Zhang D J. A framework for assessing compound drought events from a drought propagation perspective. *Journal of Hydrology*, 2022, 604: 127228.
- [25] Lu J, Wang G J, Chen T X, Li S J, Hagan D, Kattel G, Peng J, Jiang T, Su B D. A harmonized global land evaporation dataset from model-based products covering 1980-2017. *Earth System Science Data*, 2021, 13(12): 5879-5898.
- [26] Karl P. LIII. On lines and planes of closest fit to systems of points in space. *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, 1901, 2(11): 559-572.
- [27] Monahan A H, Fyfe J C, Ambaum M H P, Stephenson D B, North G R. Empirical orthogonal functions: the medium is the message. *Journal of Climate*, 2009, 22(24): 6501-6514.
- [28] 胡刚, 石星军, 宋慧. 基于 REOF 和 ESMD 的降水场时空耦合分析: 以山东省冬季降水为例. *中国水土保持科学(中英文)*, 2020, 18(6): 132-139.
- [29] 魏冲, 董晓华, 龚成麒, 马耀明, 喻丹, 薄会娟, 赵文义. 基于 REOF 的淮河流域降雨侵蚀力时空变化. *农业工程学报*, 2022, 38(12): 135-144.
- [30] 蔡元刚, 吴婷婷, 张文千, 蔡怡亨, 王劲廷, 蒲明. 基于 REOF 的四川省高温热浪时空分布特征分析. *自然灾害学报*, 2018, 27(2): 201-208.
- [31] 杭宜铖, 范敏韬, 刘智勇. 基于 REOF 的珠江三角洲河网水位时空变异特征分析. *水资源保护*, 2022, 38(2): 139-146.
- [32] Khoir A N, Ooi M C G, Juneng L, Isra Ramadhan M A, Virgianto R H, Tangang F. Spatio-temporal analysis of aerosol optical depth using rotated empirical orthogonal function over the Maritime Continent from 2001 to 2020. *Atmospheric Environment*, 2022, 290: 119356.
- [33] Kuriyama Y, Yanagishima S. Investigation of medium-term barred beach behavior using 28-year beach profile data and Rotated Empirical Orthogonal Function analysis. *Geomorphology*, 2016, 261: 236-243.
- [34] Wang Y X, Deng F, Cai Y X, Zhao Y. Spatial and temporal change in meteorological drought in Gansu Province from 1969 to 2018 based on REOF. *Sustainability*, 2023, 15(11): 9014.
- [35] 史尚渝, 王飞, 金凯, 丁文斌. 基于 SPEI 的 1981—2017 年中国北方地区干旱时空分布特征. *干旱地区农业研究*, 2019, 37(4): 215-222.
- [36] 朱慧敏, 王梓楠, 高敏, 杨文志. 方差变点模型 CUSUM 型估计量的相合性. *山东大学学报(理学版)*, 2023, 58(7): 106-114.
- [37] 蒋俐弘, 岳进, 文洪玲, 刘浏. 基于回归调整 CUSUM 控制图的流感监测. *系统科学与数学*, 2023, 43(2): 531-542.
- [38] 杨清, 张奕. 一种基于对比累计和的 expectile 变点估计方法. *高校应用数学学报 A 辑*, 2021, 36(4): 389-397.
- [39] 牛卢璐, 贾宏杰. 一种适用于非侵入式负荷监测的暂态事件检测算法. *电力系统自动化*, 2011, 35(9): 30-35.
- [40] 吴燕锋, 章光新. 松花江区气象水文干旱演变特征. *地理科学*, 2018, 38(10): 1731-1739.
- [41] 华悦, 叶磊, 张海荣, 左海阳, 周惠成. 嫩江下游多变量水文干旱特征研究. *水文*, 2021, 41(4): 88-94.
- [42] 朱光磊, 佟守正, 赵春子. 嫩江流域参考作物蒸散量时空变化及其气候归因. *应用生态学报*, 2022, 33(1): 201-209.