

黄河流域气象干旱及其恢复动态分析

杨肖丽,朱敏讷,罗 定,叶周兵,江 俊

(河海大学水文水资源学院,江苏 南京 210098)

摘要:基于 1961—2022 年的黄河流域气象数据,分析其气温和降水量变化趋势和突变点,以标准化降水蒸散指数为干旱指标,研究黄河流域年尺度的气象干旱特征和干旱恢复特征变化。采用游程理论提取干旱事件及干旱恢复特征指标,运用 Mann-Kendall 趋势检验方法对黄河流域 1961—2022 年的干旱指标和干旱恢复特征进行分析。结果表明:黄河流域气候复杂,干旱指标时空分布不均;1961—2022 年气象干旱在黄河流域下游呈显著增加趋势,在上游和中游的大部分地区呈减少趋势,少部分呈增加趋势;干旱恢复速率在黄河流域下游呈显著增大趋势,在上游和中游的大部分地区呈减小趋势,少部分呈增大趋势;降水量和气温是影响黄河流域气象干旱的重要因素,其中降水量的影响较大。

关键词:气象干旱;干旱恢复;标准化降水蒸散指数;降水量;气温;黄河流域

中图分类号:P429 **文献标志码:**A **文章编号:**1004 - 6933(2025)03 - 0127 - 07

Dynamic analysis of meteorological drought and its recovery in the Yellow River Basin//YANG Xiaoli, ZHU Minne, LUO Ding, YE Zhoubing, JIANG Jun (*College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China*)

Abstract: Based on the meteorological data of the Yellow River Basin from 1961 to 2022, the trends and abrupt changes in temperature and precipitation were analyzed. Using the standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI) as the drought indicator, the annual-scale variations in meteorological drought characteristics and drought recovery features in the Yellow River Basin were studied. The run theory was employed to extract drought characteristic indexes and drought recovery characteristic indexes, while the Mann-Kendall trend test method was applied to analyze the drought index and drought recovery characteristics in the Yellow River Basin from 1961 to 2022. The results indicate that the climate of the Yellow River Basin is complex, with uneven spatiotemporal distribution of drought indexes. From 1961 to 2022, meteorological drought showed a significant increasing trend in the lower reaches of the Yellow River Basin, while in most areas of the upper and middle reaches, meteorological drought exhibited a decreasing trend, with a minority of areas showing an increasing trend. The drought recovery rate demonstrated a significant increasing trend in the lower reaches of the Yellow River Basin, whereas in most areas of the upper and middle reaches, the drought recovery rate displayed a decreasing trend, with a minority of areas showing an increasing trend. Precipitation and temperature are identified as important factors influencing drought conditions in the Yellow River Basin, with precipitation playing a relatively more significant role.

Key words: meteorological drought; drought recovery; standardized precipitation evapotranspiration index; precipitation; temperature; the Yellow River Basin

随着极端气候的加剧与人类活动的增加,干旱影响范围逐渐从传统的农业领域扩展到工业、生态等多个领域^[1-5],同时干旱频率逐渐增加,干旱程度也逐渐加剧。黄河流域作为我国最重要的流域之一,流域内面临着水资源不足、径流量逐年减少、干旱现象频发且干旱程度加剧等问题^[6-8],这些问题不仅严重影响黄河流域的经济发展,还威胁黄河流域

的水安全。因此研究黄河流域的干旱及干旱恢复情况对开创黄河流域生态保护和高质量发展新局面具有重要意义^[9-10]。

干旱指数是研究干旱问题的基础^[11],其中被广泛运用的有标准化降水指数 (standardized precipitation index, SPI)、标准化降水蒸散指数 (standardized precipitation evapotranspiration index,

SPEI) 和帕默尔干旱指数 (Palmer drought severity index, PDSI) 等^[12-14]。其中 SPEI 在 SPI 的基础上进行了改进,其在考虑气温和太阳辐射等因素对干旱影响的同时具有计算简单且可以多尺度计算的优点^[15]。王作亮等^[16]对典型干旱指数在黄河源区的适宜性进行了评估,通过土壤湿度异常百分比指数、PDSI 与自校准 PDSI、SPI、SPEI 4 种干旱指数在黄河源区应用效果,最终选出了黄河源区适宜的干旱指数。干旱发生后的恢复速率及恢复概率对于流域干旱管理与应对非常重要,刘晔等^[17]分析了黄河流域农业干旱的干旱恢复时间。但目前研究关于气象干旱恢复的相关研究还较少,因此本文基于 SPEI 和 Mann-Kendall (M-K) 趋势检验、游程理论等方法,定量分析黄河流域气象干旱及干旱恢复的时空动态特征,以为流域尺度极端干旱应对提供科学依据。

1 研究区概况与数据来源

黄河流域最西端为其源头巴颜喀拉山脉,最东端为其入海口渤海,最南端到秦岭,最北端到阴山;流域东西向跨度极大,从西到东横跨数个高原和平原。极大的东西跨度导致黄河流域地形地貌复杂多样、海拔差大,不同区域的气候条件比较复杂。同时,黄河流域位于中纬度地带,受大气环流和季风环流等自然因素干扰,区域间的气候差异更为明显,具有温差悬殊、降水量分配不均的显著特征^[18]。本文将黄河流域分为 8 个子流域(图 1):龙羊峡以上(子流域 I)、龙羊峡至兰州(子流域 II)、兰州到头道拐(子流域 III)、自流区(子流域 IV)、头道拐至龙门(子流域 V)、龙门至三门峡(子流域 VI)、三门峡至花园口(子流域 VII)、花园口(子流域 VIII)以下。

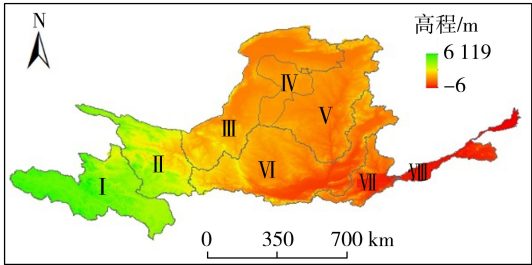


图 1 黄河流域子流域划分

Fig. 1 Sub-basin division of the Yellow River Basin

研究数据采用中国科学院大气物理研究所气象变化研究中心的 0.25°分辨率下格点化的中国区域逐日观测数据集,研究期为 1961—2022 年。

2 研究方法

SPEI 既考虑了干旱成因方面的因素,又考虑了蒸散发对气温、风速等因素变化的敏感性,能较为准

确地反映研究区的气象干旱情况^[19]。本文采用彭曼公式计算潜在蒸散发,进而计算 SPEI,计算过程见文献[20-22]。根据 SPEI 值对气象干旱等级进行划分,将气象干旱分为无旱、轻度干旱、中度干旱等 5 个类别,其 SPEI 值范围分别为: >-0.5 、 $>-1.0 \sim -0.5$ 、 $>-1.5 \sim -1.0$ 、 $>-2.0 \sim -1.5$ 、 ≤ -2.0 。

游程理论通过分析研究区的 SPEI 的变化识别气象干旱事件^[23],其优势在于可以简便快速地处理大量数据,并从中提取有用的信息。游程理论认为当 SPEI 低于某一阈值时即发生了气象干旱,本文以 -1.0 作为干旱开始和干旱恢复的阈值。提取的干旱特征指标包括干旱频次、干旱历时、干旱烈度、烈度峰值,计算方法参考文献[24-27]。

气象干旱发生后,其恢复情况也是目前研究所关注的问题之一。干旱恢复特征指标包括干旱恢复时间、干旱恢复速率、干旱恢复需水量和干旱恢复概率。干旱恢复时间是指气象干旱事件从烈度峰值出现时刻到干旱结束所持续的时间;干旱恢复速率是指单位时间的干旱恢复阶段 SPEI 值的变化率;干旱恢复需水量是干旱恢复阶段内的总降水量,反映了一次干旱恢复所需要的总水量;干旱恢复概率需将干旱恢复需水量进行拟合后得到,反映了一次干旱在无人因素干扰下快速恢复的概率。参考满元伟^[28]研究中的方法,选用正态分布对干旱恢复需水量进行拟合,从而计算干旱恢复概率,计算公式为

$$u = 1 - \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \exp \left\{ -\frac{(x - \mu)^2}{2\sigma^2} \right\} \quad (1)$$

式中: u 为干旱恢复概率; x 为干旱恢复需水量; μ 为均值; σ 为标准差。

采用 M-K 趋势检验方法分析黄河流域的气温、降水量、SPEI、干旱恢复时间和干旱恢复速率的演变趋势,同时进行显著性检验^[29]。M-K 趋势检验值 $Z > 0$ 表示统计量呈上升或增加的趋势; $Z < 0$ 表示统计量呈下降或者减少的趋势; $|Z| \geq 1.96$ 说明变量的变化趋势显著。运用 Pettitt 突变检验方法对黄河流域的降水量、气温进行突变检验,确认黄河流域降水量、气温的突变年份^[30]。

3 结果与分析

3.1 降水量和气温趋势检验与突变年份分析

图 2 为 1961—2022 年黄河流域降水量和气温的趋势性检验结果。由图 2 可见,降水量方面,黄河流域上游子流域 I 与 II 的绝大部分地区呈减少趋势,极少部分地区呈增加趋势;子流域 III 大部分地区呈减少趋势;中游子流域 V 大部分地区、子流域 IV 和子流域 VI 部分地区呈增加趋势,其他地区呈减少趋

势;下游子流域Ⅷ东部地区呈减少趋势,西部地区呈增加趋势。气温方面,黄河流域均呈增加趋势,子流域Ⅵ少部分地区增加趋势显著,可见黄河流域的气温仍不断升高。

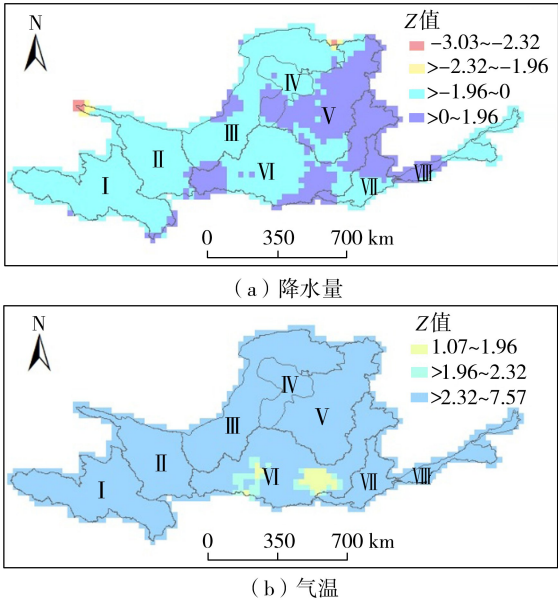


图2 1961—2022年黄河流域降水量和气温的趋势检验结果
Fig.2 Trend test results of precipitation and temperature in the Yellow River Basin from 1961 to 2022

利用 Pettitt 检验方法确定 1961—2022 年黄河流域降水量和气温的突变年份,结果见图 3。子流域Ⅰ的降水量突变发生在 1987 年;子流域Ⅱ的降水量突变发生在 1971—2018 年;子流域Ⅲ的降水量突

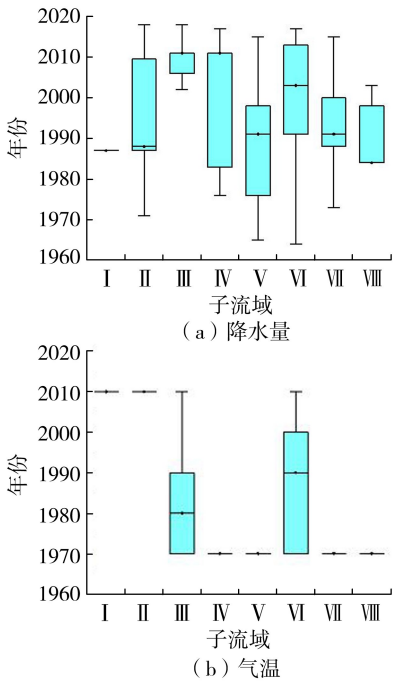


图3 1961—2022年黄河流域降水量和气温的突变年份
Fig.3 Abrupt change year in precipitation and temperature in the Yellow River Basin from 1961 to 2022

变发生在 2001—2018 年;子流域Ⅳ的降水量突变发生在 1975—2016 年;子流域Ⅴ和子流域Ⅵ内不同区域降水量突变年份跨度最大,发生在 1964—2016 年;子流域Ⅶ的降水量突变发生在 1974—2015 年;子流域Ⅷ的降水量突变发生在 1975—2003 年。沿海子流域的季风影响、中游子流域的降水量地区差异大等因素导致了部分子流域内不同区域降水量突变年份跨度较大,而子流域Ⅰ受这些因素影响小,因此子流域Ⅰ内不同区域突变年份没有差异。子流域Ⅰ和子流域Ⅱ的气温突变都发生在 1998 年;子流域Ⅲ的气温突变发生在 1994—1998 年;子流域Ⅳ、Ⅴ、Ⅶ和Ⅷ的气温突变年份都为 1994 年;子流域Ⅵ的气温突变发生在 1994—1998 年。黄河流域的气温突变基本发生在 1994—1998 年。

3.2 黄河流域气象干旱特征分析

图 4 为 1961—2022 年黄河流域气象干旱特征的空间分布。由图 4(a)可见,黄河流域的上游子流域Ⅰ的干旱频次最高,发生了 80~110 次干旱,其他地区发生干旱的频次较低;中游各个子流域发生干旱事件的频次较高,大部分地区干旱频次为 90~100;下游各子流域发生干旱事件的频次较低,绝大部分地区只发生过 80~90 次干旱,而入海口附近的区域,研究时间段内只发生了数次干旱甚至不发生干旱。黄河流域整体的干旱频次较高,大多数地区干旱发生次数为 80~100 次。由图 4(b)可见,黄河流域上游子流域Ⅰ的平均干旱历时为 1.1~1.3 月,其他子流域干旱历时较短;中游地区发生干旱事件的历时较长,大部分地区干旱历时为 1.1~1.2 月,如子流域Ⅳ、子流域Ⅴ等,只有少部分地区干旱历时较短;下游地区干旱历时较稳定,绝大部分地区平均干旱历时为 1.0~1.2 月。黄河流域的整体平均干旱历时为 1~1.3 月。由图 4(c)可见,黄河流域上游子流域Ⅰ的部分地区和子流域Ⅲ的最北端小部分地区干旱烈度极大,为 1.8~1.9;下游子流域Ⅶ、Ⅷ干旱烈度为 1.7~1.8,但有少部分地区干旱烈度极低。黄河流域整体平均干旱烈度为 1.6~1.8。由图 4(d)可见,黄河流域上游子流域Ⅰ部分地区的烈度峰值为 5.0~9.5,子流域Ⅱ烈度峰值为 5.0~11.0,子流域Ⅲ烈度峰值为 5.0~13.5 且高烈度峰值的情况占比大;下游区域烈度峰值自西向东逐渐减少,东部地区烈度峰值大多为 8.0~13.5,表明其干旱极端情况严重,而最西部烈度峰值大多小于 8.0,干旱极端情况较轻。

3.3 黄河流域气象干旱恢复特征分析

图 5 为 1961—2022 年黄河流域气象干旱恢复

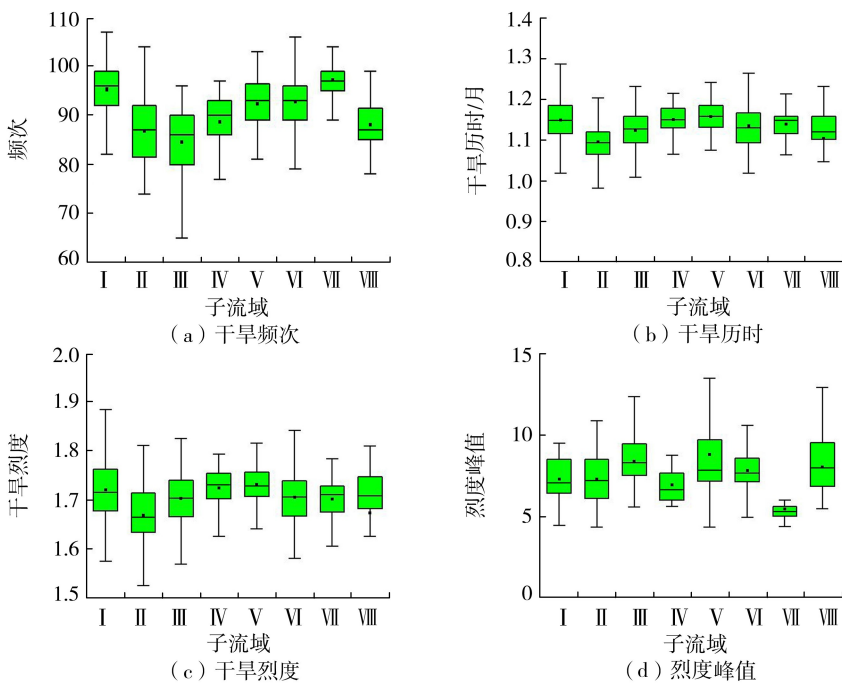


图 4 1961—2022 年黄河流域气象干旱特征的空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of meteorological drought characteristics in the Yellow River Basin from 1961 to 2022

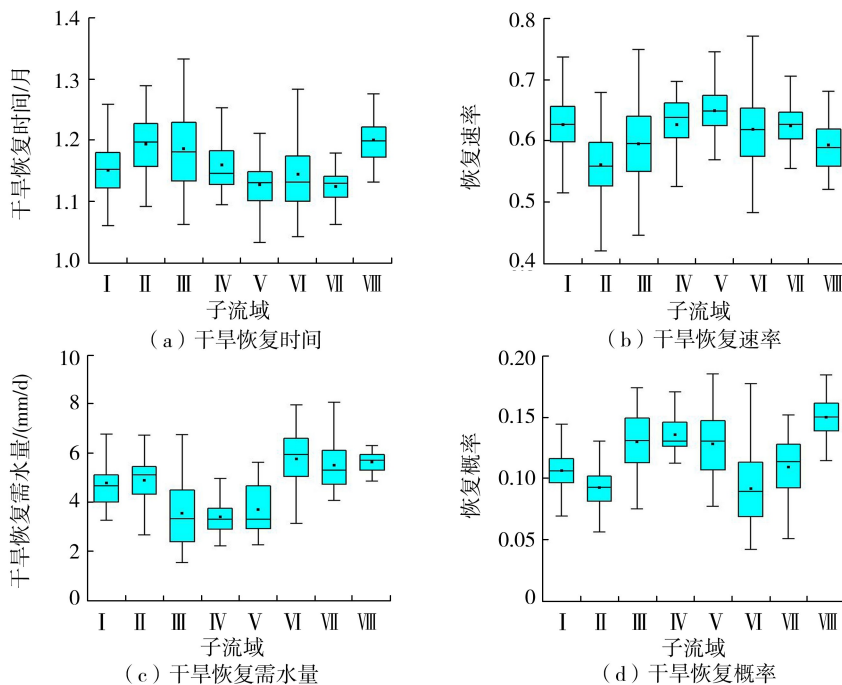


图 5 1961—2022 年黄河流域气象干旱恢复特征的空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of meteorological drought recovery characteristics in the Yellow River Basin from 1961 to 2022

特征的空间分布。由图 5(a)(b) 可见, 黄河流域上游子流域 I 的平均干旱恢复时间最短, 干旱恢复速率最快, 其他大部分地区干旱恢复时间较长, 干旱恢复速率较慢; 中游的绝大部分地区干旱恢复时间为 1.1~1.2 月, 是中下游中干旱恢复时间最短、恢复速率最快的地区; 下游地区绝大部分地区干旱恢复时间为 1.2~1.3 月, 干旱恢复速率为 0.53~0.61, 干旱恢复时间较长, 也有极少部分地区干旱恢复时间相对较短。由图 5(c) 可见, 黄河流域子流域 I、II

的平均干旱恢复需水量为 3~7 mm/d; 子流域 III 因为经纬度跨度较大, 子流域内气温、降水量差别大, 干旱恢复需水量的差别也较大, 为 1~7 mm/d; 子流域 IV 和子流域 V 是整个黄河流域干旱恢复需水量最少的地区, 为 1~5 mm/d, 主要原因是这两个子流域降水量较为稳定, 极端气温情况较少; 子流域 VI 和 VII 是干旱恢复需水量最大的子流域, 为 3~8 mm/d, 其中大部分地区为 5~7 mm/d, 究其原因, 子流域 VI 因为经度跨度大, 子流域 VII 因为气温较高、降水量较

少;子流域Ⅷ干旱恢复需水量变化最小,为5~6 mm/d。由图5(d)可见,黄河流域子流域Ⅰ、Ⅱ的平均干旱恢复概率最小,为0.05~0.15;子流域Ⅲ干旱恢复概率为0.07~0.18;子流域Ⅳ和子流域Ⅷ是整个黄河流域干旱恢复概率最大的地区,为0.11~0.18,原因是这两个子流域面积较小;子流域Ⅴ干旱恢复概率较大,为0.07~0.18;子流域Ⅵ是干旱恢复概率变幅最大的子流域,为0.03~0.18;子流域Ⅶ的干旱恢复概率变幅较大,为0.05~0.16,其干旱恢复概率均值大于子流域Ⅵ。

3.4 黄河流域气象干旱及干旱恢复趋势分析

采用 M-K 趋势检验方法对 1961—2022 年黄河流域的 SPEI 序列进行趋势分析和显著性检验,结果如图 6 所示。由图 6 可见,黄河流域上游,子流域Ⅰ的 SPEI 呈现上升趋势,且有部分地区趋势显著,置信度达到 95%,干旱逐渐减弱;子流域Ⅱ的大部分地区 SPEI 呈下降趋势,干旱逐渐加剧;子流域Ⅲ的大部分地区 SPEI 呈上升趋势,干旱减弱;中游南部地区的 SPEI 呈下降趋势,干旱加剧,中北部地区的 SPEI 呈上升趋势,干旱减弱;下游子流域Ⅷ的 SPEI 呈显著下降趋势,且部分置信度达 99%,干旱明显加剧。研究结果表明黄河流域上游和中游的大部分地区 SPEI 呈上升趋势,干旱程度逐渐减弱,小部分地区的 SPEI 呈现下降的趋势,干旱程度逐渐加剧;下游的 SPEI 总体呈显著减小趋势,干旱情况加剧。

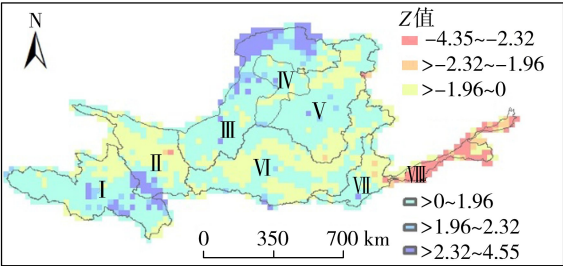


图 6 1961—2022 年黄河流域 SPEI 的趋势空间分布
Fig. 6 Trend spatial distribution of SPEI in the Yellow River Basin from 1961 to 2022

采用 M-K 趋势检验方法对 1961—2022 年黄河流域的干旱恢复时间和干旱恢复速率序列进行趋势分析和显著性检验,结果如图 7 所示。由图 7(a)可见,黄河流域上游大部分地区的干旱恢复时间呈下降趋势;中游子流域Ⅴ、Ⅵ大部分地区的干旱恢复时间呈下降趋势,干旱恢复时间逐渐缩短;而子流域Ⅶ大部分地区、子流域Ⅴ和Ⅵ少部分地区的干旱恢复时间呈上升趋势;下游大部分地区干旱恢复时间呈上升趋势,干旱恢复时间逐渐增加。由图 7(b)可见,黄河流域上游子流域Ⅰ、Ⅲ大部分区域和子流域Ⅱ小部分区域的干旱恢复速率呈下降趋势,上游其

他部分区域的干旱恢复速率呈上升趋势;中游子流域Ⅶ地区北部、子流域Ⅴ和Ⅵ大部分地区的干旱恢复速率呈上升趋势;而子流域Ⅶ地区南部、子流域Ⅴ和Ⅵ少部分地区的干旱恢复速率呈下降趋势;下游大部分地区干旱恢复速率整体呈上升趋势,且有部分地区趋势显著。黄河流域的干旱恢复速率整体趋势比较复杂,干旱恢复速率增大和减小趋势交错出现,仅下游地区呈显著增加的趋势。

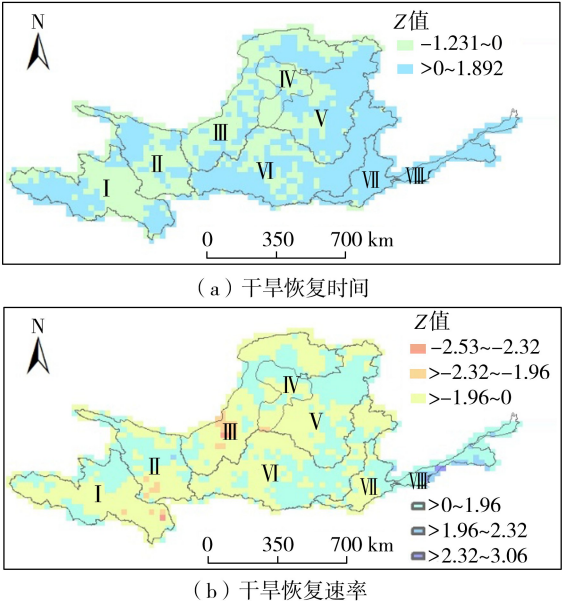


图 7 1961—2022 年黄河流域干旱恢复时间与干旱恢复速率趋势空间分布

Fig. 7 Spatial distribution of drought recovery time and drought recovery rate trend in the Yellow River Basin from 1961 to 2022

将黄河流域的干旱恢复时间和干旱恢复速率的趋势分析和显著性检验结果综合研究后发现干旱恢复时间与干旱恢复速率在一部分地区趋势比较吻合,但在大部分地区存在差异。干旱恢复速率与干旱烈度和干旱恢复时间相关,结合干旱烈度的趋势分析结果,发现干旱烈度变化的剧烈程度较干旱恢复时间更大,容易受到外界因素影响。因此,本文选择干旱恢复速率作为黄河流域干旱恢复的主要参考依据,将干旱恢复时间作为次要参考依据。总体上来说,黄河流域上中游的干旱恢复特征指标变化幅度不大,虽有增强或者减弱的趋势同时存在,但不显著,上游的干旱恢复趋势以减弱为主,中游的干旱恢复趋势以增强为主,下游干旱恢复呈显著增强趋势。这可能与黄河中下游兴建了如小浪底水库等水利工程,同时建立了完善的干旱应对系统有关。

4 结 论

a. 1961—2022 年黄河流域上游大部分地区气

象干旱情况逐渐减弱,小部分地区干旱情况逐渐加剧;中游地区干旱程度加剧和减弱交错;下游地区干旱情况显著加剧。

b. 1961—2022 年黄河流域上中游的干旱恢复特征较为稳定,呈非显著增强或者减弱的趋势,上游的干旱恢复趋势以减弱为主,中游的干旱恢复趋势以增强为主;下游干旱恢复特征呈显著增强趋势。

c. 气温和降水量是影响黄河流域气象干旱的两个重要因素。1961—2022 年黄河流域大部分地区气温逐渐升高,降水量逐渐减少,从上游到下游气温、降水量变化幅度逐渐增大,降水量对于干旱趋势的影响较为显著。

d. 1961—2022 年黄河流域气象干旱恢复速率变化趋势与降水量的变化趋势基本一致,各子流域降水量的时空分布情况与干旱恢复概率吻合,表明降水量是影响干旱恢复的重要因素。

参考文献:

[1] 顾颖,张世法,林锦,等.我国连续干旱年特征、变化趋势及对策[J].水利水电科技进展,2010,30(1):76-79. (GU Ying,ZHANG Shifa,LIN Jin,et al.Characteristics,trends,and countermeasures of continuous drought years in China[J].Advances in Science and Technology of Water Resources,2010,30(1):76-79.(in Chinese))

[2] 张长征,沈婷,徐慎晖,等.极端天气下特大型城市“水资源-能源-粮食”安全风险研究[J].水利经济,2023,41(1):55-61. (ZHANG Changzheng,SHEN Ting,XU Shenhui,et al.Study on the security risk of “water-energy-food” in mega cities under extreme weather[J].Journal of Economics of Water Resources,2023,41(1):55-61.(in Chinese))

[3] 牛玉国,张金鹏.构建黄河大水网促进黄河流域生态保护和高质量发展[J].水利经济,2023,41(2):1-4. (NIU Yuguo,ZHANG Jinpeng.Research on building the Yellow River’s large water network and promoting the ecological protection and high-quality development of the Yellow River Basin[J].Journal of Economics of Water Resources,2023,41(2):1-4.(in Chinese))

[4] 方国华,丁紫玉,闻昕,等.厄尔尼诺事件及其对我国夏季降水量时空分布的影响[J].河海大学学报(自然科学版),2017,45(6):481-488. (FANG Guohua,DING Ziyu,WEN Xin,et al.EI Niño event and its impact on the spatial and temporal distribution of summer precipitation in China[J].Journal of Hohai University (Natural Science),2017,45(6):481-488.(in Chinese))

[5] 中华人民共和国应急管理部.应急管理部发布 2022 年全国自然灾害基本情况[J].中国减灾,2023(3):7. (Ministry of Emergency Management of the People’s

Republic of China. The basic situation of natural disasters in 2022 released by Ministry of Emergency Management [J]. Natural Disaster Reduction in China, 2023 (3): 7. (in Chinese))

[6] 杨肖丽,马慧君,吴凡,等.基于 CMIP6 的全球及干旱带干旱时空演变[J].水资源保护,2023,39(2):40-49. (YANG Xiaoli, MA Huijun, WU Fan, et al. Spatio-temporal evolution of global and arid zone drought based on CMIP6 [J]. Water Resources Protection, 2023, 39 (2):40-49. (in Chinese))

[7] 颜亦琪,芦璐,陶新,等.2022—2023 年度黄河旱情及干旱特征与趋势分析[C]//2022—2023 年度全国典型洪旱过程应对技术经验交流会论文集.宁波:《中国防汛抗旱》杂志社,水利部防洪抗旱减灾工程技术研究中心(水旱灾害防御中心),2023:12.

[8] 姜雨彤,郝增超,冯思芳,等.长江与黄河流域复合高温干旱事件时空演变特征[J].水资源保护,2023,39(2):70-77. (JIANG Yutong,HAO Zengchao,FENG Sifang,et al.Spatiotemporal evolution characteristics in compound hot-dry events in Yangtze River and Yellow River basins [J]. Water Resources Protection, 2023, 39 (2):70-77. (in Chinese))

[9] 栗晓玲,褚江东,张特,等.西北地区地下水干旱时空演变趋势及对气象干旱的动态响应[J].水资源保护,2022,38(1):34-42. (SU Xiaoling,CHU Jiangdong,ZHANG Te,et al.Spatio-temporal evolution trend of groundwater drought and its dynamic response to meteorological drought in Northwest China [J]. Water Resources Protection, 2022, 38 (1): 34-42. (in Chinese))

[10] 卢荡,魏伟,王继平,等.重要生态功能区干旱时空演变特征及对关键资源的影响:以黄河流域为例[J].环境科学,2024,45(6):3352-3362. (LU Dang,WEI Wei,WANG Jiping,et al.Spatio-temporal evolution of drought and its impact on key resources in the important ecological functional area;a case study in the Yellow River Basin [J]. Environmental Science, 2024, 45 (6): 3352-3362. (in Chinese))

[11] 刘玉针,魏长寿,李志进.1961—2020 年黄河流域干旱演变分析和大气响应[J].水资源开发与管理,2022,8(10):7-17. (LIU Yuzhen,WEI Changshou,LI Zhijin. Analysis of drought evolution and atmospheric response in the Yellow River Basin from 1961 to 2020 [J]. Water Resources Development and Management,2022,8(10):7-17. (in Chinese))

[12] 郑博福,肖德利,万炜,等.长江流域干旱评估指标、时空特征及成因研究进展[J].水资源保护,2024,40(5):18-28. (ZHENG Bofu,XIAO Deli,WAN Wei,et al. Evaluation indicators, spatio-temporal characteristics and causes of drought in the Yangtze River Basin:progress and challenges[J]. Water Resources Protection,2024,40(5):

- 18-28. (in Chinese))
- [13] 杨肖丽,罗定,叶周兵,等. 基于 SPI-RRV 指数中国气象干旱及其风险时空演变特征研究[J]. 水资源保护, 2024, 40 (1): 44-51. (YANG Xiaoli, LUO Ding, YE Zhoubing, et al. Study on spatio-temporal evolution characteristics of meteorological drought and its risk in China based on SPI-RRV index [J]. Water Resources Protection, 2024, 40(1): 44-51. (in Chinese))
- [14] 瞿德业,杨明月,刘婷婷,等. 基于 SPEI 的洮河流域气象干旱时空特征分析[J]. 水利水电科技进展, 2024, 44 (5): 32-40. (QU Deyue, YANG Mingyue, LIU Tingting, et al. Analysis of spatiotemporal characteristics of meteorological drought in Taohe River Basin based on SPEI [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2024, 44(5): 32-40. (in Chinese))
- [15] 王卫光,黄茵,邢万秋,等. 基于 SPEI 的海河流域干旱时空演变特征及环流成因分析[J]. 水资源保护, 2020, 36 (3): 8-13. (WANG Weiguang, HUANG Yin, XING Wanqiu, et al. Analysis of spatial and temporal evolution characteristics and circulation causes of drought in Haihe River Basin based on SPEI [J]. Water Resources Protection, 2020, 36(3): 8-13. (in Chinese))
- [16] 王作亮,文军,李振朝,等. 典型干旱指数在黄河源区的适宜性评估[J]. 农业工程学报, 2019, 35 (21): 186-195. (WANG Zuoliang, WEN Jun, LI Zhenchao, et al. Evaluation of suitability using typical drought index in source region of the Yellow River [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, 35 (21): 186-195. (in Chinese))
- [17] 刘晔,薛万来. 黄河流域农业干旱时空演变规律及其自然恢复期特征[J]. 干旱地区农业研究, 2022, 40 (2): 213-221. (LIU Ye, XUE Wanlai. Temporal and spatial evolution of agricultural drought and its natural recovery period in the Yellow River Basin [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2022, 40(2): 213-221. (in Chinese))
- [18] 黄春艳. 黄河流域的干旱驱动及评估预测研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2021.
- [19] 高秉丽,巩杰,李焱,等. 基于 SPEI 的黄河流域多尺度干湿特征分析[J]. 干旱区研究, 2022, 39 (3): 723-733. (GAO Bingli, GONG Jie, LI Yan, et al. Analysis of multi-scalar characteristics of dry and wet conditions in the Yellow River Basin based on SPEI [J]. Arid Zone Research, 2022, 39(3): 723-733. (in Chinese))
- [20] 周志花,邹逸航,张璐,等. 基于 SPEI 指数的 1951—2013 年黄河流域干旱特征及其成因[J]. 内蒙古科技与经济, 2023 (12): 78-84. (ZHOU Zhihua, ZOU Yihang, ZHANG Lu, et al. Characteristics and causes of drought in the Yellow River basin from 1951 to 2013 based on SPEI index [J]. Inner Mongolia Science Technology & Economy, 2023(12): 78-84. (in Chinese))
- [21] 王磊,曾思栋,阳林翰,等. 基于 CMIP6 的气候变化下汉江流域气象干旱特征研究[J]. 水资源保护, 2024, 40 (5): 39-45. (WANG Lei, ZENG Sidong, YANG Linhan, et al. CMIP6-based meteorological drought characteristic study under climate change in the Hanjiang River Basin [J]. Water Resources Protection, 2024, 40(5): 39-45. (in Chinese))
- [22] 李伟光,侯美亭,周海霞,等. 基于实际蒸散量修订标准化降水蒸散干旱指数研究[J]. 海南大学学报(自然科学版), 2024, 42 (2): 164-173. (LI Weiguang, HOU Meiting, ZHOU Haixia, et al. Modification of the standardized precipitation evapotranspiration index based on actual evapotranspiration [J]. Journal of Hainan University (Natural Science), 2024, 42(2): 164-173. (in Chinese))
- [23] 程立文. 考虑非一致性的黄河流域水文干旱时空演变与驱动力探究[D]. 西安: 西安理工大学, 2023.
- [24] YAO Ying, FU Bojie, LIU Yanxu, et al. Evaluation of ecosystem resilience to drought based on drought intensity and recovery time [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2022, 314: 108809.
- [25] CAO Shengpeng, ZHANG Lifeng, HE Yi, et al. Effects and contributions of meteorological drought on agricultural drought under different climatic zones and vegetation types in Northwest China [J]. Science of the Total Environment, 2022, 821: 153270.
- [26] ZHOU Shuai, WANG Yimin, LI Ziyan, et al. Characterizing spatio-temporal patterns of multi-scalar drought risk in mainland China [J]. Ecological Indicators, 2021, 131: 108189.
- [27] XU Yang, ZHANG Xuan, HAO Zengchao, et al. Systematic assessment of the development and recovery characteristics of hydrological drought in a semi-arid area [J]. Science of the Total Environment, 2022, 836: 155472.
- [28] 满元伟. 基于 ERA-5 和多源遥感数据的黄河流域气象干旱恢复研究[D]. 兰州: 西北师范大学, 2022.
- [29] 薛联青,章郁涵,刘远洪. 干旱区与湿润区旱涝急转演变特征对比研究[J]. 水资源保护, 2024, 40 (4): 1-8. (XUE Lianqing, ZHANG Yuhan, LIU Yuanhong. Comparative study on change characteristics of drought-flood abrupt alternation in arid and humid zones [J]. Water Resources Protection, 2024, 40(4): 1-8. (in Chinese))
- [30] 陈仕豪,门宝辉,庞金凤,等. 黄河流域非平稳气象干旱特征的重构及时空演变规律[J]. 水力发电学报, 2024, 43 (7): 1-13. (CHEN Shihao, MEN Baohui, PANG Jinfeng, et al. Reconstruction of non-stationary meteorological drought series and its spatiotemporal patterns in Yellow River Basin [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2024, 43 (7): 1-13. (in Chinese))

(收稿日期: 2024-10-16 编辑: 王芳)