

基于网格聚合理论和 Copula 函数的流域极端降水 三维识别及时空动态演变研究

任立良^{1,2}, 万仪欣^{1,2}, 袁山水^{1,3,4}, 朱榴骏^{1,3,4}, 刘 懿^{1,2}, 杨肖丽^{1,2}, 季 芳^{1,3,4}

(1. 河海大学水灾害防御全国重点实验室, 江苏 南京 210098; 2. 河海大学水文水资源学院, 江苏 南京 210098;
3. 河海大学长江保护与绿色发展研究院, 江苏 南京 210098; 4. 水利部水循环与水动力系统重点实验室, 江苏 南京 210098)

摘要:为更好地应对流域极端降水灾害,本文提出了一种基于网格聚合理论的降水事件三维识别方法,通过识别、聚类、分割的动态识别步骤捕捉降水事件及其三维特征,采用 Copula 函数耦合降水历时、强度和总量,形成新的极端降水指标 COP,并以黄河流域为例进行了极端降水时空动态演变分析。结果表明:本文提出的降水事件三维识别方法能够较好地捕捉降水的演变过程,与传统极端降水指标 P_{95} 相比,本文提出的极端降水指标可以更准确地捕捉黄河流域极端降水的时空迁移轨迹,并考虑极端降水发展过程中弱降水事件的累积贡献,更完整地描述极端降水事件的时空演变机制。

关键词:极端降水;三维识别;网格聚合理论;Copula 函数;黄河流域

中图分类号:P339 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2025)05-0151-09

Three-dimensional identification and spatiotemporal dynamic evolution study of extreme precipitation in river basins based on grid aggregation theory and Copula function//REN Liliang^{1,2}, WAN Yixin^{1,2}, YUAN Shanshui^{1,3,4}, ZHU LiuJun^{1,3,4}, LIU Yi^{1,2}, YANG Xiaoli^{1,2}, JI Fang^{1,3,4} (1. State Key Laboratory of Water Disaster Prevention, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. Yangtze Institute for Conservation and Development, Hohai University, Nanjing 210098, China; 4. Key Laboratory of Hydrologic-Cycle and Hydrodynamic-System of Ministry of Water Resources, Nanjing 210098, China)

Abstract: To better cope with extreme precipitation disasters in river basins, a three-dimensional precipitation event identification method was proposed based on the grid aggregation theory. The method involved identification, clustering, and segmentation steps to capture precipitation events and their three-dimensional characteristics. On this basis, a Copula function was used to couple the duration, intensity, and total amount of precipitation, forming a new extreme precipitation index COP. A case analysis of the spatiotemporal dynamic evolution of extreme precipitation was conducted in the Yellow River Basin. The results show that the three-dimensional precipitation event identification method proposed in this paper can effectively capture the evolution process of precipitation events. Compared with the traditional P_{95} extreme precipitation index, the proposed extreme precipitation index can more accurately capture the spatiotemporal migration patterns of extreme precipitation in the Yellow River Basin and account for the cumulative contribution of weak precipitation events during the development of extreme precipitation, providing a more comprehensive description of the spatiotemporal evolution mechanism of extreme precipitation events.

Key words: extreme precipitation; three-dimensional identification; grid aggregation theory; Copula function; the Yellow River Basin

在气候变暖的背景下,极端降水事件的强度及其灾害效应显著加剧^[1],基于降水指标的研究发现,极端降水在全球大部分区域呈现显著增加趋势。同时,极端降水及其引发的次生灾害,如洪水、泥石流和山体滑坡,导致巨大的经济损失,对公共安全构成了严重威胁^[2-4]。因此,探索和理解极端降水的发

展规律具有重要的科学价值与实践意义。全面理解极端降水及其发展规律需要准确识别和提取极端降水事件。以往关于降水的研究大多将三维时空连续的降水事件简化到一维时间或二维空间上进行分析^[5-6]。然而,对于降水这一动态过程,仅考虑单一网格的降水特征,或简单地进行多网格

基金项目:国家重点研发计划项目(2023YFC3209800);国家自然科学基金项目(U2243203,52279011)
作者简介:任立良(1963—),男,教授,博士,主要从事水文水资源研究。E-mail:njrl19999@126.com
通信作者:袁山水(1987—),男,教授,博士,主要从事水文水资源研究。E-mail:yuanshanshui@hhu.edu.cn

组合,可能导致关键时空演化信息丢失,尤其是可能忽略单点降水对全局降水的贡献。此外,现有的极端降水指标主要采用分类法或百分位法来确定极端降水^[7-9],涉及的固定阈值无法反映降水分布的时空动态变化,难以全面揭示极端事件的三维动态信息。因此,有必要提出降水三维动态识别新方法,建立能够全面反映降水事件多维特征的新指标。

传统多维联合分布方法要求边缘分布类型相同,这些方法在边缘分布类型和相关性方面存在严格限制,难以满足实际需求^[10-12]。Copula 函数在多变分布建模中表现出众,为耦合极端降水多维信息提供了新的可能^[13]。Copula 函数对边缘分布类型没有限制,形式灵活多样,允许研究者分别研究边缘分布和相关结构^[14]。因此,Copula 函数在水文学领域备受关注,并得到了广泛的应用。例如:De Michele 等^[15]利用二维阿基米德 Copula 函数对水库洪峰进行了随机模拟,评估了水坝溢洪道的可靠性;Zhang 等^[16]基于站点数据,采用三维 Gumbel-Hougaard Copula 函数构建了降水强度、持续时间和降水量的联合分布,并进行了条件概率和重现期分析。然而,基于网格数据,运用 Copula 函数对极端降水事件的多维动态特征进行分析的研究仍较为有限。

本文针对极端降水事件,采用识别、聚类、分割的动态识别步骤捕捉降水事件及其强度、历时和总量的三维动态特征,在此基础上利用 Copula 函数构建新的极端降水指标,以更好地识别和分析极端降水的动态特征。本文提出的方法在黄河流域的实例应用体现出其在分析极端降水问题方面的重要价值,研究成果对流域防洪减灾具有重要的科学与实践意义。

1 研究方法

1.1 降水事件的识别与提取

将降水数据表示为经度、纬度、时间的三维矩

阵,从三维降水数据中提取时空连续的降水事件。提取流程包括识别、聚合和分割 3 个步骤,如图 1 所示。

1.1.1 降水事件识别

对于日降水数据三维矩阵的每一层,识别降水量最大的网格点,并将其赋予序号 n ($n=1,2,\dots,N$), N 为识别的降水事件总数。将半径为两个网格范围内所有降水量不为 0 的网格点标记为相同的序号 n 。对于每一个新标记的网格点,重复标记过程,直到半径为两个网格范围内降水量均为 0 为止。这定义了该日的一场降水事件,称为“降水斑块”。在标记并记录所有属于序号 n 的降水网格点后,在剩余的矩阵层中找到新的降水量最大的网格点,将其赋予序号 $n+1$,并重复上述步骤直至该层矩阵中不存在有降水的网格。

图 1 中识别步骤以两个网格范围作为降水斑块独立判断的阈值,在第 1 日(T_1)至第 7 日(T_7)按照识别步骤共识别出 15 个降水斑块。

1.1.2 降水事件聚合

采用空间聚类的方法对相邻 2 天的降水事件进行迭代聚类。以第 t 日的第 n 场降水事件为例,将 $t+1$ 日的降水事件与其进行比对,当与第 n 场降水事件在空间上重合面积超过第 n 场降水事件或其本身面积的 1/2 时,认为是同一场降水事件,进行合并。在 $t+2$ 日中重复该过程,直到 $t+k$ 日中没有事件与其前 1 日的事件重叠面积超过阈值,将合并后的降水事件标记为 t_n 。在遍历所有天数和序号后,所有降水事件被识别并记录。

如图 1 所示,聚合步骤从 T_1 开始执行, T_1 中降水事件 2 与 T_2 中降水事件 3 的重叠面积超过了这两场降水事件面积的 1/2,故这两场降水事件被判别为时空连续的同一场降水事件。 T_2 中降水事件 1 与 T_3 中降水事件 1 的重叠面积为 4 个网格范围,超过了 T_2 中降水事件 1 面积的 1/2,故这两场降水事件被判别为时空连续的同一场降水事件。 T_2 中降

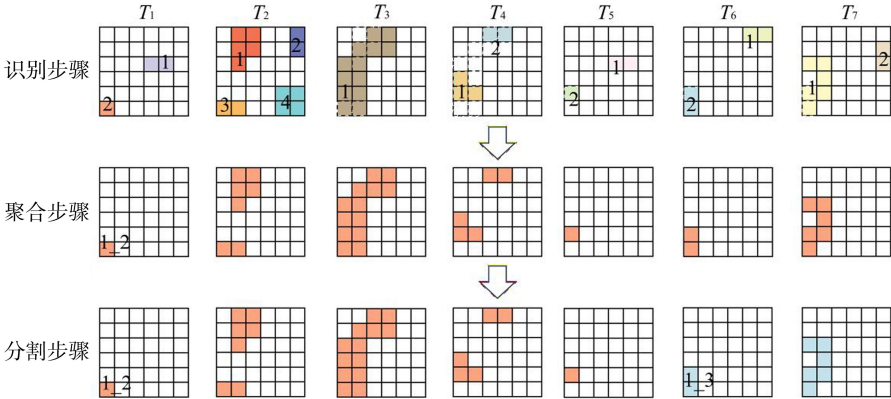


图 1 三维时空连续降水事件提取概化示意图

Fig. 1 Schematic diagram of extraction process for three-dimensional spatiotemporally continuous precipitation events

水事件 3 与 T_3 中降水事件 1 的重叠面积为 2 个网格范围,超过了 T_2 中降水事件 3 面积的一半,故这两场降水事件被判别为时空连续的同一场降水事件。对剩余时间内的降水事件使用相同方法执行聚合步骤,最终图 1 聚合步骤中标记为橙色的降水事件在时空维度上被聚合为同一降水事件 1_2。

1.1.3 降水事件分割

由于聚合算法存在将连续多场降水误判为一场降水事件的可能,本文采用阈值分割法进一步分辨多峰事件和多个单峰事件。设定两个面积阈值(以网格数量表示) H_1 和 H_2 ,且 $H_1 < H_2$ 。在提取的每场降水事件降水面积变化过程中,如果在两个面积小于等于 H_1 的时间点 a 和 b 之间存在面积大于 H_2 的时间点,则认为该场降水事件经过了一场完整的发生、发展、消退演变过程,且需要对该场降水事件进行分割。以该场降水事件的原始起点 a 作为被切分的第一段降水事件的起点, b 点作为被切分的第一段降水事件的终点,对于被裁切后余下的降水事件,执行相同的分割过程。执行此步骤后,可以把每场降水事件划分为发生、发展、消退 3 个阶段,对降水事件进行阶段性分析。

图 1 中,对于聚合步骤中得到的时空连续事件 1_2,假设 H_1 为 2 个网格范围, H_2 为 10 个网格范围,根据分割步骤的算法,在 T_1 和 T_5 这两个降水面积小于等于 H_1 的时间点之间,存在降水面积大于 H_2 的时间点 T_3 ,故判断降水事件 1_2 需要被分割。以 T_5 作为被切分的第一段降水事件的终点, T_6 作为分割后下一段降水事件的起点,则聚合步骤中标记的降水事件将被分割为两个部分:橙色的事件 1_2 和蓝色的事件 1_3。

1.2 三维降水事件的描述

使用降水历时(D)、降水总量(P)、降水面积(A)、降水强度(I)和降水事件质心来描述提取的三维降水事件。降水历时为降水事件的持续时间,即降水事件首个降水斑块到最后一个降水斑块之间的时间间隔;降水面积为降水事件中所有降水斑块面积之和,也可以看作是三维降水事件在二维平面上的投影,面积的计算采用阿尔伯斯等面积圆锥投影法;每场三维降水事件和单个降水斑块均具有各自的质心,三维降水事件的质心能够反映降水事件的时空分布特征,而降水事件逐日降水斑块的质心可以用来描述降水事件的迁移和发展过程。三维降水事件质心的计算公式为

$$X_n = \frac{\sum_{j=1}^{k_n} \sum_{t=1}^{t_n} P_{n,j,t} x_{n,j,t}}{\sum_{j=1}^{k_n} \sum_{t=1}^{t_n} P_{n,j,t}} \quad (1)$$

$$Y_n = \frac{\sum_{j=1}^{k_n} \sum_{t=1}^{t_n} P_{n,j,t} y_{n,j,t}}{\sum_{j=1}^{k_n} \sum_{t=1}^{t_n} P_{n,j,t}} \quad (2)$$

$$T_n = \frac{\sum_{j=1}^{k_n} \sum_{t=1}^{t_n} P_{n,j,t} d_{n,j,t}}{\sum_{j=1}^{k_n} \sum_{t=1}^{t_n} P_{n,j,t}} \quad (3)$$

式中: X_n 、 Y_n 、 T_n 为第 n 场三维降水事件质心的经度、维度和时间; $P_{n,j,t}$ 为第 n 场三维降水事件第 t 日在第 j 个网格点的降水量; $x_{n,j,t}$ 、 $y_{n,j,t}$ 为第 n 场三维降水事件第 t 日第 j 个降水网格点的经度和纬度; $d_{n,j,t}$ 为第 n 场三维降水事件第 t 日第 j 个降水网格点的时间,即第 t 日的时间; t_n 、 k_n 分别为第 n 场三维降水事件的总天数和总网格数。

降水事件逐日降水斑块质心的计算公式为

$$X_t = \frac{\sum_{j=1}^{k_t} P_{j,t} x_{j,t}}{\sum_{j=1}^{k_t} P_{j,t}} \quad (4)$$

$$Y_t = \frac{\sum_{j=1}^{k_t} P_{j,t} y_{j,t}}{\sum_{j=1}^{k_t} P_{j,t}} \quad (5)$$

式中: X_t 、 Y_t 为降水事件第 t 日质心的经度和纬度; $P_{j,t}$ 为第 t 日第 j 个网格点的降水量; $x_{j,t}$ 、 $y_{j,t}$ 为第 t 日第 j 个降水网格点的经度和纬度; k_t 为降水事件第 t 日的总网格数。

1.3 极端降水事件的多维特征分析

使用 Copula 函数耦合降水事件的多维特征以分析极端降水事件的特性,主要包括 3 个步骤:强降水事件的识别、Copula 函数的构建和极端降水阈值的确定。本文选择 Copula 函数,是因为在多变量联合分布的背景下,Copula 函数对边缘分布类型没有限制,其形式灵活多样,可通过 Copula 函数分别研究边缘分布和相关结构^[14]。

为反映强降水事件的统计特性,本文从各年度识别的降水事件中分别选取降水总量、降水面积和降水历时排名前两位的事件作为强降水事件。在此基础上,针对选定的强降水事件的降水总量、降水历时和降水强度进行三维 Copula 函数拟合。研究中使用 Gumbel Copula 函数、Frank Copula 函数以及 Clayton Copula 函数 3 个阿基米德 Copula 函数作为备选 Copula 函数^[14]。

Copula 函数的构建过程分为两个步骤:

a. 边缘分布的拟合。采用指数分布、广义极值分布、伽马分布、对数正态分布、韦伯分布、广义帕累托分布以及皮尔逊 III 型分布 7 种水文学中常用分布^[17]对强降水事件的降水总量、降水历时和降水强度进行拟合^[18]。边缘分布的参数通过最大似然法估计,使用 Kolmogorov-Smirnov (K-S) 检验^[19],并以均方根误差 (RMSE) 为依据,选择拟合效果最佳的边缘分布参数。

b. 三维 Copula 函数的拟合。已建立的关于降

水总量、降水历时和降水强度的三维 Copula 函数是一个累积概率分布函数,其描述了三维指标分别小于特定值的概率,即:

$$P'(P \leq p, I \leq i, D \leq d) = C(p, i, d) \quad (6)$$

式中: p, i, d 分别为特定的降水总量、降水强度、降水历时值; $C(p, i, d)$ 为构建的三维 Copula 函数。通过最大似然法确定 Copula 函数参数,并基于 RMSE、赤池信息准则(AIC)及 Cramer-von Mises(CVM)假设检验^[20-21]筛选最优拟合的 Copula 函数。

构建的三维 Copula 函数的值(COP 值)可以反映极端降水程度,故将 COP 作为新的极端降水指标。对于某一特定降水事件,当其降水总量、降水面积、降水历时和降水强度已知时,可以计算对应的 COP 值。若 COP 值大于 75%分位数,则该降水事件为极端降水事件。

2 实例分析

2.1 研究区概况与数据来源

2.1.1 研究区概况

黄河流域位于 32°10'N~41°50'N、95°53'E~119°05'E,属中纬度地区,处于大气环流的西风带内,是中国经济发展的重要区域、粮食生产的核心地带以及重要的生态屏障^[22-23]。黄河流域在极地冷高压、青藏高原高压和副热带高压等主要气团相互作用的影响下形成了典型的大陆性季风气候^[24]。

黄河流域地形多样(图 2),山脉众多,地势自西向东逐渐降低,东西方向存在显著的海拔差异,流域内降水空间分布极不均匀^[25]。流域东部主要由黄河冲积平原组成,河道高于周围地面,洪涝风险较高。极端降水及其引发的次生灾害对黄河流域的经济发展和生态环境造成了不利影响,对区域的高质量发展构成威胁。因此,全面理解黄河流域极端降水事件的发展规律,对于更好地应对极端降水引发的灾害至关重要。

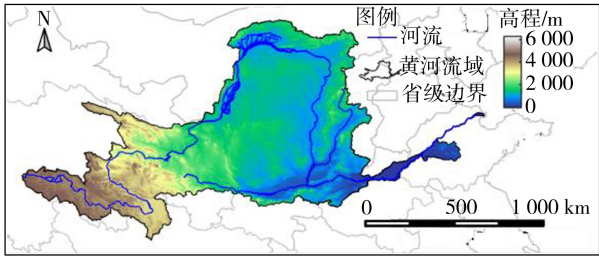


图 2 黄河流域概况

Fig. 2 Overview of the Yellow River Basin

2.1.2 数据来源

本文使用由美国宇航局戈达德地球科学数据与信息服务中心(GES DISC, <https://disc.gsfc.nasa.gov/>)提供的第六代全球降水观测计划(GPM)逐日降水数据,数据网格分辨率为 0.1°×0.1°,数据覆盖时间范围为 2000 年 6 月至 2021 年 9 月,该数据经过了 IMERG (integrated multi-satellite retrievals for GPM)算法校准^[26-27]。刘兆晨等^[28]比较了 GPM 卫星降水数据与其他降水产品及地面观测数据,研究发现,尽管 GPM 降水数据存在一定的降水高估现象,但其逐日降水数据与实测数据具有良好的一致性,偏差较小。

2.2 结果与分析

2.2.1 降水总体状况、趋势及基于 P_{95} 的极端降水时空分布

2000—2021 年黄河流域多年平均降水量为 479.80 mm,中值为 483.08 mm。降水量最大的网格点位于黄河下游,而降水量最小的网格点位于黄河上游。黄河流域降水量总体上呈现南部和东部高于北部和西部、中游和下游地区高于上游地区的特征。黄河流域中游多年平均降水量在数值上最为集中,大多数为 500~700 mm,如图 3(a)(d)所示。

利用 Mann-Kendall (M-K) 趋势检验法^[29]对 2000—2021 年黄河流域年降水量的趋势进行分析(图 3(b)(e)),结果显示,2000—2021 年黄河流域年降水量总体上呈现增加趋势,特别是流域上游和西南部地区增加趋势尤为显著。整个流域中,60.80%的网格点降水量显示出在 95%显著性水平上的显著增加趋势,上游地区仅一个网格点表现出降水量呈显著减少的趋势,降水量呈减少趋势但未超过 95%显著性水平的网格点仅占整个流域的 2.24%。总体而言,与中游相比,上游地区年降水量增加趋势更为显著,而中游的增加趋势高于下游地区。

针对每个网格日降水量计算传统极端降水指标 P_{95} ^[30],其值在一定程度上能够反映多年平均日降水量的分布。从总体空间分布来看, P_{95} 值在流域南部和东部较高,而在北部和西部较低(图 3(c)(f)),这一分布模式与年均降水量的空间分布相似。

通过统计逐年日降水量超过 P_{95} 阈值的发生次数(即极端降水频次),分析黄河流域极端降水的时间序列及变化趋势,结果如图 4 所示。2000—2010 年极端降水发生次数的趋势较为稳定,但 2015 年后急剧增加。总体来看,黄河流域降水量呈现增加趋势,且自 2015 年以来,极端降水频次显著增加。

2.2.2 三维降水事件的提取与分析

采用本文提出的降水事件三维识别方法在黄河流域识别并提取了共计 111 821 场降水事件;在执行切割步骤后,共有 111 926 场降水事件。根据

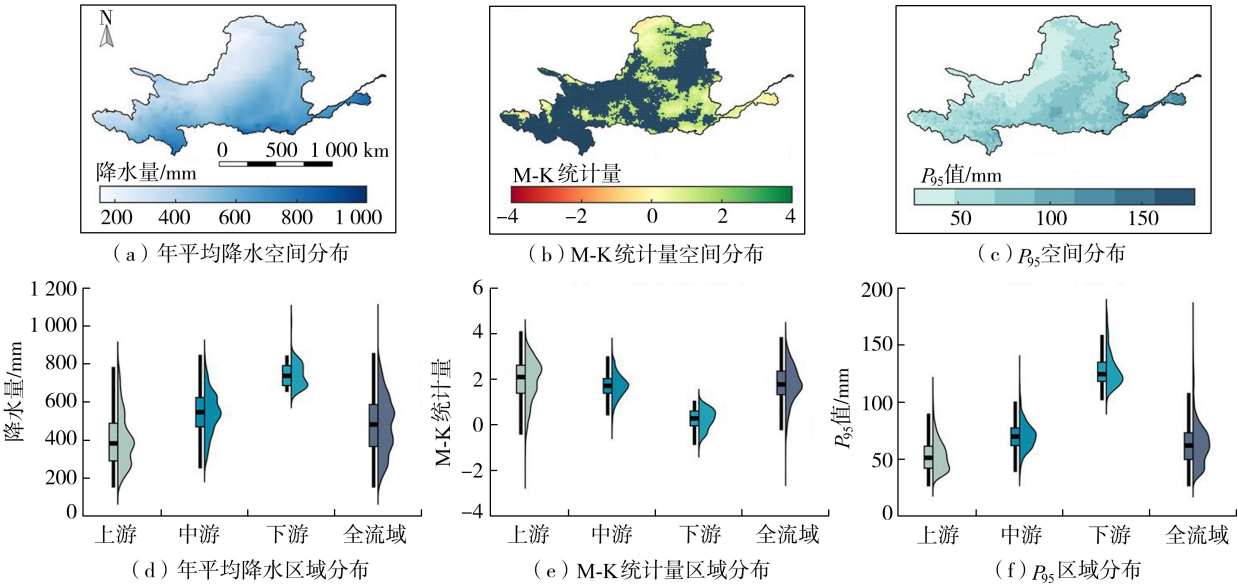


图3 2000—2021 年年平均降水量、M-K 统计量、 P_{95} 值的分布

Fig. 3 Distributions of annual average precipitation, M-K statistic, and P_{95} from 2000 to 2021

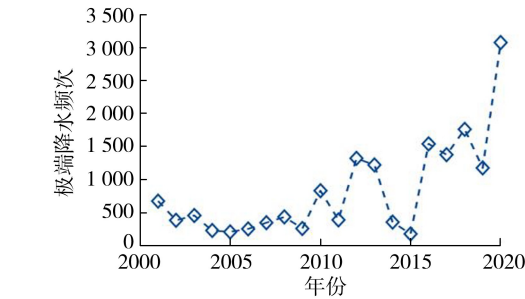


图4 极端降水频次变化趋势

Fig. 4 Trend of extreme precipitation frequency

Wang 等^[31]研究,并经过多次试算得出,取 H_1 为黄河流域面积的 1.6%, H_2 为黄河流域面积的 30%,可以较好地划分出降水事件的发生、发展、消退阶段,并较好地消除提取降水事件的粘连现象。对降水事件进行分割后,对于每场独立降水事件的发展过程,将从降水开始到降水面积第一次由 H_1 达到 H_2 的阶段称为降水发生阶段,将降水面积第一次达到 H_2 至最后一次不小于 H_2 的阶段(其间降水面积均大于 H_1)称为降水发展阶段,将降水面积从 H_2 减小为 H_1 的阶段称为降水消退阶段。例如,降水事件 512_29 (图 5)被分割为 4 场降水事件:1~17 d、18~101 d、102~192 d、193~216 d。以 102~192 d 为例,图 5 显示其完整的“发生—发展—消退”过程。对于黄河流域而言,降水事件的发生和消退过程相对较为迅速,而发展阶段则表现出显著的变异性。

所有降水事件的降水总量、降水面积和降水历时均可按事件场次进行计算。表 1 给出所有提取出的降水事件相关参数的统计结果。在所有降水事件中,降水总量和降水面积的分布呈现出显著的差异

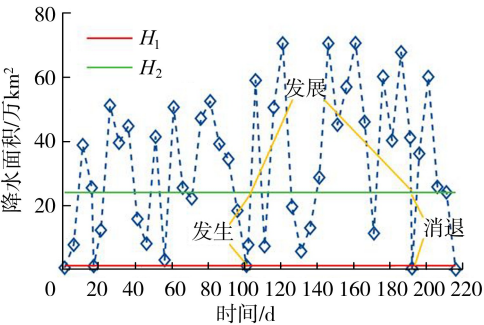


图5 降水事件 512_29 的面积变化过程

性,而降水强度和降水历时的差异性虽较小,但仍然明显。降水强度低于 0.22 mm/d 的事件占全部降水事件的 50.89%,而降水历时超过 1d 的降水事件占总事件的 10.86%。

表 1 降水事件相关参数统计结果

Table 1 Statistic results of precipitation events

统计指标	P/m^3	A/km^2	$I/(\text{mm}/\text{d})$	D/d
平均值	75.3	2.40×10^3	0.54	1.25
方差	1.83×10^7	7.34×10^8	3.05	6.79
标准差	4.28×10^3	2.71×10^4	1.75	2.61
中位数	0.0695	2.03×10^2	0.22	1.00
最大值	4.72×10^5	7.95×10^5	66.73	252.00
最小值	0.0093	92.38	0.03	1.00

分析表明,共有 12 153 场三维降水事件的降水历时超过 2 d。图 6 为 12 153 场三维降水事件质心迁移方向的分布。从图 6 可以看出,黄河流域三维降水事件的迁移路径主要集中在东北方向和西南方向,迁移方位角在 $0^\circ \sim 90^\circ$ 范围内的降水事件占全部降水事件的 34.26%,方位角在 $180^\circ \sim 270^\circ$ 范围内的

降水事件占 25.76%。此外,尽管存在降水总量超过 45 万 m³ 的降水事件,但大多数降水事件的降水总量低于 22.5 万 m³。

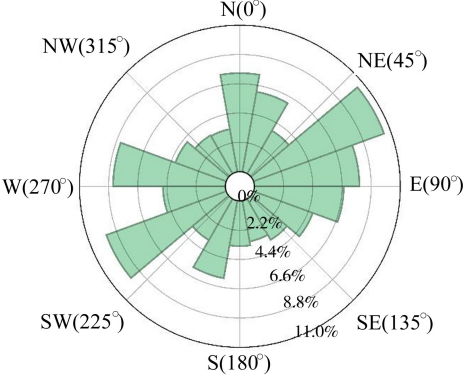


图 6 降水事件质心迁移方向分布和占比

Fig. 6 Centroid migration distribution and proportion of precipitation events

2.2.3 三维 Copula 函数的构建

将年降水总量、降水面积和降水历时最大和次大的降水事件标记为强降水事件。为拟合并确定边缘分布,对每个强降水事件的降水总量、降水历时和降水强度分别采用指数分布、广义极值分布、伽马分布、对数正态分布、韦伯分布、广义帕累托分布和皮尔逊Ⅲ型分布进行拟合。图 7 给出了每个变量(降水强度、降水总量和降水历时)的前 3 个最佳拟合累积边缘分布函数。

对于降水历时,在通过 K-S 检验的所有分布中, RMSE 最低的是指数分布,因此选择指数分布进行拟合。对于降水总量, RMSE 值最低的 3 个分布(皮尔逊Ⅲ型分布、韦伯分布和伽马分布)之间的最大与最小 RMSE 差异不超过 5.5%,但伽马分布的 K-S 统计量比皮尔逊Ⅲ型分布高出 31%,因此选择皮尔逊Ⅲ型分布拟合降水总量。对于降水强度, RMSE 和 K-S 统计量的最小值均出现在广义极值分布中,因此选择广义极值分布拟合降水强度。

在完成单变量边缘分布的拟合后,使用 Copula 函数对边缘分布进行耦合。采用阿基米德 Copula 函数构建三维模型描述黄河流域降水事件的特征,采用的 3 种 Copula 函数分别为 Gumbel Copula 函数、Frank Copula 函数和 Clayton Copula 函数。从 Copula 函数拟合结果(表 2)中可以发现, CVM 假设检验的 p 值在 Frank Copula 函数中最大,且 RMSE 和 AIC 的最小值也均出现在 Frank Copula 函数中,因此,选择 Frank Copula 函数构建三维模型,并描述降水事件的 3 个变量(降水历时、降水总量和降水强度)。图 8 通过三维数据的若干切片展示了三维 Copula 函数。

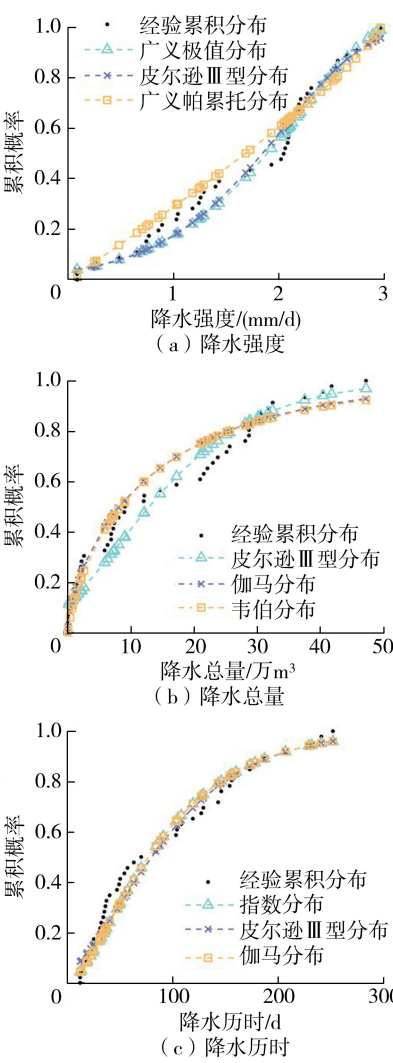


图 7 降水强度、降水总量和降水历时的前 3 个最佳拟合边缘累积分布函数

Fig. 7 Top three optimal fitted marginal cumulative distribution functions of precipitation intensity, total precipitation, and precipitation duration

表 2 三维 Copula 函数拟合结果

Table 2 Fitting results of three-dimensional Copula functions

Copula 函数	Copula 函数参数	CVM 统计量	p 值	RMSE	AIC
Frank	19.384 1	0.228 5	0.211 2	0.070 5	-222.468 6
Gumbel	4.613 6	0.278 0	0.155 9	0.077 7	-211.941 7
Clayton	4.422 7	0.438 7	0.058 2	0.097 7	-166.875 5

2.2.4 基于 COP 指标的极端降水事件分析

表 3 给出了基于 COP 值识别出的 4 场极端降水事件。其中, 1274_14 和 4538_19 两场降水事件的降水量峰值出现在降水事件后期, 而 6744_16 和 7446_38 的峰值则更接近降水事件的中心时刻。这 4 场降水事件均覆盖整个流域, 但各事件的降水面积也呈现出显著的波动, 其上升和下降趋势不如降水量的变化趋势明显。降水强度的变化主要受到降

表 3 基于 COP 值识别的 4 场极端降水事件

Table 3 Four identified extreme precipitation events based on COP value

降水事件	D/d	$A/万\ km^2$	起始时间	结束时间	$P/万\ m^3$	$I/(mm/d)$	COP 值
1274_14	154	79.5	2003-04-13	2003-09-13	32.4	2.6465	0.7858
4538_19	156	79.5	2012-04-01	2012-09-03	30.5	2.4582	0.7584
6744_16	207	79.5	2018-04-08	2018-10-31	41.7	2.5354	0.8169
7446_38	232	79.5	2020-03-05	2020-10-22	47.2	2.5570	0.8324

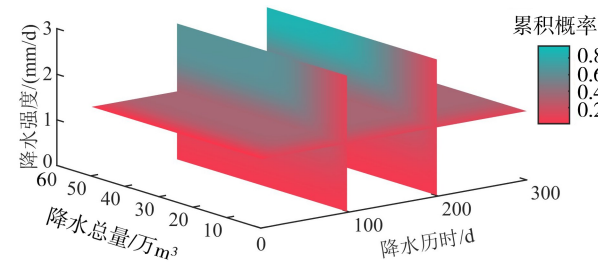


图 8 降水强度、降水总量和降水历时的 Copula 函数

Fig. 8 Copula function of precipitation intensity, total precipitation, and precipitation duration

水量变化的影响,其变化趋势与降水量的变化趋势基本一致。

4 场极端降水事件尚不能完全反映黄河流域更具共性的分布特征,为了分析黄河流域更多降水事件的分布特点,利用式(1)(2) 计算黄河流域三维降水事件中 COP 值大于 0.5 的降水事件的质心,图 9 给出了这些降水事件质心空间分布以及降水总量的大小。黄河流域三维降水事件中极端降水指标 COP 值大于 0.5 的降水事件共有 22 场,其质心主要分布在 $34^{\circ}N\sim38^{\circ}N$ 、 $104^{\circ}E\sim107^{\circ}E$ 范围内。该区域位于宁夏、陕西和甘肃三省交界处,属于山地、平原与高原的过渡地带。根据图 3 所示的黄河流域年平均降水量和 P_{95} 值分布,该区域的平均降水量和 P_{95} 值相对较高,也是黄河流域平均降水量从西向东逐渐增加的过渡带,值得后续研究重点关注。

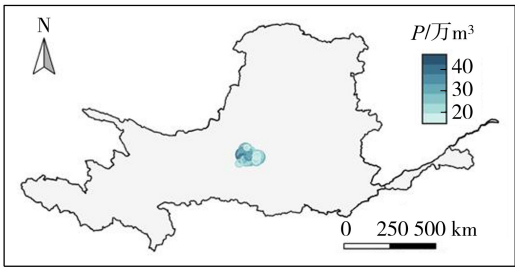


图 9 黄河流域三维降水事件质心的空间分布和对应降水总量

Fig. 9 Spatial distribution of centroid and corresponding total precipitation of three-dimensional precipitation events in the Yellow River Basin

3 讨论

本文提出的极端降水三维识别方法的价值在于

其能够捕捉降水事件的动态变化过程。与干旱领域中常用的三维事件提取方法^[31-32] 不同,该方法在三维事件提取中引入了分割步骤,确保降水事件的发生、发展和消退阶段完整且相对独立。这种方法有助于分析逐日三维降水事件的演变过程。

通过与传统极端降水指标 P_{95} 的对比发现,本文提出的 COP 极端降水指标能够捕捉对极端降水事件有贡献的弱降水事件。表 4 给出基于 COP 与 P_{95} 对 4 场极端降水事件在降水总量和降水网格点数量方面的统计结果。传统降水指标 P_{95} 会忽略许多对极端降水事件有贡献的弱降水事件,而 COP 指标能够检测到这些影响。从日降水总量的角度来看,与 P_{95} 相比,COP 指标的识别率提高了 90 倍以上。降水事件是一个连续的过程,而 P_{95} 只能识别降水超过历史百分位数的孤立网格点。相比之下,COP 指标能够捕捉整个降水过程,重建降水事件的完整演变过程。

表 4 基于 COP 和 P_{95} 对极端降水事件空间覆盖范围及降水总量的统计结果

Table 4 Spatial coverage and total precipitation of extreme precipitation events based on COP and P_{95} indexes

降水事件	超过 P_{95} 阈值的格点数	超过 P_{95} 阈值的格点的降水总量/ $万\ m^3$	基于 COP 的格点数	基于 COP 的降水总量/ $万\ m^3$
1274_14	442	3.32	627572	32.4
4538_19	1319	8.62	585322	30.5
6744_16	1757	13.20	786794	41.7
7446_38	3078	20.80	879723	47.2

在这 4 场日尺度的极端三维降水事件中,最严重的是发生于 2020 年的 7446_38 事件,其历时为 2020 年 3 月 5 日至 2020 年 10 月 22 日。据《黄河流域公报》中对 2020 年暴雨的记录,黄河流域于 7 月 20 日、8 月 6 日、8 月 11 日、8 月 25 日发生了若干场暴雨,直至 9 月 14 日黄河流域主要水文站点流量才开始回落,2020 年黄河流域兰州站、花园口站、利津站均出现了 1986 年以来实测年径流量最大值。本文基于逐日降水数据提取的三维极端降水事件能够反映给定时间段内极端降水的严重性,并可重建降水的演化过程,为分析极端降水事件的演变提供参考。

本文方法可以分析各种极端降水事件降水特征

的发展过程,揭示降水特征的发展模式和演变特征。此外,Copula 函数还可以用于重现期和回归分析^[12,21,33],通过构建新的极端降水指标,分析不同重现期内的极端降水事件,并评估极端降水的发展过程及各要素之间的关系。可以预见,基于本文研究可以发展出一套全新的极端降水分析系统,对于极端降水风险的防范具有重要意义。

需要指出的是,本文采用的是逐日降水数据,而现实中存在大量持续时间小于 1 d 的短历时降水事件^[34]。从降水数据的角度来看,本文提取的降水事件与通常理解的降水事件有所不同,列出和分析的极端降水事件持续时间均超过 100 d,这可以看作是多个小时级降水事件的累积。尽管如此,这并不会削弱本文所提出研究方法的价值。

4 结 论

a. 2000—2021 年,黄河流域多年平均年降水量为 479.80 mm。总体上,降水量南部和东部高于北部和西部,中下游地区高于上游地区。在上游和西南地区,降水量的增加趋势尤为显著。整体来看,年降水量的增加趋势在上游最为显著,其次是中游,下游地区的增加趋势最不显著。2000—2010 年,极端降水事件发生次数的趋势较为稳定,但在 2015 年后急剧增加。

b. 本文提出的方法对黄河流域极端降水的分析表明,黄河流域三维降水事件的迁移路径主要集中在东北和西南方向,存在降水总量超过 45 万 m³ 的事件,但多数降水事件的降水总量小于 22.5 万 m³。2000—2020 年黄河流域所有降水事件中,降水总量和降水面积的分布表现出显著差异,而降水强度和降水历时的差异虽相对较小,但仍然明显。强度低于 0.22 mm/d 的降水事件占有所有事件的 50.89%,降水历时超过 1 d 的降水事件占 10.86%。

c. 本文提出的降水事件三维识别方法能够较好地捕捉降水的演变过程,反映多维降水信息。与传统极端降水指标 P_{95} 相比,基于三维 Copula 函数构建的新型极端降水指标,能够从动态时空视角强调弱降水事件对极端降水事件的贡献,更准确地捕捉流域极端降水的时空迁移轨迹。本文提出的方法在应对极端降水问题方面具有重要价值。

参考文献:

[1] O' GORMAN P A. Precipitation extremes under climate change[J]. Current Climate Change Reports,2015,1(2): 49-59.
[2] DONAT M G, ALEXANDER L V, YANG H, et al.

Updated analyses of temperature and precipitation extreme indices since the beginning of the twentieth century: the HadEX2 dataset [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres,2013,118(5):2098-2118.
[3] GREENOUGH G, MCGEEHIN M, BERNARD S M, et al. The potential impacts of climate variability and change on health impacts of extreme weather events in the United States [J]. Environmental Health Perspectives, 2001, 109 (Sup2): 191-198.
[4] 张金良,罗秋实,王冰洁,等. 城市极端暴雨洪涝灾害成因及对策研究进展 [J]. 水资源保护,2024,40(1):6-15. (ZHANG Jinliang, LUO Qiushi, WANG Bingjie, et al. Research progress on causes and countermeasures for extreme rainstorm-induced urban flood disasters [J]. Water Resources Protection,2024,40(1):6-15. (in Chinese))
[5] 慎璐璐,杨艳芬,吴晶,等. 黄河流域极端气候事件时空变化规律 [J]. 水土保持研究,2022,29(2):231-242. (SHEN Lulu, YANG Yanfen, WU Jing, et al. Spatial and temporal variation characteristics of extreme climate events in the Yellow River Basin [J]. Research of Soil and Water Conservation,2022,29(2):231-242. (in Chinese))
[6] 任国玉,吴虹,陈正洪. 我国降水变化趋势的空间特征 [J]. 应用气象学报,2000,11(3):322-330. (REN Guoyu, WU Hong, CHEN Zhenghong. Spatial patterns of change trend in rainfall of China [J]. Quarterly Journal of Applied Meteorology, 2000, 11 (3): 322-330. (in Chinese))
[7] DU Hong, XIA Jun, YAN Yi, et al. Spatiotemporal variations of extreme precipitation in Wuling Mountain Area (China) and their connection to potential driving factors [J]. Sustainability,2022,14(14):8312.
[8] WANG Baolong, ZHANG Mingjun, WEI Junlin, et al. Changes in extreme precipitation over Northeast China, 1960-2011 [J]. Quaternary International, 2013, 298: 177-186.
[9] 任国玉,封国林,严中伟. 中国极端气候变化观测研究回顾与展望 [J]. 气候与环境研究,2010,15(4):337-353. (REN Guoyu, FENG Guolin, YAN Zhongwei. Progresses in observation studies of climate extremes and changes in China's mainland [J]. Climatic and Environmental Research, 2010, 15 (4): 337-353. (in Chinese))
[10] CALLAU PODUJE A C, BELLI A, HABERLANDT U. Dam risk assessment based on univariate versus bivariate statistical approaches: a case study for Argentina [J]. Hydrological Sciences Journal,2014,59(12):2216-2232.
[11] POULIN A, HUARD D, FAVRE A C, et al. Importance of tail dependence in bivariate frequency analysis [J]. Journal of Hydrologic Engineering,2007,12(4):394-403.
[12] SALVADORI G, DE MICHELE C. Frequency analysis via Copulas: theoretical aspects and applications to

- hydrological events[J]. *Water Resources Research*, 2004, 40(12): W12511.
- [13] 卞佳琪,于慧,李强,等. 长江下游多维径流丰枯遭遇及丰枯演变分析[J]. *人民长江*, 2021, 52(10): 120-127. (BIAN Jiaqi, YU Hui, LI Qiang, et al. Analysis on wetness-dryness encounter and evolution of multi-dimensional runoff in lower reaches of Changjiang River[J]. *Yangtze River*, 2021, 52(10): 120-127. (in Chinese))
- [14] NELSEN R B. *An Introduction to Copulas* [M]. 2nd ed. New York: Springer, 2006.
- [15] DE MICHELE C, SALVADORI G, CANOSSO M, et al. Bivariate statistical approach to check adequacy of dam spillway[J]. *Journal of Hydrologic Engineering*, 2005, 10(1): 50-57.
- [16] ZHANG L, SINGH V P. Gumbel-Hougaard Copula for trivariate rainfall frequency analysis [J]. *Journal of Hydrologic Engineering*, 2007, 12(4): 409-419.
- [17] SINGH V P. *Handbook of applied hydrology* [M]. 2nd ed. New York: McGraw-Hill Education, 2016.
- [18] WANG Cailin, REN Xuehui, LI Ying. Analysis of extreme precipitation characteristics in low mountain areas based on three-dimensional copulas: taking Kuandian County as an example [J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 2017, 128(1/2): 169-179.
- [19] MASSEY Jr F J. The Kolmogorov-Smirnov test for goodness of fit [J]. *Journal of the American Statistical Association*, 1951, 46(253): 68-78.
- [20] BERG D. Copula goodness-of-fit testing: an overview and power comparison [J]. *The European Journal of Finance*, 2009, 15(7/8): 675-701.
- [21] NAJIB M K, NURDIATI S, SOPAHELWAKAN A. Multivariate fire risk models using copula regression in Kalimantan, Indonesia [J]. *Natural Hazards*, 2022, 113(2): 1263-1283.
- [22] 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))
- [23] 贾绍凤, 梁媛, 张士锋. 黄河流域天然径流量评价探讨[J]. *水资源保护*, 2022, 38(4): 33-38. (JIA Shaofeng, LIANG Yuan, ZHANG Shifeng. Discussion on evaluation of natural runoff in the Yellow River Basin[J]. *Water Resources Protection*, 2022, 38(4): 33-38. (in Chinese))
- [24] 李夫星, 陈东, 汤秋鸿. 黄河流域水文气象要素变化及与东亚夏季风的关系[J]. *水科学进展*, 2015, 26(4): 481-490. (LI Fuxing, CHEN Dong, TANG QiuHong. Variations of hydro-meteorological variables in the Yellow River Basin and their relationships with the East Asian summer monsoon[J]. *Advances in Water Science*, 2015, 26(4): 481-490. (in Chinese))
- [25] 薛联青, 肖颖, 刘远洪, 等. 黄河流域植被水分利用效率对于干旱的时空累积响应[J]. *水资源保护*, 2023, 39(4): 32-41. (XUE Lianqing, XIAO Ying, LIU Yuanhong, et al. Spatiotemporal accumulation response of vegetation water use efficiency to drought in the Yellow River Basin [J]. *Water Resources Protection*, 2023, 39(4): 32-41. (in Chinese))
- [26] JIN D, OREOPOULOS L, LEE D, et al. Cloud-precipitation hybrid regimes and their projection onto IMERG precipitation data [J]. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2021, 60(6): 733-748.
- [27] 胡文韬, 余钟波, 陈松峰, 等. 长江上游卫星反演与再分析降水数据的适用性评估[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2024, 52(3): 15-24. (HU Wentao, YU Zhongbo, CHEN Songfeng, et al. Applicability evaluation of satellite and reanalysis precipitation products in upper Yangtze River Basin [J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2024, 52(3): 15-24. (in Chinese))
- [28] 刘兆晨, 杨梅学, 王学佳, 等. GPM 和 TRMM 卫星日降水数据在黄河源区的适用性分析[J]. *冰川冻土*, 2020, 42(2): 575-586. (LIU Zhaochen, YANG Meixue, WANG Xuejia, et al. The GPM and TRMM satellite-based precipitation products applied in the source regions of the Yellow River[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2020, 42(2): 575-586. (in Chinese))
- [29] HAMED K H. Trend detection in hydrologic data: the Mann-Kendall trend test under the scaling hypothesis[J]. *Journal of Hydrology*, 2008, 349(3/4): 350-363.
- [30] ZHANG Xuebin, ALEXANDER L, HEGERL G C, et al. Indices for monitoring changes in extremes based on daily temperature and precipitation data [J]. *WIREs Climate Change*, 2011, 2(6): 851-870.
- [31] WANG Aihui, LETTENMAIER D P, SHEFFIELD J. Soil moisture drought in China, 1950-2006 [J]. *Journal of Climate*, 2011, 24(13): 3257-3271.
- [32] ANDREADIS K M, CLARK E A, WOOD A W, et al. Twentieth-century drought in the conterminous United States[J]. *Journal of Hydrometeorology*, 2005, 6(6): 985-1001.
- [33] ZHANG Lan. *Multivariate hydrological frequency analysis and risk mapping* [D]. Baton Rouge: Louisiana State University and Agricultural and Mechanical College, 2005.
- [34] LIU Xuemei, ZHANG Mingjun, WANG Shengjie, et al. Assessment of diurnal variation of summer precipitation over the Qilian Mountains based on an hourly merged dataset from 2008 to 2014 [J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2017, 27(3): 326-336.

(收稿日期: 2025-02-12 编辑: 施业)