

DOI: 10.20040/j.cnki.1000-7709.2026.20250222

中国时空连续性气象干旱特征及未来预估

顾 强,尹义星,焦 阳,刘 爽,李艳忠,余文君

(南京信息工程大学水利部水文气象灾害机理与预警重点实验室,江苏 南京 210044)

摘要:为揭示气象干旱的三维时空传播特征,基于中国区域1961~2021年的CN05.1格点数据集和标准化降水指数,采用时空连续性事件识别方法和层次聚类算法,识别时空连续性气象干旱事件并划分不同传播模式,分析了各模式的特征,并探讨了未来气候情景下事件的变化特征。结果表明,时空连续性气象干旱事件分布较广,移动距离差异显著,覆盖范围从局部地区延伸至近半个国土面积;基于移动距离和移动方向可划分为三类传播模式,类型1和类型2事件呈现持续时间长、空间范围广特征,但发生频率较低;类型3事件则以高频次、短持续时间和局部影响为主要特点;未来情景下,时空连续性气象干旱事件的总频次增加,但其平均持续时间和强度趋于减弱,最大影响面积与累计影响范围则均呈扩张特征。

关键词:时空连续性;气象干旱;传播模式;三维时空;未来预估

中图分类号:S342.1;[TV11]

文献标志码:A

文章编号:1000-7709(2026)01-0033-05

Characteristics and Future Projections of Spatiotemporal Continuous Meteorological Droughts in China

GU Qiang, YIN Yi-xing, JIAO Yang, LIU Shuang, LI Yan-zhong, YU Wen-jun

(Key Laboratory of Hydrometeorological Disaster Mechanism and Warning of Ministry of Water Resources, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China)

Abstract: To investigate the three-dimensional spatiotemporal propagation characteristics of meteorological drought, based on the CN05.1 gridded data and standardized precipitation index (SPI) during the period 1961-2021 in China, a spatiotemporally continuous event identification method and hierarchical clustering algorithms were applied to classify different propagation patterns of spatiotemporally continuous meteorological droughts and analyze their characteristics. The changing characteristics of events in future climate scenarios were discussed. The results indicate that the spatiotemporal continuous meteorological drought events distribute widely with significant variations in their movement distances, ranging from localized areas to nearly half of China. Three propagation patterns are identified based on movement distance and direction. The Type 1 and Type 2 events are characterized by long duration and large affected areas but occurring less frequently. The Type 3 events occur more frequently, have shorter durations, and affect smaller areas. Under future scenarios, the total number of spatiotemporally continuous drought events is projected to increase, while their duration and intensity are expected to decrease. Both the maximum and total affected areas are likely to expand.

Key words: spatiotemporal continuity; meteorological drought; propagation pattern; three-dimensional space and time; future projections

1 引言

干旱是一种对农业、生态系统及社会经济造成深远影响的自然灾害^[1]。通常情况下,干旱的初始阶段表现为降水减少(气象干旱),随后在水

循环系统中逐步转化为多种形式的干旱。如当气象干旱持续一段时间后,土壤水分的不足可能引发农业干旱;同时,江河径流的减少及湖泊、水库和地下水位的下降可能导致水文干旱。而严重的水资源短缺进一步影响居民用水和社会经济活动,最终发展为社会经济干旱^[2]。目前广泛采用

收稿日期:2025-02-12,修回日期:2025-04-03,接受日期:2025-04-13

基金项目:国家自然科学基金气象联合基金项目(U2342219);江苏省水利科技项目(2023007)

作者简介:顾强(2000-),男,硕士研究生,研究方向为高温热浪及干旱事件,E-mail:gqwork2024@163.com

的干旱事件识别方法为游程理论,即通过设定干旱指数的阈值,识别干旱事件及其持续时间和强度等特征。研究表明,干旱在时间和空间上会同时发生演变,是一个涉及时间—纬度—经度三维时空的问题^[3]。然而,目前常用的干旱识别方法多将干旱的三维结构简化为一维(时间)或二维(经纬度),即在时间和空间上分别提取干旱特征,忽略了干旱的时空动态变化及其连续性,难以全面展现干旱发生和发展的过程^[4]。当前,针对我国气象干旱开展其三维时空传播特征的研究已经受到重视,为此,本文尝试采用一种时空连续性事件的识别方法,揭示中国时空连续性气象干旱的特征并预估其未来变化,以期为中国地区的干旱监测和预警预报提供借鉴。

2 数据与方法

2.1 数据资料

数据主要包括实测气象数据和未来气候变化情景下的 CMIP6 全球气候模式预估数据。其中气象降水数据来源于国家气候中心提供、由全国 2 400 多个气象站资料插值生成的再分析数据集 CN05.1^[5],选取时间段为 1961~2021 年,空间分辨率为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 。CMIP6 全球气候模式预估数据包括 11 个模式在两种温室气体排放情景下的模拟数据。选取时间段为 2030~2100 年。温室气体排放情景选取 SSP2-4.5、SSP5-8.5 情景来分别代表中、高排放情景。由于各模式分辨率不同,因此将模式数据采用双线性差值法插值到 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$,并采用 CLDAS 数据矫正,采用等权重集合法对多个模式进行集合平均。11 个气候模式包括 ACCESS-ESM1-5、CanESM5、CMCC-CM2-SR5、GFDL-CM4、INM-CM4、INM-CM5-0、MPI-ESM1-2-HR、MPI-ESM1-2-LR、NorESM2-LM、NorESM2-MM、TaiESM1。

2.2 研究方法

2.2.1 标准化降水指数

标准化降水指数(SPI)通常将一段时间(累计周期)内的降水量累加,然后计算累计降水量的 Γ 分布概率密度,并将累计概率进行正态标准化,从而得到该指数^[6]。若某时段降水量为 x ,则伽马分布降水概率密度函数为:

$$G(x) = \frac{1}{\beta^\gamma \Gamma(\gamma)} x^{\gamma-1} e^{-x/\beta} \quad x > 0 \quad (1)$$

式中, γ 、 β 分别为函数的形状参数、尺度参数, γ 、 β 可通过极大似然估计法求得。

标准化正态处理公式为:

$$\begin{cases} A = S \frac{t - (C_2 t + C_1) t + C_0}{[(d_3 t + d_2) t + d_1] t + 1.0} \\ t = \sqrt{\ln[G(X)]^{-2}} \end{cases} \quad (2)$$

式中, A 为 SPI 经标准化后的取值; S 为概率密度正负系数,当 $G(X) > 0.5$ 时 $S=1$,当 $G(X) \leq 0.5$ 时 $S=-1$; C_0 、 C_1 、 C_2 、 d_1 、 d_2 、 d_3 均为常数, $C_0=2.515\ 517$ 、 $C_1=0.802\ 853$ 、 $C_2=0.010\ 328$ 、 $d_1=1.432\ 788$ 、 $d_2=0.189\ 269$ 、 $d_3=0.001\ 308$ 。

采用月尺度计算标准化降水指数(SPI),累计周期为 1 个月,将气象干旱的阈值设定为 -1,即标准化降水指数小于 -1 时,该格点被认定为当月发生干旱。这是由于当干旱阈值设定为通常的 -0.5 时,干旱范围显著扩大,导致多个相邻区域的干旱连成一片,从而会减少独立干旱事件的数量。

2.2.2 时空连续性事件的识别及特征

基于格点逐月降水数据,使用三维连通组件(CC3D)算法追踪时空上连续的干旱事件。CC3D 算法是对二维图像连通组件标记(CCL)算法的三维扩展^[7],用于识别三维数据中的连通区域。传统方法如游程理论聚焦于单站或单点,忽略了干旱在空间上的传播,CC3D 算法能较好弥补这一不足。

如图 1(a)所示,该算法各步骤为:①对三维数据进行初步扫描,根据邻域系数(如 6、18 或 26 邻域系数)为每个单元临时分配标签。邻域系数的选择决定了连通性分析的范围,系数越大,邻域连接越宽松。26 邻域系数适用于数据平滑且边界不明显的场景,适合检测大范围的连通区域。因此,采用 26 邻域系数来识别时空连续性事件。图 1 中,粉色单元表示干旱月份,灰色单元表示非干旱月份,红色单元为追踪的起始点(步骤 1)。②从起始点(红色单元)出发,检查其相邻单元是

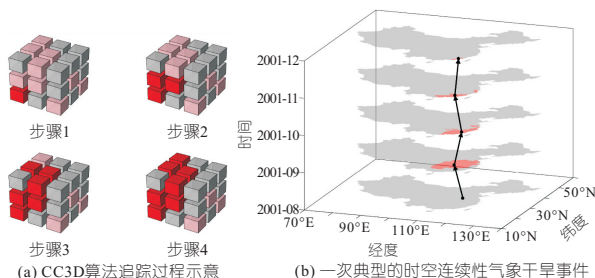


图 1 CC3D 算法追踪过程示意及一次典型的时空连续性气象干旱事件

Fig. 1 Illustration of the tracking process of CC3D algorithm and a single typical spatiotemporal continuous drought event

否属于同一连通事件(粉色单元)。若是则将这些单元标记为同一事件的一部分(步骤 2、3)。在标记过程中,记录所有等价标签对,即将具有相同连通性的单元归为同一组。这一步骤确保了从不同方向搜索的结果能够整合为统一的连通事件。③重复搜索和标记过程,直到所有连通单元(粉色单元)都被分配到一个特定事件中(步骤 4)。识别完成后,输出标记完成的三维数组,其中每个连通组件对应一个唯一的标签。图 1(b)中展示的是 2001 年 8~12 月,发生在华南地区的一次时空连续性气象干旱事件。

采用干旱持续时间、强度、最大面积、总面积、移动距离、移动速度及移动方向等指标衡量时空连续性气象干旱的特征,见表 1。

表 1 时空连续性气象干旱的特征及描述
Tab. 1 Characteristics and descriptions of the spatiotemporal continuous droughts

特征	描述
持续时间/月	事件开始和结束之间的时间间隔
干旱强度	事件期间所有网格单元的 SPI 面积加权平均值
最大面积/ 10^6km^2	事件在经纬度平面上的投影面积,即事件可能影响的最大区域
总面积/ 10^6km^2	事件期间中所有网格单元的面积总和
移动距离/km	事件期间中,相邻时间步之间强度加权的质心所移动距离之和
移动速度/ $(\text{km} \cdot \text{d}^{-1})$	事件总移动距离与事件持续时间的比值
移动方向/ $(^\circ)$	从事件开始时强度加权的质心位置到结束时的质心位置的方向角

2.2.3 层次聚类方法

层次聚类是一种基于树状结构的聚类方法,广泛应用于数据分析和模式识别。其主要思想是根据样本之间的相似性,构建一个层次化的聚类结构,使得相似的样本先聚合,而相对不相似的样本在较高的层次上合并。层次聚类的具体过程包括自底向上的凝聚(聚合)方法和自顶向下的分裂方法两种主要方式。其中,凝聚层次聚类从每个样本作为单独的簇开始,逐步合并最相似的簇,直至形成所需的聚类结构;而分裂层次聚类则从所有样本组成一个整体簇开始,逐步拆分最不相似的簇,直至达到指定的聚类数。最终,层次聚类的结果通常以树状图的形式呈现,直观地展示样本之间的层次关系^[8]。

3 结果与分析

3.1 时空连续性气象干旱的空间分布

根据 SPI 指数,采用时空连续性事件的识别方法筛选出了 1961~2021 年间中国发生的持续三个月以上的气象干旱事件。图 2 展示了识别出

的 106 个时空连续性气象干旱事件的空间分布。图 2 中箭头的起点和终点分别表示干旱事件的起止时刻强度加权的质心位置,箭头的方向和矢量长度则分别指示干旱的移动方向和距离。部分事件的终点位于中国境外,这是由于终点位置由强度加权质心决定。其中,红色五角星所标记的事件,对应于图 1(b)中展示的时空连续性气象干旱事件。由图 2 可知,时空连续性气象干旱事件在全国范围内均有分布,尤其是中部和西部地区分布较多。事件的移动距离差异较大,覆盖范围从局部地区到几乎小半个中国。相比之下,起源于东北地区的时空连续性气象干旱事件较少,且移动范围较小。

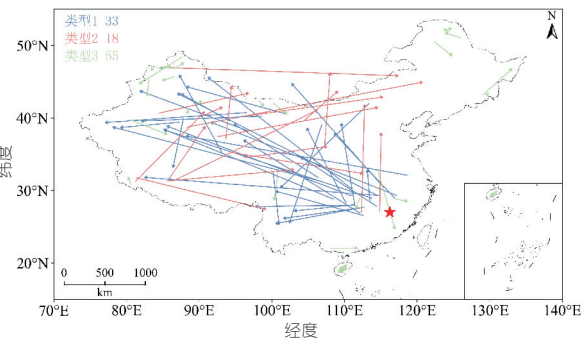


图 2 1961~2021 年中国时空连续性气象干旱事件及传播模式

Fig. 2 Spatiotemporally continuous meteorological drought events and propagation patterns in China from 1961 to 2021

3.2 不同传播模式的特征

采用层次聚类方法,根据干旱事件的移动距离和移动方向,将时空连续性气象干旱的传播模式划分为不同类型(图 3(a))。通过轮廓系数来进一步确定最优簇数,结果显示,当簇数为 3 时,轮廓系数最大(图 3(b))。因此,将时空连续性气象干旱事件分为三类。

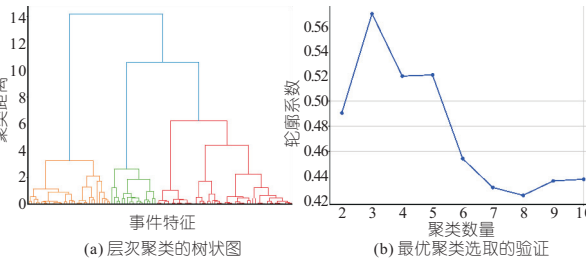


图 3 层次聚类的树状图 and 最优聚类选取的验证
Fig. 3 Dendrogram of hierarchical clustering and validation of optimal cluster selection

如图 2、4 所示,类型 1~3 这三类传播模式之间存在显著差异。类型 1(共计 33 次事件)的干旱事件移动距离较长(平均 5 190 km),主要向西移动,尤其是向西北方向,这些事件通常起源于中国东部地区并向西北移动,或起源于西北地区并

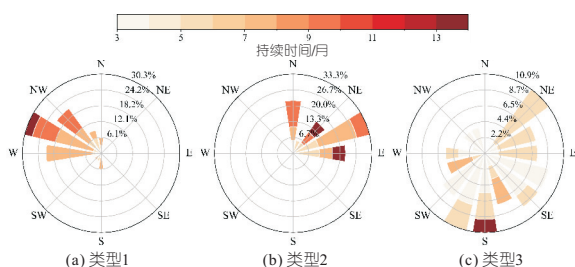


图 4 三种干旱传播模式的持续时间和方向分布

Fig. 4 Duration and directional distribution of the three drought propagation patterns

继续向西移动。类型 2(共计 18 次事件)的干旱事件移动距离较长(平均约 4 610 km),主要向东移动,且主要起源于中国西部地区。类型 3(共计 55 次事件)的干旱事件具有较短的移动距离(平均约 270 km),移动方向不确定,且主要发生在海南、东北北部及西北地区,持续时间一般不超过 13 个月。除类型 3 外,其余类型均存在干旱事件持续时间长达 21 个月,说明干旱持续时间并不受事件影响范围的影响。

为定量比较三种类型连续性干旱的差异,图 5 展示了其各项特征的分位数分布。由图 5 可知,类型 1、2 的干旱事件各项特征总体上均大于类型 3。从中位数来看,类型 1、2 的持续时间均为 8 个月,而类型 3 则仅有 3 个月。类型 1、2 的面积和移动距离、速度远远大于类型 3,其中最大面积约为 220 倍,总面积约为 216 倍,移动距离约为 44 倍,移动速度约为 21 倍。然而,类型 1、2 的干旱强度,与类型 3 的差异则不明显。

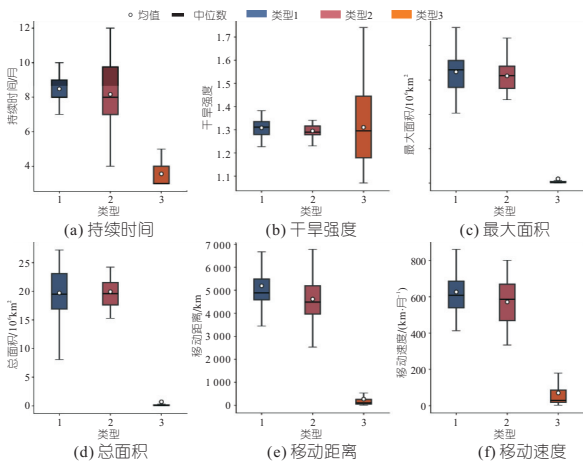


图 5 三种干旱传播模式的多个特征比较

Fig. 5 Comparison of multiple characteristics of the three drought propagation patterns

综上所述,类型 3 的干旱事件发生次数多、影响范围小、持续时间短,其应该主要是受局地性过程的控制。相比之下,类型 1、2 的干旱事件发生次数少、影响范围广泛、持续时间长,应该主要是受到大尺度因子的控制。同时,尽管不同类型干

旱事件的影响范围不同,但他们的干旱强度类似。因此,干旱强度与影响范围、持续时间之间并非简单的线性关系。更大的影响范围和持续时间并不必然导致干旱强度的显著增加。换句话说,干旱强度可能更多地受到局地水分过程和降水特征的影响,而不仅仅是事件的空间扩展或时间延续。

3.3 未来时空连续性气象干旱事件预估

采用基于 11 种模式的平均降水预估数据来分析中国未来时空连续性气象干旱事件的变化特征。通过模式集合平均的降水数据,识别出的 2030~2100 年的连续性气象干旱事件同样可以被分为三类,与 1961~2021 的连续性气象干旱事件分类一致。与历时情景(1961~2021 年)相比,中排放情景(SSP2-4.5)和高排放情景(SSP5-8.5)在 2030~2100 年期间识别出的时空连续性气象干旱事件发生次数增加。

进一步使用概率密度函数来比较历史情景和未来情景的时空连续性气象干旱事件的特征变化,结果见图 6。两种未来情景下的概率密度函数差别不大。这可能是由于两种情境下未来气候模式对降水变化的模拟差异较小,或者可能是两种情景下影响气象干旱的大尺度环流特征相似。

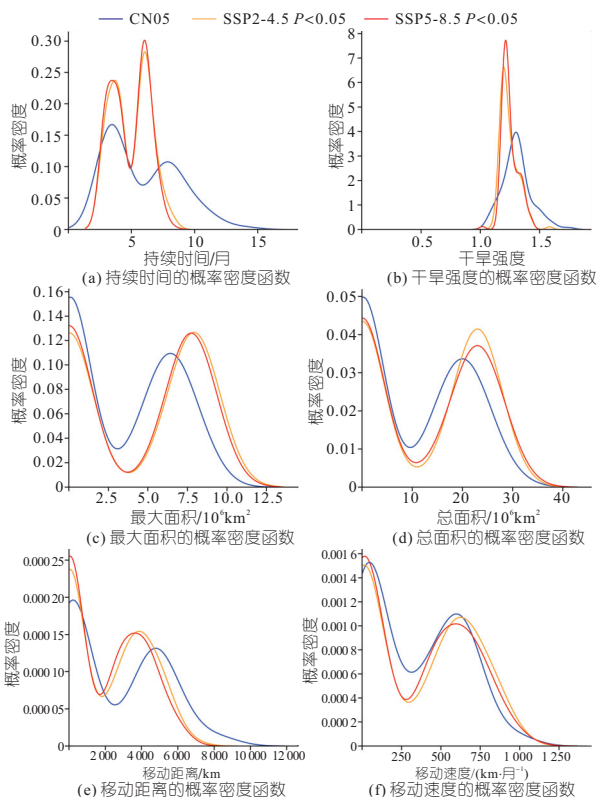


图 6 历史时期、SSP2-4.5 和 SSP5-8.5 排放情景下时空连续性气象干旱特征的概率密度函数曲线

Fig. 6 Distribution of probability density function of spatiotemporal continuity characteristics of meteorological drought in historical period, SSP2-4.5 and SSP5-8.5 scenarios

由图 6(a)、(b)可看出,未来情景下具有较短持续时间和较弱干旱强度的时空连续性气象干旱事件发生的概率有上升趋势。由图 6(c)、(d)可看出,未来情景下具有更广影响范围的时空连续性气象干旱事件发生的概率有上升趋势。由图 6(e)可看出,未来情景下的时空连续性气象干旱事件,其概率密度曲线相对于历史时期整体向左偏移,表明极端事件的平均移动距离减少,而具有较小影响范围的时空连续性气象干旱事件发生的概率有上升趋势。由图 6(f)可看出,未来情景与历史情景的概率分布基本相似,但未来情景下的概率密度曲线具有较大的尾部,意味着一些干旱事件会有更快的移动速度。

4 结论

a. 1961~2021 年中国的时空连续性气象干旱事件可被分为 3 种传播模式,类型 1 事件主要起源于中国东南地区,向西北传播;类型 2 事件主要起源于中国西北并向西传播;这两类气象干旱事件持续时间长、影响范围广,但发生频率较低。类型 3 发生频率高、持续时间短、影响范围较小。

b. 未来的两种排放情景下,时空连续性气象干旱的数量和特征差异不明显。但与历史情景相比,事件总数量呈上升趋势,持续时间和强度有所减弱,最大面积和总面积均呈增加趋势。

c. 本文利用时空连续性事件的识别方法,采用 CC3D 算法,识别在时间和空间上均连续的气象

(上接第 10 页)

- [4] 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. (WANG J F, XU C D. Geodetector: Principle and prospective[J]. Acta geographica sinica, 2017, 72(1): 116-134. (in Chinese))
- [5] 张晨钰,王伟,黄莉,等. 高度城镇化背景下深圳市易涝点驱动因子分析[J]. 水资源保护, 2024, 40(2): 35-45. (ZHANG C Y, WANG W, HUANG L, et al. Analysis of driving factors for waterlogging points in Shenzhen City under high urbanization background[J]. Water resources protection, 2024, 40(2): 35-45. (in Chinese))
- [6] FU G, WANG W, LI J S, et al. Prediction and selection of appropriate landscape metrics and optimal scale ranges based on multi-scale interaction analysis[J]. Land, 2021, 10(11): 1192.
- [7] WU J G. Effects of changing scale on landscape pattern analysis: Scaling relations[J]. Landscape ecology, 2004, 19(2): 125-138.
- [8] HUANG Y Q, LIN J Y, HE X Y, et al. Assessing the scale effect of urban vertical patterns on urban waterlogging: An empirical study in Shenzhen[J]. Environmental impact assessment review, 2024, 干旱事件,并定量分析了气象干旱的传播模式,丰富了我国气象干旱三维时空传播特征的研究内容。
- 参考文献:
- [1] DILLEY M, CHEN R S, DEICHMANN U, et al. Natural disaster hotspots: A global risk analysis [M]. Washington DC: World Bank, 2005.
- [2] 程亮,金菊良,郦建强,等. 干旱频率分析研究进展[J]. 水科学进展, 2013, 24(2): 296-302. (CHENG L, JIN J L, LI J Q, et al. Advance in the study of drought frequency analysis[J]. Advances in water science, 2013, 24(2): 296-302. (in Chinese))
- [3] HASLINGER K, BLÖSCHL G. Space-time patterns of meteorological drought events in the European greater alpine region over the past 210 years [J]. Water resources research, 2017, 53(11): 9807-9823.
- [4] HERRERA-ESTRADA J E, SATOH Y, SHEPHERD J. Spatiotemporal dynamics of global drought[J]. Geophysical research letters, 2017, 44(5): 2254-2263.
- [5] WU J, GAO X J. A gridded daily observation dataset over China region and comparison with the other datasets[J]. Chinese journal of geophysics, 2013, 56(4): 1102-1111.
- [6] SEILER R A, HAYES M, BRESSAN L. Using the standardized precipitation index for flood risk monitoring[J]. International journal of climatology, 2002, 22(11): 1365-1376.
- [7] SILVERSMITH W. cc3d: Connected components on multilabel 3D & 2D images[EB/OL]. <https://github.com/seung-lab/connected-components-3d>, 2021.
- [8] DASGUPTA S, LONG P M. Performance guarantees for hierarchical clustering[J]. Journal of computer and system sciences, 2005, 70(4): 555-569.
- [9] 郑佳薇,尹昌应,戴丽,等. 多尺度下西南喀斯特山地城市内涝空间分布特征与驱动力分析:以贵阳市为例[J]. 水利水电技术, 2023(2): 33-46. (ZHENG J W, YIN C Y, DAI L, et al. Analysis of spatial and temporal distribution characteristics and driving factors of inundation in karst mountains, Southwest China at multi-scales: Taking Guiyang City as an example[J]. Water resources and hydro-power engineering, 2023(2): 33-46. (in Chinese))
- [10] 张晨钰,王伟,黄莉,等. 高度城镇化背景下粤港澳大湾区易涝点驱动力分析:以深圳市为例[J/OL]. 水资源保护, 2023: 1-19. (2023-08-01). <https://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?filename=SZYB20230728001&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ>. (ZHANG C Y, WANG W, HUANG L, et al. Driving forces of waterlogging sites in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area in the context of high urbanization: Taking Shenzhen City as an example[J/OL]. Water resources protection, 2023: 1-19. (2023-08-01). <https://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?filename=SZYB20230728001&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ>. (in Chinese))