

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2021.04.009

昆明市极端降水事件演变特征及城市效应

王 辉^{1,2}, 吴文俊³, 王 广¹, 赵珍丽¹, 陈静敏¹, 严长安¹

(1. 昆明市生态环境科学研究院, 云南 昆明 650032; 2. 昆明市滇池水生态管理中心, 云南 昆明 650028;
3. 生态环境部环境规划院国家环境保护环境规划与政策模拟重点实验室, 北京 100012)

摘要:为探究昆明市极端降水事件在城市化进程中的演变规律,基于百分位法、Mann-Kendall 检验及 R/S 分析等方法,对 1960—2017 年昆明市极端降水事件时空演变特征、严重程度及城市效应进行了定量分析。结果表明:1960—2017 年昆明市极端降水量呈不显著增加趋势,速率为 0.24 mm/a,且其发生率、贡献率及强度均呈增长变化,降水昼夜间分配不均,极端降水量在主城区以及城市下风区存在明显高值区;1960—2017 年城市化对年极端降水的增雨系数为 1.16,城市化增雨明显,并且呈加剧趋势;昆明市缓慢发展期城市效应不明显,而快速发展期极端降水量城、郊差异均值较缓慢发展期增长了 57.04%,城市效应凸显;极端降水严重度指数及其城、郊差异均呈持续增加趋势,表明昆明市极端降水严重程度以及城市化对其影响效应均将不断加剧。

关键词:极端降水事件;城市效应;严重度指数;昆明市

中图分类号:TV125 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2021)04-0061-08

Evolution characteristics of extreme precipitation events and its urban effect in Kunming City// WANG Hui^{1,2}, WU Wenjun³, WANG Guang¹, ZHAO Zhenli¹, CHEN Jingmin¹, YAN Chang'an¹ (1. Kunming Institute of Eco-Environmental Sciences, Kunming 650032, China; 2. Kunming Dianchi Water Ecological Management Center, Kunming 650028, China; 3. State Environmental Protection Key Laboratory of Environmental Planning and Policy Simulation, Chinese Academy of Environmental Planning, Beijing 100012, China)

Abstract: In order to explore the evolution law of extreme precipitation events during the process of urbanization in Kunming, the temporal and spatial evolution characteristics, severity and urban effect of extreme precipitation events in Kunming from 1960 to 2017 were quantitatively analyzed based on the percentile method, Mann-Kendall test, R/S analysis and other methods. The results show that from 1960 to 2017, the extreme precipitation in Kunming showed no significant increasing trend with a rate of 0.24 mm/a, while its occurrence rate, contribution rate and intensity all showed increasing changes. The distribution of precipitation was uneven between night and day. The extreme precipitation in the main urban area and the downwind area of the city had obvious high value areas. From 1960 to 2017, the enhancement coefficient of urbanization to annual extreme precipitation was 1.16, which indicated that the effect of urbanization on increase of precipitation was obvious, and the effect tended to intensify. The urban effect of Kunming was not obvious in the slow development period, while the mean value of extreme precipitation difference between urban and suburban areas increased by 57.04% in the rapid development period with the urban effect being prominent. The extreme precipitation severity index and the index difference between urban and suburban areas showed continuous increasing trend, which indicated that the severity of extreme precipitation and the effect of urbanization on it will continue to intensify.

Key words: extreme precipitation events; urban effect; severity index; Kunming City

在全球气候变暖及人类活动干扰的影响下,区域乃至全球水循环过程发生了明显变化^[1],导致极端降水等气象事件频发,严重威胁区域社会经济发

展及生态文明建设。极端降水作为水循环和非点源污染物传输过程的重要驱动力^[2],其时空规律变化是导致区域水循环和水环境变异的重要因素,目前

基金项目:国家自然科学基金(4176010618)

作者简介:王辉(1993—),男,助理工程师,硕士,主要从事气候变化及环境系统模拟研究。E-mail: hwh1993@163.com

通信作者:严长安(1986—),男,副研究员,博士,主要从事环境系统模拟研究。E-mail: ycaandy88@163.com

对此已开展了不少研究,如 Donat 等^[3]研究指出全球极端降水呈现显著的增加趋势;Wahl 等^[4]研究指出极端降水事件致使美国主要城市的洪涝风险日益凸显;国内学者在全国、地区、流域等不同尺度上对极端降水变化特征开展了诸多研究^[5-7],对极端降水事件发生频率、强度的变化规律给予了充分关注^[8-9],同时也有学者对气候模式评估^[10]、极端降水形成的物理机制^[11-12]等方面开展了研究。随着城市化快速发展,城市化对降水影响效应吸引了不同学者对其展开研究,主要涉及城市化对降水影响的数据解析、物理机制及数值模拟等多个方面^[13],如 Shem 等^[14]采用数值模拟方法研究表明城市下风区降水频次偏多;国内学者通过城郊对比分析发现我国北京、上海、深圳等城市“雨岛效应”明显^[15-17]。

目前关于极端降水事件及城市效应已有不少研究成果,但在极端降水研究中通常采用频次、强度等指标侧面表征其严重程度,而鲜有采用极端降水严重度指数^[18] (extreme precipitation severity index, EPSI) 进行定量评估;在城市效应对降水影响研究中多采用传统的城郊雨量站对比分析法,而昆明市作为典型的高原山地城市,因其特殊的地形及气候特征,目前的城郊站划分方法对其适用性不高。本文采用 EPSI 以及多种统计学方法,定量分析昆明市 1960—2017 年极端降水事件演变特征及城市效应,并提出了一种适用于昆明市高原山地城市特征的城郊雨量站划分方法,可较为科学合理地开展城市化对极端降水的影响评估,以期为昆明市等高原山地城市的极端降水事件风险管控以及非点源污染控制提供参考。

1 研究区概况

昆明市地处云贵高原中部(102°10'E ~ 103°40'E、24°23'N ~ 26°22'N),整体地势北高南低,由北向南逐级降低,中部隆起,东西两侧较低,海拔高度介于 1 500 ~ 2 800 m 之间,以湖盆岩溶高原地貌形态为主,红色山原地貌次之,是典型的高原山地城市。昆明属亚热带高原季风气候,由于受印度洋西南暖湿气流的影响,盛行西南风,日照长、霜期短,降水充沛,干湿分明。市内建有国家级地面雨量站 12 个,其空间分布情况见图 1。

2 研究方法

2.1 数据来源及一致性检验

降水量数据采用昆明市 12 个国家级地面雨量站 1960—2017 年逐日、白天(8:00—20:00 累积)及夜间(20:00—8:00 累积)观测数据,数据来源于中

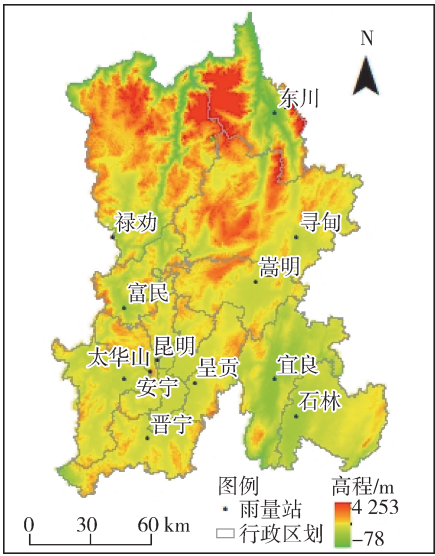


图 1 昆明市地形及雨量站空间分布

Fig.1 Spatial distribution of topography and meteorological stations in Kunming

国气象数据中心;人口数据采用 1960—2017 昆明市逐年城镇人口、常住人口,数据来源于昆明市统计年鉴;高程数据采用昆明市 30 m 分辨率数字高程数据,数据来源于地理空间数据云(www. gscloud. cn)。

采用双累积曲线对各雨量站降水观测序列进行一致性检验及缺测插补,图 2 为昆明站和晋宁站检验结果,可见两站的平均累积降水量与地区平均累积降水量均具有较好的相关性,趋势未发生突变,数据一致性较好。

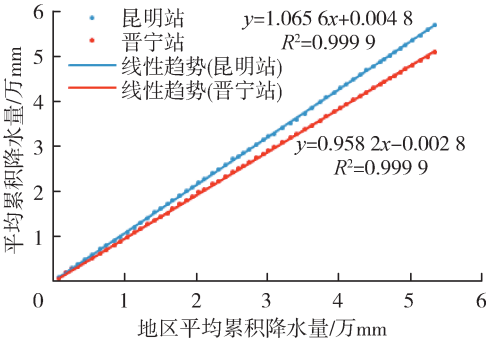


图 2 降水序列一致性检验

Fig.2 Consistency test of precipitation sequence

2.2 极端降水阈值计算

采用百分位法确定昆明市各雨量站的极端降水阈值,具体做法为:将各雨量站 1960—2017 年日降水量序列升序排列,将日降水量大于或等于 0.1 mm 子样本的第 95 个百分位对应的日降水量定义为极端降水阈值,当日降水量超过该阈值时,就认为该日出现了极端降水事件^[7]。

2.3 EPSI 计算

采用 Du 等^[18]提出的 EPSI 来定量表征极端降

水事件严重程度, EPSI 越大, 表示极端降水事件越严重。具体计算步骤包括: 计算平均强度, 标准化处理, 计算 EPSI。

a. 计算平均强度。

$$z_i = y_i/x_i \quad (i = 1, 2, \cdots, n) \quad (1)$$

式中: z_i 为第 i 年的极端降水平均强度, % ; y_i 为第 i 年超过阈值部分降水总量与阈值比值, % ; x_i 为第 i 年极端降水频次; n 为年份数。

b. 标准化处理。

$$x'_i = (x_i - x_{\max})/(x_{\max} - x_{\min}) \quad (2)$$

$$z'_i = (z_i - z_{\max})/(z_{\max} - z_{\min}) \quad (3)$$

式中: x'_i 、 z'_i 分别为标准化后极端降水频次与平均强度; $x_{\max}$ 、 $x_{\min}$ 、 $z_{\max}$ 、 $z_{\min}$ 分别为极端降水频次与平均强度的最大、最小值。

c. 计算 EPSI。

$$I_i = k_1 x'_i + k_2 z'_i \quad (i = 1, 2, \cdots, n) \quad (4)$$

式中: I_i 为第 i 年的 EPSI 值; k_1 、 k_2 分别为极端降水频次与平均强度的权重系数, 取 $k_1 = k_2 = \frac{1}{2}$ 。

2.4 降水大尺度气候背景及局地变化分离方法

采用于淑秋^[19]提出的平均值方法分离降水大尺度气候背景及局地变化。设有一极端降水序列 $\{R_{ij}\}$ ($i = 1, 2, \cdots, n; j = 1, 2, \cdots, m$, 其中 i 表示年份序列, j 表示站点), 对 m 站极端降水序列做平均得到地区年极端降水序列 $\{R_i\}$, 代表区域大尺度极端降水变化, 其多年平均值记为 $\bar{R}$, 则局地降水距平百分率可定义为 $r_{ij} = (R_{ij} - R_i)/\bar{R}$, 代表局地极端降水差异。

2.5 城郊雨量站划分方法

本文在相关研究的基础上, 提出一种适用于昆明市高原山地城市特征的城郊雨量站划分方法, 具体流程为: ①下垫面特征遴选。以各雨量站为中心, 建立半径为 2 km 的缓冲区, 计算各缓冲区内人工建筑面积占比, 规定缓冲区内人工建筑面积占比不超过 40% 为郊区站, 大于 40% 为城市站^[20]。②人口指标筛选。参考 Li 等^[21]的研究成果, 将雨量站所在城市的城镇人口在 15 万人以下的雨量站定义为郊区站, 15 万人以上定义为城市站。③剔除地形与海拔影响。海拔是导致降水发生变化的因素^[22], 对高原山地城市而言, 地形与海拔对降水影响不能忽略, 规定以昆明站为基准, 所选雨量站与其海拔相对高差比例不超过 1%。④剔除气候因素影响。降水受区域大尺度气候特征影响明显, 如城市下风区降水偏多^[14], 规定以昆明站为基准, 所选雨量站与其受大尺度气候影响应尽量相同, 并注意避免选取城市下风区站点。

2.6 极端降水指标选取

选取年极端降水量、极端降水发生率、极端降水贡献率、极端降水强度、极端降水 EPSI、最大日降水量、降水夜昼差(夜间与日间降水差值)共 7 项指标对极端降水事件进行分析。此外采用气候倾向法、Mann-Kendall 检验、R/S 分析等统计学方法对降水事件序列进行趋势、突变及趋势持续性分析。

3 结果与分析

3.1 极端降水事件演变特征

3.1.1 极端降水事件大尺度演变特征

由图 3 可知昆明市极端降水阈值分布存在明显的空间局地差异, 整体上东北、西南两侧相对较低, 最大值 32.1 mm, 位于太华山站附近, 该处地势相对较高(海拔 2 358.3 m); 最小值 25.6 mm, 位于东川站附近, 该处地势相对较低(海拔 1 254.1 m), 表明昆明市极端降水阈值空间分布和地形高度有一定的相关性。郑祚芳等^[23]对北京地区的研究也得到了相同的结论。

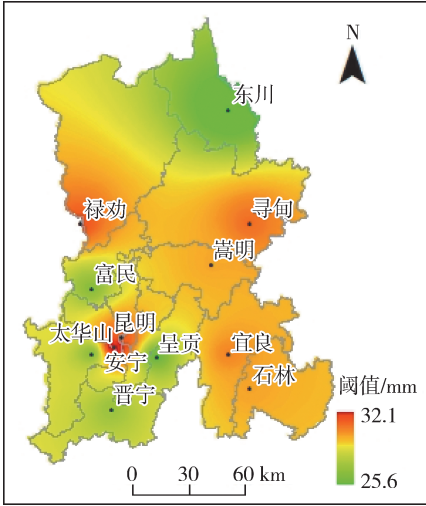


图 3 昆明市极端降水阈值空间分布
Fig.3 Spatial distribution of extreme precipitation threshold in Kunming City

对昆明市 1960—2017 年极端降水序列统计分析得到昆明市多年平均极端降水量为 283.85 mm, 比云南省多年平均极端降水量 269 mm 要高^[24], 这可能与昆明作为省会城市, 高速的城市化发展导致的“雨岛效应”更明显有关。以变化速率来看, 年极端降水量整体上呈不显著的增加趋势($\alpha = 0.05$), 其速率为 0.24 mm/a。极端降水发生率与贡献率多年平均值分别为 5.02% 和 29.97%, 二者均呈不显著增加趋势($\alpha = 0.05$)。极端降水强度呈不显著增加趋势, 其多年平均值为 44.12 mm/d, 是昆明市同

时期平均降水强度(7.77 mm/d)的 5.68 倍。最大日降水量呈不显著增加趋势,其多年平均值为 67.89 mm。降水夜昼差多年平均值为 73.39 mm,表明昆明市降水在夜昼之间分配不均,总体夜间降水量多于白天,并且这种夜昼分配不均匀特征以 0.34 mm/a 速率在加剧。

由图 4 可知,昆明市极端降水事件主要发生于 5—10 月,尤其以夏季(6—8 月)最为严重,这与降水年内分配曲线的变化相似,可见极端降水对降水年内分配过程起到较大贡献作用。最大日降水量大致呈单峰型分布,峰值处于 6—7 月之间,而 1—4 月及 12 月值较小。降水夜昼差在 6 月达到高峰,并且在极端降水量较多的月份,降水夜昼差异也相对明显。可见昆明市夜间及夏季极端降水是重点风险管控对象。

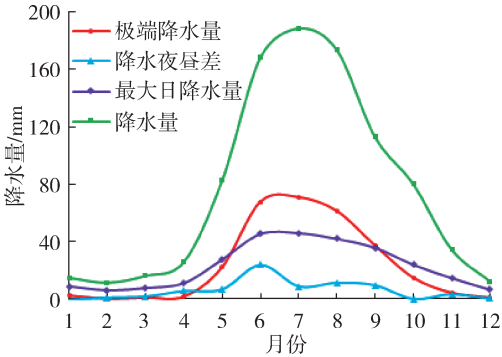


图 4 昆明市降水年内分布情况

Fig. 4 Annual distribution of precipitation and extreme precipitation in Kunming City

3.1.2 极端降水事件局地差异特征

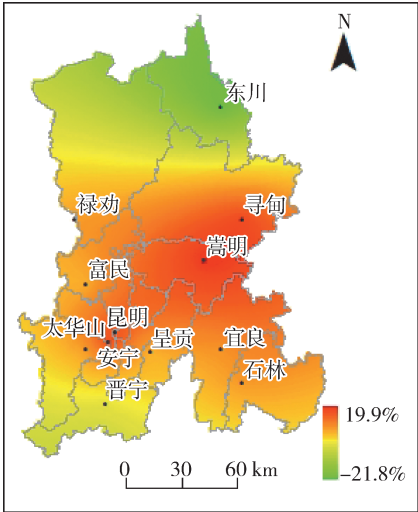
由图 5 可知,昆明市年极端降水量在空间上具有较大局地差异性,整体北部偏低,中部偏高,最小值位于东北部东川站附近,地处昆明市地势低洼处。地形可能是导致降水偏少的因素。中部地区存在两个高值区,其一位于主城区的昆明站附近,该高值区即“城市雨岛”中心^[18],其形成主要与城市化对极端降水的影响有较大关系;其二位于城市下风区嵩明、寻甸一带,已有研究表明在城市下风区降水偏多^[14],故认为该高值区形成主要与城市气候因素有关。最大日降水量高值区位于嵩明与寻甸一带,地处城市下风区,最小值位于东川地区。降水夜昼差整体呈由东北向西南递减的空间分布特征,与地形存在一定的关系,但二者之间的联系有待进一步研究。

3.2 城市化对极端降水事件变化的影响

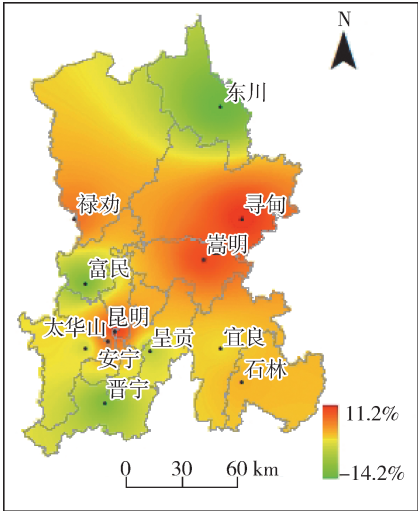
3.2.1 城郊雨量站与城市发展阶段划分结果

按城郊雨量站遴选流程,筛选出典型城市站为昆明站,郊区站为晋宁站(表 1),遴选结果较好

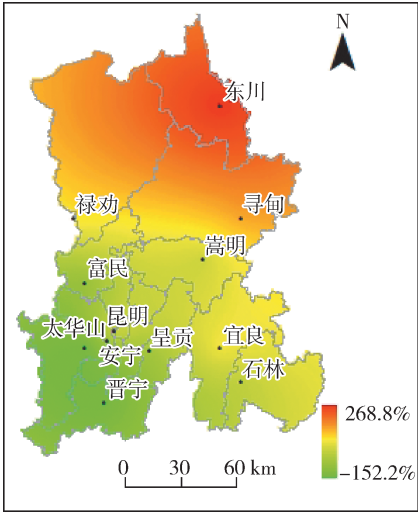
地符合昆明市高原山地城市特殊的地形及气候特征,是科学开展城市化对极端降水影响研究的基础。



(a) 年极端降水量



(b) 最大日降水量



(c) 降水夜昼差

图 5 极端降水事件距平百分率空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of anomaly percentage of extreme precipitation events

表 1 城郊雨量站划分结果

Table 1 Division results of urban and suburban meteorological stations

雨量站	人工建筑 面积占比/%	城镇人 口/万人	海拔相对高 差比例/%	站点类型
昆明站	72.31	76.55		城市站
晋宁站	36.67	12.82	0.26	郊区站

城市用地面积与城镇人口之间往往具有高度的相关性,城镇人口是分析城市化与气候变化之间关系的一个理想指标^[25],本文采用城市化率(城镇人口与常住总人口的比值)表征昆明市城市化发展进程。由图 6 可见,昆明市城市化发展大致呈二次函数型增长,其中存在一个明显的跃变点(2004 年)将其划分为两个明显的阶段:1960—2004 年缓慢发展期(以下简称缓慢期)和 2005—2017 年快速发展期(以下简称快速期),划分结果与张洪等^[26]采用综合指标法的研究结果一致。

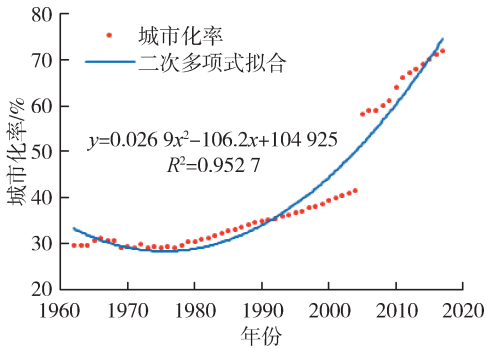


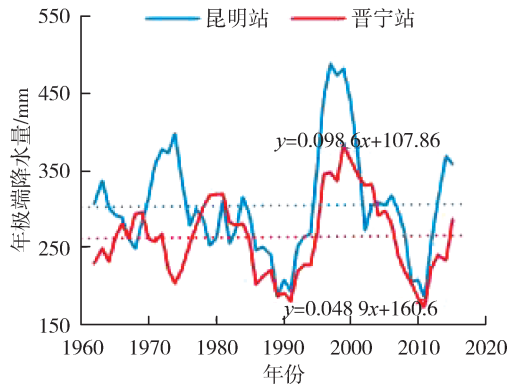
图 6 昆明市城市化率变化过程

Fig. 6 The change process of urbanization rate in Kunming

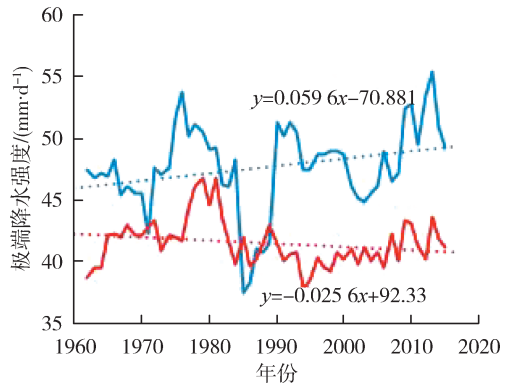
3.2.2 城市化对极端降水影响评估

城市降水受城市化水平、地形及气候等因素影响,由图 7(a)可知,昆明、晋宁站极端降水变化过程具有相似的转折及趋势波动,二者降水差异受区域大尺度气候影响很小。因此在相同气候背景及剔除地形因素影响的情况下,二者之间降水差异可归结为城市化影响。

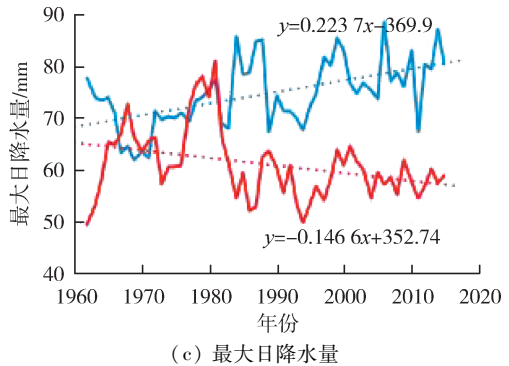
a. 中长期城郊雨量站对比。1960—2017 年昆明、晋宁站多年平均极端降水量分别为 305.26 mm 和 263.23 mm,增雨系数 Z_p 为 $1.16 > 1$,增雨效应明显;由图 7(a)可知,昆明站极端降水增长速率明显大于晋宁站,且城郊差异以速率 0.05 mm/a 呈增加趋势,可见城市化对极端降水影响明显。昆明、晋宁站多年平均极端降水强度分别为 47.71 mm/d 和 41.39 mm/d ,由图 7(b)可知昆明站极端降水强度变化速率明显大于晋宁站,且城郊差异呈显著增加趋势($\alpha = 0.05$),速率为 $0.09 \text{ mm}/(\text{d} \cdot \text{a})$,采用 Mann-Kendall 检验对极端降水强度城郊差异进行突变检验(图 8),UF 与 UK 两曲线在 2005 年前后存在交



(a) 年极端降水量



(b) 极端降水强度



(c) 最大日降水量

图 7 城郊雨量站极端降水及其差异 5 年滑动平均变化过程

Fig. 7 Five-year moving average process of extreme precipitation in urban and suburban stations and their difference

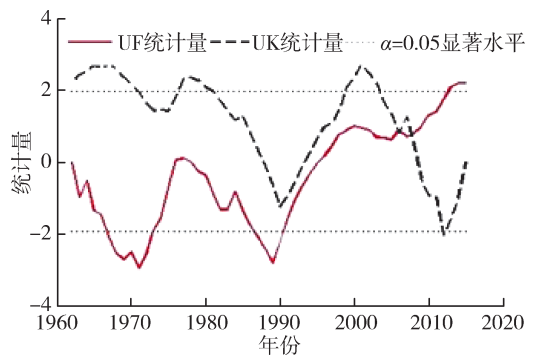


图 8 极端降水强度城郊差异 Mann-Kendall 检验曲线
Fig. 8 Mann-Kendall test curve of extreme precipitation intensity difference between urban and suburban

又且 UF 曲线超过置信水平($\alpha=0.05$),故城郊差异在 2005 年前后存在显著突变,这与昆明市城市化发展阶段也较吻合,可见城市化对于极端降水强度影响明显。昆明、晋宁站多年平均最大日降水量分别为 75.30 mm 和 60.69 mm,增雨系数 Z_p 为 $1.24 > 1$,增雨效应明显,由图 7(c)可知,昆明站最大日降水量变化速率明显大于晋宁站,且城郊差异以速率 0.37 mm/a 呈增加趋势,可见城市化对最大日降水量影响效应明显。由图 7 还可看出,昆明市极端降水各指标具有明显波动过程,这种波动性主要来源于降水序列周期性、趋势性及噪声等影响,这与曹晴等^[27]对中国极端降水的研究结果类似,说明降水序列具有一定的不确定性波动特性。

b. 不同发展阶段对比。在城市发展缓慢期和快速期年极端降水量城、郊差异均值分别为 37.27 mm 和 58.53 mm,快速期相比缓慢期增长了 57.04%,可见不同城市化水平对极端降水量均值影响明显;以变化速率看,缓慢期年极端降水量城、郊差异序列呈负增长,城市效应不明显,而快速期城、郊差异序列呈显著增加趋势($\alpha=0.1$),增速达 6.63 mm/a,快速期城市效应明显。极端降水强度城郊差异均值在快速期相对缓慢期增长 2.97 mm/d,并且在快速期城市化对其变化速率影响明显,较缓慢期变化速率增大了 0.37 mm/(d·a)。最大日降水量城郊差异均值在快速期相对缓慢期增长 9.11 mm,并且快速期城市化对最大日降水量变化速率影响明显,较缓慢期速率增大 0.33 mm/a。

3.3 极端降水事件严重程度演变特征及城市效应

3.3.1 极端降水事件严重程度演变特征

仅分析极端气候事件的发生频率或强度并不能合理表征其严重程度^[18],本文采用 EPSI 来探究昆明市极端降水事件严重程度演变规律。由图 9(a)可知,1960—2017 年昆明市极端降水 EPSI 整体呈增加趋势,最大值为 0.78(1994 年),最小值为 0.08(1992 年),多年平均值为 0.45,整体变化过程波动明显。将 EPSI 序列进行 5 年滑动平均处理后,大致呈现 3 个周期波动,波峰分别位于 1966 年、1981 年和 1995 年前后,而近几年 EPSI 处于一个相对增长期,可见目前以及未来几年昆明市仍需对极端降水事件的致灾性提高警惕。

从空间分布看(图 9(b)),EPSI 整体中部偏高、南北部偏低,存在两个高值中心,分别为主城区昆明站附近及城市下风区嵩明站一带,这与极端降水量空间分布具有较大相似性,这些均是空间风险管控重点区域。

3.3.2 城市化对极端降水事件严重程度影响评估

以城郊差异表示城市化对极端降水事件严重

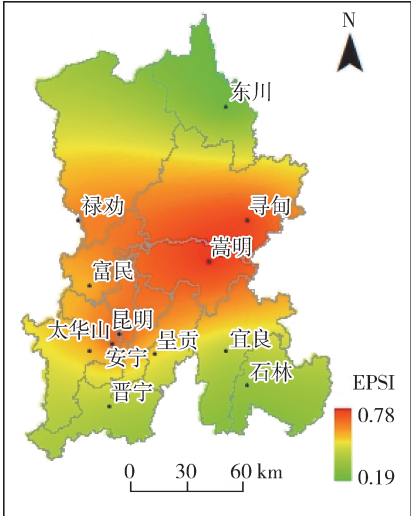
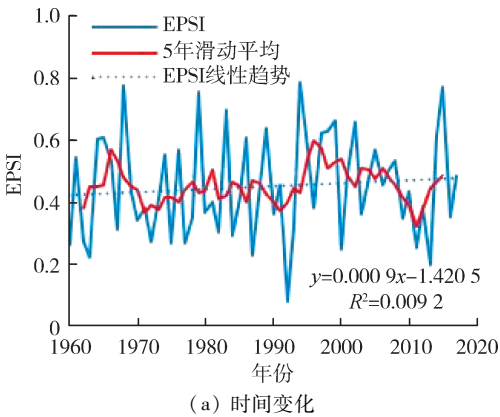


图 9 极端降水 EPSI 时空特征
Fig. 9 Time variation process and spatial distribution of extreme precipitation EPSI index

程度影响大小,如图 10 所示,1960—2017 年极端降水 EPSI 城、郊差异整体呈增加趋势。从不同时期来看,在缓慢期极端降水事件受城市化影响较小,EPSI 城郊差异未呈现明显规律,波动较大;快速期城市效应凸显,城郊 EPSI 差异值基本为正值,波动过程减小,整体呈增加变化趋势,可见城市化对极端降水事件严重程度产生了一定影响且影响效应随城市化发展有加剧趋势。

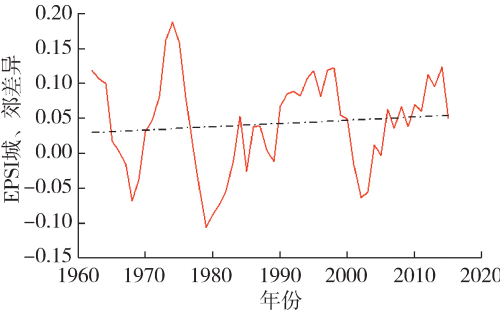


图 10 极端降水 EPSI 城郊差异变化过程
Fig. 10 The change process of extreme precipitation EPSI index between urban and suburban stations and their difference

3.3.3 极端降水事件及其严重程度演变趋势预测

昆明市各极端降水指标 Hurst 值(表 3)计算结果均大于 0.5,表明未来昆明市极端降水量、极端降水发生率、强度及严重程度均将保持增加趋势,昆明市未来对极端降水事件风险防控仍需加大力度。各极端降水指标城郊差异序列 Hurst 值计算结果也均大于 0.5,表明城市化对昆明市极端降水事件趋势影响具有持续性,未来昆明市“雨岛效应”将持续呈现,这可能会成为未来可持续发展限制因素之一。

表 3 极端降水指标 Hurst 值

Table 3 Hurst value of extreme precipitation index		
指标	Hurst 值	城郊差异序列 Hurst 值
年极端降水量	0.63	0.58
极端降水发生率	0.68	0.62
极端降水贡献率	0.65	0.65
极端降水强度	0.62	0.59
最大日降水量	0.61	0.70
降水夜昼差	0.54	0.63
极端降水 EPSI	0.59	0.59

4 结 论

a. 1960—2017 年昆明市年极端降水量呈不显著增加趋势,多年平均值为 283.85 mm,对年降水量贡献为 29.97%,且极端降水发生率、贡献率及强度均呈不同程度增加趋势;多年平均降水夜昼差为 73.39 mm,昆明市降水总体夜间多于白天,且这种夜昼分配不均匀特性具有加剧趋势;以降水年内分配看,极端降水在夏季(6—8 月)最为集中。

b. 昆明市极端降水整体呈北部偏低、中部偏高的空间分布特征,存在两个明显高值中心,其一位于主城的昆明站附近,即“城市雨岛”中心,其二位于城市下风区嵩明站一带,这些均是极端降水风险空间管控的重点区域。

c. 1960—2017 年城市化对年极端降水量的增雨系数为 1.16,城市增雨效应明显,并且以 0.05 mm/a 速率呈加剧趋势;不同城市化阶段城郊差异明显,快速发展期极端降水量城郊差异均值较缓慢期增长 57.04%,该阶段城市效应凸显。

d. 1960—2017 年昆明市极端降水 EPSI 及其城郊差异均呈增加趋势,且各指标 Hurst 值均大于 0.5,表明昆明市极端降水事件严重程度及其城市效应均将持续加剧。

参考文献:

[1] OKI T, KANAE S. Global hydrological cycles and world water resources [J]. Science, 2006, 313 (5790): 1068-1072.

[2] 黄国如,陈晓丽,任秀文. 北江飞来峡库区典型流域非点源污染特征分析及模拟[J]. 水资源保护, 2019, 35 (4): 9-16. (HUANG Guoru, CHEN Xiaoli, REN Xiuwen. Characteristic analysis and simulation of non-point source pollution in typical watershed of Feilaixia Reservoir area [J]. Water Resources Protection, 2019, 35 (4): 9-16. (in Chinese))

[3] DONAT M G, LOWRY A L, ALEXANDER L V, et al. More extreme precipitation in the world's dry and wet regions [J]. Nature Climate Change, 2016, 6 (5): 508-513.

[4] WAHL T, JAIN S, BENDER J, et al. Increasing risk of compound flooding from storm surge and precipitation for major US cities [J]. Nature Climate Change, 2015, 5 (12): 1093.

[5] 程诗悦,秦伟,郭乾坤,等. 近 50 年我国极端降水时空变化特征综述[J]. 中国水土保持科学, 2019, 17 (3): 155-161. (CHENG Shiyue, QIN Wei, GUO Qiankun, et al. Review on spatio-temporal variation of extreme precipitation events in China in the past 50 years [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2019, 17 (3): 155-161. (in Chinese))

[6] 李政,张文太,轩俊伟. 伊宁市 1956—2015 年强降雨特征及对洪灾的影响[J]. 水资源保护, 2018, 34 (6): 49-55. (LI Zheng, ZHANG Wentai, XUAN Junwei. Characteristics of heavy precipitation in Yining City from 1956 to 2015 and its impact on flood [J]. Water Resources Protection, 2018, 34 (6): 49-55. (in Chinese))

[7] 高冰,任依清. 鄱阳湖流域 1961—2010 年极端降水变化分析[J]. 水利水电科技进展, 2016, 36 (1): 31-35. (GAO Bing, REN Yiqing. Changes of extreme precipitation events in Poyang Lake Basin from 1961 to 2010 [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2016, 36 (1): 31-35. (in Chinese))

[8] 孔锋,方建,乔枫雪,等. 透视中国小时极端降水强度和频次的时空变化特征(1961—2013 年)[J]. 长江流域资源与环境, 2019, 28 (12): 3051-3067. (KONG Feng, FANG Jian, QIAO Fengxue, et al. Temporal and spatial variation characteristics of intensity and frequency of hourly extreme precipitation in China from 1961 to 2013 [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2019, 28 (12): 3051-3067. (in Chinese))

[9] 杜尧,陈启慧,和鹏飞,等. 南京地区暴雨变化特性分析[J]. 水资源保护, 2019, 35 (6): 89-94. (DU Yao, CHEN Qihui, HE Pengfei, et al. Analysis of rainstorm variation characteristics in Nanjing region [J]. Water Resources Protection, 2019, 35 (6): 89-94. (in Chinese))

[10] 赵彦茜,肖登攀,柏会子. CMIP5 气候模式对中国未来气候变化的预估和应用[J]. 气象科技, 2019, 47 (4): 608-621. (ZHAO Yanxi, XIAO Dengpan, BAI Hui. Projection and application for future climate in China by CMIP5 climate model [J]. Meteorological Science and

- Technology, 2019, 47(4): 608-621. (in Chinese))
- [11] 李银娥, 张文言, 陈赛男, 等. 2008—2017 年鄂西南区域极端降水特征及成因[J]. 干旱气象, 2019, 37(6): 875-884. (LI Yine, ZHANG Wenyan, CHEN Sainan, et al. Characteristics and causes of extreme precipitation in southwestern Hubei during 2008-2017[J]. Journal of Arid Meteorology, 2019, 37(6): 875-884. (in Chinese))
- [12] 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. El Nino event and its impact on the spatial and temporal distribution of summer precipitation in China [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2017, 45(6): 481-488. (in Chinese))
- [13] 胡庆芳, 张建云, 王银堂, 等. 城市化对降水影响的研究综述[J]. 水科学进展, 2018, 29(1): 138-150. (HU Qingfang, ZHANG Jianyun, WANG Yintang, et al. A review of urbanization impact on precipitation [J]. Advances in Water Science, 2018, 29(1): 138-150. (in Chinese))
- [14] SHEM W, SHEPHERD M. On the impact of urbanization on summertime thunderstorms in Atlanta: two numerical model case studies [J]. Atmospheric Research, 2009, 92(2): 172-189.
- [15] 丁凯熙, 张利平, 宋晓猛, 等. 北京地区汛期降雨时空演变特征及城市化影响研究[J]. 地理科学进展, 2019, 38(12): 1917-1932. (DING Kaixi, ZHANG Liping, SONG Xiaomeng, et al. Temporal and spatial features of precipitation and impact of urbanization on precipitation characteristics in flood season in Beijing [J]. Progress in Geography, 2019, 38(12): 1917-1932. (in Chinese))
- [16] 金义蓉, 胡庆芳, 王银堂, 等. 快速城市化对上海代表站降水的影响[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2017, 45(3): 204-210. (JIN Yirong, HU Qingfang, WANG Yintang, et al. Impacts of rapid urbanization on precipitation at two representative rain gauges in Shanghai City [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2017, 45(3): 204-210. (in Chinese))
- [17] 陈申鹏. 深圳多年降水变化规律和雨岛效应分析[J]. 气象科技进展, 2019, 9(3): 166-170. (CHEN Shenpeng. Multi-year variation of precipitation and rain island effect in Shenzhen [J]. Advances in Meteorological Science and Technology, 2019, 9(3): 166-170. (in Chinese))
- [18] DU Haibo, WU Zhengfang, ZONG Shengwei, et al. Assessing the characteristics of extreme precipitation over northeast China using the multifractal detrended fluctuation analysis [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2013, 118(12): 6165-6174.
- [19] 于淑秋. 北京地区降水年际变化及其城市效应的研究[J]. 自然科学进展, 2007(5): 632-638. (YU Shuqiu. A study on the interannual variation of precipitation and its urban effect in Beijing [J]. Progress in Natural Science, 2007, 17(5): 632-638. (in Chinese))
- [20] 任国玉, 张爱英, 初子莹, 等. 我国地面气温参考站点遴选的依据、原则和方法[J]. 气象科技, 2010, 38(1): 78-85. (REN Guoyu, ZHANG Aiyang, CHU Ziyang, et al. Principles and procedures for selecting reference surface air temperature stations in China [J]. Meteorological Science and Technology, 2010, 38(1): 78-85. (in Chinese))
- [21] LI Q, ZHANG H, LIU X, et al. Urban heat island effect on annual mean temperature during the last 50 years in China [J]. Theoretical and Applied Climatology, 2004, 79(3): 165-174.
- [22] 周秋雪, 康岚, 蒋兴文, 等. 四川盆地边缘山地强降水与海拔的关系[J]. 气象, 2019, 45(6): 811-819. (ZHOU Qiuxue, KANG Lan, JIANG Xingwen, et al. Relationship between heavy precipitation and altitude in mountainous areas of Sichuan Basin [J]. Meteorological Monthly, 2019, 45(6): 811-819. (in Chinese))
- [23] 郑祚芳, 王在文, 高华. 北京地区夏季极端降水变化特征及城市化的影响[J]. 气象, 2013, 39(12): 1635-1641. (ZHENG Zuofang, WANG Zaiwen, GAO Hua. Characteristics of extreme precipitation events in summer and its effect on urbanization in Beijing Area [J]. Meteorological Monthly, 2013, 39(12): 1635-1641. (in Chinese))
- [24] 杨晓静, 徐宗学, 左德鹏, 等. 云南省 1958—2013 年极端降水时空变化特征分析[J]. 灾害学, 2015, 30(4): 178-186. (YANG Xiaojing, XU Zongxue, ZUO Depeng, et al. Spatio-temporal characteristics of extreme precipitation in Yunnan Province from 1958-2013 [J]. Journal of Catastrophology, 2015, 30(4): 178-186. (in Chinese))
- [25] 崔林丽, 史军, 杨引明, 等. 长江三角洲气温变化特征及城市化影响[J]. 地理研究, 2008(4): 775-786. (CUI Linli, SHI Jun, YANG Yinming, et al. Temperature change characteristics and its influence by urbanization in the Yangtze River Delta [J]. Geographical Research, 2008, 27(4): 775-786. (in Chinese))
- [26] 张洪, 黎海林. 1998—2008 年昆明主城发展与滇池水环境交互耦合机制分析[J]. 中国水土保持, 2012(10): 64-66. (ZHANG Hong, LI Hailin. Interactive coupling mechanism of downtown development of Kunming and its impact on water environment of Dianchi Lake in period of 1998-2008 [J]. Soil and Water Conservation in China, 2012(10): 64-66. (in Chinese))
- [27] 曹晴, 郝振纯, 傅晓洁, 等. 1960—2017 年中国极端气候要素时空变化分析[J]. 人民黄河, 2020, 42(2): 11-17. (CAO Qing, HAO Zhenchun, FU Xiaojie, et al. Analysis of spatial-temporal changes of extreme climatic elements in China from 1960 to 2017 [J]. Yellow River, 2020, 42(2): 11-17. (in Chinese))

(收稿日期: 2020-02-28 编辑: 熊水斌)