

湘江流域城市化对夏季降水的影响研究

傅玉霞, 韩龙飞*

湖南师范大学地理科学学院, 湖南 长沙

收稿日期: 2026年3月14日; 录用日期: 2026年4月13日; 发布日期: 2026年6月29日

摘要

本研究基于1965~2020年湘江流域内78个国家级气象站点的逐日降水数据, 采用动态城乡站点分类法, 结合线性趋势拟合、S-T检验、分数位分析等方法, 量化了城市化对流域夏季降水及不同强度降水的影响特征。结果表明: ① 湘江流域城市化进程呈显著的阶段性, 2000年前发展缓慢, 2010~2020年进入高速扩张期。② 1965~2020年湘江流域夏季总降水量呈显著增加趋势, 城乡站点降水均呈增长特征, 城市站点增长速率(24.77 mm/10年)略高于农村站点(24.16 mm/10年)。③ 城市化对不同强度降水的影响存在明显差异, 对小雨、中雨等弱降水影响微弱, 对极端降水增强效应最为突出。城市站点极端降水增幅(12.45 mm/10年)为农村站点(7.59 mm/10年)的1.64倍, 且流域强降水增加高值区与长株潭城市群等城市化核心区高度耦合。④ 流域降水总量增加主要由高分位数(P70~P100)强降水驱动, 城乡降水趋势差异随分位数升高而扩大, 降水结构呈现“小雨占比持续下降、强降水占比逐步上升”特征, 2000年后快速城市化进一步拉大了城乡强降水占比差距。

关键词

城市化, 极端降水, 城乡动态分类

The Impact of Urbanization on Summer Precipitation in the Xiangjiang River Basin

Yuxia Fu, Longfei Han*

School of Geographical Sciences, Hunan Normal University, Changsha Hunan

Received: March 14, 2026; accepted: April 13, 2026; published: June 29, 2026

Abstract

Based on the daily precipitation data from 78 national meteorological stations in the Xiangjiang River Basin

作者简介: 傅玉霞(2000-), 江苏南京高淳人, 硕士研究生, 研究方向为城市化的气候效应, Email: 19825092582@163.com

*通讯作者 Email: hanlf@hunnu.edu.cn

文章引用: 傅玉霞, 韩龙飞. 湘江流域城市化对夏季降水的影响研究[J]. 水资源研究, 2026, 15(3): 230-242.

DOI: 10.12677/jwrr.2026.153027

during the year of 1965 to 2020, this study quantified the impact characteristics of urbanization on summer precipitation and different precipitation intensities in the basin by adopting the dynamic urban-rural station classification method, combined with the methods of linear trend fitting, Student's t-test and quantile analysis. The results show that: 1) The urbanization process of the Xiangjiang River Basin presented obvious phased characteristics, with slow development before 2000 and a rapid expansion period during 2010 to 2020. 2) The total summer precipitation in the Xiangjiang River Basin showed a significant increasing trend from 1965 to 2020, and the precipitation at both urban and rural stations presented a growing feature. The growth rate at urban stations (24.77 mm per decade) was slightly higher than that at rural stations (24.16 mm per decade). 3) Urbanization had distinct impacts on different precipitation intensities, with a negligible effect on light precipitation, while the enhancement effect on extreme precipitation was the most prominent. The growth rate of extreme precipitation at urban stations (12.45 mm per decade) was 1.64 times of that at rural stations (7.59 mm per decade), and the high-value areas of increased heavy precipitation in the basin were highly coupled with urbanization core areas in the Changsha-Zhuzhou-Xiangtan Urban Agglomeration. 4) The increase in the total precipitation was mainly driven by heavy precipitation in the high quantiles (P70~P100). The difference in precipitation trends between urban and rural areas expanded with the rise of quantiles, and the precipitation structure presented the characteristic of "a continuous decline in the proportion of light rain and a gradual rise in the proportion of heavy precipitation". The rapid urbanization after 2000 further widened the gap in the proportion of heavy precipitation between urban and rural areas.

Keywords

Urbanization, Extreme Precipitation, Dynamic Urban-Rural Classification

Copyright © 2026 by author(s) and Wuhan University & Bureau of Hydrology, Changjiang Water Resources Commission. This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

城市化是当代全球社会发展最重要的趋势之一,自 18 世纪以来,城市规模不断扩张、城市人口持续集聚,城市成为人类主要的栖息地,如今城市人口占比超 50%,到 2050 年将接近 70% [1]。中国作为世界城市化进程最快的国家,城市群扩张、不透水面剧增、人为热排放与气溶胶增多,深刻改变局地大气热力、动力与微物理过程,对夏季降水尤其是极端降水的影响日益突出[2]。夏季是我国强对流、暴雨等极端降水高发季,城市化叠加全球变暖,显著放大城市内涝、山洪、地质灾害风险[3],威胁城市基础设施安全、居民生命财产与水资源供需平衡。研究城市化对夏季极端降水的影响,一方面可以完善城市气候学理论、揭示人类活动与天气气候相互作用,另一方面可为城市防洪排涝规划、海绵城市建设、极端天气预警等提供科学依据[4]。

国内外对城市与降水关系的研究起步较早,早期 Changnon [5]利用美国伊利诺伊州乌尔班纳的降水资料绘制等雨量图,指出城市化会导致城市下风方向降水量大于城市中心及周边区域。Molders [6]对德国莱比锡和德累斯顿的研究验证了城市化对降水分布的扰动作用,发现城市外缘及下风方向降水显著增加。国内研究聚焦长三角、珠三角、京津冀等典型城市群,周莉等发现东部城市群夏季极端降水频次与强度显著高于郊区,城市化贡献率达 10%~36% [7];张珊等基于 WRF 模拟证实,京津冀城市扩张导致下风向极端降水增幅显著,50 mm 以上暴雨贡献率超 60% [8]。

尽管国内外学者已围绕城市化对夏季降水的影响开展了大量研究,证实了城市化通过改变下垫面属性、形成热岛效应及影响局地环流等方式,对夏季降水的时空分布、强度及频次产生显著作用,但现有研究仍存在诸多局限。首先,在站点分类方法上,多数研究采用固定分类模式,仅依据某一时期的入口、土地利用或夜间灯光数据将气象站点划分为城市站、城乡过渡站和农村站,忽略了城市化进程的动态演变特性,导致站点分类结

果与实际城市化水平脱节,无法反映不同城市化阶段站点属性的动态变化对降水观测的影响[9]。其次,部分研究对降水数据的利用不够充分,多聚焦于极端降水指标或月、季尺度的降水特征分析,对逐日降水观测数据的挖掘不足,难以捕捉城市化影响下夏季降水的短期波动规律及精细化响应机制[10]。此外,现有研究对站点分类方法的合理性重视不足,不同分类方法下得到的城乡降水差异结果存在较大分歧,进一步降低了研究结论的可靠性与可比性,难以精准量化城市化对夏季降水的影响程度与贡献率[11][12]。

湘江流域位于中国中南部长江中游地区,属湿润亚热带气候区。过去40年间,该区域经历了大规模城市化发展,已成为中国中部最发达地区之一。目前学界已围绕该流域夏季降水展开诸多探索,有学者基于1979~2018年降水观测资料,系统揭示出湘江流域夏季降水整体呈上升趋势,且空间分布存在显著差异,中东部区域降水增幅明显高于西部山区[13]。另有研究结合ERA5再分析数据,深入探究了流域夏季降水的日变化规律,同时剖析了其背后的热力与动力驱动成因,为深入理解该区域夏季降水的演变特征提供了重要理论支撑[14]。然而,当前针对湘江流域夏季降水的已有研究,仍存在诸多不足:站点分类多采用静态化方式,难以适配降水时空动态演变特征;对逐日降水数据的深度挖掘不够充分,未能充分挖掘降水日内、日间演变的潜在规律;同时,在降水影响机制解析及各驱动因子贡献率的量化方面仍存在精度不足的问题,这些局限在一定程度上制约了研究结论的科学性与应用价值。

本研究以城市化对湘江流域夏季降水的影响为核心研究目标,采用城市站点动态分类方法,结合长时间序列逐日降水观测数据开展研究。研究首先整合气象站点逐日降水与土地利用数据,构建动态站点分类指标体系,依据城市化水平动态演变特征对站点进行归类,突破传统固定分类局限[15]。其次,对逐日降水数据进行质量控制,系统分析不同动态分类站点夏季逐日降水的强度、频次等核心指标演变规律,捕捉城市化对流域夏季降水的精细化影响机制。最后,通过对比站点降水差异,量化城市化对流域夏季降水的影响贡献率,明确降水演变趋势及驱动因素,为湘江流域城市化气候效应研究、城市气象灾害防控及规划布局提供科学支撑。

2. 数据与方法

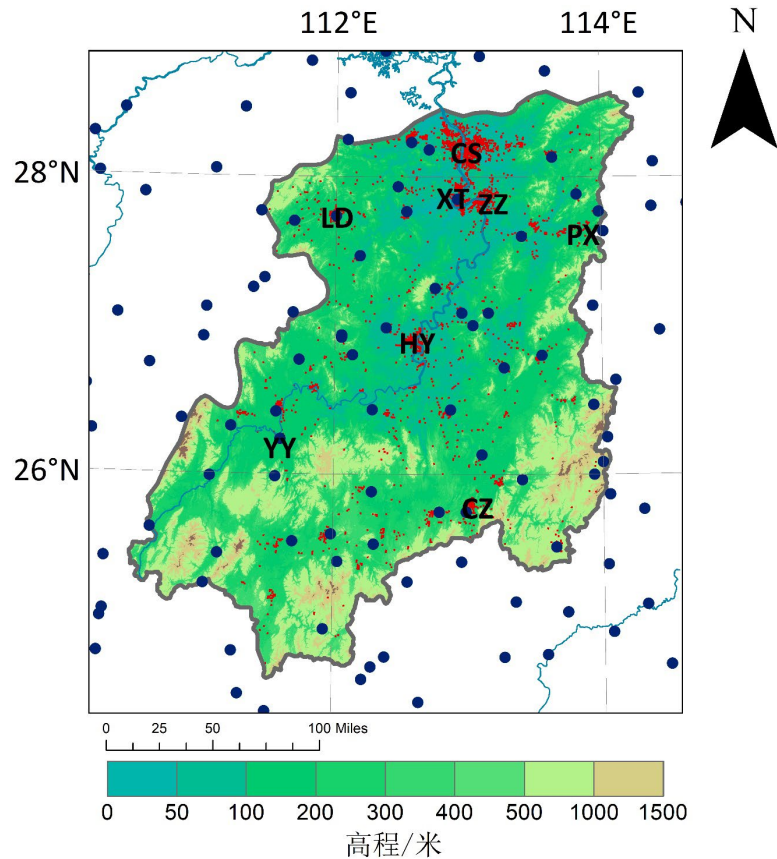
2.1. 研究区域

湘江为长江中游重要支流,全长856 km,自南向北流经永州、衡阳、长株潭等城市,流域经纬度110.5°~114°E、24°~29°N,总面积约94,660 km²,占湖南省总面积40%以上(图1)。流域属亚热带季风气候,雨热同期,年均气温16℃~18℃,年降水量1200~1700 mm且时空分布不均,夏季(6~8月)降水占全年35%~45%[16],同期径流量占全年50%以上,近年受气候变化影响,极端降水频发,洪旱灾害风险加剧[17]。流域地形以丘陵、山地为主,东、西、南三面高而中北部低,受地形与季风共同影响,降水空间差异显著:上游永州、郴州受山地抬升,年降水量超1600 mm;中下游长株潭等平原地区年降水量1300~1500 mm,城市化对局地降水存在增强效应[18]。作为湖南省经济核心区、中国中部发展最快的区域之一,湘江流域承载全省60%以上人口,人类生产生活用水加剧了水资源供需矛盾,降水时空不均则进一步影响流域生态健康[19]。

2.2. 研究数据

本研究的气象观测资料均来自中国气象局国家级气象观测站,选取湘江流域界线向外延伸35 km缓冲区内的站点,经质量控制、数据连续性及高程筛选后,确定78个站点1965~2019年的逐日降雨量数据为研究对象,数据源于中国气象局官网(<http://data.cma.cn/cn/>)。对数据进行系统性预处理:剔除数据缺失、序列不连续及海拔超500 m的站点,对短时缺测值采用相邻日期降水量平均值插补,最终形成高质量、连续可靠的降雨数据集[20]。

本研究选取1980~2020年8期土地利用/土地覆盖(LULC)数据,作为分析研究区近40年城市空间演变的核心数据源[21],数据来源于中国科学院资源环境科学数据中心(RESDC)的中国多时期土地利用遥感监测数据集。该数据集以Landsat系列卫星遥感影像为信息源,经人工目视解译结合计算机辅助分类、野外核查及多源资料校



注：该图基于自然资源部标准底图服务网站下载的审图号为 GS(2016)1593 号的标准地图制作，底图无修改。

图 1. 湘江流域地图(灰色边界为湘江流域，蓝色圆点为国家气象站，城市范围用红色表示，CX、XT、ZZ、LD、PX、HY、YY、CZ 分别代表长沙、湘潭、株洲、娄底、萍乡、衡阳、益阳、郴州等城市)

正优化得到，是国内土地利用变化研究的权威数据集；其采用二级土地分类体系，一级含耕地、林地等 6 大类，建设用地等还细分为二级类型，可满足研究区城市空间演变的精细化分析需求。本次选用的 8 期数据时序连续、空间覆盖完整、分类标准统一，能客观反映研究区城市化进程中的土地利用转型特征，为量化分析城市化的降水影响提供了可靠数据支撑。

2.3. 气象站点分类

湘江流域城市化水平空间分布极不均衡。1980 年前，城市化进程整体较为缓慢，城市气象站点数量较少。1980 年之后，得益于我国的改革开放政策与工业化的快速发展，城市化进程显著加快。2000 年以后，城市化进程放缓。在不同的城市化发展阶段城乡站点并不是固定不变的。受城市空间扩张影响，部分原属于农村区域的气象站点会逐步被纳入城市区域，由农村站点转变为城市站点。同时，部分城市站点因规划搬迁等原因，迁至非城市区，进而由城市站点转为农村站点。

为规避传统静态分类法无法反映站点下垫面时空演变、易低估城市化影响的缺陷[22]，本文采用动态分类法划分城乡站点。本研究利用 1980、1990、1995、2000、2005、2010、2015、2020 年 8 期土地利用数据，将 1965~2019 年研究期划分为 8 个对应子时期，各子时期均采用末尾年份的土地利用数据开展分类。

本研究以建成区面积分数(BAF)为核心指标，结合土地利用数据与气象站点空间坐标，通过三步完成城乡站

点动态分类：一是以各气象站点为中心构建 4 km 半径圆形缓冲区，提取周边城市建成区范围；二是计算缓冲区内建成区面积占比，得到 BAF 值以量化站点区域城市化程度；三是设定 4% 为划分阈值，BAF 超阈值为城市站点，反之则为乡村站点。

$$BAF = \frac{S_{\text{built-up}}}{S_{\text{buffer}}} \quad (1)$$

式中： S_{buffer} 是缓冲区的面积， $S_{\text{built-up}}$ 是缓冲区中建成区域的面积。

本研究将缓冲区半径设为 4 km，选取 4% 的建成区面积分数(BAF)作为城乡站点动态划分阈值。4 km 半径能有效表征中小尺度城市化下垫面的综合影响，平衡“局部代表性”与“空间完整性”，也贴合湘江流域城市空间分散、建成区破碎化的特点。4% 的阈值既能有效识别受城市化显著影响的站点，又能保证乡村站点的区域代表性，与长三角、华中地区同类研究的低比例建设用地阈值思路一致[23]-[26]。

2.4. 降水等级定义及量化城市化影响

为系统分析城市化对不同强度降水事件的影响，本研究依据日降水量大小，将降水事件划分为小雨、中雨、大雨、暴雨与极端降水五个等级，分级标准严格遵循国家标准 GB/T 28592-2012《降水量等级》并结合区域研究习惯进行界定[27]。具体划分方案如下：小雨(0.1~10 mm/day)、中雨(10.1~25 mm/day)、大雨(25.1~50 mm/day)、暴雨(50.1~100 mm/day)和极端雨量(100 mm/day)。该分级方案便于定量识别城市化对弱降水、中等强度降水及强极端降水事件的差异化影响[28] [29]。

在历史观测数据的分析中，本研究通过对比城市与农村气象站点的降雨变化趋势，定量评估城市化对湘江流域夏季降水的长期影响。首先，基于动态划分得到的城乡站点序列，分别对城市站点与农村站点的夏季降雨量进行平均，构建时段内城市夏季降雨量时间序列与农村夏季降雨量时间序列，这消除了单一站点可能出现的误差，突出整个流域城乡降雨的整体变化特征。降水序列的线性趋势采用最小二乘法进行拟合，趋势的统计显著性采用 Student's t-test (ST 检验)在 0.05 显著性水平下进行显著性检验，以此判断降雨变化趋势是否具有统计学意义。

3. 结果

3.1. 城乡分类结果

湘江流域自 1980 年以来经历了快速的城市化进程。基于 1980、1990、1995、2000、2005、2010、2015 和 2020 年共 8 个时期的土地利用数据，重建并绘制了不同历史时期湘江流域城市用地空间分布的动态演变图(图 2)，并基于此提取并计算出湘江流域不同历史时期的城市用地面积，结果如表 1 所示。结果可知，湘江流域城市化进程呈现出显著的阶段性特征，城市的空间格局和用地规模均发生了深刻改变。

从城市的用地规模上来看，在 1980~2020 年的城市化初期，流域内城市用地规模相对较少，1980 年城市的用地面积仅为 1274 km²，占流域总面积的 1.31%。在 2000 年之前，流域内城市化的速度都较慢，2000 年城市用地面积仅增至 1446 km²，20 年间仅增加 172 km²，年均增速不足 9 km²/年。进入 21 世纪，湘江流域城市化进程明显加速，城市用地进入快速扩张阶段，2000~2010 年城市用地面积从 1446 km² 增至 1847 km²，10 年间增加 401 km²，年均增速提升至约 40 km²/年。2010~2020 年流域城市化进入高速发展期，城市用地扩张达到峰值。至 2020 年城市用地面积已达 3396 km²，是 1980 年的 2.6 倍，占流域总面积的比例提升至 3.5%。10 年间城市用地净增 1549 km²，年均增速超过 150 km²/年。

从城市的空间格局上来看，城市化初期城市斑块主要集中于长株潭城市群、衡阳、郴州等地级市的中心城区，呈现出孤立的点状分布格局，远离核心城市的地区城市发展水平普遍较低，城市空间分布零散且规模较小。

21 世纪前十年,城市扩张开始从中心城区向外围郊区蔓延,城市斑块的数量增长并在空间上连片融合。2010~2020 年,城市扩张的范围进一步扩大,县级城市也有了全面的发展,长株潭城市群的城市用地已经基本连为一体。

根据 8 个时期的土地利用数据,本研究将湘江流域气象站点划分为城市站点和乡村站点。城乡站点的空间分布特征如图 3 所示。统计数据显示,伴随着湘江流域城市化进程的持续推进,城市气象站点的数量呈稳步增长态势乡村站点数量则相应持续缩减。1980 年 78 个站点中城市站点占 10 个,而到 2020 年 76 个站点中城市站点占 37 个,城市站点占比近 50%,分阶段来看,2010~2020 年是城市站点增长最为显著的时期,10 年间净增 12 个,成为城乡站点数量格局发生逆转的关键阶段。

从空间分布格局的动态演变来看,湘江流域城乡站点的分布范围随着时间的推移发生了明显的重构,并且站点的城乡属性随着城市化进程的推进发生了改变。1980~2000 年,城市站点仅零星分布于长株潭城市群及衡阳、郴州等少数地级市的中心城区,乡村站点则广泛覆盖流域内县域及郊区地带;2000 年后城市站点的空间分布范围快速扩张,除核心城区外,县域中心的乡村站点陆续转化为城市站点。此外,受到站点迁移的影响,部分早期被划定为城市类型的气象站(如长沙站、湘潭站),因迁至城市化水平较低的郊区,其城乡属性由城市站转变为乡村站。

3.2. 城市化对夏季降水的影响

1965~2020 年湘江流域夏季总降水量整体呈显著增加趋势(图 4(a))。从整体来看,流域内绝大多数气象站点的夏季降水均表现为增长态势,且增幅普遍较大,其中多个站点的增加趋势通过了显著性检验。与之形成对比的是,仅在流域西南部边缘存在极少数呈现微弱减少趋势的站点,并未在流域内形成明显的降水减少中心。降水增加的高值区主要与长株潭城市群及湘江下游东部、南部区域重合,这些区域的站点多呈现深红色,且多数通过了显著性检验,夏季降水增幅显著。其中,长株潭城市群及周边站点的增幅尤为突出,部分站点每十年变化量接近或超 60 mm。

基于动态分类的结果,构建城市和农村两条降水的时间序列,并计算出其线性趋势,如图 5(a)所示。两条曲线的年际波动规律高度一致,在整个研究时间段内呈现出同步起伏的变化特征。线性趋势统计结果显示,农村站点夏季降水量的变化速率为 24.16 mm/10 年,对应的显著性水平 $p = 0.015$;城市站点夏季降水量的变化速率为 24.77 mm/10 年,对应的显著性水平 $p = 0.014$ 。城乡站点的夏季降水量均呈现出增加趋势,且城市站点的增长速率略高于农村站点,但二者的变化趋势均通过 0.05 的显著性检验,有显著的增长趋势。

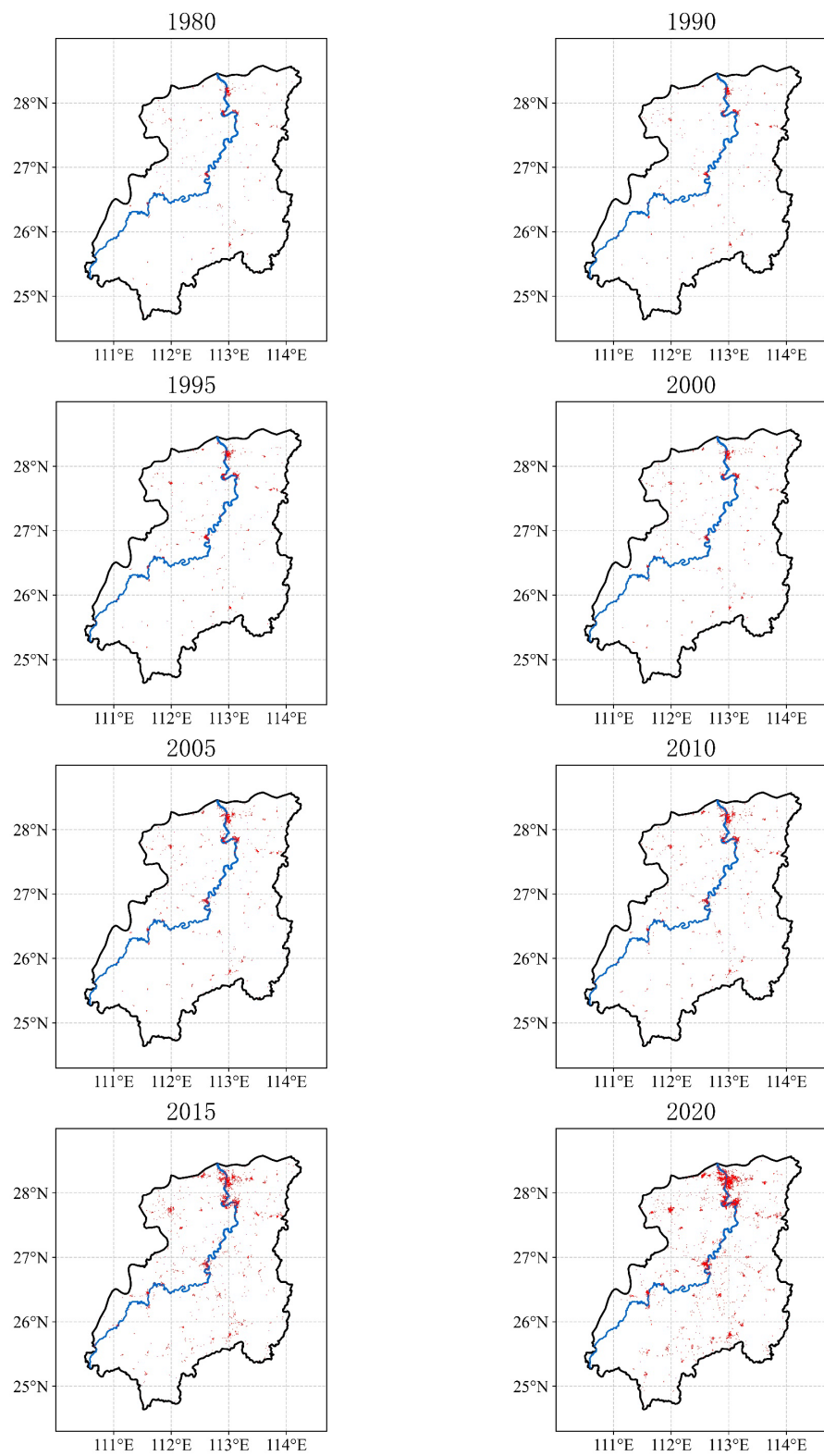
湘江流域的地形特征也对城市化的降水效应产生了调制作用。流域东、西、南三面高,中部和北部低,中下游平原地区城市化水平高,地势平坦利于城市热岛环流的形成与维持,而上游山地的抬升作用与城市局地环流叠加,进一步增强了水汽的垂直运动,使得城市化核心区的极端降水增幅更为显著,这也是流域降水增加高值区集中于中下游城市群的重要原因。

3.3. 城市化对夏季极端降水的影响

通过分析各年份第 10、20……,第 90、95、100 个分位数的正向变化趋势,证实了湘江流域夏季总降水量的增加(图 6(a))。但是不同分位数的降水增长幅度存在差异:低分位数(P10~P70)降水增长趋势微弱,而高分位数(P70~P100)降水则呈指数级增长,表明夏季总降水量的增加主要由强降水事件驱动。

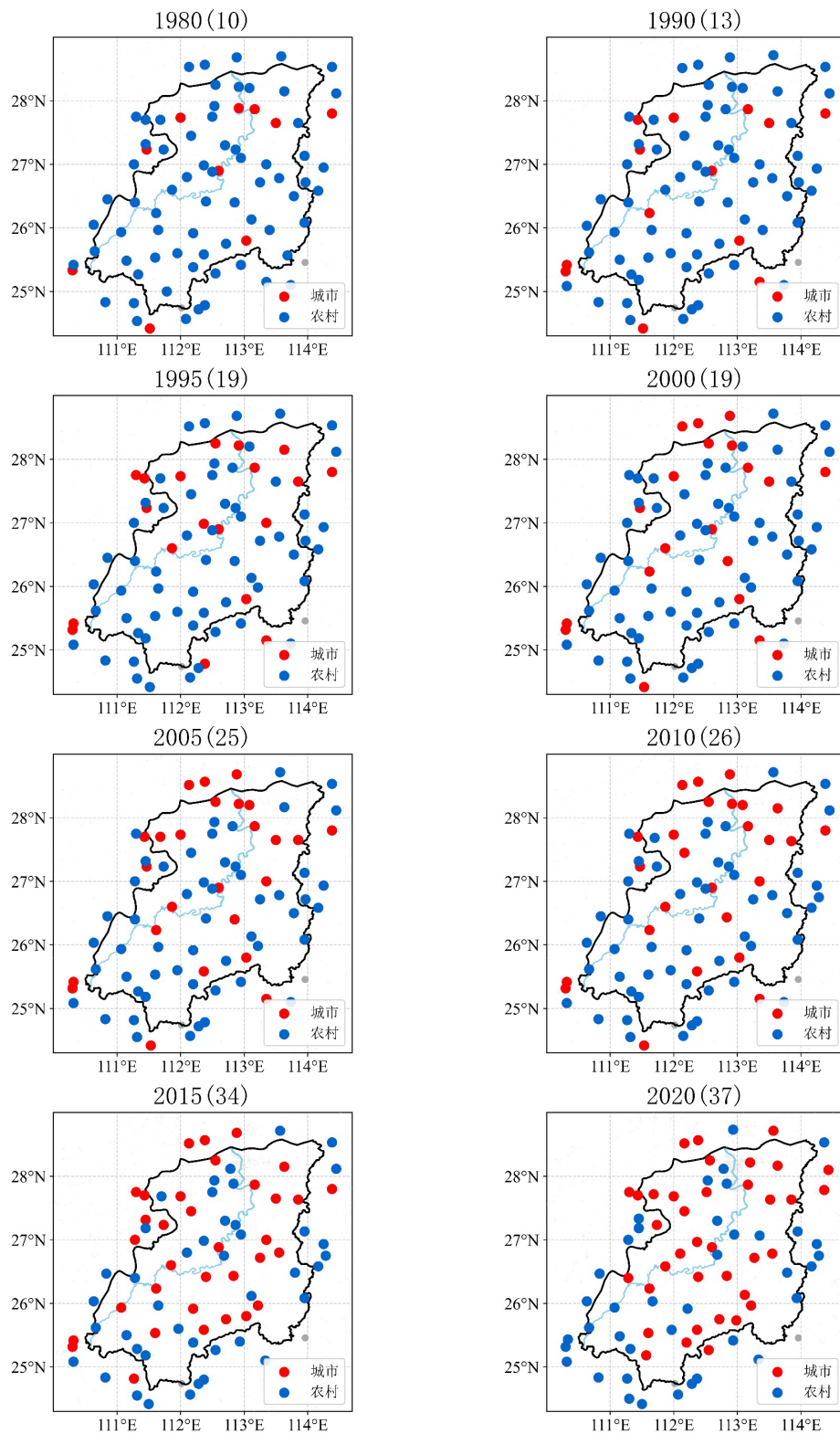
表 1. 湘江流域不同历史时期(年份)城市用地面积

	1980	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2020
城市用地面积(单位: km ²)	1274	1337	1391	1446	1712	1847	2528	3396
城市用地面积占比	1.31%	1.37%	1.43%	1.49%	1.76%	1.90%	2.60%	3.50%



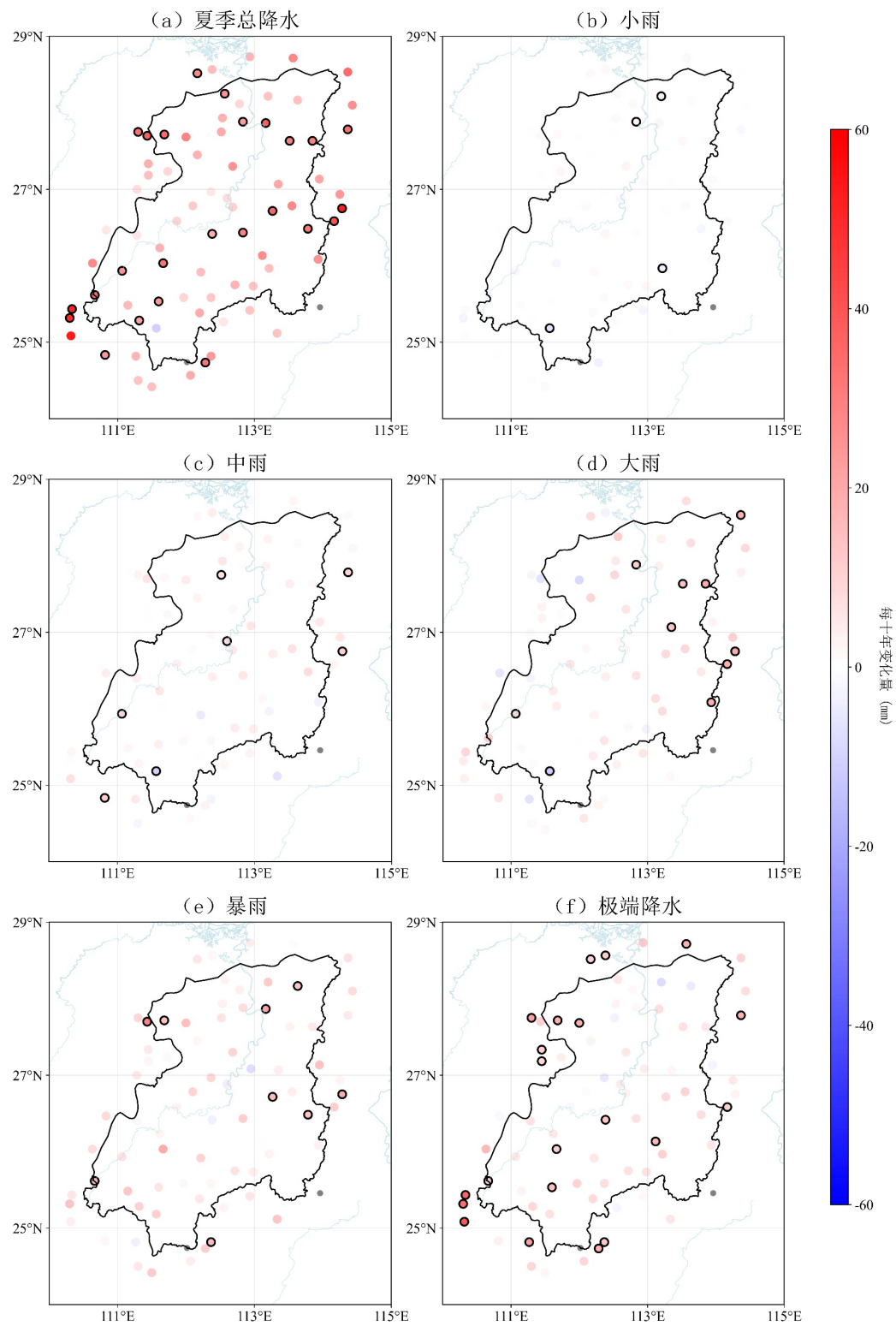
注：该图基于自然资源部标准底图服务网站下载的审图号为 GS(2016)1593 号的标准地图制作，底图无修改。

图 2. 湘江流域不同历史时期(年份)城市用地空间分布



注：该图基于自然资源部标准底图服务网站下载的审图号为 GS(2016)1593 号的标准地图制作，底图无修改。

图 3. 不同时期城市站(红色)和乡村站(蓝色)的空间分布



注：该图基于自然资源部标准底图服务网站下载的审图号为 GS(2016)1593 号的标准地图制作，底图无修改。

图 4. 1965~2020 年湘江流域夏季总降水及不同等级降水的变化趋势(mm/10 年) (黑色圆圈代表趋势通过 0.05 显著性水平检验)

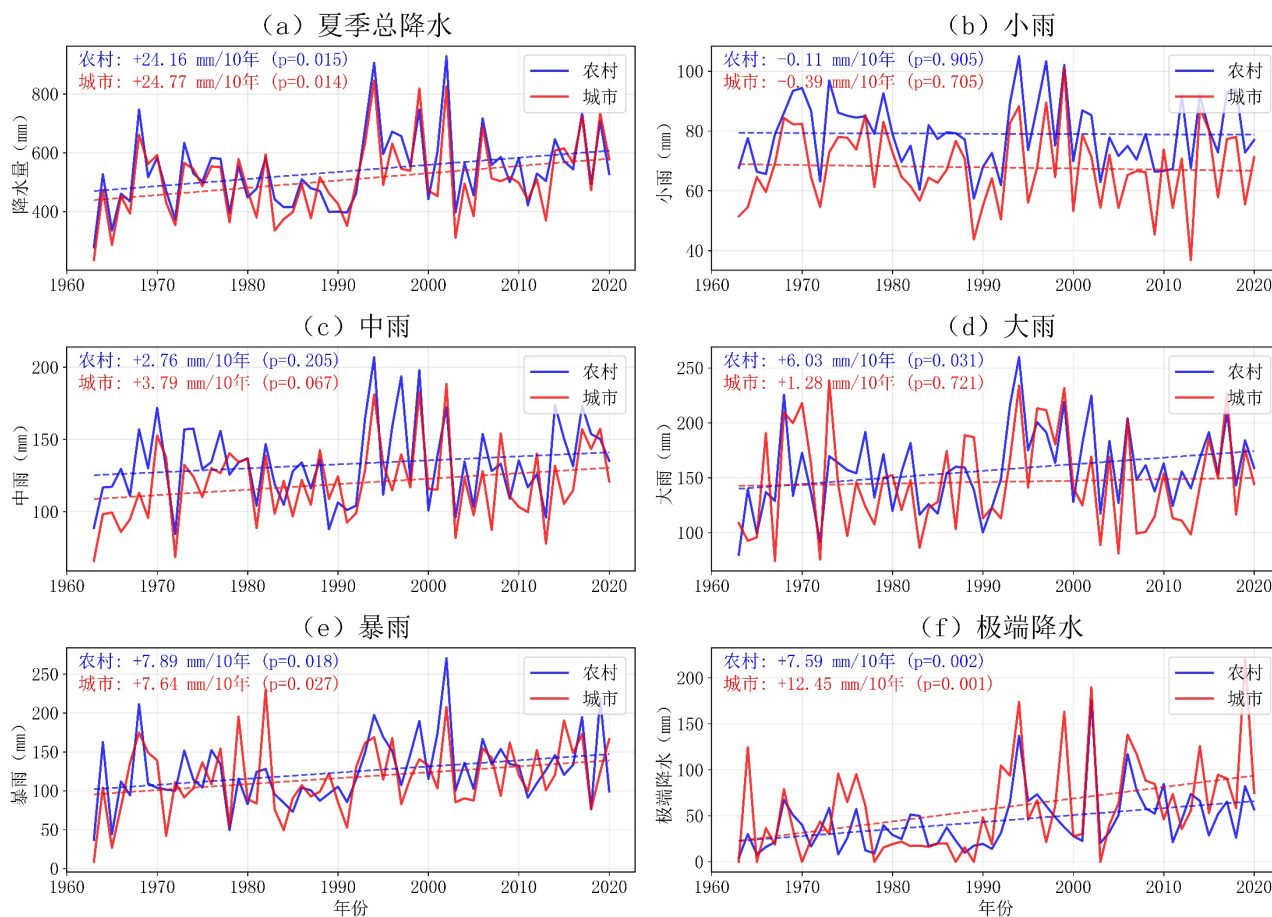
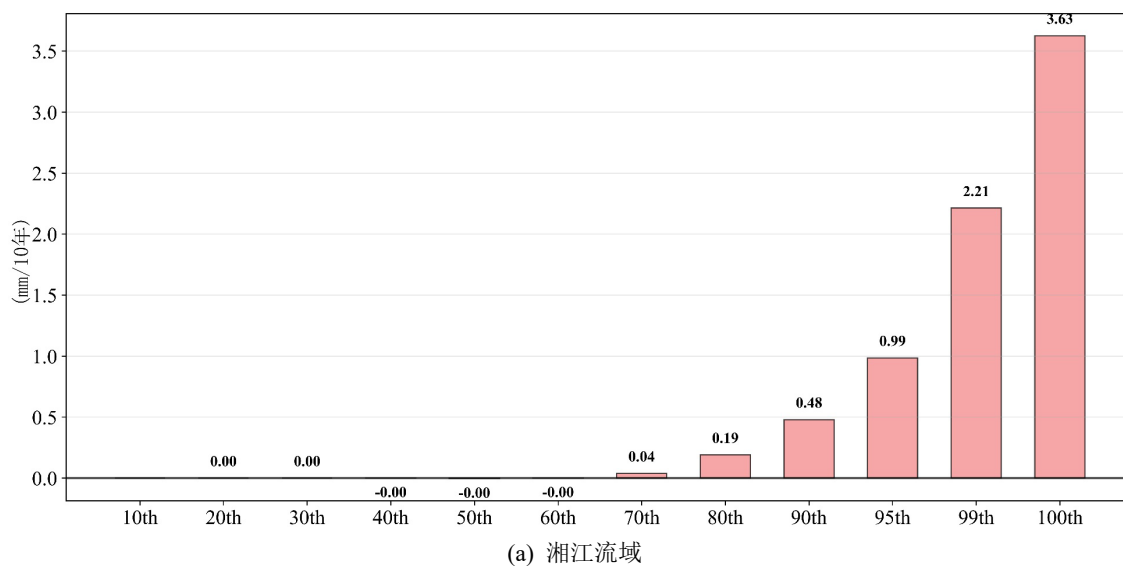


图 5. 城乡站点夏季总降水及不同等级降水的年际时间序列和线性趋势

对比城市与农村站点各分位数的降水数据(图 6(b)), 城市与农村站点的降水趋势差异随分位数升高而扩大: 在低分位数区间, 城市站点降水趋势略低于农村站点; 而在高分位数区间, 城市站点降水趋势显著高于农村站点。这一差异说明, 城市化对弱降水事件的影响较弱, 而对强降水事件的增强作用更为突出。



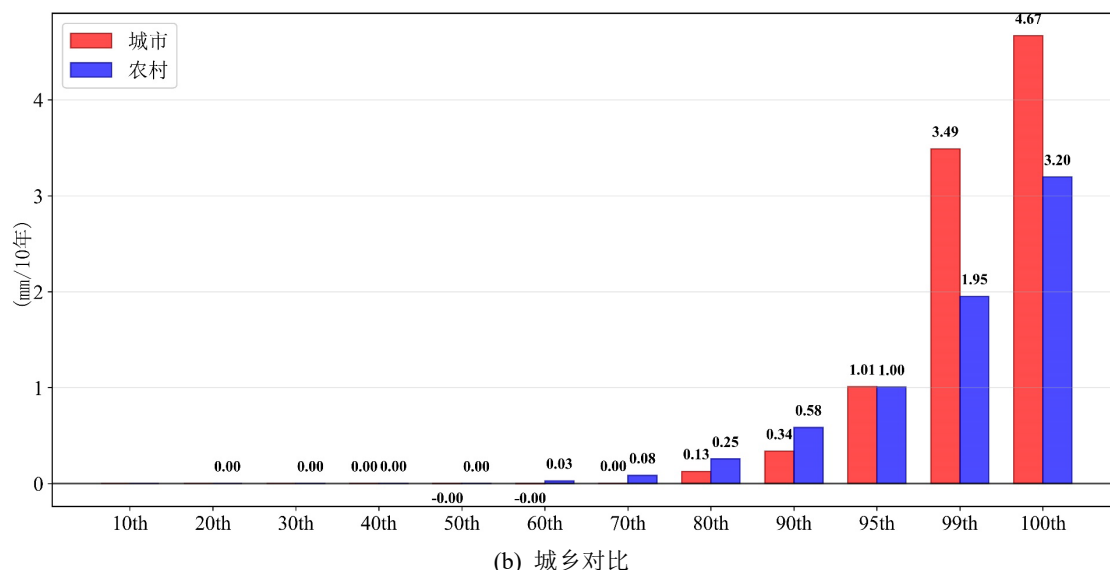


图 6. 1965~2020 年湘江流域夏季不同降水分位数的趋势分布与城乡对比(柱状图的数字为每十年增长降水量)

为揭示不同强度降水事件的变化特征，分别绘制了各等级降水变化趋势的空间分布图(图 4(b)~(f))。由图可知随着降水强度等级的提升，通过显著性检验的站点越多，降水的增长趋势更加显著。对于小雨和中雨，湘江流域站点的降水呈现微弱的增长趋势，甚至部分地区有减少趋势，通过显著性检验的站点很少，空间差异也并不明显。当降水强度达到大雨等级(图 4(d))，虽然通过显著性检验的站点依然少，但降水的增长趋势逐渐明显，长株潭城市群及下游区域开始出现明显的降水增加斑块。在暴雨(图 4(e))和极端降水(图 4(f))等级下，降水增加的高值区进一步扩大并集中于城市核心区，部分站点呈现极强的正趋势。

对各强度的降水构建城乡两条时间序列，分析城市化对各强度降水的影响(图 5(b)~(f))。城市化对小雨和中雨的影响较小，城乡降水趋势均接近 0 且未通过显著性检验，其中小雨呈现微弱的减少趋势，中雨呈现微弱的增加趋势，说明弱降水主要是受大尺度的气候背景影响，城市化的局部调控作用几乎可以忽略不计。随着降水强度等级增加，城市化的影响逐渐显现。在暴雨和极端降水等级下，城乡降水均呈显著增加趋势，且差异进一步扩大。暴雨等级下，城乡增幅相近且均通过显著性检验，表明流域暴雨事件整体增多；而在极端降水等级下，城市站点增幅(12.45 mm/10 年)显著高于农村站点(7.59 mm/10 年)，增幅达农村站点的 1.64 倍。这一结果清晰表明，城市化对极端降水的增强效应最为突出。

本研究将时间序列划分为 1965~1980 年、1980~2000 年及 2000~2020 年三个阶段，系统对比了湘江流域城乡站点夏季不同等级降水(小雨、中雨、大雨、暴雨、极端降水)的占比演变，直观揭示了城市化进程对区域降水结构的年代际影响(图 7)。

整体来看，1963~2020 年期间，湘江流域城乡站点的夏季降水结构均呈现出“小雨占比持续下降、强降水(大雨、暴雨、极端降水)占比逐步上升”的演变趋势。其中，城市站点的强降水占比上升幅度更为显著，极端降水占比也始终高于农村站点，这一现象表明城市化显著加剧了夏季强降水的发生频率与强度。值得注意的是，2000 年以后，城乡站点之间的强降水占比差距进一步扩大，说明在近二十年快速城市化背景下，城市下垫面变化对区域降水结构的调控作用更为突出。

城市化对湘江流域极端降水的增强效应，是自然与人类活动共同作用的结果。自然层面，全球气候变暖导致大气持水能力提升，亚热带季风区夏季极端天气事件频发，为湘江流域极端降水增加提供了大尺度气候背景。人类活动层面，多角度推动极端降水加剧：一是下垫面性质改变，城市热岛效应增强局地对流，提升降水强度；二是城市大气气溶胶含量增加，作为云凝结核促进云滴形成与发展，使降水更易向极端化发展；三是城市空间

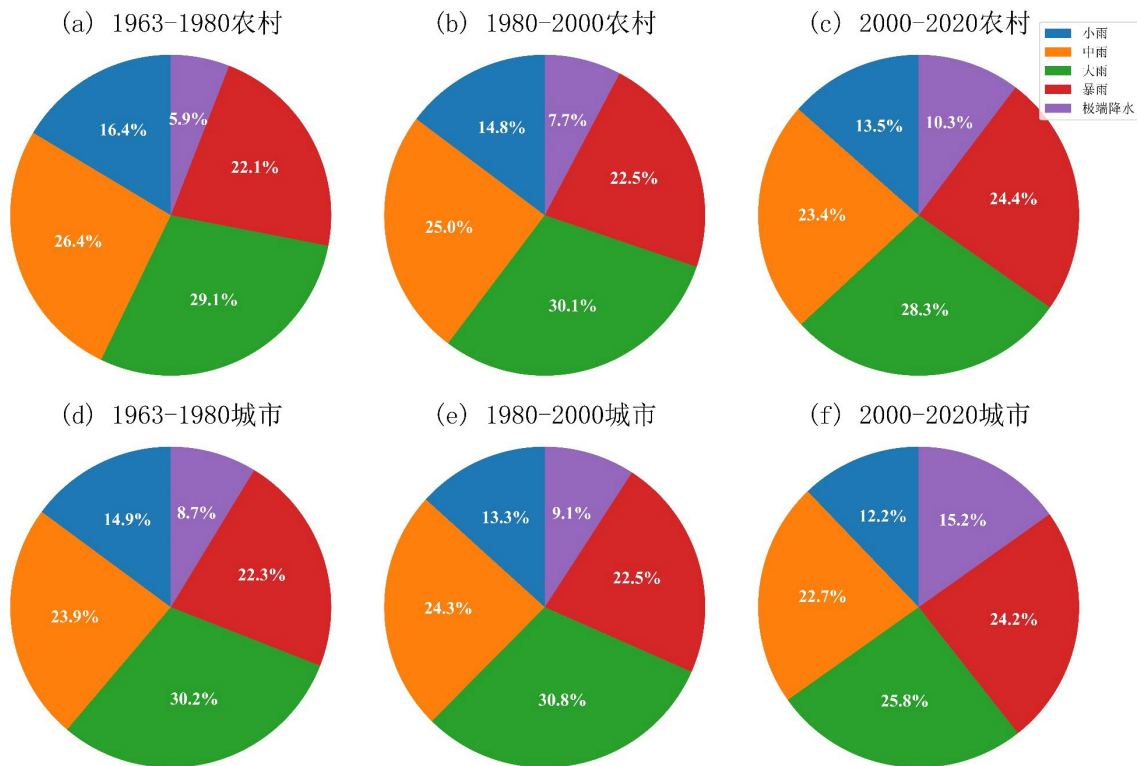


图 7. 1965~2020 年湘江流域城乡站点夏季不同等级降水占比的演变

扩张形成的城市群集聚效应，长株潭等城市群的连片发展使局地气候扰动相互叠加，进一步放大了城市化对降水的影响。

4. 结论

本文主要有以下结论：

1) 1965~2020 年湘江流域夏季总降水量呈显著增加趋势，城乡站点降水均呈增长特征，城市站点增长速率 (24.77 mm/10 年)略高于农村站点(24.16 mm/10 年)。

2) 城市化对不同强度降水的影响存在明显差异，对小雨、中雨等弱降水影响微弱，对极端降水增强效应最为突出。城市站点极端降水增幅(12.45 mm/10 年)为农村站点(7.59 mm/10 年)的 1.64 倍，且流域强降水增加高值区与长株潭城市群等城市化核心区高度耦合。

3) 流域降水总量增加主要由高分位数(P70~P100)强降水驱动，城乡降水趋势差异随分位数升高而扩大，降水结构呈现“小雨占比持续下降、强降水占比逐步上升”特征，2000 年后快速城市化进一步拉大了城乡强降水占比差距。

基金项目

国家自然科学基金项目。

参考文献

- [1] 姜彤, 翟建青, 罗勇, 等. 气候变化影响适应和脆弱性评估报告进展: IPCC AR5 到 AR6 的新认知[J]. 大气科学学报, 2022, 45(4): 502-511.
- [2] 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.

- [3] WANG, Y. J., WANG, H. Y. and SONG, L. C. Considerable increase in sub-daily precipitation extremes and its possible causes across the middle-lower reaches of Yangtze River. *Advances in Climate Change Research*, 2026, 17(3): 528-539. <https://doi.org/10.1016/j.accre.2026.02.001>
- [4] 谈建国, 顾问. 城市化降水效应研究进展[J]. *气象科技进展*, 2015, 5(6): 17-22.
- [5] CHANGNON, S. A. The La porte weather anomaly—Fact or fiction? *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1968, 49(1): 4-11. <https://doi.org/10.1175/1520-0477-49.1.4>
- [6] MÖLDERS, N. Landscape changes over a region in east Germany and their impact upon the processes of its atmospheric water-cycle. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 1998, 68(1): 79-98. <https://doi.org/10.1007/bf01025386>
- [7] 周莉, 江志红, 李肇新, 等. 中国东部不同区域城市群下垫面变化气候效应的模拟研究[J]. *大气科学*, 2015, 39(3): 596-610.
- [8] 张珊, 黄刚, 王君, 等. 城市地表特征对京津冀地区夏季降水的影响研究[J]. *大气科学*, 2015, 39(5): 911-925.
- [9] TYSA, S. K., REN, G. and QIN, Y. Urbanization effect in regional temperature series based on a remote sensing classification scheme of stations. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2019, 124(20): 10646-10661. <https://doi.org/10.1029/2019jd030948>
- [10] LIANG, P., DING, Y. The long-term variation of extreme heavy precipitation and its link to urbanization effects in Shanghai during 1916-2014. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2017, 34(3): 321-334. <https://doi.org/10.1007/s00376-016-6120-0>
- [11] MA, X., YANG, B. and DAI, G. Contrasting effects of urban land cover change and anthropogenic heat on summer precipitation over the Yangtze River delta of China: Analyses from an atmospheric moisture budget perspective. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2024, 129(10): e2023JD039430. <https://doi.org/10.1029/2023jd039430>
- [12] XIAO, F., ZHU, B. and ZHU, T. Inconsistent urbanization effects on summer precipitation over the typical climate regions in central and eastern China. *Theoretical and Applied Climatology*, 2021, 143(1-2): 73-85. <https://doi.org/10.1007/s00704-020-03404-z>
- [13] 龙晓琴, 廖春花, 谭诗琪, 等. 湘江流域面雨量气候特征分析[J]. *水利科技与经济*, 2022, 28(2): 8-12+19.
- [14] 谢傲, 李易芝, 罗伯良, 等. 湖南省夏季降水的日变化特征及形成原因分析[J]. *暴雨灾害*, 2026, 45(1): 130-141.
- [15] 何玉秀, 许有鹏, 李子贻, 等. 城镇化对极端降水的影响及其贡献率研究——以太湖平原地区为例[J]. *湖泊科学*, 2022, 34(1): 262-271.
- [16] ZHANG, L., LI, J., ZHANG, Q., et al. Summer precipitation variability in the Xiangjiang River Basin. *Journal of Hydrology*, 2022, 615: 128634.
- [17] CHEN, X., ZHANG, Z., LI, Y., et al. Impacts of climate change on hydrological extremes in the Xiangjiang River Basin. *Journal of Hydrology*, 2020, 589: 125268.
- [18] 王立新, 李红梅, 张建军. 南岭地形对湘江上游降水的影响机制[J]. *地理学报*, 2019, 74(5): 912-925.
- [19] LIU, Y., WANG, H., LI, Y., et al. Human-water interactions in the Xiangjiang Basin: A review. *Environmental Research Letters*, 2019, 14(5): 053002.
- [20] REN, G., ZHOU, Y. Urbanization effect on trends of extreme temperature indices of national stations over Mainland China, 1961-2008. *Journal of Climate*, 2014, 27(6): 2340-2360. <https://doi.org/10.1175/jcli-d-13-00393.1>
- [21] 刘纪远, 庄大方, 张增祥, 等. 中国土地利用时空数据平台建设及其支持下的相关研究[J]. *地球信息科学学报*, 2002, 4(3): 3-7.
- [22] YANG, X., HOU, Y. and CHEN, B. Observed surface warming induced by urbanization in east China. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2011, 116(D14): D14113. <https://doi.org/10.1029/2010jd015452>
- [23] 任国玉, 初子莹, 周雅清, 等. 中国地面气温序列城市化偏差订正研究[J]. *地理科学进展*, 2015, 34(3): 267-275.
- [24] 贾根锁, 陆其峰, 徐兴奎. 长三角台站周边城市土地利用扩张及其对气温观测的影响[J]. *气候与环境研究*, 2018, 23(1): 1-12.
- [25] 周秀骥, 徐祥德, 张耀存, 等. 中国区域气候变化及其城市化影响研究[M]. 北京: 气象出版社, 2004.
- [26] 李煜斌, 高志球, 王式功, 等. 西安市 PM_{2.5} 城乡差异及与城市热岛关联[J]. *大气科学学报*, 2022, 45(2): 221-230.
- [27] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. GB/T 28592-2012 降水量等级[S]. 北京: 中国标准出版社, 2012.
- [28] 中国气象局. 气象资料统一规范与观测数据处理指南[M]. 北京: 气象出版社, 2015.
- [29] 任国玉, 吴霞, 陈峪. 中国不同强度降水事件时空变化特征研究[J]. *气候与环境研究*, 2018, 23(2): 198-210.