

DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2022.05.004

长三角地区夏季降水结构演变及其非平稳性

吴 雷¹, 许有鹏², 王 强², 徐 羽³, 高 斌²

(1. 安徽农业大学资源与环境学院, 安徽 合肥 230036; 2. 南京大学地理与海洋科学学院, 江苏 南京 210023;
3. 宁波大学地理与空间信息技术系, 浙江 宁波 315211)

摘要: 基于长三角地区72个站点1960—2016年逐日降水量观测数据, 采用Pettitt与Mann-Kendall非参数检验法, 从降水量、降水日数、降水强度和不同等级降水(小雨、中雨、大雨与暴雨)发生率方面, 分析长三角地区夏季降水结构的时空演变及其非平稳性特征, 并探讨其可能的成因。结果表明: ① 长三角地区夏季小雨发生率以减少为主, 其他6个降水指标均以增加为主。其中, 小雨发生率非平稳的站点表现为单调减少, 降水量、降水强度、大雨和暴雨发生率非平稳的站点表现为单调增加, 并且主要分布在太湖流域, 增加了该区域遭受洪涝灾害的风险。② 东亚夏季风强度与长三角地区多数站点的小雨发生率呈正相关关系, 而与其他降水指标呈负相关关系。③ 长三角地区城市化典型区(太湖流域)城市化对夏季降水量、降水强度、大雨和暴雨发生率有增加作用, 贡献率分别为25.4%、27.9%、54.6%和25.5%; 对降水日数、小雨和中雨发生率有减少作用, 贡献率分别为-37.3%、-33.2%和-100%。

关键词: 降水结构; 时空演变; 非平稳性; 长三角地区

中图分类号: TV125 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-6791(2022)05-0730-13

在气候变化和人类活动影响加剧的大背景下, 局地乃至全球尺度的降水结构发生了显著变化, 导致暴雨、洪水、干旱等极端水文气象事件频发, 在一定程度上影响了区域的水安全与可持续发展^[1-2]。降水作为水循环过程中的关键环节, 其形成的环境背景正在发生变化, 引发人们开始审视水文平稳性是否已经被打破、基于水文平稳性假设构建的水资源管理体系是否可靠^[3-4]。因此, 变化环境下降水结构演变及其平稳/非平稳性研究成为水科学研究的热点问题。

已有研究从不同角度开展了降水结构演变特征分析, 如宋晓猛等^[5]采用降水发生率和降水贡献率指标, 分析了北京地区不同降水历时和不同降水等级的时空演变规律; Wu等^[6]通过11个极端降水指数, 探讨了长江中下游地区极端降水的时空变化趋势; 黄国如等^[7]基于7种模式雨型, 分析了珠江三角洲地区暴雨雨型的变化规律。在降水结构演变非平稳性识别方面, 现有研究主要考察降水序列均值或方差的突变和趋势性, 常用的检测方法有Pettitt和Mann-Kendall检验法, 也有研究将降水极值序列的突变和趋势统一纳入广义可加模型中进行分析^[8-9]。此外, 可以通过比较平稳/非平稳极值统计模型的拟合优度来判断降水序列是否具有平稳性^[10]。

长江三角洲城市群(简称长三角地区)是全球六大城市群之一, 过去几十年其降水结构发生了很大变化。Han等^[11]对长三角地区1957—2013年逐日降水量数据分析发现, 1~2 d历时降水的发生率和贡献率呈增加趋势, ≥3 d历时降水的发生率和贡献率呈减少趋势; Yuan等^[12]通过9个极端降水指数分析发现, 长三角地区1960—2016年呈变湿趋势; Lu等^[13]发现非平稳广义极值分布对年最大1 d和5 d降水的拟合效果更好,

收稿日期: 2022-02-24; 网络出版日期: 2022-08-22

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1309.P.20220822.1551.002.html>

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(U2240203); 安徽农业大学稳定和引进人才科研资助项目(rc522013)

作者简介: 吴雷(1989—), 男, 安徽宿州人, 讲师, 博士, 主要从事水文水资源与防洪减灾方面研究。

E-mail: wulei@ahau.edu.cn

通信作者: 许有鹏, E-mail: xuy305@163.com

指出城市扩张会增加极端降水的量级及其在不同重现期下的重现水平。

以往研究对降水结构演变及其非平稳性分析大多集中在极端降水方面,对降水结构演变的整体认识有待深化;相关研究多局限于现象描述,而定量化的归因分析相对缺乏。本文基于长三角地区72个站点1960—2016年逐日降水量观测数据,科学运用Pettitt与Mann-Kendall方法,从降水量、降水日数、降水强度和不同等级降水(小雨、中雨、大雨与暴雨)发生率方面,分析长三角地区夏季降水结构演变及其非平稳性特征,并揭示其与大尺度环流系统变化和城市化的关系,以期为区域水资源管理和防洪减灾提供科学依据。

1 研究区概况

长三角地区在上海、江苏、浙江、安徽范围内,由以上海为核心、联系紧密的26个城市组成,是中国最具活力、城市化水平最高的区域之一。地势由南向北倾斜,地形以平原为主(图1(a))。气候类型属于典型的亚热带季风气候,夏季高温多雨,冬季温和少雨。据1960—2016年长三角地区72个站点平均降水量统计(图1(b)),夏季(6—8月)降水量约483.8 mm(350.7 ~ 601.3 mm),约占全年降水量的41.5%(33.4% ~ 56.2%)。

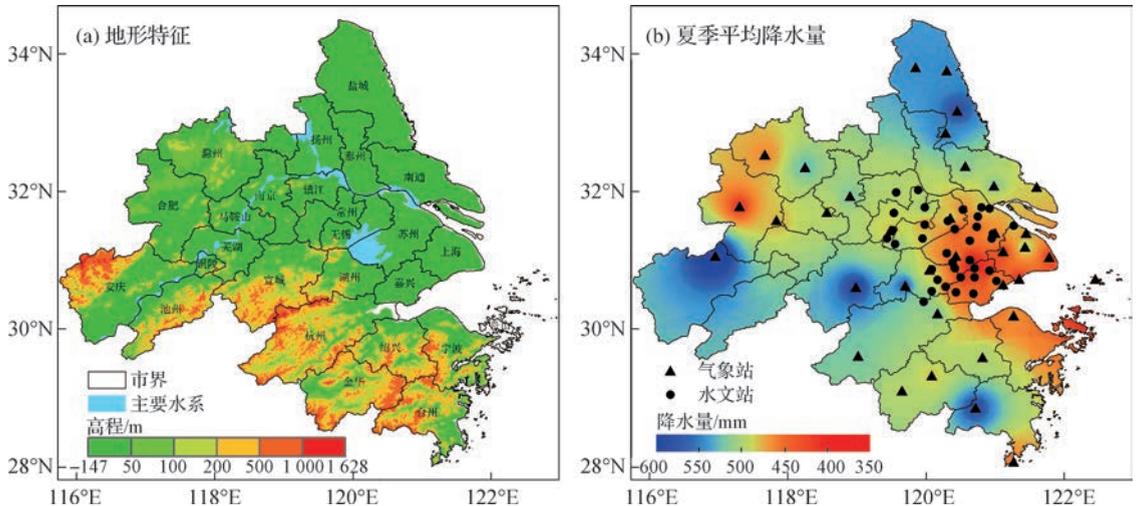


图1 长三角地区地形特征与夏季平均降水量空间分布

Fig. 1 Spatial distribution of topographic feature and average summer precipitation in the Yangtze River Delta

2 数据与方法

2.1 数据来源

2.1.1 降水数据

本文选取长三角地区72个站点1960—2016年夏季逐日(日界为北京时间8时)降水量观测数据进行研究,数据来源于中国地面气候资料日值数据集3.0版(<http://data.cma.cn>)和长江流域太湖区水文年鉴(图1(b))。上述站点在研究期内均不存在数据缺测和观测场地变化,所有数据均经过合理性检查,质量符合相关规范要求。通常认定日降水量 ≥ 0.1 mm为有降水发生,因此将微量日降水(< 0.1 mm)记为无降水(0 mm)。

2.1.2 东亚夏季风指数

东亚夏季风是中国东部夏季天气与气候的主要驱动力和降水源^[14],本文采用Li等^[15]提出的东亚夏季风

指数(East Asian Summer Monsoon Index, EASMI)来描述东亚夏季风的强度,采用的数据时段为1948—2017年(<http://ljp.gcess.cn>)。

2.1.3 土地利用遥感监测数据

20世纪70年代末、80年代末和1995年、2005年、2015年共5期1 km分辨率土地利用遥感监测数据集,来源于中国科学院资源环境科学与数据中心(<http://www.resdc.cn>),该数据集以相应时期Landsat系列遥感影像为主要数据源,采用人工目视解译方法,将土地利用类型分为6个一级类型和25个二级类型,其总体精度分别优于94.3%和91.2%^[16]。

2.2 研究方法

2.2.1 降水结构指标

本文主要从降水量、降水日数、降水强度和不同等级降水(小雨、中雨、大雨与暴雨)发生率方面,分析长三角地区夏季降水结构的时空演变及其非平稳性特征。根据采用的降水数据特点,定义8时至次日8时降水量 ≥ 0.1 mm为1个降水日。参考国家标准《降水量等级:GB/T 28592—2012》,将日降水量划分为小雨(0.1~9.9 mm)、中雨(10.0~24.9 mm)、大雨(25.0~49.9 mm)和暴雨(≥ 50.0 mm)共4个等级。定义降水强度为发生降水日降水量的平均值;降水发生率为某一等级降水发生的日数占总降水日数的比值。

2.2.2 非平稳性分析

非平稳时间序列中最典型的是均值随时间而改变,使序列表现出明显的急剧变化(突变)或缓慢变化(渐变)。时间序列是否存在突变或渐变,可以通过参数或非参数检验方法进行统计推断。由于水文数据大多是偏态且不服从同一分布,因而非参数检验方法在水文统计领域应用较为广泛^[17]。本文分别采用Pettitt和Mann-Kendall非参数检验法,对各站点降水序列进行突变点识别和趋势性诊断。这2种方法均采用秩和作为统计量进行假设检验,具有适用范围广、受异常值干扰小的特点,是目前水文序列突变和渐变分析中应用较多且具有理论意义的方法。

Pettitt和Mann-Kendall检验法均要求序列数据独立,水文序列数据的独立性主要考察其一阶自相关性。去趋势预置白算法(Trend-free Pre-whiting, TFPW)是Yue等^[18]为消除时间序列的自相关性对Mann-Kendall检验结果的影响而提出的一种预处理方法。本文将该方法应用在Pettitt和Mann-Kendall检验之前,通过去趋势算法剔除趋势项对自相关系数估计的影响,通过预置白算法剔除一阶自相关项对检验结果的影响。

2.2.3 城市化影响贡献率

城市化降水效应可以通过城市、郊区降水序列的趋势差异来反映,而城市化对这种趋势差异的贡献率即为城市化影响贡献率(Contribution Rate of Urbanization, R_{CU}),其计算公式为^[19]

$$R_{CU} = \frac{T_u - T_r}{|T_u|} \times 100\% \quad (1)$$

式中: T_u 和 T_r 分别为城市、郊区降水序列的斜率。一般情况下, $-100\% < R_{CU} < 100\%$,正值表示城市化对降水事件产生正效应,负值表示城市化对降水事件产生负效应;若 $R_{CU} = \pm 100\%$,表示降水事件的变化完全是由城市化引起的;若 $R_{CU} > 100\%$ 或 $R_{CU} < -100\%$,说明存在未知的当地人为或自然因素影响城市或郊区的降水,此情况视同为 $R_{CU} = \pm 100\%$ 。

3 结果与讨论

3.1 突变分析与渐变分析的关系

突变是时间序列在特定时间节点不经过任何过渡阶段从一种模态向另一种模态的转变;渐变是时间序列稳定而规则的缓慢变化,并且这种趋势在整个时间序列中保持不变。因此,若时间序列存在显著突变,则不

存在渐变趋势。图2是以夏季降水量为例,从长三角地区36个存在显著均值突变的站点中选取的4个代表站(黑色虚线表示突变分段线,对应的年份为突变时间点)。从计算结果来看,其整体序列均为显著增加趋势,而突变点前后子序列的趋势方向有增/增、增/减、减/增、减/减4种组合形式,表明对存在显著突变的时间序列进行趋势分析将得出错误的结论;子序列的趋势方向与整体序列的趋势方向没有必然的联系。因此,下文将首先对降水序列进行突变分析,而后对无显著突变的序列进行趋势分析。

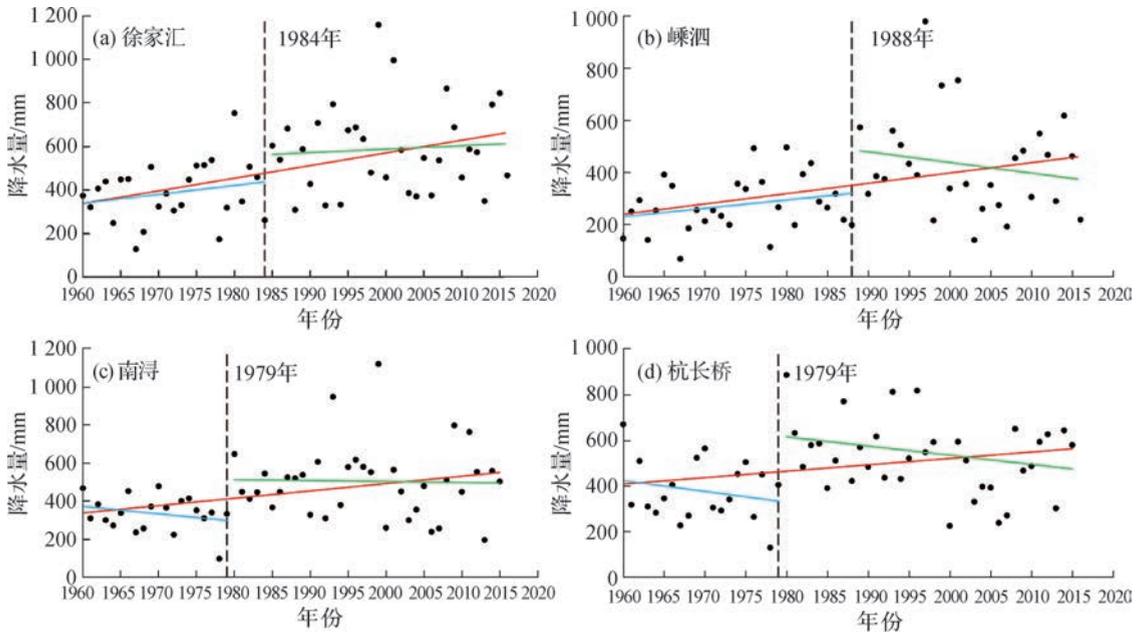


图2 突变分析与渐变分析的关系

Fig. 2 Relationship between abrupt change analysis and gradual change analysis

3.2 降水量、降水日数与降水强度演变及其非平稳性特征

长三角地区72个站点1960—2016年夏季降水量、降水日数与降水强度的均值突变和渐变趋势如图3所示(图中三角形表示均值突变通过0.05显著性检验的站点,向上表示突变后均值大于突变前;括号内数字表示站点数;显著增加表示存在显著($p < 0.05$)增加趋势,其他依此类推;左上角是均值突变时间频数柱形图)。降水量发生均值突变的站点主要分布在环太湖地区,突变后子序列的均值增大,突变时间跨越1974—1997年,其中位于1978年、1979年的站点有24个(66.7%),表现出明显的时空集聚特征(图3(a));此外,仅有2个位于长三角北部的站点降水量呈减少趋势,其余站点均呈增加趋势,其中10个站点为显著增加趋势(图3(d))。降水日数发生均值突变的站点仅有4个(图3(b)),而存在渐变趋势的站点达到68个,以增加趋势为主(53个),但其中仅有1个站点为显著增加趋势(图3(e))。降水强度发生均值突变的站点主要分布在环太湖地区,突变时间位于20世纪70年代末和80年代;另有部分站点沿长江分布,突变时间位于20世纪80年代末和90年代,这可能与区域间城市化进程差异有关(图3(c))。降水强度存在渐变趋势的站点以增加趋势为主,其中7个站点为显著增加趋势,在空间分布上没有明显的规律(图3(f))。

总体而言,长三角地区夏季降水量、降水日数和降水强度均以增大为主(突变后子序列的均值增大或渐变趋势为增加趋势),占比分别为97.2%、75.0%和98.6%。其中,降水量和降水强度非平稳的站点分别有46个(63.9%)与49个(68.1%),主要集中在环太湖地区;降水日数非平稳的站点有7个(9.7%),其中3个表现为减少的站点分布在长三角地区北部,另外4个表现为增加的站点分布在杭州湾附近。

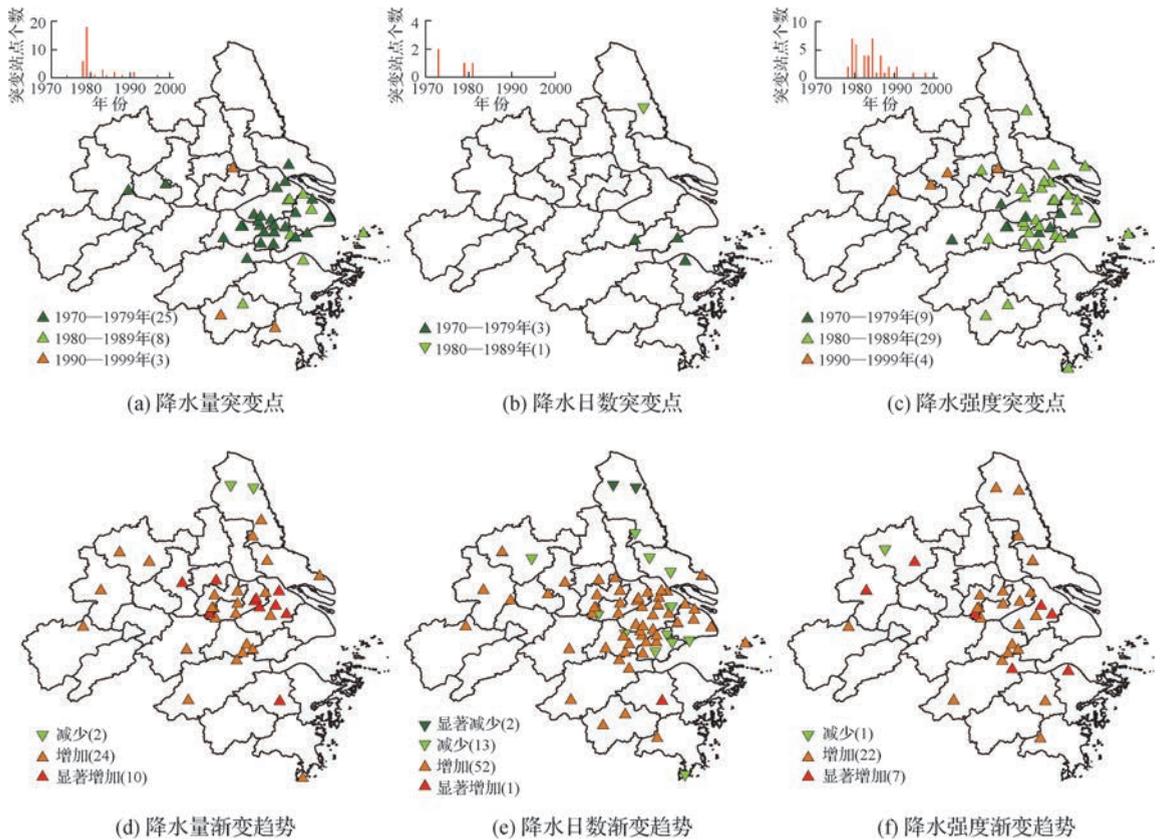


图3 长三角地区夏季降水量、降水日数与降水强度的均值突变与渐变趋势空间分布

Fig.3 Distributions of change point and trend for amount, days and intensity of summer precipitation

3.3 不同等级降水发生率演变及其非平稳性特征

长三角地区72个站点1960—2016年夏季不同等级降水发生率的均值突变和渐变趋势,如图4所示(图例含义同图3)。小雨发生率存在均值突变的站点主要集中在环太湖地区,突变后子序列的均值减小(图4(a));此外,仅有3个站点呈增加趋势,其余站点均呈减少趋势,其中6个站点为显著减少趋势(图4(e))。中雨发生率存在均值突变的站点仅有2个(图4(b)),另外有40个站点呈增加趋势,30个站点呈减少趋势,但均未达到0.05显著性水平(图4(f))。大雨发生率存在均值突变的站点主要分布在上海及周边地区,突变后子序列的均值增大,突变时间位于1978—1994年,其频数分布相对均匀(图4(c));大雨发生率呈渐变趋势的站点以增加趋势为主,其中4个站点为显著增加趋势(图4(g))。暴雨发生率存在均值突变的站点主要分布在太湖流域,突变后子序列的均值增大,突变时间位于20世纪80年代初期和末期的站点相对较多(图4(d));此外,仅有1个站点呈减少趋势,其余站点均呈增加趋势,其中11个站点为显著增加趋势(图4(h))。

总体而言,长三角地区夏季小雨发生率以减少为主(95.8%),而中雨至暴雨发生率以增加为主,占比分别为56.9%、84.7%和98.6%。小雨发生率非平稳的站点有31个(43.1%),表现为单调减少;大雨和暴雨发生率非平稳的站点分别有17个(23.6%)和38个(52.8%),均表现为单调增加,三者都在太湖流域分布相对集聚。此外,三者均值突变发生的时间主要分布在20世纪70年代后期至80年代,这一时期也是长三角地区城市化快速发展初期。中雨发生率非平稳的站点仅有2个(2.8%),其时空分布没有明显的规律。简而言之,长三角地区夏季暴雨发生率演变及其非平稳性表现最为明显,而后依次为小雨、大雨和中雨发生率。

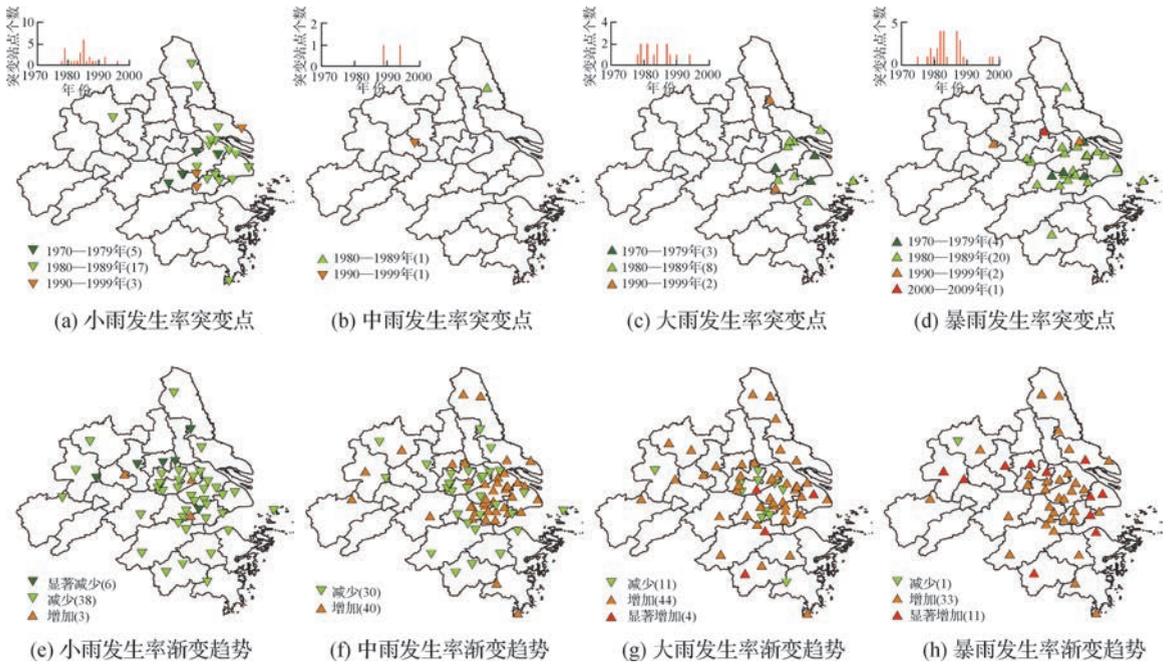


图 4 长三角地区夏季不同等级降水发生率的均值突变与渐变趋势空间分布

Fig. 4 Distributions of change point and trend for the incidence rate of different precipitation grades in summer

3.4 夏季降水结构演变成因分析

3.4.1 夏季降水结构演变与东亚夏季风的关系

为分析东亚夏季风强度的变化规律, 本文计算了 1948—2017 年标准化东亚夏季风指数, 如图 5 所示。东亚夏季风表现出先强后弱的年代际变化过程, 即 20 世纪 40 年代末至 70 年代东亚夏季风异常偏强, 而 70 年代末突然减弱。在 0.05 显著性水平下, 1960—2016 年东亚夏季风强度呈显著减弱趋势, 线性倾向率约为 $-0.16/(10 a)$ 。

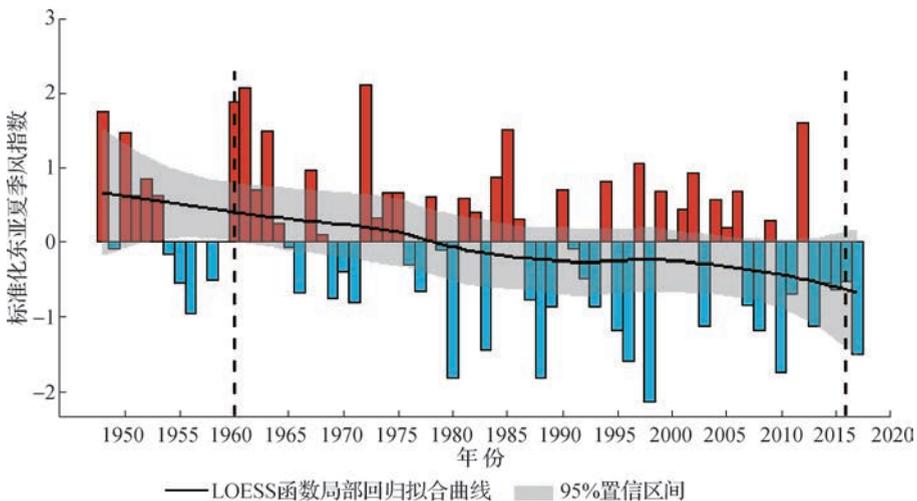


图 5 1948—2017 年标准化东亚夏季风指数过程

Fig. 5 Normalized time series of EASMI for the period of 1948—2017

采用 Spearman 相关系数对东亚夏季风指数与长三角地区 72 个站点的降水序列进行相关性分析, 结果如图 6 所示(左下角小图为相关系数累积分布函数)。夏季降水量、降水日数和降水强度分别有 70 个(97.2%)、70 个和 52 个(72.2%) 站点与东亚夏季风指数呈负相关关系, 表明弱(强)东亚夏季风对应多数站点的夏季降水量多(少)、降水日数多(少)、降水强度大(小)。Li 等^[15] 也发现东亚夏季风强度与长江中下游地区夏季降水之间存在负相关关系。究其原因, Ge 等^[20] 认为东亚夏季风偏强的年份, 西太平洋副热带高压偏北, 季风雨带长时间位于华南和华北地区, 导致梅雨期偏短, 降水偏少; 而东亚夏季风偏弱的年份, 西太平洋副热带高压偏南, 季风雨带长时间停留在长江中下游地区, 导致梅雨期偏长, 降水偏多。梅雨区降水主要位于长江中下游地区, 梅雨期降水量约占该地区夏季降水总量的 45%^[14]。就夏季不同等级降水发生率而言, 有 63 个(87.5%) 站点的小雨发生率与东亚夏季风指数之间呈正相关关系; 与之相反, 分别有 62 个(86.1%)、55 个(76.4%) 和 40 个(55.6%) 站点的中雨至暴雨发生率与东亚夏季风指数之间呈负相关关系, 表明弱(强)东亚夏季风对应多数站点的小雨发生率低(高), 而中雨至暴雨发生率高(低)。

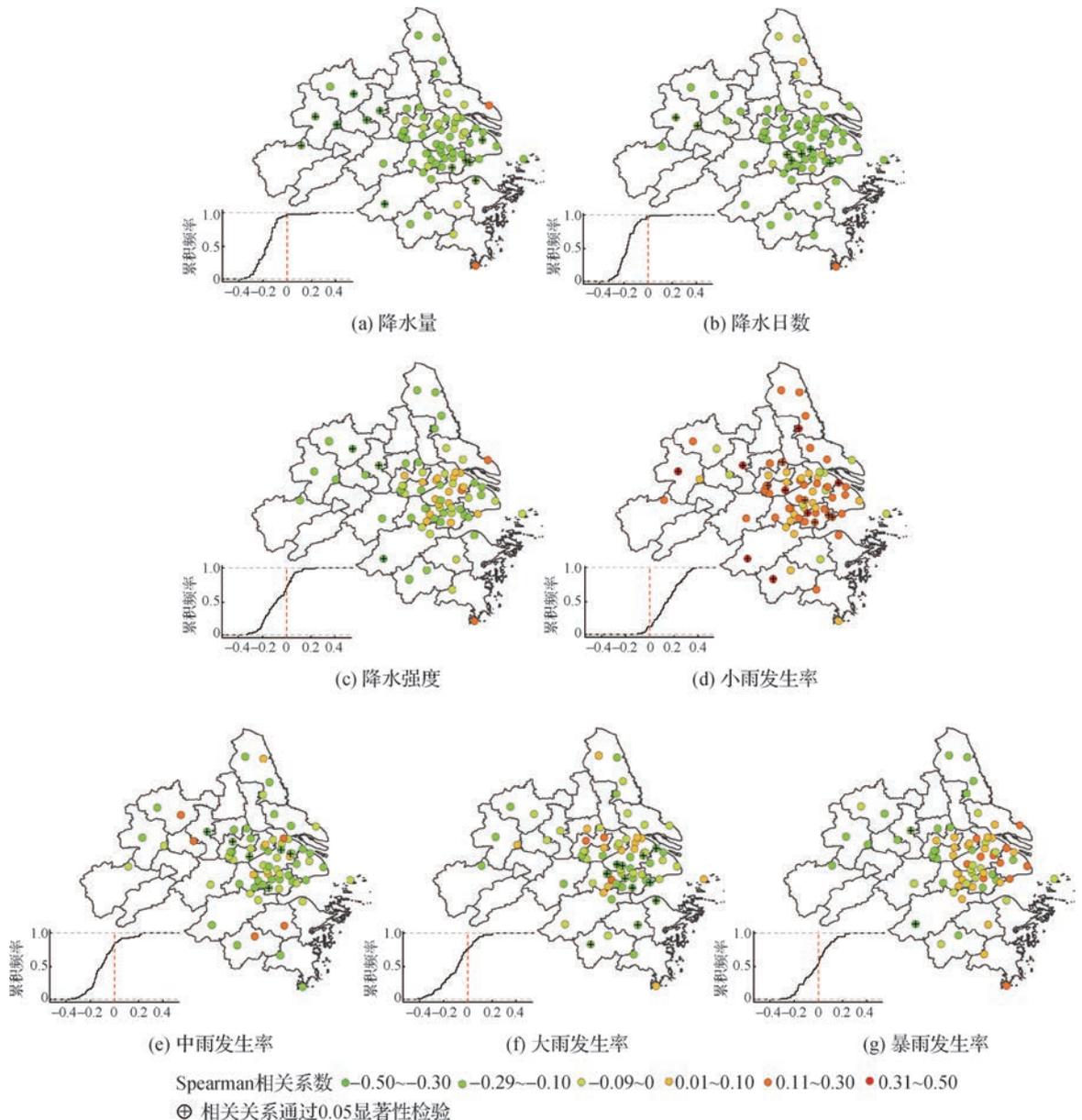


图 6 东亚夏季风指数与长三角地区夏季降水序列的相关关系

值得注意的是, 东亚夏季风强度与长三角地区夏季降水序列之间的相关程度较低, 相关系数为 $-0.42 \sim 0.38$, 并且通过 0.05 显著性检验的站点所占比例较小 ($2.8\% \sim 19.4\%$), 其空间分布也没有明显的规律。究其原因, 可能是东亚夏季风强度与长三角地区夏季降水之间的关系具有多面性, 此关系取决于大气环流场的整体配置; 季风雨带的移动及相应的降水配置, 除了与东亚夏季风强度有关, 还受到西太平洋副热带高压北上程度和中高纬阻塞形势的共同影响^[21]; 此外, 局地天气尺度环流也是影响夏季降水的重要因素^[22-23]。上述各种因素变化组合的多样性, 增加了东亚夏季风强度与长三角地区夏季降水之间关系的复杂程度和不确定性。

3.4.2 夏季降水结构演变与城市化的关系

改革开放以来, 长三角地区经历了快速的城市化过程, 大量植被、水域等自然景观被道路、房屋等人工建筑物所取代, 形成了独特的城市冠层结构。如图 7 所示, 20 世纪 70 年代末, 长三角地区城镇用地和交通、工矿用地分别为 $2\,580\text{ km}^2$ 与 784 km^2 , 到 2015 年已扩张至 $7\,937\text{ km}^2$ 与 $3\,095\text{ km}^2$ 。城市化引起的土地利用与覆被变化会改变区域热力、动力等陆面物理特征, 引起局地大气环流系统变化, 进而影响区域降水。

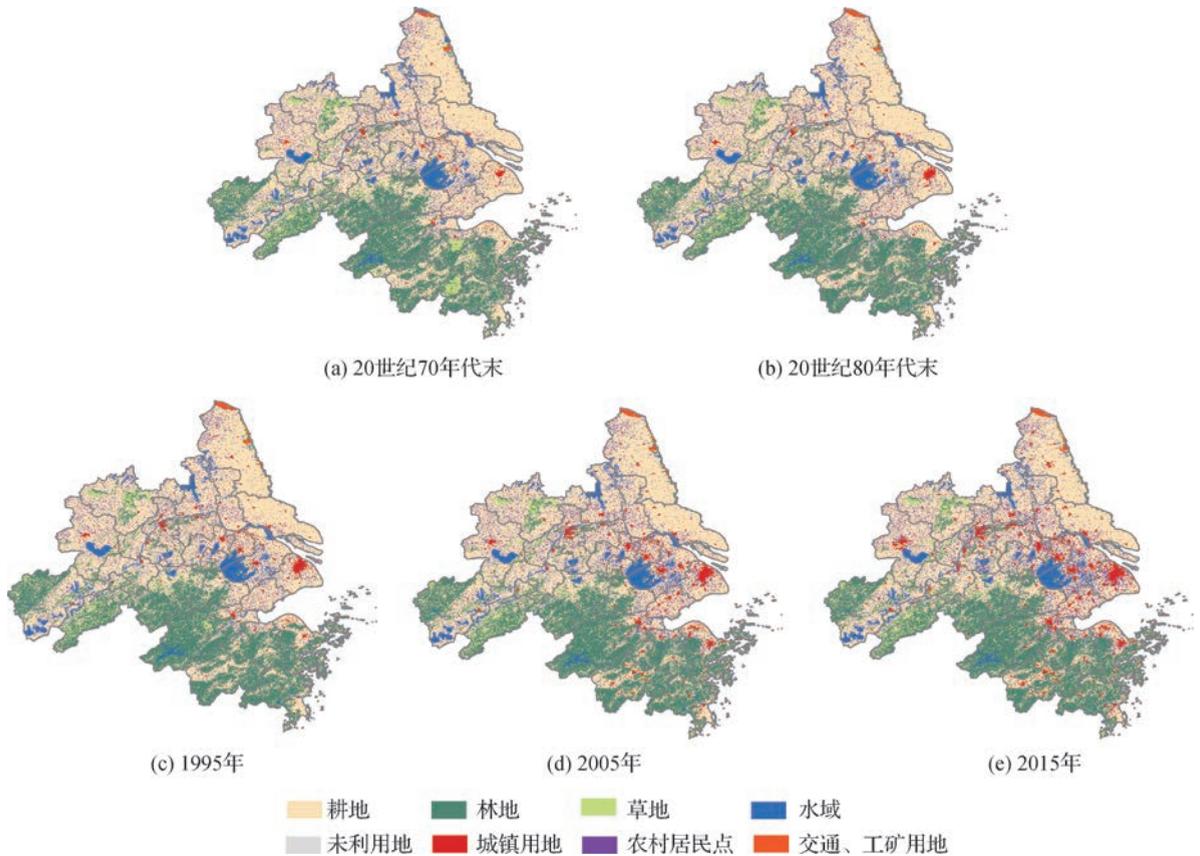


图 7 20 世纪 70 年代末至 2015 年长三角地区土地利用变化

Fig. 7 Land use changes over the Yangtze River Delta from the late 1970s to 2015

为揭示城市化对长三角地区夏季降水结构的影响, 本文以城市化发展最为迅速的太湖流域为典型, 选取上海、苏州、无锡、常州、杭州、嘉兴、湖州等地的城市与郊区代表站进行分析, 其空间距离临近 ($14.7 \sim 30.9\text{ km}$), 可以认为两者处在相同的大尺度环流系统背景下 (图 8)。本文以城市与郊区站点降水指标的均值为分析对象, 以避免单对站点代表性不足。

以 1978 年为界, 1960—1978 年为城市化缓慢发展阶段, 1979—2016 年为城市化快速发展阶段; 该时间节点也是东亚夏季风由强转弱的转折点^[21]。由表 1 可知, 1960—1978 年城市夏季降水量和降水日数高于郊区, 降水强度低于郊区; 而 1979—2016 年 3 个指标均表现为城市高于郊区。对比 2 个阶段的变化, 可以发

现城市化快速发展阶段 3 个指标在城市与郊区均有所增加。其中，降水量增幅最大，其次为降水强度，降水日数增幅最小；城市降水量和降水强度的增幅大于郊区，而降水日数的增幅小于郊区。 R_{CU} 结果表明，1979—2016 年城市化对夏季降水量和降水强度有增加作用，对降水日数有减少作用，城市化影响贡献率分别为 25.4%、27.9% 和 -37.3%。敖翔宇等^[24] 利用 WRF (Weather Research and Forecasting) 模拟发现了相似的结果，并指出降水日数的减少主要是由于城市化使小雨日数减少引起的。

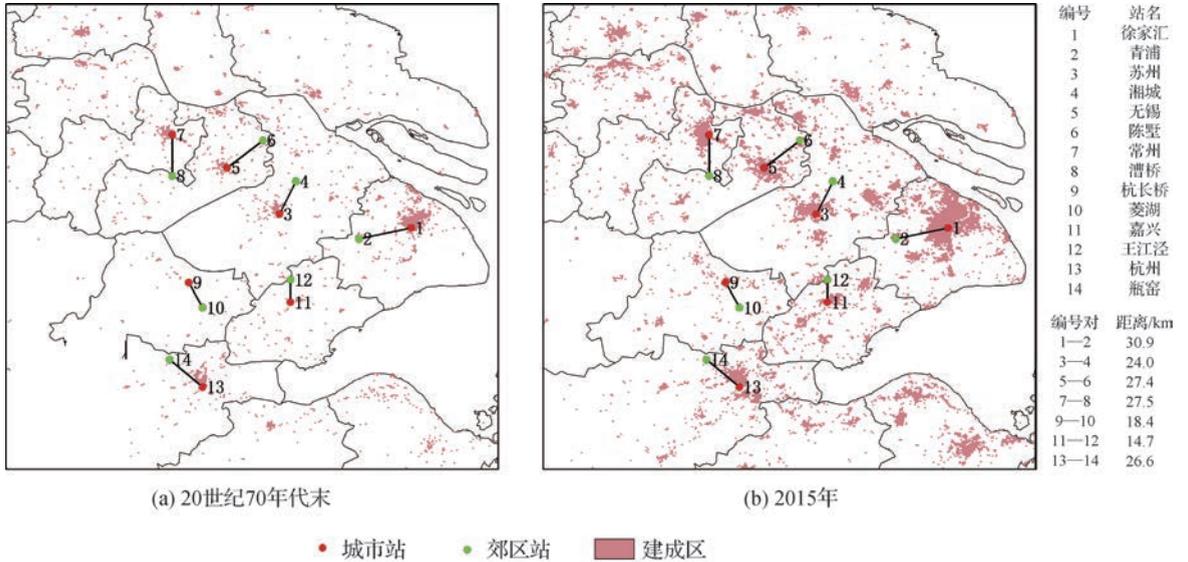


图 8 城市与郊区雨量站的空间分布

Fig. 8 Spatial distribution of rain gauges in urban and suburban areas

表 1 城市与郊区夏季降水量、降水日数与降水强度变化差异及城市化影响贡献率

Table 1 Change difference of amount, days and intensity of summer precipitation over urban and suburban areas, and the contribution rate of urbanization

类型	时段	均值			均值变化率/%			R_{CU} /%		
		P_a /mm	P_d /d	P_i /(mm · d ⁻¹)	P_a	P_d	P_i	P_a	P_d	P_i
城市站	1960—1978 年	390.3	35.5	11.0	37.3	9.0	24.5	25.4	-37.3	27.9
	1979—2016 年	535.7	38.7	13.7						
郊区站	1960—1978 年	386.5	33.9	11.5	30.4	11.8	13.9			
	1979—2016 年	503.9	37.9	13.1						

注： P_a 、 P_d 和 P_i 分别表示降水量、降水日数和降水强度； R_{CU} 对应的数据时段为1960—2016年。

城市与郊区夏季不同等级降水发生率变化差异及城市化影响贡献率，如表 2 所示。与 1960—1978 年相比，1979—2016 年城市与郊区夏季小雨发生率均减少，而大雨和暴雨发生率均增加。其中，暴雨发生率变化最大，其次为大雨发生率，小雨发生率变化最小。此外，城市中雨发生率略有增加，而郊区中雨发生率微弱减少。 R_{CU} 结果表明，1979—2016 年城市化对夏季小雨和中雨发生率有减少作用，而对大雨和暴雨发生率有增加作用，城市化影响贡献率分别为 -33.2%、-100%、54.6% 和 25.5%。Kishtawal 等^[25] 在印度次大陆发现了相似的结果，即与郊区相比，快速城市化导致城市夏季强降水事件发生率更高，而弱降水事件发生率更低。这是因为与自然景观相比，以砖石、水泥、沥青等材料构成的人工建筑物通常吸热快而比热容小，在相同的太阳辐射条件下，城市地区的气温明显高于郊区，形成城市热岛效应。城市热岛会对大气边界层产生扰动，破坏大气层结稳定性，形成热岛环流。受此影响，在水汽充足、凝结核丰富的条件下，容易触发并增

强湿对流运动, 形成强降水、雷暴等对流性天气^[26-28]。另外, 城市人工建筑增大了下垫面的粗糙度, 对气流有机障、触发湍流和抬升作用, 也有利于形成对流性降水^[2]。

表2 城市与郊区夏季不同等级降水发生率变化差异及城市化影响贡献率

Table 2 Change difference of incidence rate of different precipitation grades over urban and suburban areas, and the contribution rate of urbanization

类型	时段	均值/%				均值变化率/%				R_{CU} /%			
		R_s	R_m	R_h	R_{rs}	R_s	R_m	R_h	R_{rs}	R_s	R_m	R_h	R_{rs}
城市站	1960—1978年	66.73	19.51	9.91	1.35								
	1979—2016年	61.80	20.55	11.68	2.34	-7.4	5.3	17.9	73.3				
郊区站	1960—1978年	65.19	20.48	10.69	1.11								
	1979—2016年	62.49	20.43	11.78	2.05	-4.1	-0.2	10.2	84.7	-33.2	-100	54.6	25.5

注: R_s 、 R_m 、 R_h 和 R_{rs} 分别表示小雨、中雨、大雨和暴雨发生率; R_{CU} 对应的数据时段为1960—2016年。

3.5 讨 论

(1) 本文分析了长三角地区夏季降水结构的时空演变特征, 发现绝大多数站点的夏季降水量、降水强度、大雨和暴雨发生率增加, 而小雨发生率减少, 表明该地区强降水事件发生率趋多, 而弱降水事件发生率趋少。此外, 长三角地区城市化水平高, 下垫面不透水率比例大, 导致相同降水条件下地表径流量增加、汇流速度加快, 城市及其下游的洪水过程线变高、变尖、变瘦, 洪峰出现时间提前^[22]。受降水结构变化和城市化的双重影响, 长三角地区发生洪涝灾害的风险不断增加。值得注意的是, 上述降水指标呈现非平稳性的站点主要分布在太湖流域, 该地区城市化程度更高, 遭遇洪涝灾害的概率也更大, 应予以重视。过去, 一般基于水文系统平稳性假设进行防洪设施规划设计与运行管理, 实际上一些地区(或流域)的降水、流量等水文要素表现出非平稳性, 如长三角地区、京津冀地区、珠江流域和淮河流域等^[8-9, 13, 29]。Cheng等^[30]指出平稳性假设可能导致极端降水被低估高达60%, 将增加基础设施系统遭遇洪水和失效的风险。因此, 亟需对传统基于水文平稳性假设构建的水资源管理体系有效性进行论证^[3-4]。

(2) 降水结构演变是气候变化和城市化共同作用的结果, 这在水文科学领域已经形成共识, 但两者对降水影响的机制及贡献率仍有待深入研究^[31]。在基于站点资料分析城市化降水效应方面, 一般将雨量站按城市化水平进行分区或分类, 然后分析不同城市化发展阶段城、郊降水差异, 并将这种差异视为城市化差异引起的^[7, 19]。很多研究忽略了站点所在环境差异对降水系统的影响, 如高程、坡度、坡向及与大型水体的空间关系等, 从而降低了分析结果的可靠性。本文基于土地利用遥感动态监测数据识别城市化差异明显的城、郊站点, 选取多组空间距离临近的站点, 对其降水指标的均值进行分析, 不仅能减小城市化以外环境因素对分析结果的影响, 同时避免了单对站点代表性不足的问题。

4 结 论

本文基于长三角地区72个站点1960—2016年逐日降水量数据, 从降水量、降水日数、降水强度和不同等级降水(小雨、中雨、大雨与暴雨)发生率方面, 分析了长三角地区夏季降水结构的时空演变及其非平稳性特征, 并探讨其可能的成因。主要得到以下结论:

(1) 长三角地区夏季小雨发生率以减少为主, 而其他6个降水指标均以增加为主。其中, 小雨发生率非平稳的站点表现为单调减少; 降水量、降水强度、大雨和暴雨发生率非平稳的站点表现为单调增加, 并且主要分布在太湖流域, 增加了该区域遭受洪涝灾害的风险。在不同等级降水中, 暴雨变化和非平稳性表现最为明显, 而后依次为小雨、大雨和中雨, 表明变化环境引起的水循环变异导致强降水事件发生率趋多, 而弱降水事件发生率趋少。

(2) 20 世纪 40 年代末至 70 年代东亚夏季风异常偏强, 而 70 年代末突然减弱。东亚夏季风强度与长三角地区多数站点的小雨发生率呈正相关关系, 与其他 6 个降水指标呈负相关关系, 但相关程度均较低 ($-0.42 \sim 0.38$), 并且通过 0.05 显著性检验的站点比例较小 (2.8% ~ 19.4%), 表明长三角地区夏季降水结构演变除了与东亚夏季风强度有关, 还受到其他因素的影响。

(3) 长三角地区城市化典型区(太湖流域)城市化对夏季降水量、降水强度、大雨和暴雨发生率有增加作用, 城市化影响贡献率分别为 25.4%、27.9%、54.6% 和 25.5%; 而对降水日数、小雨和中雨发生率有减少作用, 城市化影响贡献率分别为 -37.3%、-33.2% 和 -100%。

参考文献:

- [1] KOTZ M, LEVERMANN A, WENZ L. The effect of rainfall changes on economic production[J]. *Nature*, 2022, 601(7892): 223-227.
- [2] ZHANG W, VILLARINI G, VECCHI G A, et al. Urbanization exacerbated the rainfall and flooding caused by hurricane Harvey in Houston[J]. *Nature*, 2018, 563(7731): 384-388.
- [3] GANGULI P, COULIBALY P. Does nonstationarity in rainfall require nonstationary intensity-duration-frequency curves? [J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2017, 21(12): 6461-6483.
- [4] HUANG H F, CUI H J, GE Q S. Will a nonstationary change in extreme precipitation affect dam security in China? [J]. *Journal of Hydrology*, 2021, 603: 126859.
- [5] 宋晓猛, 张建云, 刘九夫, 等. 北京地区降水结构时空演变特征[J]. *水利学报*, 2015, 46(5): 525-535. (SONG X M, ZHANG J Y, LIU J F, et al. Spatial-temporal variation characteristics of precipitation pattern in Beijing[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2015, 46(5): 525-535. (in Chinese))
- [6] WU S Q, HU Z W, WANG Z H, et al. Spatiotemporal variations in extreme precipitation on the middle and lower reaches of the Yangtze River basin (1970—2018)[J]. *Quaternary International*, 2021, 592: 80-96.
- [7] 黄国如, 陈易偲, 姚芝军. 高度城镇化背景下珠三角地区极端降雨时空演变特征[J]. *水科学进展*, 2021, 32(2): 161-170. (HUANG G R, CHEN Y S, YAO Z J. Spatial and temporal evolution characteristics of extreme rainfall in the Pearl River Delta under high urbanization[J]. *Advances in Water Science*, 2021, 32(2): 161-170. (in Chinese))
- [8] SONG X M, ZOU X J, MO Y C, et al. Nonstationary Bayesian modeling of precipitation extremes in the Beijing-Tianjin-Hebei region, China[J]. *Atmospheric Research*, 2020, 242: 105006.
- [9] SUN P, WEN Q Z, ZHANG Q, et al. Nonstationarity-based evaluation of flood frequency and flood risk in the Huai River basin, China[J]. *Journal of Hydrology*, 2018, 567: 393-404.
- [10] 鲁帆, 肖伟华, 严登华, 等. 非平稳时间序列极值统计模型及其在气候-水文变化研究中的应用综述[J]. *水利学报*, 2017, 48(4): 379-389. (LU F, XIAO W H, YAN D H, et al. Progresses on statistical modeling of non-stationary extreme sequences and its application in climate and hydrological change[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2017, 48(4): 379-389. (in Chinese))
- [11] HAN L F, XU Y P, YANG L, et al. Changing structure of precipitation evolution during 1957—2013 in Yangtze River Delta, China[J]. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 2015, 29(8): 2201-2212.
- [12] YUAN J, XU Y P, WU L, et al. Variability of precipitation extremes over the Yangtze River Delta, Eastern China, during 1960—2016[J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 2019, 138(1/2): 305-319.
- [13] LU M, XU Y P, SHAN N, et al. Effect of urbanisation on extreme precipitation based on nonstationary models in the Yangtze River Delta metropolitan region[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 673: 64-73.
- [14] 丁一汇, 柳艳菊, 宋亚芳. 东亚夏季风水汽输送带及其对中国大暴雨与洪涝灾害的影响[J]. *水科学进展*, 2020, 31(5): 629-643. (DING Y H, LIU Y J, SONG Y F. East Asian summer monsoon moisture transport belt and its impact on heavy rainfalls and floods in China[J]. *Advances in Water Science*, 2020, 31(5): 629-643. (in Chinese))
- [15] LI J P, ZENG Q C. A unified monsoon index[J]. *Geophysical Research Letters*, 2002, 29(8): 1274.
- [16] 刘纪远, 匡文慧, 张增祥, 等. 20 世纪 80 年代末以来中国土地利用变化的基本特征与空间格局[J]. *地理学报*, 2014, 69(1): 3-14. (LIU J Y, KUANG W H, ZHANG Z X, et al. Spatiotemporal characteristics, patterns and causes of land use

- changes in China since the late 1980s[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2014, 69(1): 3-14. (in Chinese))
- [17] 章诞武, 丛振涛, 倪广恒. 基于中国气象资料的趋势检验方法对比分析[J]. *水科学进展*, 2013, 24(4): 490-496. (ZHANG D W, CONG Z T, NI G H. Comparison of three Mann-Kendall methods based on the China's meteorological data[J]. *Advances in Water Science*, 2013, 24(4): 490-496. (in Chinese))
- [18] YUE S, WANG C Y. Applicability of prewhitening to eliminate the influence of serial correlation on the Mann-Kendall test[J]. *Water Resources Research*, 2002, 38(6): 1068.
- [19] 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. (HE Y X, XU Y P, LI Z Y, et al. The impacts and its contribution rate of urbanization on extreme precipitation, 1976—2015: a case study in the Lake Taihu Plain region[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2022, 34(1): 262-271. (in Chinese))
- [20] GE Q S, GUO X F, ZHENG J Y, et al. Meiyu in the middle and lower reaches of the Yangtze River since 1736[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2008, 53(1): 107-114.
- [21] 刘长征, 王会军, 姜大勝. 东亚季风区夏季风强度和降水的配置关系[J]. *大气科学*, 2004, 28(5): 700-712. (LIU C Z, WANG H J, JIANG D B. The configurable relationships between summer monsoon and precipitation over East Asia[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2004, 28(5): 700-712. (in Chinese))
- [22] 张建云, 宋晓猛, 王国庆, 等. 变化环境下城市水文学的发展与挑战: I: 城市水文效应[J]. *水科学进展*, 2014, 25(4): 594-605. (ZHANG J Y, SONG X M, WANG G Q, et al. Development and challenges of urban hydrology in a changing environment: I: hydrological response to urbanization[J]. *Advances in Water Science*, 2014, 25(4): 594-605. (in Chinese))
- [23] 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 Q F, ZHANG J Y, WANG Y T, et al. A review of urbanization impact on precipitation[J]. *Advances in Water Science*, 2018, 29(1): 138-150. (in Chinese))
- [24] 敖翔宇, 任雪娟, 汤剑平, 等. 长江三角洲城市群对夏季日降水特征影响的模拟研究[J]. *气象科学*, 2011, 31(4): 451-459. (AO X Y, REN X J, TANG J P, et al. Simulation study of urbanization effects on summer daily precipitation over the Yangtze River Delta[J]. *Journal of the Meteorological Sciences*, 2011, 31(4): 451-459. (in Chinese))
- [25] KISHTAWAL C M, NIYOGI D, TEWARI M, et al. Urbanization signature in the observed heavy rainfall climatology over India[J]. *International Journal of Climatology*, 2010, 30(13): 1908-1916.
- [26] YANG L, SMITH J A, BAECK M L, et al. Impact of urbanization on heavy convective precipitation under strong large-scale forcing: a case study over the Milwaukee-Lake Michigan region[J]. *Journal of Hydrometeorology*, 2014, 15(1): 261-278.
- [27] YU M, LIU Y M. The possible impact of urbanization on a heavy rainfall event in Beijing[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2015, 120(16): 8132-8143.
- [28] 江志红, 唐振飞. 基于CMORPH资料的长三角城市化对降水分布特征影响的观测研究[J]. *气象科学*, 2011, 31(4): 355-364. (JIANG Z H, TANG Z F. Urbanization effects on precipitation over the Yangtze River Delta based on CMORPH data[J]. *Journal of the Meteorological Sciences*, 2011, 31(4): 355-364. (in Chinese))
- [29] 吴孝情, 陈晓宏, 唐亦汉, 等. 珠江流域非平稳性降雨极值时空变化特征及其成因[J]. *水利学报*, 2015, 46(9): 1055-1063. (WU X Q, CHEN X H, TANG Y H, et al. Spatiotemporal variations and the causes of non-stationary extreme precipitation in the Pearl River basin[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2015, 46(9): 1055-1063. (in Chinese))
- [30] CHENG L Y, AGHAKOUCHAK A. Nonstationary precipitation intensity-duration-frequency curves for infrastructure design in a changing climate[J]. *Scientific Reports*, 2014, 4: 7093.
- [31] 刘国纬. 水文科学的基本问题及当代前沿[J]. *水科学进展*, 2020, 31(5): 685-689. (LIU G W. Basic problems and frontier of hydrology[J]. *Advances in Water Science*, 2020, 31(5): 685-689. (in Chinese))

Evolution and non-stationary characteristics of summer precipitation structure over the Yangtze River Delta*

WU Lei¹, XU Youpeng², WANG Qiang², XU Yu³, GAO Bin²

(1. *College of Resources and Environment, Anhui Agricultural University, Hefei 230036, China*; 2. *College of Geographic and Oceanographic Sciences, Nanjing University, Nanjing 210023, China*; 3. *Department of Geography and Spatial Information Techniques, Ningbo University, Ningbo 315211, China*)

Abstract: This research aimed to determine the evolution and non-stationarity characteristics of summer precipitation structure over the Yangtze River Delta (YRD) in a changing environment. Based on the daily precipitation data from 72 rain gauges over the YRD during 1960—2016, the methods of Pettit and Mann-Kendall were applied to investigate the spatio-temporal variation rules of summer precipitation, considering the variables of precipitation amount, days, intensity and the incidence rates of light rain, moderate rain, heavy rain, and rainstorms, and analyze their causes. The results showed that the incidence rate of light rain decreased through time at most gauges, but the other six indices increased at most gauges. Among these, the non-stationarity in the incidence rate of light rain decreased monotonically, while the non-stationarity characteristics of precipitation amount, intensity, and incidence rates of heavy rain and rainstorms increased monotonically. These gauges were mainly scattered in the Tai Lake Basin, suggesting that this region is likely to face even greater risks from flooding. For most gauges, the intensity of the East Asian summer monsoon was positively associated with the incidence rate of light rain, but it was negatively associated with the other six indices. Take the Tai Lake basin as an example, urbanization increased the precipitation amount, intensity and incidence rates of heavy rain and rainstorms, with contribution rates of 25.4%, 27.9%, 54.6%, and 25.5%, respectively. However, urbanization decreased the precipitation days and the incidence rates of light rain and moderate rain, with contribution rates of -37.3%, -33.2%, and -100%, respectively.

Key words: precipitation structure; spatio-temporal evolution; non-stationary; Yangtze River Delta

* The study is financially supported by the National Natural Science Foundation of China (No. U2240203) and the Research Grants Program for Stabling and Introducing Talents of Anhui Agricultural University, China (No. rc522013).