

嘉陵江流域汛期不同等级降水量时空变化特征及贡献率分析*

甄英¹, 李永飞², 刘鸿文¹, 刘紫莹¹, 林鑫¹

(1. 内江师范学院 地理与测绘科学学院, 四川 内江 641100;

2. 吉首大学 旅游学院生态旅游湖南省重点实验室, 湖南 张家界 427000)

摘要:为揭示嘉陵江流域汛期降水规律,基于该流域11个气象站1960—2020年逐日降水资料,采用线性倾向估计、Mann-Kendall非参数检验、滑动 t 检验、重标极差分析、贡献率分析等方法分析了流域汛期(5—9月)总降水量和不同等级降水量的时空演变规律,并量化降水日数和降水强度变化对降水量的贡献。结果表明:1)流域汛期降水以中雨和小雨为主,总降水量及不同等级降水量均呈增长趋势,其中暴雨降水量增幅最大;2)总降水量及中雨、大雨和暴雨降水量在空间上呈“东部和西南部多、北部少”的格局,总体上南北差异大于东西差异;3)除总降水量在1985年发生突变外,不同等级降水量均没有突变发生;未来总降水量及中雨、暴雨降水量仍呈增加趋势,而小雨、大雨降水量呈减少趋势;4)总降水增量与中雨、大雨和暴雨降水增量主要受降水日数变化影响,小雨降水增量则主要源于降水强度增加。研究结果为区域气候变化研究及水资源的利用和开发提供科学依据。

关键词:嘉陵江流域;降水量等级;汛期;贡献率;时空变化

中图分类号:P461

文献标志码:A

文章编号:1672-6693(2025)05-0084-12

降水作为水循环的核心环节,它的时空分布特征及变化规律对区域水资源管理、旱涝灾害防御和生态环境建设具有重要意义。近些年来,在全球气候变化和人类活动的影响下,局地乃至全球尺度的降水结构已发生了明显的变化,暴雨、洪水、干旱等极端水文气象事件频发,并在一定程度上影响了区域的水安全与可持续发展^[1-2]。由于降水的频次和强度能引起总降水量的变化且两者贡献率不同^[3],因此不同等级降水量的时空变化特征及贡献率分析已成为水文学与气候学研究中的一大热点。

有关不同等级降水量演变及贡献率的研究成果十分丰富。从空间上看,不同等级降水量在不同区域存在明显的空间分异特征。就全球而言,赤道附近的降水量有所减少,北半球中高纬度地区和南半球降水量略有增加^[4];中国境内的弱降水量在西北地区西部和青藏高原地区以增加为主,而强降水量在大部分地区呈现增长趋势,仅在京津冀和重庆部分地区呈现减少趋势^[5];在西南地区夏季不同等级降水以中雨为主,降水量和降水日数的年际变化具有一致性^[6];黄土高原地区不同等级降水量和降水日数皆呈减少趋势,而总降水量和小雨、中雨降水量呈增加趋势^[7]。从贡献率来看,中国北方干旱半干旱区小雨降水量占总降水量的比例明显增加,而暴雨降水量在干旱区增幅尤为明显^[8];长江流域则呈现“东北部暴雨日数增加、西南部小雨日数减少”的格局,暴雨降水量对总降水量的贡献率达19.55%,且与上游地区相比,该项指标在下游地区更高,升幅为5%~10%^[9]。从时间上看,薛媛等人^[5]研究了1961—2020年中国弱降水、中等强度降水和极端降水长期变化趋势及它们的年代际分量与年代际海温振荡型的关联性;李晓容等人^[10]研究了四川盆地东北部不同等级的短时强降水,得出北部短时强降水出现频次更高的特征。此外,有学者利用气候模式数据预估未来全球范围内暴雨变化,发现未来情景中大洋洲暴雨强度最大、欧洲暴雨强度最小,同时随着重现期的增加,有暴雨发生的区域不断扩大且暴雨的强度也在不断增大^[11];而在中国,未来年暴雨日数和降水量呈增加趋势,但年暴雨强度在不同重现期下表现不同^[12]。还有研究综合考量了大气环流模式^[13]、城市化进程^[14-15]等多种因素对不同等级降水量及贡献率的影响,从而揭示降水事件变化的复杂性与多样性。

嘉陵江是长江上游最大支流,流经陕西省、甘肃省、四川省和重庆市。嘉陵江流域是重要的水源涵养地,也

* 收稿日期:2025-06-04 修回日期:2025-09-08 网络出版时间:2025-11-05T10:21

资助项目:国家自然科学基金地区科学基金项目(No. 42067061);生态旅游湖南省重点实验室开放基金项目(No. STLY2203);气象灾害预测预警与应急管理研究中心项目(No. ZHYJ22-YB07);内江师范学院校级科研项目(No. 2023YB05)

第一作者简介:甄英,女,讲师,硕士,研究方向为气候与环境变化,E-mail:zhen2153343@163.com;通信作者简介:李永飞,男,教授,博士,E-mail:lyfei123@163.com

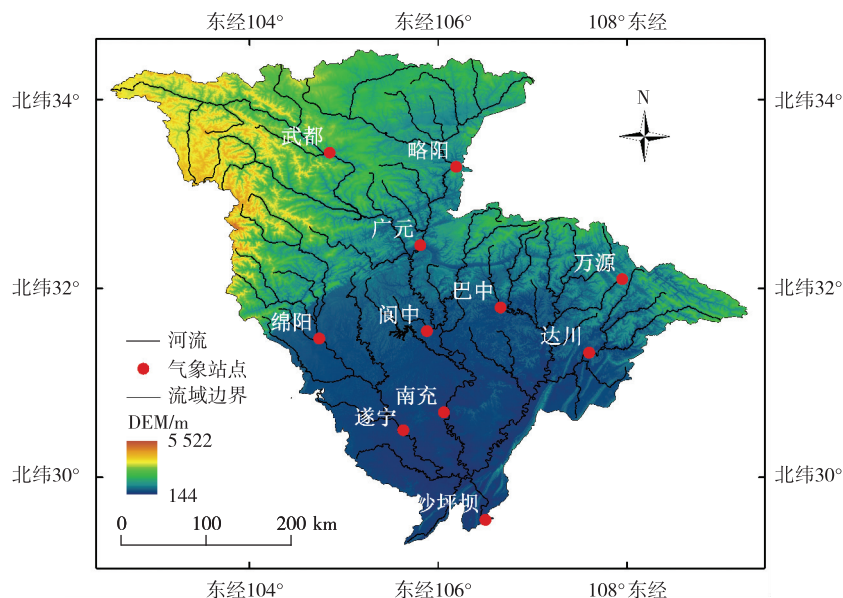
网络出版地址:https://link.cnki.net/urlid/50.1165.N.20251104.1752.002

是长江上游生态安全的重要屏障。目前已有的关于嘉陵江流域降水研究的关注点主要集中在降水分布规律与趋势^[16-24]、降水驱动因素分析^[25-26]及旱涝研究^[27-30]方面。汛期降水是水资源利用的关键时期,而有关嘉陵江流域汛期不同等级降水量变化及贡献率的研究还较少见。本研究基于已有相关研究成果和1960—2020年嘉陵江流域主要气象站点实测数据,结合不同等级降水划分标准,分析了流域不同等级降水量时空变化特征以及降水日数、降水频次对降水量的贡献,以期为该流域水资源的合理利用与开发以及区域气候变化研究提供参考资料。

1 数据来源与研究方法

1.1 数据来源

考虑到研究数据应覆盖嘉陵江流域并具备完整性,选取了该流域内武都、略阳、广元、万源、巴中、阆中、绵阳、达川、南充、遂宁、沙坪坝等11个气象站点(图1)在1960—2020年的降水数据进行研究。在统计上述时段嘉陵江流域逐日降水资料后发现,5、6、7、8和9月的月平均降水量分别占年平均降水量的11.16%、13.71%、19.77%、15.21%和15.08%,月平均降水量总和则占年平均降水量的74.59%,因此选取5—9月降水作为流域汛期降水。降水数据资料来源于中国气象科学数据共享服务网(<http://data.cma.cn/>),流域数字高程模型(DEM)数据来源于地理空间数据云网站(<http://www.gscloud.cn/>),分辨率为90 m。依据中华人民共和国国家标准《降水量等级:GB/T 28592—2012》^[31],将流域内降水等级划分为小雨、中雨、大雨和暴雨共4个等级,它们对应的24 h降水量分别为 $0.1 \sim < 10$ mm、 $10 \sim < 25$ mm、 $25 \sim < 50$ mm和 ≥ 50 mm。



注:底图来源于四川省水利厅(<http://slt.sc.gov.cn/>)印发的四川省行政区域内嘉陵江流域范围划定示意图,下同。

图1 嘉陵江流域气象站点分布示意图

Fig. 1 Distribution of meteorological stations in the Jialing River Basin

1.2 研究方法

1.2.1 线性倾向估计

利用一元线性回归模型建立降水时间序列,其中回归系数反映了研究时段内时间序列的变化趋势,该系数为正值时表明序列呈增加趋势,为负值时则表明序列呈减少趋势^[32]。

1.2.2 Mann-Kendall 非参数检验与滑动 t 检验

Mann-Kendall 非参数检验简称 M-K 检验,常被应用于气候突变检验中突变点的确定^[33]。滑动 t 检验法可进一步明确 M-K 检验所得突变点的存在。在本研究中,选取时间步长为 5 a、显著性水平 α 值为 0.05 进行检验^[34]。

1.2.3 重标极差分析

重标极差分析简称 R/S 分析(R 、 S 分别为极差和标准差),可用来判断序列的随机性及未来变化趋势^[35]。利用 $\ln(R/S)$ 和 $\ln L$ (L 为时间尺度)的回归分析求出 Hurst 指数(H),其中:当 $H = 0.5$ 时,表明序列相互独立,随机分布;当 $0 < H < 0.5$ 时,表明序列存在反持久性;当 $0.5 < H < 1$ 时,表明序列存在正持久性^[36]。

1.2.4 贡献率分析

降水日数和降水强度的长期变化会引发降水量的改变^[37]。Karl 等人^[38]指出降水量的变化可以看成是由上述 2 个因素的变化所引起,与之相关的公式如下:

$$U_z = pU_d, \quad (1)$$

$$U_{zi} = U_p - U_z, \quad (2)$$

其中: p 为降水量(单位: $\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$), U_p 为降水量趋势(单位: $\text{mm} \cdot \text{a}^{-1}$), U_d 为降水日数趋势(单位: $\text{d} \cdot \text{a}^{-1}$), U_z 为受降水日数趋势影响产生的降水增量(单位: $\text{mm} \cdot \text{a}^{-1}$), U_{zi} 为受降水强度趋势影响产生的降水增量(单位: $\text{mm} \cdot \text{a}^{-1}$)。当 U_z (或 U_{zi}) >0 时,降水日数(或降水强度)趋势引起降水量增加;当 U_z (或 U_{zi}) <0 时,降水日数(或降水强度)趋势引起降水量减少^[7,37]。为进一步比较降水日数和降水强度对降水增量的贡献差异,采用以下公式进行计算^[7,37]:

$$C = \frac{|U_z| - |U_{zi}|}{p} \times 100\%, \quad (3)$$

其中: C 为贡献差值百分数。当 $C > 0$ 时,表示降水日数趋势引起的降水增量大于降水强度趋势引起的降水增量;当 $C < 0$ 时,表示降水强度趋势引起的降水增量大于降水日数趋势引起的降水增量。

2 结果与分析

2.1 降水量时间变化

经统计,1960—2020 年嘉陵江流域汛期小雨、中雨、大雨和暴雨降水量的年平均值分别为 269.7、296.6、147.1 和 26.9 mm。由该结果可知:中雨降水量年平均值最大,占比为 40.47%,这与西南地区夏季降水特征相一致^[6];小雨降水量年平均值次之,占比为 36.43%;以上两者合计占汛期总降水量年平均值的 76.90%,表明汛期嘉陵江流域降水以中雨和小雨为主。

图 2a 显示:1960—2020 年嘉陵江流域汛期总降水量年平均值为 743.4 mm,整体上呈每 10 a 增加 3.3 mm 的趋势,这一结果与刘凯等人^[39]统计中国 699 个气象站降水资料得到的全国降水量变化趋势相一致,但低于同期全国降水量的增速即每 10 a 增加 5.1 mm^[40]。流域汛期总降水量的年代际变化呈“少—多—少—多”的波动模式,其中:1980 年代(1980—1989 年)和 2010 年代(2010—2019 年)汛期总降水量偏大,特别是 1980 年代汛期总降水量为 844.3 mm,高于其他年代的汛期总降水量;其余年代降水偏少,1990 年代(1990—1999 年)汛期总降水量为 670.3 mm,低于其他年代的汛期总降水量。图 2b~e 则显示小雨、中雨、大雨和暴雨降水量也均呈增加趋势,按降水量增幅从大到小依次对降水等级进行排序,分别为:暴雨、大雨、中雨和小雨。年代际变化分析结果则显示汛期各等级降水量的最大值均出现在 1980 年代,而汛期暴雨和中雨降水量最小值出现于 1990 年代、大雨降水量最小值出现于 1970 年代(1970—1979 年)、小雨降水量最小值出现于 2000 年代(2000—2009 年)。

对嘉陵江流域内各气象站点汛期降水量变化趋势作进一步分析(表 1),可以发现汛期总降水量和暴雨降水量变化趋势较为相似。流域汛期总降水量在巴中、万源、阆中、南充、达川、遂宁、沙坪坝等 7 个站点的增幅超过全流域及全国平均水平,暴雨降水量则在巴中、万源、阆中、南充、达川、遂宁等 6 个站点表现出明显增加,且相较于其他站点而言,位于四川省的万源站点暴雨降水量增幅最大。万源站点汛期小雨、大雨和暴雨降水量都呈增加趋势,因此当地需重点关注洪涝灾害的发生。与前者情况相反,同样是位于四川省的绵阳站点汛期小雨、中雨降水量均呈增加趋势,而总降水量和暴雨降水量均呈减少趋势,且与其他站点相比减少幅度最大,因此当地需对旱情的出现加以防范。此外,位于甘肃省的武都站点汛期总降水量增幅相对较低,其中小雨、中雨降水量均呈减少趋势,而大雨、暴雨降水量却明显增加,因此当地存在短时洪涝风险。

综合上述分析,1960—2020 年嘉陵江流域汛期降水以小雨和中雨为主,总降水量与各等级降水量在年际变化上有较强的一致性,峰值都出现在 1980 年代,且总降水量和各等级降水量都呈增加趋势。需要关注的是暴雨降水量增幅最大,流域内个别站点所在地区要防范短时洪涝和干旱灾情的出现。

2.2 降水量空间变化

ArcGIS 空间插值技术能精准反映出连续数据的空间变化情况,其中 Kriging 插值法是近地面气候插值的主流方法^[41],相关研究^[42-43]也证实了该方法的精度和可靠性。通过统计 1960—2020 年嘉陵江流域各气象站点汛期总降水量和各等级降水量的年平均值,利用 Kriging 插值法中的自然间断点分层得到流域汛期降水空间分布状况如图 3 所示。

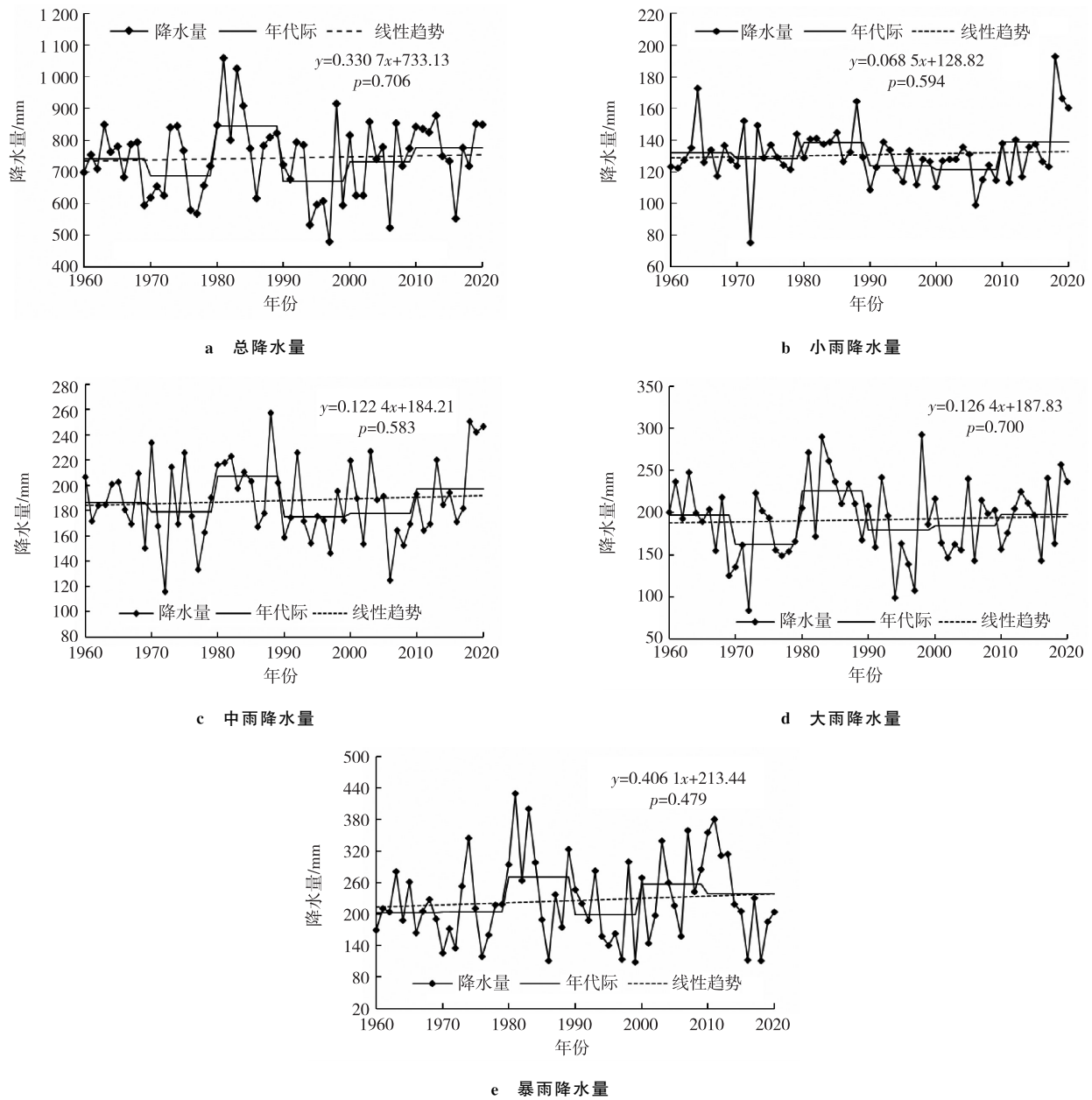


图 2 嘉陵江流域汛期总降水量与各等级降水量变化趋势

Fig. 2 The trend of the total precipitation and the precipitation of each grade change during the flood season in the Jialing River Basin

表 1 嘉陵江流域汛期各站点平均每 10 a 降水量变化趋势

Tab. 1 The trend of average precipitation change per 10 years at each site during the flood season in the Jialing River Basin

mm

气象站点	小雨	中雨	大雨	暴雨	总降水	气象站点	小雨	中雨	大雨	暴雨	总降水
武都	-1.09	-2.87	6.73	0.13	2.92	绵阳	6.47	5.30	-7.66	-19.21	-15.07
略阳	0.47	4.90	-5.32	-6.59	-6.52	南充	-0.25	-2.88	9.44	9.48	15.79
广元	-1.81	8.19	-4.19	-2.17	0.02	达川	-1.00	-4.55	10.91	12.88	18.26
巴中	-0.26	0.84	-2.48	8.01	6.13	遂宁	0.30	5.39	-6.01	15.83	15.52
万源	1.08	-4.81	5.73	22.05	24.06	沙坪坝	4.45	-0.82	8.33	-0.59	11.34
阆中	-0.82	4.78	-1.57	4.85	7.25						

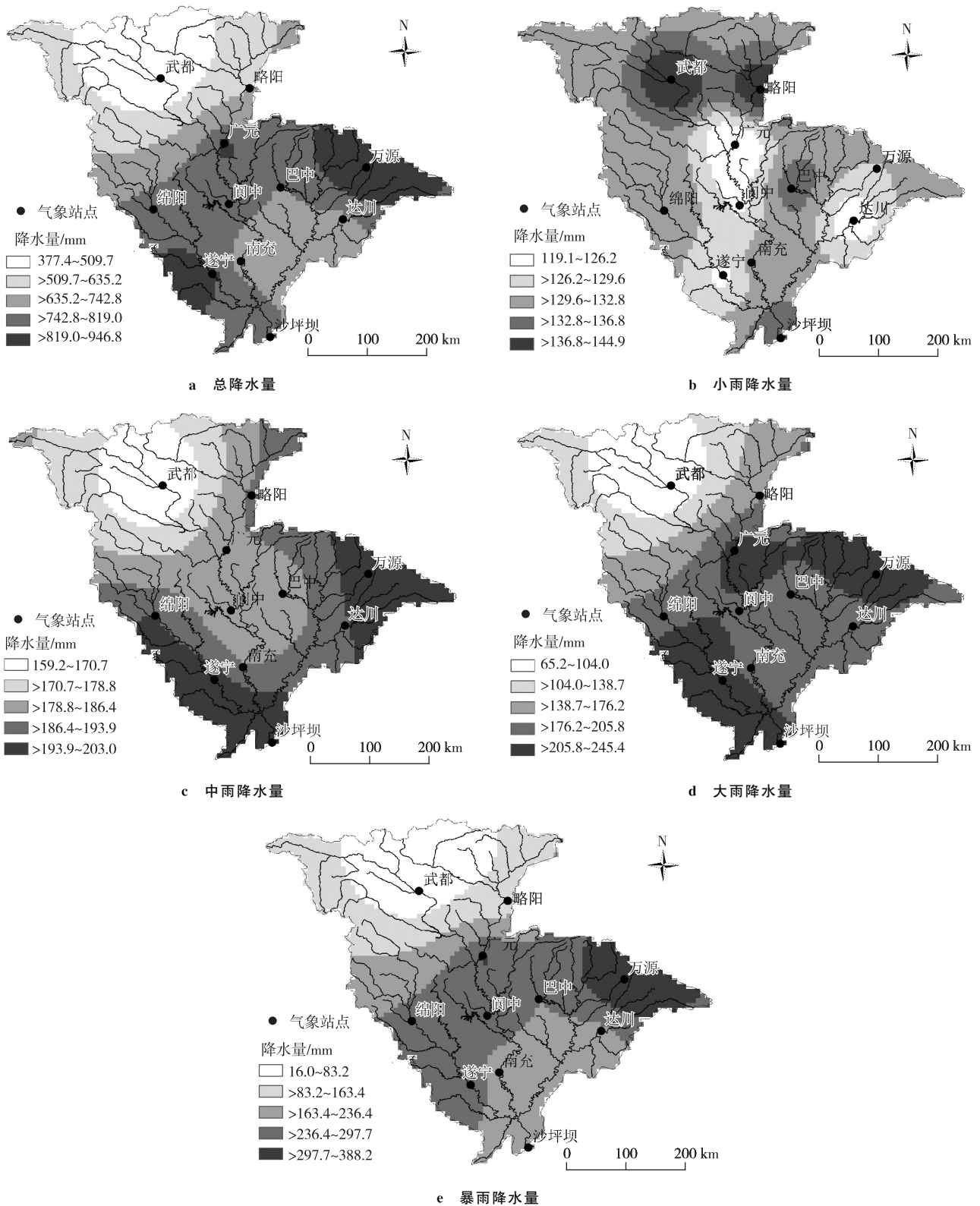


图 3 嘉陵江流域汛期总降水量及各等级降水量空间分布
 Fig.3 Spatial distribution of total precipitation and each grade of precipitation during the flood season in the Jialing River Basin

从图 3a 中可以看出嘉陵江流域汛期总降水量空间分布差异明显,范围为 377.4~946.8 mm,最大值出现在流域东部的万源,最小值出现在北部的武都,整体呈“东部和西南部多、北部少”的空间分布特征。气候和海拔是影响嘉陵江流域汛期降水空间分布的主要因素:武都地处海拔范围为 667~3 600 m 的北亚热带半湿润气候向暖

温带半干旱气候过渡带,而位于大巴山腹地的万源海拔范围为 600~1 400 m,属亚热带北缘,故而降水更加充沛。嘉陵江流域汛期各等级降水量空间分布状况不一,其中:小雨降水量空间分布差异较小,范围为 119.1~144.9 mm,最大值出现在武都,最小值出现在流域中部的阆中,整体上形成了“北部多、中部和南部少”的空间分布特征(图 3b);中雨、大雨降水量空间分布均呈“东部和西南部多、北部少”的特征,其中武都为中雨、大雨降水量的低值区,中雨降水量的低值区在万源,大雨降水量的低值区在遂宁(图 3c、d);暴雨降水量的空间变异性最强,范围为 16.0~388.2 mm,且空间分布与总降水量的情况相似,分别也在武都和万源(图 3e)。

综上所述,嘉陵江流域汛期内除小雨外的其他等级降水整体均呈“东部和西南部多、北部少”的空间分布特征,且南北差异大于东西差异;总降水量和中雨、暴雨降水量高值区位于万源,小雨、大雨降水量高值区分别位于武都和遂宁;中雨、大雨和暴雨降水量低值区均在武都。

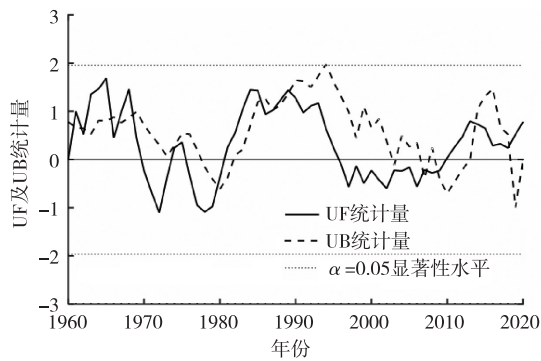
2.3 突变性分析

降水突变是通过突变点来表现降水量在时间上的急剧增加或急剧减少的变化。为排除单一方法可能出现的虚假突变点,本研究结合 M-K 检验和滑动 t 检验这 2 种方法进行突变性分析并对结果作相互验证,以此提升结果可信度。表 2 为嘉陵江流域汛期各等级降水量的突变检验结果,图 4 为检验出有突变点的总降水量 M-K 检验和滑动 t 检验趋势图。

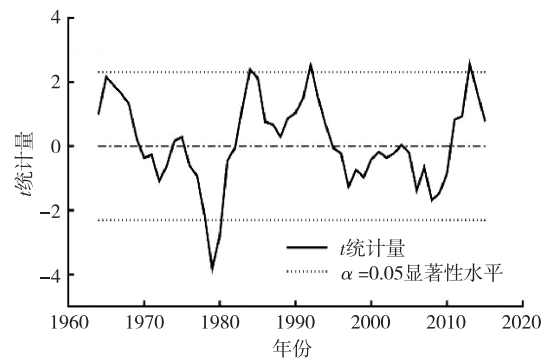
表 2 嘉陵江流域汛期各等级降水量突变检验结果

Tab. 2 The results of the mutation test of precipitation of all grades in the flood season of the Jialing River Basin

等级	M-K 检验	滑动 t 检验	结果
小雨	UF 和 UB 曲线在 1960、1962、1989、2017 和 2020 年临界值内有交点	1978 和 1980 年超过临界值范围	无突变发生
中雨	UF 和 UB 曲线在 1964、1966、1981、1986、1988、2018 和 2020 年临界值内有交点	未超过临界值范围	无突变发生
大雨	UF 和 UB 曲线在 1961、1962、1981、1983、1987 和 2018 年临界值内交点	1980 年超过临界值范围	无突变发生
暴雨	UF 和 UB 曲线在 1961、1965、1967、1970、1973、1975、1978、2016、2017 和 2019 年临界值内有交点	1979、1984 和 2013 年超过临界值范围	无突变发生



a M-K 检验



b 滑动 t 检验

图 4 嘉陵江流域汛期总降水量 M-K 检验和滑动 t 检验结果

Fig. 4 Results of M-K test and moving t test on total precipitation during the flood season in the Jialing River Basin

由表 2 可知,嘉陵江流域汛期各等级降水量的 M-K 检验结果相似,分别在 1960—1990 年、2016—2020 年间有多个交点位于临界值间;滑动 t 检验结果显示突破临界值的点主要在 2000 年代前后。综合来看,嘉陵江流域汛期内各等级降水量都不存在突变发生。

由图 4a 可见,嘉陵江流域汛期总降水量 UF 曲线在 1960 年代、1980 年代和 2010 年代以后值都大于 0,表明在以上时段降水增多,UF 和 UB 曲线在 1961、1962、1966、1967、1974、1985、1989、2006、2008、2014 和 2018 年在临界值间相交。而图 4b 则显示: t 统计量曲线在 1960—1979 年呈下降趋势,并于 1979 年突破临界值后上升,说明降水在此期间发生了 1 次由少到多的转变;该曲线在 1985 和 1993 年向上突破临界值后下降,2013 年再次向上突破临界值。结合 M-K 检验和滑动 t 检验结果来看,嘉陵江流域汛期总降水量在 1985 年发生了突变。

2.4 持续性分析

掌握汛期降水量未来变化趋势对嘉陵江流域短期防灾减灾与长期水资源规划均具有重要意义。由图 5 可知:总降水量以及中雨、暴雨降水量对应的 H 值均大于 0.5, 表明它们未来变化趋势和历史上一致, 即未来三者仍呈增加趋势, 而小雨、大雨降水量则呈减少趋势。这一结论与基于 CMIP6 气候模式对长江流域四川段和全国未来降水变化预估结果相一致^[44-45]。就嘉陵江流域各气象站点所在地区降水量未来变化趋势(表 3)来看, 万源的小雨、大雨降水量过去呈增加趋势而 $H > 0.5$, 表明两者未来仍呈增加趋势; 暴雨降水量和总降水量过去呈增加趋势但 $H < 0.5$, 表明两者未来呈减少趋势; 中雨降水量过去呈减少趋势且 $H < 0.5$, 表明该等级降水量未来呈增加趋势。绵阳小雨降水量过去呈增加趋势而 $H > 0.5$, 表明该等级降水量未来仍呈增加趋势; 大雨、暴雨降水量和总降水量过去呈减少趋势但 $H < 0.5$, 表明三者未来呈增加趋势; 中雨降水量过去呈增加趋势但 $H < 0.5$, 表明该等级降水量未来呈减少趋势。此外, 嘉陵江流域其他各气象站点所在地区降水量未来变化趋势各不相同, 值得关注的是在流域北部少雨的武都、略阳地区未来总降水量呈增加趋势, 而其他绝大部分区域总降水量呈减少趋势。

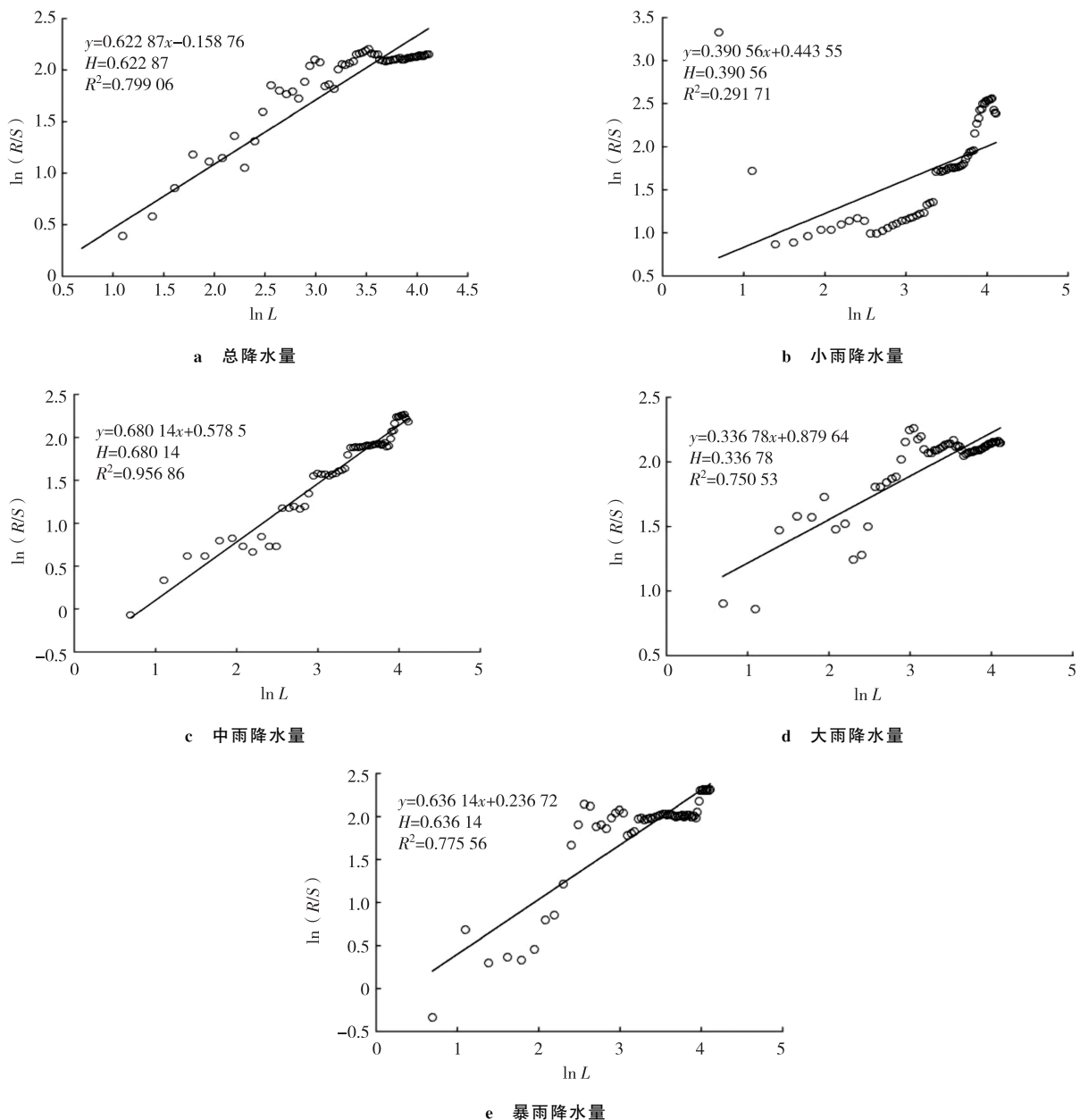


图 5 嘉陵江流域汛期总降水量及各等级降水量的 R/S 分析

Fig. 5 The R/S analysis of the total precipitation and the precipitation of each grade during the flood season in the Jialing River Basin

表 3 嘉陵江流域汛期降水量未来变化趋势

Tab.3 Future trend of precipitation during the flood season in the Jialing River Basin

气象站点	小雨		中雨		大雨		暴雨		总降水	
	H 值	未来趋势	H 值	未来趋势	H 值	未来趋势	H 值	未来趋势	H 值	未来趋势
武都	0.76	减少	0.69	减少	0.40	减少	0.58	增加	0.87	增加
略阳	0.49	减少	0.19	减少	0.31	增加	0.37	增加	0.45	增加
广元	0.42	增加	0.81	增加	0.43	增加	0.40	增加	0.41	减少
巴中	0.57	减少	0.66	增加	0.42	增加	0.15	减少	0.31	减少
万源	0.67	增加	0.23	增加	0.54	增加	0.42	减少	0.43	减少
阆中	0.56	减少	0.50	随机	0.84	减少	0.50	随机	0.29	减少
绵阳	0.81	增加	0.34	减少	0.44	增加	0.47	增加	0.44	增加
南充	0.30	增加	0.57	减少	0.63	增加	0.47	减少	0.40	减少
达川	0.24	增加	0.71	减少	0.67	增加	0.41	减少	0.33	减少
遂宁	0.52	增加	0.88	增加	0.24	增加	0.05	减少	0.37	减少
沙坪坝	0.05	减少	0.68	减少	0.56	增加	0.52	减少	0.43	减少

2.5 降水日数和降水强度对降水量的贡献率

为量化降水日数和降水强度对嘉陵江流域汛期降水量的贡献状况,统计流域汛期总降水和各等级降水的日数、强度,并利用式(1)~(3)计算了流域汛期总降水和各等级降水的变化及C值(表4)。结果表明:除小雨外,研究时段内流域汛期各等级降水的 U_d 值均呈微弱增加趋势,其中中雨的 U_d 值最大;除中雨和总降水外,其他等级降水的降水强度趋势(U_{pi})值均呈轻微增加趋势,其中暴雨的 U_{pi} 值最大。总降水的 U_z 值和 U_{zi} 值分别为2.789和-2.716 mm·a⁻¹,表明总降水的日数、强度趋势变化分别引起了总降水量趋势的上升和下降,由C=0.219%可知总降水日数趋势在总降水增量中起主要贡献。除小雨外的其他各等级降水的 U_z 值都是正值,表明降水日数趋势变化引起对除小雨外其他等级降水量趋势的增加;同时这些等级降水的 U_{zi} 值全为正值,表明降水强度趋势变化也引起相应的降水量趋势的上升;由它们对应的C值分别是-2.294%、0.037%、0.236%和0.071%,表明小雨的降水强度趋势对小雨降水增量起主要贡献,而中雨、大雨和暴雨的降水日数趋势对它们各自的降水增量起主要贡献。

表 4 降水的日数、强度变化趋势对降水增量的影响

Tab.4 The influence of the trend of precipitation days and intensity on the increment of precipitation

参数	小雨	中雨	大雨	暴雨	总降水
$p/(mm \cdot d^{-1})$	3.008	16.063	34.787	76.562	33.205
$U_p/(mm \cdot a^{-1})$	0.069	0.122	0.126	0.406	0.073
$U_d/(d \cdot a^{-1})$	-0.044	0.004	0.003	0.003	0.084
$U_z/(mm \cdot a^{-1})$	-0.132	0.064	0.104	0.230	2.789
$U_{pi}/(mm \cdot a^{-1})$	0.001	-0.005	0.008	0.014	-0.007
$U_{zi}/(mm \cdot a^{-1})$	0.201	0.058	0.022	0.176	-2.716
C	-2.294%	0.037%	0.236%	0.071%	0.219%

3 结束语

基于1960—2020年嘉陵江流域11个气象站点逐日降水资料,本研究系统分析了该流域汛期总降水量和小雨、中雨、大雨、暴雨等不同等级降水量的时空演变特征、突变规律和未来变化趋势,并量化了降水日数和降水强度对降水量的贡献机制,得到以下主要结果:

1) 嘉陵江流域汛期降水以中雨、小雨为主;总降水量和各等级降水量都呈增加趋势,峰值均出现在 1980 年代,其中暴雨降水量增幅最大。

2) 受海拔和气候的影响,嘉陵江流域汛期内除小雨外,其他等级降水整体呈“东部和西南部多、北部少”的空间分布特征,且南北差异大于东西差异;万源为总降水量和中雨、暴雨降水量的高值区,武都、遂宁分别为小雨、大雨降水量的高值区,武都也是中雨、大雨和暴雨降水量低值区。

3) M-K 检验和滑动 t 检验结果表明各等级降水量没有突变发生,仅总降水量在 1985 年发生突变。基于 Hurst 指数的预测结果显示嘉陵江流域汛期未来总降水量和中雨、暴雨降水量均呈增加趋势,小雨、大雨降水量均呈减少趋势。

4) 统计嘉陵江流域汛期总降水和各等级降水的日数、强度并分析它们对降水量的贡献率,结果显示总降水日数趋势在总降水增量中起主要贡献,小雨降水强度趋势对小雨降水增量起主要贡献,中雨、大雨和暴雨降水日数趋势对相应的降水增量起主要贡献。

需要指出的是,受区域尺度限制,本研究未能深入解析大尺度环流(如季风系统)对降水格局的调控机制,对降水日数和降水强度变化的归因分析(如 ENSO 事件、气温变化等关键驱动因子)亦未充分量化。未来研究将融合 CMIP6 多模式集合模拟,评估不同碳排放情景下的降水变化,并耦合大气环流模型量化环流-局地因子的交互作用,从而进一步深入揭示降水变化规律。

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] 曾颖婷, 陆尔. 1961—2010 年我国夏季总降水和极端降水的变化[J]. *气候变化研究进展*, 2015, 11(2): 79-85.
ZENG Y T, LU E. Changes of summer rainfall and extreme precipitation during 1961—2010 in China [J]. *Progressus Inquisitiones de Mutatione Climatis*, 2015, 11(2): 79-85.
- [4] VAN WIJNGAARDEN W A, SYED A. Changes in annual precipitation over the earth's land mass excluding Antarctica from the 18th century to 2013[J]. *Journal of Hydrology*, 2015, 531: 1020-1027.
- [5] 薛媛, 杨庆, 马柱国, 等. 1961—2020 年中国区域不同等级降水的变化趋势及其可能成因[J]. *大气科学*, 2024, 48(2): 619-644.
XUE Y, YANG Q, MA Z G, et al. Trends and possible causes of different levels of precipitation variations in China during 1961—2020[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2024, 48(2): 619-644.
- [6] 薛雨婷, 李谢辉, 王磊, 等. 1976—2017 年西南地区夏季不同等级降水时空变化特征[J]. *西南大学学报(自然科学版)*, 2022, 44(2): 137-145.
XUE Y T, LI X H, WANG L, et al. Spatial and temporal change characteristics of different grades of precipitation in summer in southwestern China from 1976 to 2017[J]. *Journal of Southwest University (Natural Science Edition)*, 2022, 44(2): 137-145.
- [7] 安彬, 肖薇薇, 张淑兰, 等. 1960—2017 年黄土高原不同等级降水日数和强度时空变化特征[J]. *干旱区研究*, 2021, 38(3): 714-723.
AN B, XIAO W W, ZHANG S L, et al. Spatio-temporal characteristics of precipitation days and intensity with different grades in the Loess Plateau during 1960—2017[J]. *Arid Zone Research*, 2021, 38(3): 714-723.
- [8] 申露婷, 张方敏, 黄进, 等. 1981—2018 年内蒙古不同等级降水时空变化特征[J]. *气象科学*, 2022, 42(2): 162-170.
SHEN L T, ZHANG F M, HUANG J, et al. Spatiotemporal variations of different precipitation grades in Inner Mongolia from 1981 to 2018[J]. *Journal of the Meteorological Sciences*, 2022, 42(2): 162-170.
- [9] 李莹, 朱益民, 夏淋淋, 等. 长江流域夏季不同强度降水日数的时空变化特征[J]. *气象科学*, 2017, 37(6): 808-815.
LI Y, ZHU Y M, XIA L L, et al. Spatiotemporal variation of different intensity rainfall in the Changjiang River Basin in summer [J]. *Journal of the Meteorological Sciences*, 2017, 37(6): 808-815.
- [10] 李晓容, 刘原江, 王涵, 等. 区分等级对分析四川盆地东北部短时强降水特征的影响[EB/OL]. (2025-08-04)[2025-09-01]. <https://link.cnki.net/urlid/65.1265.P.20250804.1548.010>.
LI X R, LIU Y J, WANG H, et al. The impact of differentiating precipitation intensity on analyzing short-term heavy precipitation characteristics in the northeastern part of the Sichuan Basin[EB/OL]. (2025-08-04)[2025-09-01]. <https://link.cnki.net/urlid/65.1265.P.20250804.1548.010>.

- [11] 唐明秀,朱秀芳,刘婷婷,等. 基于CMIP6不同重现期的全球未来暴雨社会经济风险变化评估[J]. 地理科学进展,2023,42(3):531-542.
TANG M X,ZHU X F,LIU T T,et al. Future global socioeconomic risk changes to rainstorms based on the different return periods of CMIP6[J]. Progress in Geography,2023,42(3):531-542.
- [12] 唐明秀,孙劭,朱秀芳,等. 基于CMIP6的中国未来暴雨危险性变化评估[J]. 地球科学进展,2022,37(5):519-534.
TANG M X,SUN S,ZHU X F,et al. CMIP6 assessment of changes in hazard of future rainstorms in China[J]. Advances in Earth Science,2022,37(5):519-534.
- [13] 刘卫林,吴滨,李香,等. 赣江流域不同等级降水变化特征及其与大尺度气候相关性研究[J]. 长江流域资源与环境,2022,31(3):659-672.
LIU W L,WU B,LI X,et al. Variation characteristics of rainfall at different levels and its correlation with large-scale climate indices on Gangjiang Basin[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin,2022,31(3):659-672.
- [14] 黄晓东,刘文锴,曹润祥,等. 不透水面扩张对郑州主城区降水特征的影响[J]. 水资源保护,2022,38(6):22-30.
HUANG X D,LIU W K,CAO R X,et al. Effects of impervious surface expansion on precipitation characteristics in main urban area of Zhengzhou City[J]. Water Resources Protection,2022,38(6):22-30.
- [15] 曹永强,李玲慧,邵薇薇,等. 珠海市香洲城区降水变化特征及成因分析[J]. 水资源保护,2021,37(5):9-15.
CAO Y Q,LI L H,SHAO W W,et al. Analysis on characteristics and causes of precipitation change in Xiangzhou urban area, Zhuhai City[J]. Water Resources Protection,2021,37(5):9-15.
- [16] 王跃峰,胡月,尹思危,等. 嘉陵江流域极端连续性降水时空变化及其驱动因素研究[J]. 水资源与水工程学报,2023,34(4):35-44.
WANG Y F,HU Y,YIN S W,et al. Spatio-temporal changes in continuous extreme precipitation and its climatic drivers in the Jialing River Basin[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering,2023,34(4):35-44.
- [17] 安文杰,胡旭健,苗蔚,等. 1960—2016年嘉陵江流域极端降水时空变化特征研究[J]. 水利水电技术(中英文),2022,53(12):11-23.
AN W J,HU X J,MIAO W,et al. Spatial-temporal variation of extreme precipitation in Jialing River Basin from 1960 to 2016 [J]. Water Resources and Hydropower Engineering,2022,53(12):11-23.
- [18] 曾小凡,叶磊,翟建青,等. 嘉陵江流域极端降水变化及其对水文过程影响的初步研究[J]. 长江流域资源与环境,2014,23(S1):159-164.
ZENG X F,YE L,ZHAI J Q,et al. Research on changes of extreme precipitation in the Jialingjiang river basin and its potential impacts on hydrological process[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin,2014,23(S1):159-164.
- [19] 周珍. 基于Mann-Kendall的嘉陵江流域降水量时空分布规律研究[J]. 水资源开发与管理,2021,7(3):25-28.
ZHOU Z. Study on temporal and spatial distribution of precipitation in Jialing River Basin based on Mann-Kendall[J]. Water Resources Development and Management,2021,7(3):25-28.
- [20] 贺成民,陈元芳,孙夏利. 嘉陵江流域降水量时空分布特征[J]. 水电能源科学,2019,37(6):5-8.
HE C M,CHEN Y F,SUN X L. Temporal and spatial distribution of precipitation in Jialingjiang River Basin[J]. Water Resources and Power,2019,37(6):5-8.
- [21] 符艳红,谢世友,高洁. 基于Mann-Kendall法的嘉陵江流域降水量时空分布规律[J]. 西南大学学报(自然科学版),2018,40(6):132-139.
FU Y H,XIE S Y,GAO J. A Mann-Kendall method-based study of the temporal and spatial distribution of precipitation in the Jialing River Basin[J]. Journal of Southwest University (Natural Science Edition),2018,40(6):132-139.
- [22] 王润科,杨磊,叶青. 陇南嘉陵江流域年降水量空间结构的趋势面分析[J]. 首都师范大学学报(自然科学版),2013,34(6):86-91.
WANG R K,YANG L,YE Q. Spatial trend surface analysis of precipitation in Longnan Jialing River Basin[J]. Journal of Capital Normal University (Natural Science Edition),2013,34(6):86-91.
- [23] 向田恬,陈华,郭家力,等. 气候变化对嘉陵江流域降水变化影响分析[J]. 南水北调与水利科技,2010,8(1):75-77.
XIANG T T,CHEN H,GUO J L,et al. Impact of climate change on prediction of precipitation in Jialing River of the Upper Yangtze River Basin[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology,2010,8(1):75-77.
- [24] 段文明,穆兴民,高鹏,等. 嘉陵江流域近50年降水量演变规律分析[J]. 水土保持研究,2012,19(1):97-101.
DUAN W M,MU X M,GAO P,et al. Analysis on the trend of precipitation in Jialing River Basin nearly 50 years[J]. Research of Soil and Water Conservation,2012,19(1):97-101.
- [25] 杨军,张会兰,庞建壮. 嘉陵江流域降水集中度的时空变异与驱动因素研究[J]. 长江流域资源与环境,2021,30(4):849-860.
YANG J,ZHANG H L,PANG J Z. Study on spatial-temporal variation and driving factors of precipitation concentration in

- Jialing River Basin[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2021, 30(4): 849-860.
- [26] 孟铖铖. 嘉陵江流域径流时空变化特征及其驱动因素研究[D]. 北京:北京林业大学, 2019.
MENG C C. Spatiotemporal heterogeneity and driving factors of streamflow variations in Jialing River Basin[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2019.
- [27] 董永超, 甘富万, 高扬, 等. IMERG 卫星降水数据在嘉陵江流域的干旱监测效用评估[J]. *水文*, 2023, 43(4): 88-95.
DONG Y C, GAN F W, GAO Y, et al. Evaluation of drought monitoring effectiveness in Jialing River Basin using IMERG satellite precipitation data[J]. *Journal of China Hydrology*, 2023, 43(4): 88-95.
- [28] 缪文学, 强宏伟. 嘉陵江上游罗家河流域降水量变化特征研究[J]. *水利科技与经济*, 2025, 31(5): 100-104.
MIAO W X, QIANG H W. Research on the characteristics of precipitation changes in Luoia River Basin in the upper reaches of Jialing River[J]. *Water Conservancy Science and Technology and Economy*, 2025, 31(5): 100-104.
- [29] 王世杰, 刘柯莹, 孟长青. 基于 SPEI 的嘉陵江流域旱涝时空演变分析[J]. *水利水电快报*, 2022, 43(5): 12-19.
WANG S J, LIU K Y, MENG C Q. Spatiotemporal evolution characteristics of drought and flood in Jialing River Basin based on SPEI[J]. *Express Water Resources & Hydropower Information*, 2022, 43(5): 12-19.
- [30] 杜华明, 延军平, 杨登兴, 等. 嘉陵江流域降水变化及早涝多时间尺度分析[J]. *自然资源学报*, 2015, 30(5): 836-845.
DU H M, YAN J P, YANG D X, et al. The distribution of precipitation and multi-temporal scales drought-flood analysis in the Jialing River Basin[J]. *Journal of Natural Resources*, 2015, 30(5): 836-845.
- [31] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 降水量等级: GB/T 28592—2012[S]. 北京: 中国标准出版社, 2012.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, National Standardization Administration of the People's Republic of China. Grade of precipitation: GB/T 28592—2012[S]. Beijing: Standards Press of China, 2012.
- [32] 马小燕, 朱晓雯, 赵金涛, 等. 1995—2015 年宁夏沿黄城市带蒸散发时空变化特征[J]. *水资源与水工程学报*, 2022, 33(2): 216-224.
MA X Y, ZHU X W, ZHAO J T, et al. Temporal and spatial variation characteristics of evapotranspiration along the Yellow River Urban Belt in Ningxia from 1995 to 2015[J]. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2022, 33(2): 216-224.
- [33] 刘明亮, 王振龙, 吕海深, 等. 五道沟地区 1971—2020 年地温月尺度变化及其对气温的响应[J]. *灌溉排水学报*, 2022, 41(2): 83-90.
LIU M L, WANG Z L, LYU H S, et al. Change in temperature over the past 50 years at Wudaogou and its influence on soil temperature at different depths[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2022, 41(2): 83-90.
- [34] 张静, 牟风云, 楚昌全. 未来土地利用变化情景下重庆市高温灾害的暴露度分析[J]. *重庆师范大学学报(自然科学版)*, 2025, 42(1): 83-96.
ZHANG J, MU F Y, CHU C Q. Analysis of exposure to heat hazards in Chongqing municipality under future land use change scenarios[J]. *Journal of Chongqing Normal University (Natural Science)*, 2025, 42(1): 83-96.
- [35] 艾明乐, 赵强, 王奎峰, 等. 1957—2017 年泾河流域降雨量及降雨侵蚀力时空变化分析[J]. *水资源与水工程学报*, 2021, 32(4): 93-100.
AI M L, ZHAO Q, WANG K F, et al. Spatio-temporal variations of rainfall and rainfall erosivity in Jinghe River Basin from 1957 to 2017[J]. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2021, 32(4): 93-100.
- [36] 郑新奇, 吕利娜. 地统计学(现代空间统计学)[M]. 北京: 科学出版社, 2018.
ZHENG X Q, LÜ L N. *Geostatistics (Modern Spatial Statistics)* [M]. Beijing: Science Press, 2018.
- [37] 徐新创, 张学珍, 戴尔阜, 等. 1961—2010 年中国降水强度变化趋势及其对降水量影响分析[J]. *地理研究*, 2014, 33(7): 1335-1347.
XU X C, ZHANG X Z, DAI E F, et al. Research of trend variability of precipitation intensity and their contribution to precipitation in China from 1961 to 2010[J]. *Geographical Research*, 2014, 33(7): 1335-1347.
- [38] KARL T R, KNIGHT R W. Secular trends of precipitation amount, frequency, and intensity in the United States[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1998, 79(2): 231-241.
- [39] 刘凯, 聂格格, 张森. 中国 1951—2018 年气温和降水的时空演变特征研究[J]. *地球科学进展*, 2020, 35(11): 1113-1126.
LIU K, NIE G G, ZHANG S. Study on the spatiotemporal evolution of temperature and precipitation in China from 1951 to 2018[J]. *Advances in Earth Science*, 2020, 35(11): 1113-1126.
- [40] 中国气象局气候变化中心. 中国气候变化蓝皮书 2022[M]. 北京: 科学出版社, 2022.

- Climate Change Center of China Meteorological Administration. Blue book on climate change in China 2022[M]. Beijing: Science Press, 2022.
- [41] 张国峰, 瞿明凯, 成兆金, 等. 基于序贯高斯模拟的日最低气温空间不确定性评估[J]. 应用生态学报, 2014, 25(1): 117-124.
ZHANG G F, QU M K, CHENG Z J, et al. Assessment for spatial uncertainty of daily minimum temperature by using sequential Gaussian simulation[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2014, 25(1): 117-124.
- [42] 王新宇, 黄鹏程. 基于 GIS 的气象要素插值方法比较研究[J]. 测绘与空间地理信息, 2020, 43(5): 167-170.
WANG X Y, HUANG P C. Comparative study of interpolation methods of meteorological factors based on GIS[J]. Geomatics & Spatial Information Technology, 2020, 43(5): 167-170.
- [43] 许民, 王雁, 周兆叶, 等. 长江流域逐月气温空间插值方法的探讨[J]. 长江流域资源与环境, 2012, 21(3): 327-334.
XU M, WANG Y, ZHOU Z Y, et al. Discussion of methods of spatial interpolation for monthly temperature data in the Yangtze River basin[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2012, 21(3): 327-334.
- [44] 陈侯霏, 韩玉国, 孙明东, 等. 基于 CMIP6 气候模式对长江流域四川段的未来降水变化预估与分析[J]. 水土保持研究, 2024, 31(5): 288-294.
CHEN Y F, HAN Y G, SUN M D, et al. Prediction and analysis of future precipitation changes in the Sichuan section of the Yangtze River Basin based on the CMIP6 climate model[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(5): 288-294.
- [45] 温姗姗, 翟建青, 汪辰钰, 等. 基于 NEX-GDDP-CMIP6 的不同升温情景下中国气候要素变化[EB/OL]. (2025-07-14)[2025-09-01]. <https://doi.org/10.13870/j.cnki.stbcbx.2025.05.021>.
WEN S S, ZHAI J Q, WANG C Y, et al. Changes in climate elements in China under different warming scenarios based on NEX-GDDP-CMIP6[EB/OL]. (2025-07-14)[2025-09-01]. <https://doi.org/10.13870/j.cnki.stbcbx.2025.05.021>.

Resources, Environment and Ecology in Three Gorges Area

Analysis of Spatio-Temporal Variation and Contribution Rate of Different Grade of Precipitation in the Jialing River Basin During the Flood Season

ZHEN Ying¹, LI Yongfei², LIU Hongwen¹, LIU Ziyang¹, LIN Xin¹

(1. School of Geographic Science and Geomatics, Neijiang Normal University, Neijiang Sichuan 641119; 2. Hunan Provincial Key Laboratory of Ecological Tourism, College of Tourism, Jishou University, Zhangjiajie Hunan 427000, China)

Abstract: In order to reveal the law of precipitation during the flood season in the Jialing River Basin, based on the daily precipitation data of 11 meteorological stations in the basin from 1960 to 2020, the temporal and spatial evolution laws of the total precipitation and precipitation of different grades in the flood season (May-September) were analyzed using methods such as linear tendency estimation, Mann-Kendall non-parametric test, sliding t-test, re-scaling analysis, and contribution rate analysis, and the contribution of the change of precipitation days and precipitation intensity to the precipitation was quantified. The results show that: 1) The precipitation of the basin during the flood season is mainly moderate rain and light rain, and the total precipitation and precipitation of different grades all show an increasing trend, among which the precipitation of torrential increases the most. 2) The total precipitation and the precipitation of moderate rain, heavy rain and torrential rain are more in the east and southwest and less in the north, the overall difference between the north and the south is greater than that between the east and the west. 3) Except for the total precipitation in 1985, there no sudden change in the precipitation of different grades; the total precipitation, moderate rain and torrential rain in the future still show an increasing trend, while the light rain and heavy rain a decreasing trend. 4) The increment of total precipitation and the increment of moderate rain, heavy rain and torrential rain are mainly affected by the change of precipitation days, while increment of light rain precipitation mainly comes from the increase of precipitation intensity. The research results provide a scientific basis for the study of regional climate change and the utilization and development of water.

Keywords: the Jialing River Basin; grade of precipitation; flood season; contribution rate; spatiotemporal variation

(责任编辑 方 兴)