

雅鲁藏布江流域降水时空变化特征

张仪辉^{1,2}, 刘昌明¹, 梁康¹, 吕锦心^{1,2}

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所 中国科学院陆地水循环及地表过程重点实验室, 北京 100101;

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 雅鲁藏布江流域是全球气候变化的敏感区, 该流域降水变化对青藏高原的水系统、生态系统和山地灾害系统的演变具有重要影响。本文通过流域水文分析, 将雅鲁藏布江流域的三大水资源区细分为9个分区。基于雅鲁藏布江流域1979—2018年降水数据, 综合分析了雅鲁藏布江流域及9个分区的年、干湿季、月降水量以及日、小时尺度极端降水的时空变化特征, 探讨了降水和典型大尺度大气环流因子的相关性。结果表明: ① 1979—2018年间, 在流域尺度上, 各时间尺度降水整体上均呈上升趋势。其中, 年降水量上升趋势最大, 为 $2.5 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$; 年、干湿季降水量以及典型小时尺度极端降水(Rx3hour、Rx12hour)均在95%信度水平下显著上升。在水资源分区尺度上, 各分区不同时间尺度降水的变化趋势呈现更明显的非一致性, 所有分区除小时尺度极端降水均呈上升趋势外, 其余时间尺度降水的趋势变化方向各异。② 雅鲁藏布江流域降水存在明显的空间分异性, 且降水空间分异性会随着降水指标时间尺度的缩短而增强。各时间尺度降水整体上均呈现出自东部向西部逐渐减少的趋势, 流域东南部(分区III-2)始终是高值中心, 流域中西部(分区I-2、II-1)存在区域性高值中心。③ 北半球副热带高压和北半球极涡对雅鲁藏布江流域降水变化具有显著影响。研究结果有助于掌握当地降水的多尺度变化特征, 可为雅鲁藏布江流域和青藏高原地区的水循环研究、水资源开发利用和山洪灾害防治等提供科学基础。

关键词: 青藏高原; 雅鲁藏布江; 极端降水; 时空变化; 水资源区; 大气环流因子

DOI: 10.11821/dlxb202203008

1 引言

青藏高原对中国、亚洲甚至北半球的人类生存环境和可持续发展起着重要的环境和生态屏障作用^[1-2]。在全球变暖背景下, 青藏高原气候变化呈现变暖和变湿的特征^[3-4]。雅鲁藏布江是青藏高原面积最大的河流, 同时是西藏的经济和文化中心^[5]。雅鲁藏布江流域由西向东横贯青藏高原南部, 对全球气候变化极其敏感和脆弱^[6-8]。雅鲁藏布江流域的降水变化对青藏高原及周边地区的水循环^[9]、水资源分布格局^[10-13]、重大山洪灾害防治^[14-15]等方面均具有重要影响。

国内外学者在雅鲁藏布江流域降水变化等相关领域上取得了大量有价值的科研成

收稿日期: 2021-07-30; 修订日期: 2021-12-26

基金项目: 第二次青藏高原综合科学考察研究(2019QZKK0903); 中国科学院青年创新促进会会员人才专项(2019054)

[Foundation: The Second Tibetan Plateau Scientific Expedition and Research, No.2019QZKK0903; Youth Innovation Promotion Association of the Chinese Academy of Sciences, No.2019054]

作者简介: 张仪辉(1999-), 男, 山东烟台人, 硕士生, 主要从事流域水文过程对气候变化的响应机理研究。

E-mail: 13671133021@163.com

通讯作者: 梁康(1986-), 男, 重庆巴南人, 博士, 副研究员, 主要从事流域水循环演变机理研究。

E-mail: liangk@igsnrr.ac.cn

果。相关研究证明雅鲁藏布江流域的年尺度和季节尺度平均降水量以及极端降水指标整体呈上升趋势^[16-18]。该流域未来多年平均降水量将高于1978—2009年的平均值,并且气候因子在未来将保持暖湿化的走势^[19]。但相关研究更多集中在日及更长时间尺度上对非极端降水进行分析,对小时尺度极端降水指标的研究偏少,对不同时间尺度降水特征的综合对比分析不足,并且对流域内部极端降水空间差异性的刻画不够细致。极端降水多呈现出短历时、高强度和显著的空间异质性等特征^[20-22]。在青藏高原气候暖湿化的背景下,极端降水频发,加剧了山地灾害的频率、规模和复杂性^[14]。仅采用日尺度降水数据难以捕捉极端降水频次和强度特征,在空间上也无法细致刻画极端降水的区域分异性,难以反映区域极端降水的真实情况^[23]。

综上所述,本文基于雅鲁藏布江流域1979—2018年的年、月、日、3 h降水数据,对流域内年、干湿季、月降水量以及日、小时尺度极端降水指标进行综合分析,以期在更全面的时间尺度和更精细的空间尺度上揭示雅鲁藏布江流域降水变化特征。研究结果有助于进一步掌握雅鲁藏布江流域不同时间尺度降水的基本特征和变化规律,以期为气候变化背景下的青藏高原水循环演变规律分析以及山地灾害防治等方面提供一定的科学支持。

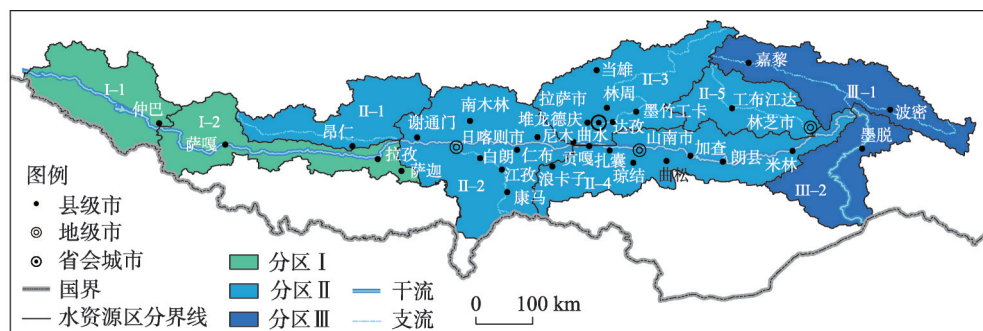
2 研究方法与数据来源

2.1 研究区概况

雅鲁藏布江(28°N~31°N、82°E~97°E)发源于青藏高原西南部、喜马拉雅山脉北麓的杰玛央宗冰川,源头海拔约5590 m,流域全长2057 km,平均海拔在4000 m以上,是中国水资源方面重要的江河之一^[24]。参考水利部划分的全国水资源区划(<http://ghjh.mwr.gov.cn/>),流域自上游至下游被划分为三大水资源区(I拉孜以上、II拉孜至派乡和III派乡以下)。本文为更加详细分析降水空间差异特征,根据三大水资源区内主要河流水系分布概况,基于研究区90 m分辨率DEM^[25],在ArcGIS10.7中开展流域水系分析,将雅江流域三大水资源区细分为9个分区。研究区的水资源分区及主要城镇分布概况见图1、表1。

2.2 数据来源

本文采用的降水数据来源于国家青藏高原科学数据中心(<http://data.tpdac.ac.cn>)1979—2018年的中国区域地面气象要素驱动数据集^[26-27]。该数据集包括地面降水率等7个气象要素,数据为NETCDF格式,时间分辨率为3 h,水平空间分辨率为0.1°,采用气象



注:基于自然资源部标准地图服务网站审图号为GS(2020)4619号标准地图制作,底图边界无修改。

图1 雅鲁藏布江流域水资源分区及主要城镇分布

Fig. 1 Distribution of water resources subregions and main towns in the Yarlung Zangbo river basin

表1 雅鲁藏布江流域水资源分区概况
Tab. 1 Overview of water resources subregions in the Yarlung Zangbo river basin

水资源分区编号	分区内主要河流	集水面积(km ²)	长度(km)	河口位置	
				北纬	东经
I-1	雅鲁藏布江	24189	311	29°56′	84°18′
I-2	雅鲁藏布江	24317	374	29°10′	87°99′
II-1	多雄藏布	19697	303	29°23′	87°58′
II-2	年楚河	11101	223	29°19′	88°54′
	雅鲁藏布江	40832	241	29°24′	91°41′
II-3	拉萨河	32471	551	29°19′	90°45′
II-4	雅鲁藏布江	35075	594	28°99′	94°56′
II-5	尼洋河	17732	286	29°25′	94°28′
III-1	帕隆藏布	28600	266	29°52′	95°07′
III-2	雅鲁藏布江	19988	496	28°01′	95°35′

领域广泛使用的 ANU-Spline^[28]统计插值。该数据集充分融合了中国气象局常规气象观测数据、再分析资料和卫星遥感数据，精度介于气象局观测数据和卫星遥感数据之间。本文从该数据集中提取了雅鲁藏布江流域范围内的降水数据，用于分析研究。

本文选用的大气环流因子数据来源于中国气象局国家气候中心 (<http://cmdp.ncc-cma.net/cn/index.htm>) 提供的 74 项环流特征量资料，时间跨度为 1979—2016 年。

2.3 研究方法

2.3.1 干湿季的划分 雅鲁藏布江流域干湿季分明，且降水主要集中在湿季^[29]。定义月降水强度指数 $I^{[30]}$ ：

$$I = R_m - R_y \tag{1}$$

式中： R_m 表示逐月降水量； R_y 表示年平均月降水量。如果 $I > 0$ ，说明该月实际降水强度大于平均降水强度，则该月降水偏多；反之， $I < 0$ ，说明该月实际降水强度小于平均降水强度，则该月降水偏少。通过计算可得，雅鲁藏布江流域 5—9 月，连续 5 个月降水偏多，10—次年 4 月，连续 7 个月降水偏少。因此，干湿季的划分采取 10—12 月和次年 1—4 月为干季，5—9 月为湿季。

2.3.2 线性倾向估计法、统计 t 检验和变差系数 线性倾向估计法和统计 t 检验已被广泛应用于水文气象领域中降水要素的时间趋势变化及显著性检验分析^[31-32]。本文采用线性倾向估计法分析各时间尺度降水的时间变化趋势，采用统计 t 检验判断其显著性（置信度统一设置为 95%）。

变差系数 C_v 作为传统且重要的水文统计参数，反映标准差相对于平均值的比例，即降水量的波动和偏离程度，其公式为^[33-34]：

$$C_v = \frac{\sigma}{\bar{x}} \tag{2}$$

式中： σ 为标准差； \bar{x} 为平均数。

2.3.3 极端降水指标方法 可以通过定义与极端降水事件有关的指标来研究极端降水变化特征^[35-36]，本文采用的是国际上常用的由气候变化与监测指数专家团队（ETCCDI）定义的指数。ETCCDI 给出了 27 个核心指数的确切定义 (<http://etccdi.pacificclimate.org>)。根据本文的多时间尺度降水指标综合对比分析的目的，结合数据和研究流域本身特点，本文选取了 6 个极端降水指标^[37-38]，新定义了最大 3 h 降水量（Rx3hour）、最大 12 h 降水量

(Rx12hour) 这两个极端降水指标。将 8 个极端指标划分为极值指标、阈值指标两大类。极值指标通过判断是否为极大(极小)值确定, 阈值指标通过绝对阈值法(如在中国 24 h 降雨量在 50 mm 以上为暴雨)和相对阈值法(如降水量超过降水序列中一定百分位的为暴雨)确定, 具体描述见表 2。

表 2 雅鲁藏布江流域极端降水指标
Tab. 2 Extreme precipitation indexes in the Yarlung Zangbo river basin

指标类别	指标	指标名称	定义	单位
极值指标	Rx1day	最大 1 d 降水量	年最大 1 d 降水量	mm
	Rx7day	最大 7 d 降水量	年连续 7 d 最大降水总量	mm
	Rx3hour	最大 3 h 降水量	年最大 3 h 降水量	mm
	Rx12hour	最大 12 h 降水量	年最大 12 h 降水量	mm
阈值指标	PRCPTOT	年湿润日降水总量	一年中降水量大于 1 mm/d 的降水总量	mm
	R95p	极端降水量	一年中降水量超过序列中第 95 个百分位的降水量之和	mm
	CWD	持续湿润日数	一年中降水量大于 1 mm/d 的最大持续日数	d
	R10	强降水日数	一年中降水量大于 10 mm/d 的总日数	d

3 降水时间变化特征

3.1 年、干湿季和月降水量时间变化特征

1979—2018 年雅鲁藏布江流域年降水量在 436.0~691.7 mm 之间波动变化(图 2a), 整体呈 $2.5\text{ mm}\cdot\text{a}^{-1}$ 的显著上升趋势, 平均年降水量为 575.6 mm, 变差系数 C_v 值为 0.11。由此可见, 雅鲁藏布江流域年降水朝着偏多的方向变化, 总体上离散程度低, 波动变化小。

1979—2018 年雅鲁藏布江流域湿季和干季降水变化见图 2c~2d, 流域多年湿季降水量均值为 443.6 mm, 波动范围为 323.3~534.1 mm, C_v 值为 0.13, 呈现 $1.7\text{ mm}\cdot\text{a}^{-1}$ 的显著上升趋势。流域多年干季降水量均值为 112.9 mm, 波动范围为 88.9~189.1 mm, C_v 值为 0.17, 呈现 $0.7\text{ mm}\cdot\text{a}^{-1}$ 的显著上升趋势。

1979—2018 年雅鲁藏布江流域月平均降水量分布见图 2b, 结果表明流域年内降水分配不均, 年降水量的 90% 出现在 4—10 月, 78.3% 出现在 5—9 月。由表 3 可知, 7 月和 12 月份分别是雅鲁藏布江流域降水量最高和最低月份, 月均降水量分别为 120.5 mm 和 4.9 mm。故选择 7 月、12 月为降水典型月, 其多年变化趋势见图 2e~2f。雅鲁藏布江流域 7 月降水量的变化范围为 61.8~183.4 mm, C_v 值为 0.23, 整体呈不显著上升趋势。12 月降水量的变化范围为 0.6~15.6 mm, C_v 值为 0.14, 整体呈不显著下降趋势。

1979—2018 年雅鲁藏布江流域 9 个分区的年、干湿季和月降水量概况见表 4, 自下游分区 III-2 向上游分区 I-1, 年、干湿季、月降水量整体自东向西呈现出先减少、后增加、再减少的趋势。除干季降水量外, 其余降水量的最小值均出现在上游分区 I-1 中。具体到各个分区, 上游分区 I-2、下游分区 III-1 的年、湿季和月降水量均呈下降趋势。且上游分区 I-2 的湿季降水量, 下游分区 III-1 的年、湿季、月降水量下降趋势显著。这表明雅鲁藏布江流域整体降水量呈上升趋势, 但流域东北部、西南部降水呈下降趋势。

3.2 极端降水指标时间变化特征

3.2.1 极值指标时间变化特征 1979—2018 年雅鲁藏布江流域降水极值指标时间变化见图 3, 极端降水的极值指标整体上均呈波动上升趋势, 但在趋势大小和显著性上有差

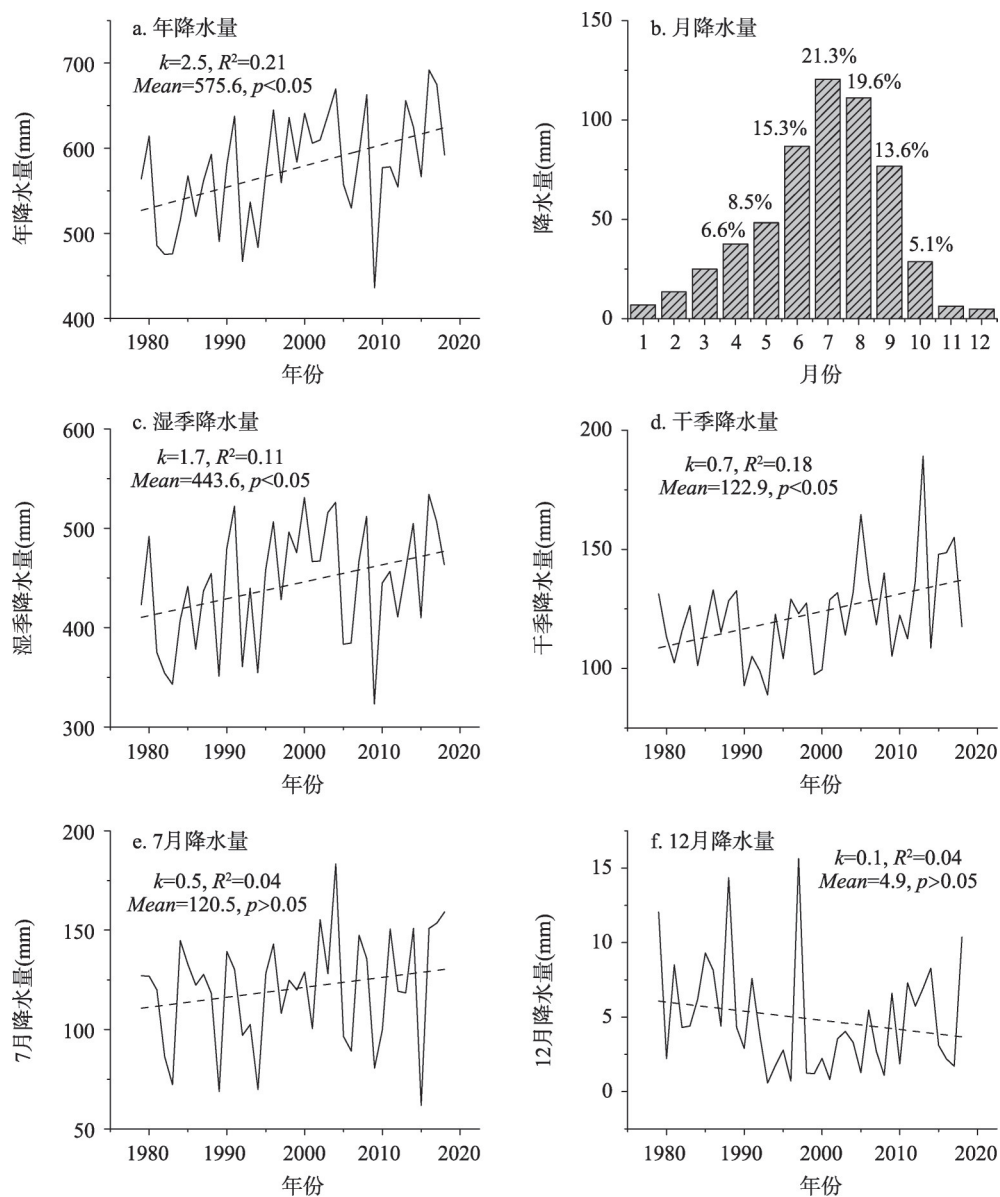


图2 雅鲁藏布江流域年、干湿季和月降水量变化趋势

Fig. 2 Variation trends of annual, wet and dry seasons, and monthly precipitation in the Yarlung Zangbo River Basin

异。年最大1 d降水量(Rx1day)整体呈不显著上升趋势,多年均值和 C_v 值分别为11.8 mm、0.02。年最大7 d降水量(Rx7day)整体呈不显著上升趋势,多年均值和 C_v 值分别为50.4 mm、0.03。年最大3 h降水量(Rx3hour)整体以 $0.04 \text{ mm}\cdot\text{a}^{-1}$ 的趋势显著上升,多年均值和 C_v 值分别为3.1 mm和0.25。年最大12 h降水量(Rx12hour)整体以 $0.04 \text{ mm}\cdot\text{a}^{-1}$ 的趋势显著上升,多年均值和 C_v 值分别为8.4 mm、0.05。

雅鲁藏布江流域9个分区的降水极值指标概况见表5,自下游分区III-2向上游分区I-1,各极值指标均值整体自东向西呈先减少、后增加、再减少的趋势。Rx3hour、Rx12hour在所有分区中均呈显著上升趋势,这表明雅鲁藏布江流域各分区小时尺度强降水在增

表3 雅鲁藏布江流域各月份降水概况

Tab. 3 Overview of monthly precipitation in the Yarlung Zangbo river basin

月份	平均降水量(mm)	变化趋势(mm·a ⁻¹)	月最高降水量		月最低降水量		变差系数 C _v
			年份	数值(mm)	年份	数值(mm)	
1	7.0	0.1	1989	25.8	2006	0.2	0.77
2	13.5	0.1	2007	31.7	1985	5.0	0.40
3	25.0	0.2 [*]	1998	39.2	1990	10.5	0.29
4	37.6	0.3 [*]	2016	65.8	2009	21.3	0.28
5	48.3	0.5 [*]	2000	72.1	1986	27.6	0.23
6	86.8	0.4	2004	122.7	1987	46.0	0.24
7	120.5	0.5	2004	183.4	2015	61.8	0.23
8	111.2	0.4	1998	178.8	1982	53.4	0.26
9	76.8	-0.02	2016	122.5	2009	36.5	0.26
10	28.7	0.01	2013	54.5	1981	8.9	0.39
11	6.3	0.1	2006	16.1	1980	1.0	0.63
12	4.9	-0.1	1997	15.6	1993	0.6	0.14

注：^{*}表示通过95%置信水平检验,下同。

表4 雅鲁藏布江流域水资源分区年、干湿季和月降水量概况

Tab. 4 Overview of annual, wet and dry season, and monthly precipitation in water resources subregions in the Yarlung Zangbo river basin

水资源分区	年降水量			湿季降水量			干季降水量			月降水量		
	均值 (mm)	趋势 (mm·a ⁻¹)	变差 系数	均值 (mm)	趋势 (mm·a ⁻¹)	变差 系数	均值 (mm)	趋势 (mm·a ⁻¹)	变差 系数	均值 (mm)	趋势 (mm·a ⁻¹)	变差 系数
I-1	330.9	3.3 [*]	0.24	211.5	1.9 [*]	0.29	115.4	1.3	0.47	27.2	0.3 [*]	0.24
I-2	472.0	-1.8	0.16	343.7	-2.2 [*]	0.18	121.0	0.4	0.38	38.7	-0.1	0.16
II-1	413.6	2.0	0.18	356.5	1.0	0.20	49.5	0.9 [*]	0.37	33.8	0.2	0.18
II-2	394.2	2.3 [*]	0.21	357.4	1.5	0.22	29.3	0.7 [*]	0.48	32.2	0.2 [*]	0.21
II-3	528.6	3.5 [*]	0.18	456.9	2.3 [*]	0.18	62.9	1.1 [*]	0.33	43.3	0.3 [*]	0.18
II-4	530.2	4.5 [*]	0.18	434.5	2.9 [*]	0.20	86.9	1.5 [*]	0.29	43.4	0.4 [*]	0.18
II-5	698.5	3.4 [*]	0.16	574.0	2.0	0.17	113.6	1.4 [*]	0.23	57.3	0.3 [*]	0.16
III-1	759.1	-4.1 [*]	0.14	546.5	-3.7 [*]	0.16	201.6	-0.3	0.18	62.3	-0.3 [*]	0.14
III-2	1356.1	11.4 [*]	0.17	870.6	12.0 [*]	0.24	466.3	-0.8	0.19	111.4	0.9 [*]	0.17

多。具体到各个分区，除 Rx7day 外，分区II-2的各极值指标均为最小值。分区I-2、II-1、II-2、III-1 的日尺度极值指标均呈下降趋势，分区II-4、III-2的日尺度极值指标均呈显著上升趋势，这表明雅鲁藏布江流域日尺度强降水整体呈现出东部增加西部减少的趋势。

3.2.2 阈值指标时间变化特征 1979—2018年雅鲁藏布江流域降水阈值指标时间变化见图4，极端降水的阈值指标整体均呈波动上升趋势，但在趋势大小和显著性上有差异。年湿润日降水总量（PRCPTOT）的波动范围为370.3~650.0 mm，整体以2.4 mm·a⁻¹的趋势显著上升，多年均值和C_v值分别为517.9 mm、0.05。极端降水量（R95p）整体呈不显著上升趋势，多年均值和C_v值分别为138.1 mm、0.11。极端降水量约占年降水量的24%。持续湿润日数（CWD）整体呈不显著上升趋势，多年均值和C_v值分别为49.2 d、0.08。持续湿润日数大多集中在每年的6—9月。强降水日数（R10）整体呈不显著上升

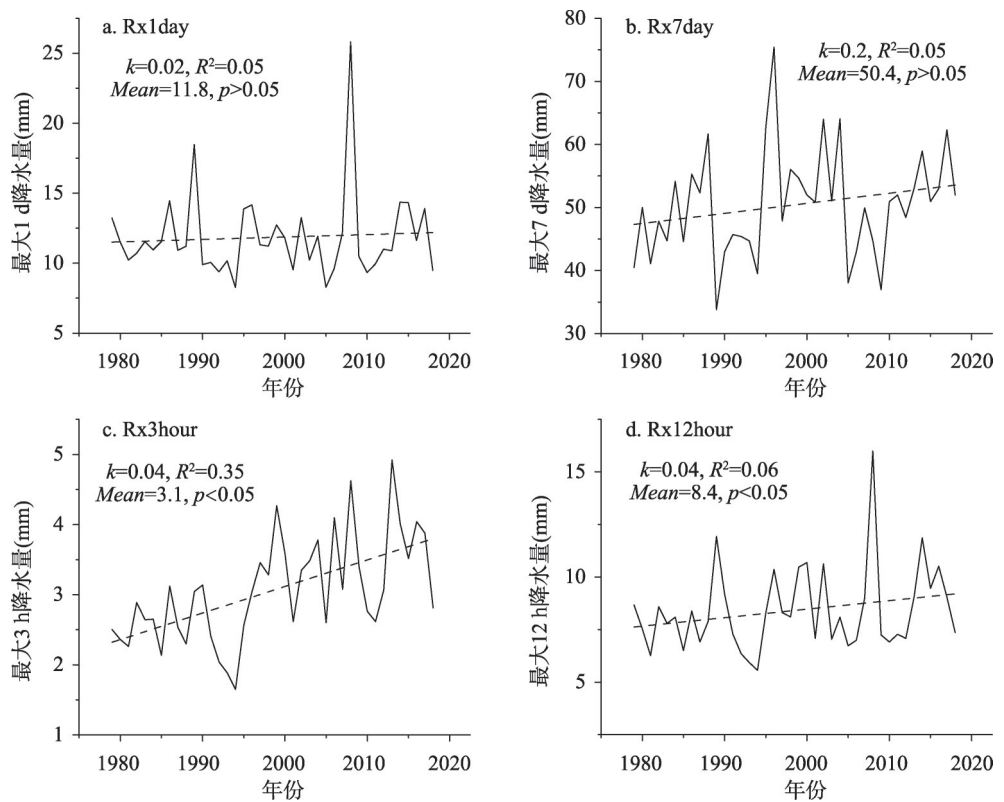


图3 雅鲁藏布江流域降水极值指标变化趋势

Fig. 3 Variation trends of precipitation extremum indexes in the Yarlung Zangbo river basin

表5 雅鲁藏布江流域水资源分区降水极值指标概况

水资源分区	Rx1day			Rx7day			Rx3hour			Rx12hour		
	均值 (mm)	趋势 (mm·a ⁻¹)	变差 系数	均值 (mm)	趋势 (mm·a ⁻¹)	变差 系数	均值 (mm)	趋势 (mm·a ⁻¹)	变差 系数	均值 (mm)	趋势 (mm·a ⁻¹)	变差 系数
I-1	19.6	0.03	0.59	40.4	0.3	0.39	7.8	0.2 [*]	0.54	14.9	0.4 [*]	0.50
I-2	21.3	-0.2	0.64	53.7	-0.4 [*]	0.30	8.0	0.2 [*]	0.55	15.8	0.3 [*]	0.43
II-1	16.5	-0.1	0.30	55.8	-0.3	0.24	7.1	0.1 [*]	0.42	16.2	0.3 [*]	0.37
II-2	13.5	-0.1	0.17	55.8	-0.2	0.20	5.1	0.1 [*]	0.37	13.1	0.2 [*]	0.31
II-3	14.9	0.03	0.18	57.1	0.2	0.14	6.1	0.1 [*]	0.37	16.1	0.3 [*]	0.32
II-4	16.4	0.2 [*]	0.28	61.3	0.5 [*]	0.23	5.2	0.1 [*]	0.32	13.6	0.3 [*]	0.34
II-5	18.8	0.1	0.20	72.0	0.3	0.21	7.2	0.1 [*]	0.31	19.9	0.3 [*]	0.28
III-1	19.5	-0.1	0.31	69.7	-0.6 [*]	0.28	6.3	0.1 [*]	0.43	15.4	0.1 [*]	0.24
III-2	41.8	0.9 [*]	0.50	130.9	4.5 [*]	0.26	12.8	0.4 [*]	0.48	30.3	0.9 [*]	0.40

趋势，多年均值和C_i值分别为1.7 d、0.07，其中，1990年、1992年、1994年、2001年、2005—2006年、2010—2011年强降水日数为0。

雅鲁藏布江流域9个分区的降水阈值指标概况见表6，自下游分区III-2向上游分区I-1，各阈值指标均值整体上自东向西呈先减少、后增加、再减少的趋势。具体到各个分区，上游分区I-1的各阈值指标均为最小值。上游分区I-2、下游分区III-1的各阈值指标均

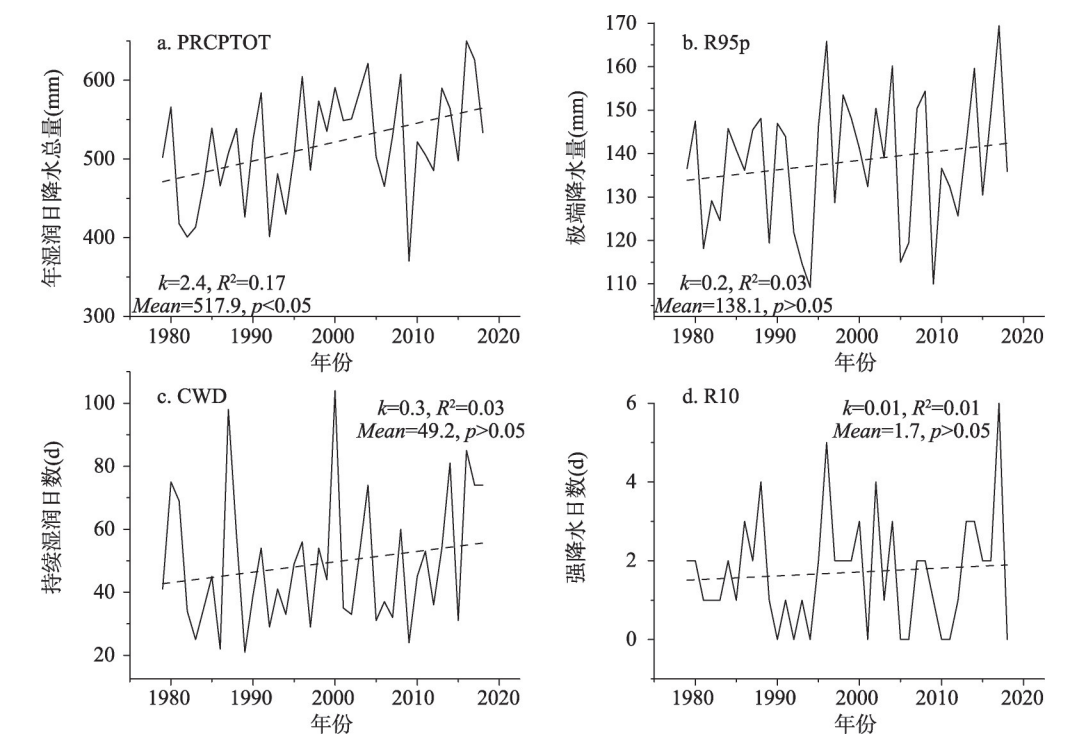


图4 雅鲁藏布江流域降水阈值指标变化趋势

Fig. 4 Variation trends of precipitation threshold indexes in the Yarlung Zangbo River Basin

表6 雅鲁藏布江流域水资源分区降水阈值指标概况

Tab. 6 Overview of precipitation threshold indexes in water resources subregions in the Yarlung Zangbo river basin												
水资源 分区	PRCPTOT			R95p			CWD			R10		
	均值 (mm)	趋势 (mm·a ⁻¹)	变差 系数	均值 (mm)	趋势 (mm·a ⁻¹)	变差 系数	均值 (mm)	趋势 (mm·a ⁻¹)	变差 系数	均值 (mm)	趋势 (mm·a ⁻¹)	变差 系数
I-1	274.5	2.8 [*]	0.28	129.2	1.0 [*]	0.28	11.8	0.1	0.37	2.6	0.04	0.77
I-2	421.6	-2.3 [*]	0.18	163.8	-0.7	0.21	23.8	-0.03	0.51	4.5	-0.1	0.66
II-1	365.8	1.6	0.21	156.8	-0.1	0.17	23.6	0.2	0.41	4.9	0.01	0.63
II-2	352.2	2.0	0.24	152.6	-0.03	0.17	21.4	0.02	0.42	4.5	-0.1	0.68
II-3	482.4	3.2 [*]	0.20	167.6	0.5	0.13	24.6	0.3	0.44	5.5	0.1 [*]	0.53
II-4	469.0	4.4 [*]	0.22	168.6	1.1 [*]	0.19	28.4	0.3	0.39	5.8	0.1 [*]	0.64
II-5	650.1	3.4 [*]	0.17	210.7	0.6	0.14	27.3	0.2	0.37	12.1	0.1	0.42
III-1	710.5	-4.2 [*]	0.15	204.0	-1.9 [*]	0.21	33.0	-0.1	0.39	9.7	-0.2 [*]	0.55
III-2	1308.4	11.6 [*]	0.18	394.3	4.3 [*]	0.22	38.1	0.5 [*]	0.34	37.7	0.5 [*]	0.29

呈下降趋势，且下游分区III-1的PRCPTOT、R95p、R10下降趋势显著。下游分区III-2的各阈值指标均为最大值，且均呈显著上升趋势。

4 降水空间分布特征

4.1 年、干湿季和月降水量空间分布特征

1979—2018年雅鲁藏布江流域年降水量空间分布见图5a，整体上看，年降水量呈现

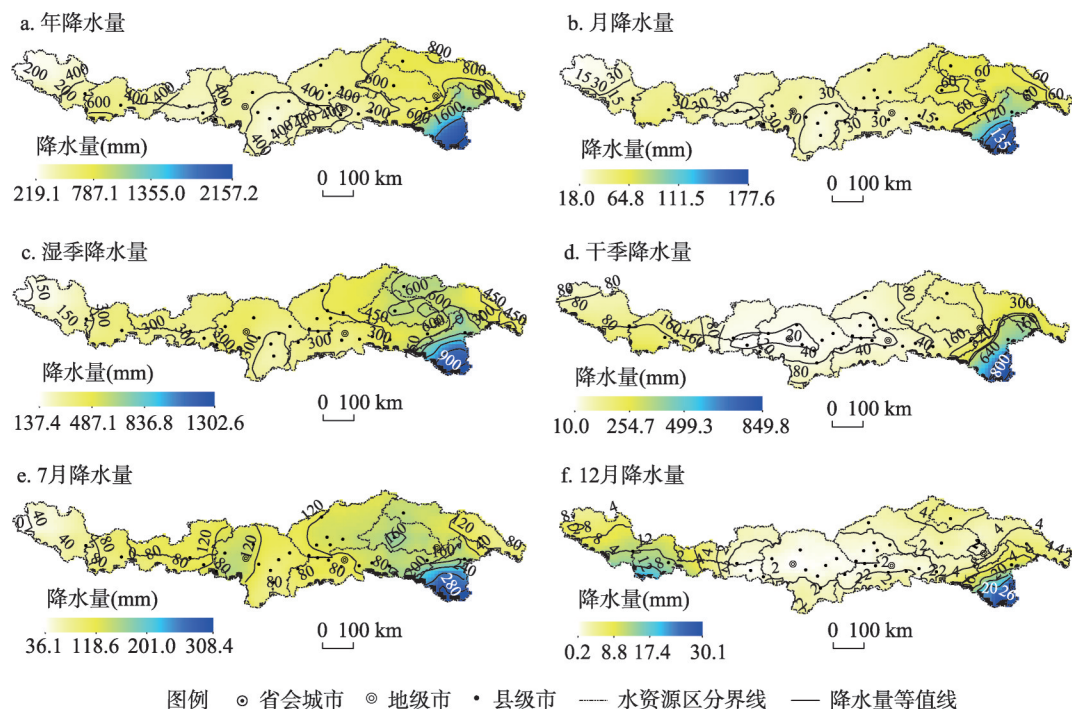


图5 雅鲁藏布江流域年、干湿季、月降水量空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of annual, wet and dry seasons, and monthly precipitation in the Yarlung Zangbo river basin

从流域东部向西部逐渐减少的趋势,且在流域中西部会出现区域性高值中心。0~200 mm、200~400 mm、400~800 mm、800~1600 mm等值线所包络的面积比例分别为:38.7%、33.5%、24.7%、3.0%。流域东南部等值线密集,且在流域东部形成小范围的闭合等值线圆环,降水的量级、梯度均在东南部剧增。其中,日喀则和拉萨等重点城市所在的流域中游分区II-2、II-3、II-4年降水量整体偏低,分区内绝大部分地区在200~400 mm之间。

1979—2018年雅鲁藏布江流域湿季、干季降水量空间分布见图5c~5d,湿季降水量从流域东部的1302.6 mm逐渐减少到流域西部的137.4 mm。干季降水量从流域东部的849.8 mm、流域西南部的240.0 mm逐渐减少到流域中部的10.0 mm。其中,上游分区I-1、I-2降水量受干湿季影响相对较小,湿季降水量在150~300 mm之间,干季降水量在80~240 mm之间。流域中游的分区II-1、II-2、II-3降水量受干湿季影响相对较大,湿季降水量在300~450 mm之间,干季降水量在20~80 mm之间,流域中游分区在干季是一个明显的区域降水低值中心。

1979—2018年雅鲁藏布江流域月降水量空间分布见图5b,整体上看,月降水量呈现从流域东部向西部逐渐减少的趋势,从177.6 mm减少到18.0 mm。在流域东部形成小范围的闭合等值线圆环,说明存在小范围的降水中心。典型月7月、12月降水量空间分布见图5e~5f,7月降水量呈现从流域东部向西部逐渐减少的趋势,12月降水量呈现从流域东部、西部向流域中部逐渐减少的趋势。其中,分区II-1、II-2、II-3、II-4、II-5、III-1在7月份时,降水量相对较高,在80~160 mm之间;但在12月份时,降水量相对较低,在2~4 mm之间。分区I-1、I-2在7月份时,降水量相对较低,在40~80 mm之间;但在12月份时,降水量相对较高,在6~16 mm之间。

4.2 极值指标空间分布特征

1979—2018年雅鲁藏布江流域降水极值指标的空间分布见图6, Rx1day、Rx7day、Rx3hour、Rx12hour都表现出相似的空间分布特征, 即整体呈现从流域东部向西部逐渐减少的趋势, 但在流域的中西部地区会出现区域性高值中心, 且都在流域东南部发生剧增。这说明雅鲁藏布江流域的极端降水事件主要发生在流域的东部或东南部。具体到各个指标, Rx1day从流域东南部的34.0 mm减少到西北部的2.4 mm。Rx7day从流域东部的133.1 mm减少到西部的6.8 mm, 东部、中部地区出现部分区域性高值中心。Rx3hour呈现从流域东部、西部向中部逐渐减少的趋势, 从5.9 mm减少到0.8 mm。Rx12hour从流域东部的21.0 mm减少到西部的1.4 mm。由图6可见, 闭合等值线圆环主要出现在流域的中东部、东部, 降水的量级、梯度均在东南部剧增。对各极值指标而言, 随着时间尺度的缩短, 流域内闭合圆环范围逐渐变大, 中西部高值区也更加明显且范围变大。

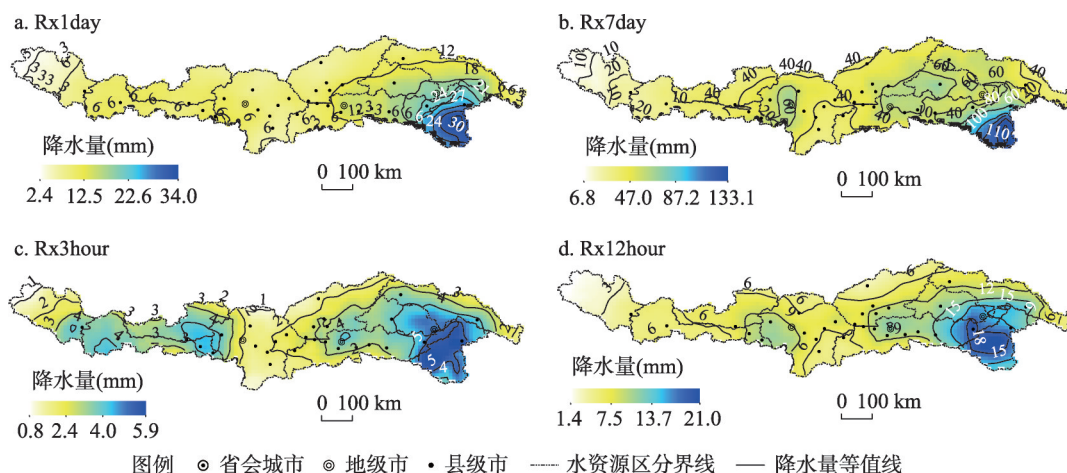


图6 雅鲁藏布江流域降水极值指标空间分布

Fig. 6 Spatial distribution of precipitation extremum indexes in the Yarlung Zangbo river basin

4.3 阈值指标空间分布

1979—2018年雅鲁藏布江流域降水阈值指标的空间分布见图7, PRCPTOT、R95p、CWD、R10都表现出与极值指标相似的空间分布特征, 整体呈现从流域东部向西部逐渐减少的趋势, 且在流域中西部会出现区域性高值中心。具体到各个指标, PRCPTOT从流域东部的2025.3 mm逐渐减少到流域西部的189.9 mm, 与年降水量在数值及空间分布上相似。R95p出现多处闭合等值线圆环, 呈现多处区域性高值中心, 主要分布在流域中东部与中西部地区。特别值得注意的是, R95p在水资源分区I-2、II-1交界处、水资源分区III-2东南部形成了两个极高值区域, 该区域发生强降水的可能性较大。CWD从流域东部的11.0 d逐渐减少到流域西部的1.1 d。R10从流域东部的23.8 d逐渐减少到流域西部的2.5 d。由图可见, 闭合等值线圆环主要出现在流域的中东部、东部, 且分区III-2始终是流域内高值地区, 降水量级、梯度均在分区III-2剧增。对R95p而言, 闭合等值线圆环在分区II-1、II-3、II-4、II-5内多次出现, 且闭合圆环数值范围为160~240 mm。

5 流域降水与大尺度大气环流的关系

本文进一步探讨了雅鲁藏布江流域年、干湿季、月降水量以及极端降水指标与74项

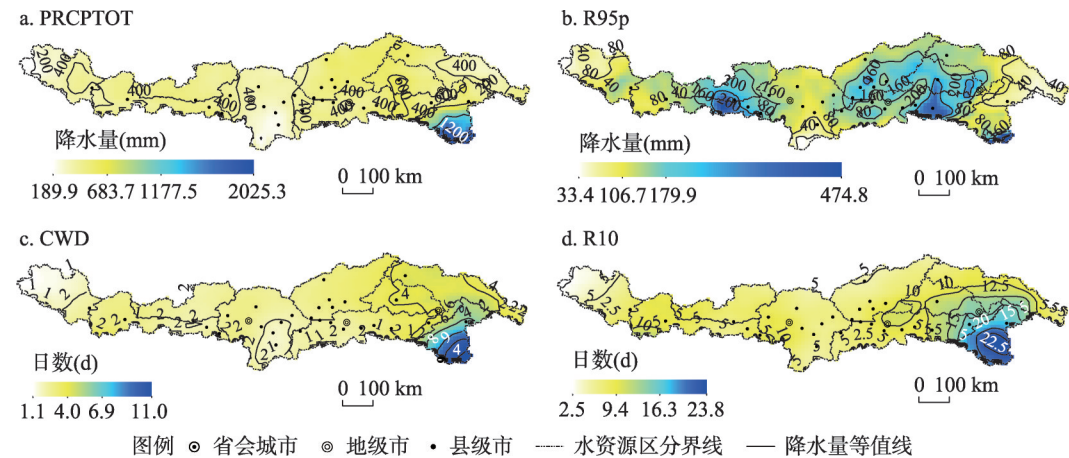


图7 雅鲁藏布江流域降水阈值指标空间分布

Fig. 7 Spatial distribution of precipitation threshold indexes in the Yarlung Zangbo river basin

大尺度大气环流因子的相关性。分析表明：北半球副热带高压（NHSH）和北半球极涡（NHPV）是在北半球主导的两大大气环流，其变化对雅鲁藏布江流域降水变化具有显著影响。其中，北半球副高北界、北半球副高脊线、北半球极涡面积指数、北半球极涡强度指数与各降水指标的相关性最强。

雅鲁藏布江流域年、干湿季、月降水量以及日、小时尺度极端降水指标与大尺度大气环流因子的相关系数见表7，年、湿季、月降水量均与大气环流因子显著相关，且与北半球极涡面积、北半球极涡强度指数呈显著负相关。各极端降水指标与大气环流因子在显著性上有差异。除Rx1day外，其余极端降水指标均与北半球极涡面积、北半球极涡强度指数呈负相关，与其余大气环流因子呈正相关。可以推断，当NHSH较强或NHPV较弱时，雅鲁藏布江流域降水增多，极端降水发生频率提高。

表7 雅鲁藏布江流域降水与大气环流因子的关系

Tab. 7 Relationships between precipitation and atmospheric circulation factors in the Yarlung Zangbo river basin				
降水指标	北半球副高北界	北半球副高脊线	北半球极涡面积	北半球极涡强度指数
年降水量	0.38*	0.40*	-0.44**	-0.44**
湿季降水量	0.34*	0.42**	-0.34*	-0.32*
干季降水量	0.15	-0.01	-0.33*	-0.40*
月降水量	0.43**	0.42**	-0.49**	-0.48**
Rx1day	0.01	0.18	-0.21	0.01
Rx7day	0.16	0.18	-0.06	-0.13
Rx3hour	0.26	0.40*	-0.61**	-0.45**
Rx12hour	0.16	0.37*	-0.46**	-0.15
PRCPTOT	0.40*	0.42**	-0.39*	-0.42**
R95p	0.33*	0.28	-0.22	-0.19
CWD	0.33*	0.19	-0.07	-0.24
R10	0.18	0.17	-0.03	-0.03

注：*表示通过95%置信水平检验,**表示通过99%置信水平检验。

6 讨论

6.1 雅鲁藏布江流域多时空尺度降水变化特征的对比分析

进一步对结果中的各时间尺度降水时空变化特征进行综合探讨。首先,对流域尺度下的不同时间尺度降水进行对比。对日及更长时间尺度降水而言,虽然流域整体的降水变化趋势是增加的,但是降水增加、减少趋势的区域分异性明显。降水趋势增加的区域主要集中在降水相对更多的中下游,趋势减少的区域主要集中在降水相对更少的上游以及流域东北部,在降水空间分配上呈现“湿的越湿、干的越干”的变化趋势,这将进一步加剧流域降水的空间分异性。而小时尺度极端降水在流域中均呈上升趋势,且小时尺度极端降水在流域尺度下相较于日及更长时间尺度降水空间分异性更加明显。其次,对水资源分区尺度下的不同时间尺度降水进行对比。同一分区,年、干湿季、月、日尺度降水的变化趋势基本一致,但小时尺度降水均呈显著上升趋势。以分区II-5、III-1为例,除小时尺度外的降水在分区II-5中均呈上升趋势,在分区III-1中均呈下降趋势。最后,将水资源分区尺度与流域尺度相比。各分区之间指标值的差异较大,以水资源分区尺度呈现的降水空间分异性更加明显。并且通过水资源分区之间的对比进一步发现,除了东部传统高值区外,雅鲁藏布江流域降水在中西部(分区I-2、II-1)出现了区域性高值中心,其原因可能是该区域南部山脉海拔相对较低,来自印度洋的暖湿气流得以北上,在该区域形成一个降水高值中心。

对雅鲁藏布江流域降水时空变化特征进行分析一直是学者们重点开展的研究方向之一。若根据时间尺度和指标特性的不同,可将这些研究大致划分为非极端降水研究和极端降水研究两大类。对于日及更长时间尺度的非极端降水研究而言,近几十年来雅鲁藏布江流域降水增多的变化方向是一致的。但由于数据源、时间尺度和趋势判别方法等的差异,不同学者得出的非极端降水均值及趋势大小是存在差异的。以年降水量为例,其多年均值在321~500 mm之间^[17, 39],增加趋势在2.0~7.9 mm 10a⁻¹之间^[19, 39]。对极端降水而言,当前研究更多是对基于日尺度构建的极端指标进行分析,指出雅鲁藏布江流域典型的日尺度极端降水指标整体上呈现出上升趋势^[7]。虽然本文的研究结果与前人的研究结果大体上一致,但是在时间尺度上,从单一尺度的研究拓展至多时间尺度的对比研究,尤其是针对小时尺度的拓展研究,在极端气候事件分析和区域山洪灾害防治等方面有重要的应用价值。在空间尺度上,本文基于河流水系情况,将三大水资源区细分为9个分区,采用流域整体空间分析、水资源分区差异性对比、降水等值线分析相结合的方式,更细致的刻画了雅鲁藏布江流域降水空间分布情况。

6.2 雅鲁藏布江流域水资源管理和山洪灾害防治启示

雅鲁藏布江流域整体的降水变化趋势是增加的,但是在降水空间分配上却呈现“中下游区湿的越湿、上游区干的越干”的变化趋势,这种降水分配倾向极端的趋势,很可能进一步加剧流域水资源管理和区域山洪灾害防治的压力。雅鲁藏布江流域下游水资源丰富,其中,下游分区III-2年降水量在800 mm以上,部分区域超过1600 mm,且海拔高度差较大。中国“十四五”规划中明确指出,要推动雅鲁藏布江下游水电基地的建设。因此,应着重考虑在分区III-2建设水电基地。以拉萨、日喀则、山南为代表的城市群集中分布在雅鲁藏布江流域中游(分区II-2、II-3和II-4),该区域生产生活用水基本靠流域水资源^[40]。虽然中游地区降水呈现增多趋势,但年内分配不均,干湿季差异较大,且该地区在干季会出现很明显的区域降水低值中心,因此,水资源的合理调配对缓解中游区城镇用水压力尤为重要。林芝、嘉黎和墨脱等城镇位于雅鲁藏布江流域中下游和下游区

(分区II-5、III-1、III-2),该区域降水丰沛,短时强降水集中,易达到山洪暴发的降水阈值^[41]。此外,由于下垫面条件和降水的空间异质性等原因,中西部(分区I-2、II-1)区域性高值中心、中游分区II-3、II-4交界处同样是山洪灾害易发地。降水尤其是小时尺度极端降水的增加将进一步加剧这些分区山洪防治的压力。因此,应着重预防上述降水高值区和区域高值区山洪灾害的发生。

7 结论

本文综合对比分析了雅鲁藏布江流域及其9个水资源分区的年、干湿季、月降水量以及日、小时尺度极端降水的多时空尺度变化特征,得出了以下结论:

(1)在降水的时间变化特征上,雅鲁藏布江流域尺度上的各时间尺度降水整体上均呈上升趋势,但趋势大小和显著性有差异。在水资源分区尺度上,各分区不同时间尺度降水的变化趋势呈现出非一致性,除小时尺度极端降水均呈上升趋势外,其余时间尺度降水的趋势变化方向各异、差异更明显。流域小时尺度极端降水显著上升以及中部地区年内干季降水减少的独特变化趋势,对流域水资源管理、山洪灾害的防治提出了更大的挑战。

(2)在降水空间分布规律及变化特征上,各时间尺度降水整体均呈现自流域东部向西部减少的趋势,流域东南部(分区III-2)始终是降水量值和趋势变化最剧烈区。全流域尺度和分区尺度降水均呈现较强的空间分异性,且空间分异性随着降水指标时间尺度的缩短而增强。流域总体呈现“湿的越湿、干的越干”的更加极端化的空间变化趋势,这将加剧流域降水的空间分异性,也会给“分区施策”造成一定的压力。

(3)北半球副热带高压和北半球极涡这两项大尺度大气环流因子对雅鲁藏布江流域降水变化具有显著影响。各时间尺度降水整体表现为与北半球副热带高压指数(副高位置和脊线)呈正相关,与北半球极涡指数(极涡面积和强度)呈负相关。

本文尝试在更全面精细的时空尺度上对雅鲁藏布江流域降水的变化特征进行综合分析。多时空尺度对比的研究模式在系统诊断和揭示流域降水时空变化特征上有较好的优势,对于流域的生态水文过程多时空尺度演变特征及驱动力分析、水文气象要素演变特征等相关研究具有一定的借鉴意义。但是,本文因缺少小时以内更高时间分辨率的降水数据而未能在时间尺度上实现全序列尺度分析,未来将进一步融合自动气象站和更长序列的多源降水观测数据,开展跨尺度的全序列对比分析。本文仅简单探讨了大气环流因子和降水之间的相关性,缺乏更深层次的机理分析。且降水变化机理随着时空尺度的精细而变得更加复杂,局地干扰因素增多增强。如何全面准确解析雅鲁藏布江流域降水多时空尺度变化机理是未来亟待深入研究的难点,也是为青藏高原及周边地区的水资源管理、山洪灾害防治等提供更加精准科学支撑的关键点。

参考文献(References)

- [1] Zheng Du, Yao Tandong. Progress in research on formation and evolution of Tibetan Plateau with its environment and resource effects. *China Basic Science*, 2004, 6(2): 17-23. [郑度, 姚檀栋. 青藏高原形成演化及其环境资源效应研究进展. *中国基础科学*, 2004, 6(2): 17-23.]
- [2] Yao Tandong, Chen Fahu, Cui Peng, et al. From Tibetan Plateau to Third Pole and Pan-Third Pole. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2017, 32(9): 924-931. [姚檀栋, 陈发虎, 崔鹏, 等. 从青藏高原到第三极和泛第三极. *中国科学院院刊*, 2017, 32(9): 924-931.]
- [3] Yao Tandong, Zhu Liping. The response of environmental changes on Tibetan Plateau to global changes and adaptation strategy. *Advances in Earth Science*, 2006, 21(5): 459-464. [姚檀栋, 朱立平. 青藏高原环境变化对全球变化的响应及

- 其适应对策. 地球科学进展, 2006, 21(5): 459-464.]
- [4] Chen Deliang, Xu Baiqing, Yao Tandong, et al. Assessment of past, present and future environmental changes on the Tibetan Plateau. *Chinese Science Bulletin*, 2015, 60(32): 3025-3035. [陈德亮, 徐柏青, 姚檀栋, 等. 青藏高原环境变化科学评估: 过去、现在与未来. 科学通报, 2015, 60(32): 3025-3035.]
- [5] Liu W F, Xu Z X, Li F P, et al. Impacts of climate change on hydrological processes in the Tibetan Plateau: A case study in the Lhasa River basin. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 2015, 29(7): 1809-1822.
- [6] Li D, Li J, Zhang L L, et al. Variations in the key hydrological elements of the Yarlung Zangbo River basin. *Water Supply*, 2019, 19(4): 1088-1096.
- [7] Xuan W D, Xu Y P, Fu Q, et al. Hydrological responses to climate change in Yarlung Zangbo River Basin, Southwest China. *Journal of Hydrology*, 2021, 597: 125761. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2020.125761.
- [8] Yang Hao, Cui Chunguang, Wang Xiaofang, et al. Research progresses of precipitation variation over the Yarlung Zangbo River basin under global climate warming. *Torrential Rain and Disasters*, 2019, 38(6): 565-575. [杨浩, 崔春光, 王晓芳, 等. 气候变暖背景下雅鲁藏布江流域降水变化研究进展. 暴雨灾害, 2019, 38(6): 565-575.]
- [9] Tang Qiuhong, Liu Xingcai, Zhou Yuanyuan, et al. Cascading impacts of Asian Water Tower change on downstream water systems. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2019, 34(11): 1306-1312. [汤秋鸿, 刘星才, 周园园, 等. “亚洲水塔”变化对下游水资源的连锁效应. 中国科学院院刊, 2019, 34(11): 1306-1312.]
- [10] Zhang Yinsheng, Ma Yingzhao, Guo Yanhong, et al. Hydrological changes during the past 50 years over the Tibetan Plateau and its regional difference. *Quaternary Sciences*, 2012, 32(1): 95-102. [张寅生, 马颖钊, 郭燕红, 等. 青藏高原 50 年来水循环要素变化趋势及其区域差异性. 第四纪研究, 2012, 32(1): 95-102.]
- [11] Cheng Guodong, Jin Huijun. Groundwater in the permafrost regions on the Qinghai-Tibet Plateau and it changes. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2013, 40(1): 1-11. [程国栋, 金会军. 青藏高原多年冻土区地下水及其变化. 水文地质工程地质, 2013, 40(1): 1-11.]
- [12] Yao Tandong, Qin Dahe, Shen Yongping, et al. Cryospheric changes and their impacts on regional water cycle and ecological conditions in the Qinghai-Tibetan Plateau. *Chinese Journal of Nature*, 2013, 35(3): 179-186. [姚檀栋, 秦大河, 沈永平, 等. 青藏高原冰冻圈变化及其对区域水循环和生态条件的影响. 自然杂志, 2013, 35(3): 179-186.]
- [13] Zhang Jianyun, Liu Jiufu, Jin Junliang, et al. Evolution and trend of water resources in Qinghai-Tibet Plateau. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2019, 34(11): 1264-1273. [张建云, 刘九夫, 金君良, 等. 青藏高原水资源演变与趋势分析. 中国科学院院刊, 2019, 34(11): 1264-1273.]
- [14] Cui Peng, Guo Xiaojun, Jiang Tianhai, et al. Disaster effect induced by Asian Water Tower change and mitigation strategies. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2019, 34(11): 1313-1321. [崔鹏, 郭晓军, 姜天海, 等. “亚洲水塔”变化的灾害效应与减灾对策. 中国科学院院刊, 2019, 34(11): 1313-1321.]
- [15] Liu Yesen, Yang Zhenshan, Huang Yaohuan, et al. Spatio-temporal evolution pattern and driving factors of mountain torrent disasters in China since the founding of the People's Republic of China. *Scientia Sinica: Terrae*, 2019, 49(2): 408-420. [刘业森, 杨振山, 黄耀欢, 等. 建国以来中国山洪灾害时空演变格局及驱动因素分析. 中国科学: 地球科学, 2019, 49(2): 408-420.]
- [16] You Q L, Kang S C, Wu Y H, et al. Climate change over the Yarlung Zangbo river basin during 1961-2005. *Journal of Geographical Sciences*, 2007, 17(4): 409-420.
- [17] Liu Jiangtao, Xu Zongxue, Zhao Huan, et al. Spatiotemporal variation of extreme precipitation events in the Yarlung Zangbo river basin from 1973 to 2016. *Mountain Research*, 2018, 36(5): 750-764. [刘江涛, 徐宗学, 赵焕, 等. 1973—2016 年雅鲁藏布江流域极端降水事件时空变化特征. 山地学报, 2018, 36(5): 750-764.]
- [18] You Q L, Kang S C, Aguilar E, et al. Changes in daily climate extremes in the eastern and central Tibetan Plateau during 1961-2005. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2008, 113: D07101. DOI: 10.1029/2007JD009389.
- [19] Nie Ning, Zhang Wanchang, Deng Cai. Spatial and temporal climate variations from 1978 to 2009 and their trend projection over the Yarlung Zangbo river basin. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2012, 34(1): 64-71. [聂宁, 张万昌, 邓财. 雅鲁藏布江流域 1978—2009 年气候时空变化及未来趋势研究. 冰川冻土, 2012, 34(1): 64-71.]
- [20] Poschlo B, Ludwig R, Sillmann J. Ten-year return levels of sub-daily extreme precipitation over Europe. *Earth System Science Data*, 2021, 13(3): 983-1003.
- [21] He Jing, Fan Guangzhou, Zhang Yongli, et al. Land monsoon and non-monsoon regions under climate change comparison of extreme precipitation characteristics. *Plateau Meteorology*, 2021, 40(2): 324-332. [何静, 范广洲, 张永莉, 等. 气候变化背景下陆地季风与非季风区极端降水特征对比. 高原气象, 2021, 40(2): 324-332.]
- [22] Liang K, Liu S, Bai P, et al. The Yellow River basin becomes wetter or drier? The case as indicated by mean

- precipitation and extremes during 1961-2012. *Theoretical and Applied Climatology*, 2015, 119(3): 701-722.
- [23] 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. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2019, 28(12): 3051-3067. [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). 长江流域资源与环境, 2019, 28(12): 3051-3067.]
- [24] Yang Zhigang, Zhuoma, Lu Hongya, et al. Characteristics of precipitation variation and its effects on runoff in the Yarlung Zangbo River basin during 1961-2010. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2014, 36(1): 166-172. [杨志刚, 卓玛, 路红亚, 等. 1961—2010年西藏雅鲁藏布江流域降水量变化特征及其对径流的影响分析. 冰川冻土, 2014, 36(1): 166-172.]
- [25] Jarvis A, Reuter H I, Nelson A, et al. Hole-filled SRTM for the globe Version 4. 2008. <http://srtm.csi.cgiar.org>.
- [26] He J, Yang K, Tang W J, et al. The first high-resolution meteorological forcing dataset for land process studies over China. *Scientific data*, 2020, 7(1): 1-11.
- [27] Yang K, He J, Tang W J, et al. On downward shortwave and longwave radiations over high altitude regions: Observation and modeling in the Tibetan Plateau. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2010, 150(1): 38-46.
- [28] Hutchinson M F. ANUSPLIN Version 4.3 User Guide. Canberra: The Australia National University, 2004.
- [29] Gao Zhiyou, Wang Xiaodan, Yin Guan. Hydrological rule and isotopic composition of water bodies in Yarlung Zangbo river. *Acta Geographica Sinica*, 2007, 62(9): 1002-1007. [高志友, 王小丹, 尹观. 雅鲁藏布江径流水文规律及水体同位素组成. 地理学报, 2007, 62(9): 1002-1007.]
- [30] Zhang Wulong, Zhang Jingyong, Fan Guangzhou. Dominant modes of dry- and wet- season precipitation in southwestern China. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2014, 38(3): 590-602. [张武龙, 张井勇, 范广洲. 我国西南地区干湿季降水的主模态分析. 大气科学, 2014, 38(3): 590-602.]
- [31] Wei Fengying. *Modern Statistical Diagnosis and Prediction of Climate*. 2nd ed. Beijing: China Meteorological Press, 2007. [魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术. 2版. 北京: 气象出版社, 2007.]
- [32] Lin Houbo, You Qinglong, Jiao Yang, et al. Spatial and temporal characteristics of the precipitation over the Tibetan Plateau from 1961 to 2010 based on high resolution grid-observation dataset. *Journal of Natural Resources*, 2015, 30(2): 271-281. [林厚博, 游庆龙, 焦洋, 等. 基于高分辨率格点观测数据的青藏高原降水时空变化特征. 自然资源学报, 2015, 30(2): 271-281.]
- [33] Liu Changming, Tian Wei, Liu Xiaomang, et al. Analysis and understanding on runoff variation of the Yellow River in recent 100 years. *Yellow River*, 2019, 41(10): 11-15. [刘昌明, 田巍, 刘小莽, 等. 黄河近百年径流量变化分析与认识. 人民黄河, 2019, 41(10): 11-15.]
- [34] Vehkalahti K. The concise encyclopedia of statistics by Yadolah Dodge. *International Statistical Review*, 2008, 76(3): 460-461.
- [35] Yuan Wende, Zheng Jiangkun, Dong Kui. Spatial and temporal variation in extreme precipitation events in southwestern China during 1962-2012. *Resources Science*, 2014, 36(4): 766-772. [袁文德, 郑江坤, 董奎. 1962—2012年西南地区极端降水事件的时空变化特征. 资源科学, 2014, 36(4): 766-772.]
- [36] Zhai Panmao, Pan Xiaohua. Change in extreme temperature and precipitation over northern China during the second half of the 20th century. *Acta Geographica Sinica*, 2003, 58(Suppl.): 1-10. [翟盘茂, 潘晓华. 中国北方近50年温度和降水极端事件变化. 地理学报, 2003, 58(Suppl.): 1-10.]
- [37] Karl T R, Nicholls N, Ghazi A. Clivar/GCOS/WMO Workshop on Indices and Indicators for Climate Extremes Workshop Summary. *Climatic Change*, 1999, 42(1): 3-7.
- [38] Peterson T, Folland C, Gruza G, et al. Report on the activities of the working group on climate change detection and related rapporteurs. Geneva: World Meteorological Organization, 2001.
- [39] Xu Z C, Cheng L, Luo P, et al. A climatic perspective on the impacts of global warming on water cycle of cold mountainous catchments in the Tibetan Plateau: A case study in Yarlung Zangbo River Basin. *Water*, 2020, 12(9): 2338. DOI: 10.3390/w12092338.
- [40] Qiao Fuwei, Bai Yongping, Zhou Liang, et al. Multiscale spatial differentiation and physical influencing factors of urban and rural settlements in the middle reaches of the Yarlung Zangbo River Basin. *Journal of Geo-Information Science*, 2019, 21(9): 1341-1351. [乔富伟, 白永平, 周亮, 等. 雅鲁藏布江中游地区城乡居民点多尺度空间分异及自然因素影响分析. 地球信息科学学报, 2019, 21(9): 1341-1351.]
- [41] Liu C J, Guo L, Ye L, et al. A review of advances in China's flash flood early-warning system. *Natural Hazards*, 2018, 92(2): 619-634.

Spatio-temporal variation of precipitation in the Yarlung Zangbo river basin

ZHANG Yihui^{1,2}, LIU Changming¹, LIANG Kang¹, LYU Jinxin^{1,2}

(1. Key Laboratory of Water Cycle and Related Land Surface Processes, Institute of
Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The Yarlung Zangbo river basin (YZRB) is sensitive to global climate change. The precipitation changes in the YZRB have a great impact on the evolutions of water system, ecosystem and mountain disaster system on the Qinghai-Tibet Plateau. In this study, we divided three water resources regions of the YZRB into nine subregions through hydrological analysis. Based on precipitation data within the YZRB from 1979 to 2018, we examined the spatio-temporal variations of precipitation at annual, wet and dry seasons, monthly scales, daily and hourly extreme precipitation in the study area and its nine subregions. We further discussed the correlation between precipitation and typical large-scale atmospheric circulation factors. The results showed that: (1) From 1979 to 2018, at the whole basin scale, precipitation at each time scale showed an overall upward trend. Among them, annual precipitation showed the largest increasing trend of $2.5 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$. Annual precipitation, dry and wet precipitation, and typical hourly scale extreme precipitation (Rx3hour and Rx12hour) increased significantly at the 95% confidence level. At the regional scale, the variation trend of precipitation at different time scales in each subregion showed more obvious inconsistencies. Except for the increasing trend of hourly scale extreme precipitation, the trends of precipitation in all the subregions were different. (2) There was an obvious spatial heterogeneity of precipitation in the YZRB, and the spatial heterogeneity of precipitation did increase with the shortening of the precipitation time scale. The precipitation at each time scale showed a gradual decreasing trend from the east to the west. The southeastern part of the YZRB (i.e. subregion III-2) had been the center of high value, and the central and western parts (i.e. subregions I-2 and II-1) had a regional high value center. (3) The Northern Hemisphere Subtropical High (NHSH) and the Northern Hemisphere Polar Vortex (NHPV) had significant effects on precipitation changes. The results can help us to understand the characteristics of local precipitation at multiple scales, and provide a scientific basis for water cycle research, water resources development and utilization, and prevention of flash flood disasters in the YZRB and the Qinghai-Tibet Plateau.

Keywords: Qinghai- Tibet Plateau; Yarlung Zangbo river; extreme precipitation; spatio-temporal variation; water resources region; atmospheric circulation factor