

杜军,黄志诚,程已阳,等,2024. 近 40 年西藏昼夜降水量时空变化特征[J]. 气象,50(10):1161-1174. Du J, Huang Z C, Cheng S Y, et al, 2024. Spatio-temporal variation characteristics of daytime and nighttime precipitation in Xizang from 1981 to 2020[J]. Meteor Mon, 50(10):1161-1174(in Chinese).

近 40 年西藏昼夜降水量时空变化特征^{*}

杜 军^{1,2} 黄志诚^{3,4} 程已阳⁵ 德庆卓嘎¹ 王 挺²

1 西藏高原大气环境科学研究所/西藏高原大气环境开放实验室,拉萨 850001

2 中国气象局墨脱大气水分循环综合观测野外科学试验基地/墨脱国家气候观象台,西藏墨脱 860700

3 西藏自治区气象信息网络中心,拉萨 850001

4 日喀则国家气候观象台,西藏日喀则 857000

5 中国气象科学研究院,灾害天气国家重点实验室/青藏高原气象研究所,北京 100081

提 要: 基于 1981—2020 年西藏 38 个气象站点逐小时降水量资料,采用线性倾向估计、Pearson 相关系数、Mann-Kendall 突变检验等方法,分析近 40 年西藏昼夜降水量和夜降水率时空变化特征。结果表明:西藏多年平均的年昼降水量总体上自东向西减少,年夜降水量由东南向西北递减,夜降水量大于昼降水量;雅鲁藏布江中游是西藏夜降水率的中心地带;春季昼夜降水量与海拔高度相关性最显著,夏秋两季和全年的昼夜降水量与经度相关系数最大;夜降水率,在冬季是高纬地区大于低纬地区,而在夏秋两季则是高海拔地区小于低海拔地区。近 40 年,西藏 73.7% 的站年昼夜降水量均趋于增加,57.9% 的站年夜降水率呈减少趋势,63.2% 的站夜降水量变化趋势大于昼降水量;西藏平均年昼夜降水量均呈增加趋势且夜降水量增速大于昼降水量,主要表现在春夏两季;因冬春秋三季夜降水率均减小,导致年夜降水率趋于减小。从年代际变化来看,近 40 年中,20 世纪 80 年代是年昼夜降水量最少的年代,最大值分别出现在 21 世纪 10 年代和 20 世纪 90 年代;夜降水率则在 20 世纪 80 年代最高、21 世纪 10 年代最低。Mann-Kendall 突变检验显示,西藏仅有春季昼夜降水量、冬季夜降水量分别在 20 世纪 90 年代末和 21 世纪初发生了气候突变,前者增多,后者变少;2004 年、2011 年和 2009 年分别是冬季、春季和年夜降水率的突变时间。

关键词: 昼夜降水量,夜降水率,空间分布,线性趋势,年代际变化,气候突变

中图分类号: P463, P466

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2024.081501

Spatio-Temporal Variation Characteristics of Daytime and Nighttime Precipitation in Xizang from 1981 to 2020

DU Jun^{1,2} HUANG Zhicheng^{3,4} CHENG Siyang⁵ DECHEN Dolkar¹ WANG Ting²

1 Xizang Institute of Plateau Atmospheric and Environmental Science Research/Plateau Atmospheric and Environment Open Laboratory of Xizang, Lhasa 850001

2 CMA Field Science Experiment Base for Comprehensive Observation of Atmospheric Water Cycle in Mêdog/Mêdog National Climate Observatory, Xizang Mêdog 860700

3 Xizang Meteorological Information and Network Centre, Lhasa 850001

4 Xizagê National Climate Observatory, Xizang Xizagê 857000

5 State Key Laboratory of Severe Weather/Institute of Tibetan Plateau Meteorology, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081

Abstract: Based on the measured hourly precipitations at 38 meteorological stations in Xizang from 1981 to 2020, the spatio-temporal characteristics of daytime precipitation (P_d) and nighttime precipitation (P_n)

^{*} 中国气象科学研究院青藏高原与极地气象科学研究所开放课题(ITPP2021K03)、第二次青藏高原综合科学考察研究项目(2019QZKK0106)和西藏科技创新基地自主研究项目(XZ2021JR0001G)共同资助

2023 年 10 月 5 日收稿; 2024 年 8 月 27 日收修定稿

第一作者:杜军,主要从事青藏高原气候与气候变化、生态与农业气象研究. E-mail:dujun0891@163.com

and night-precipitation rate (N_r) in recent 40 years are analyzed by the methods of linear trend estimation, Pearson coefficient and Mann-Kendall test. The results show that, in Xizang the multi-year average of annual P_d decreases from east to west, the annual P_n decreases from southeast to northwest, and P_n is larger than P_d . The middle reaches of the Yarlung Zangbo River are the center N_r in Xizang. The correlations between the P_d and P_n and the altitude are most significant in spring, and the correlation coefficients between the P_d and P_n and the longitude are the greatest in summer, autumn and the whole year. In winter, N_r at high latitudes is larger than that at low latitudes. In summer and autumn, N_r at high altitudes is smaller than that at low altitudes. In the past 40 years, the annual P_d and P_n increased at 73.7% of stations in Xizang, while the annual N_r showed a decreasing trend at 57.9% of stations, of which the variation trend of P_n was more obvious than that of P_d at 63.2% of stations. The average annual P_d and P_n increased in Xizang, mainly in spring and summer, and the growth rate of annual P_n was greater than that of P_d . Due to the decreased N_r in winter, spring and autumn, the annual N_r tended to decrease. On the interdecadal scale, the P_d and P_n in the 1980s were the least in Xizang in the past 40 years, with the maxima of annual P_d and P_n appearing in 2010s and in 1990s, respectively. For N_r , the maximum and minimum occurred in the 1980s and in the 2010s, respectively. According to the Mann-Kendall test mutation test, the abrupt changes of climate for the P_d and P_n in spring and P_n in winter occurred in the late 1990s and at the beginning of 21st century, respectively, with the former increasing and the latter decreasing. The years 2004, 2011, and 2009 were the time of mutation for winter, spring, and annual N_r , respectively.

Key words: daytime and nighttime precipitation, night-precipitation rate, spatial distribution, linear trend, interdecadal variation, abrupt change of climate

引 言

降水的时空分布、过程演变和不同时间尺度变化对地球系统的水资源分布、自然生态系统、水和能源循环过程都有不可替代的调节作用(宇如聪等, 2021)。降水日变化不仅是表征精细化天气过程或降水事件的一个重要物理特征,也正在成为气候变化相关研究的重要关注点(宇如聪等, 2021; 赵玮等, 2022; 曾秀娟等, 2023; 唐菁等, 2023; 丁乙等, 2024; 李冉等, 2024; 汪小康等, 2024)。相关研究表明, 中国降水日变化存在区域差异。宇如聪等(2021)研究指出: 106°E 以西的青藏高原东部降水峰值多出现在夜间, 上述西南夜雨区以东地区在清晨达到降水量峰值, 华北平原近海和东南沿海也表现为清晨峰值; 112°E 以东和 35°N 以北的大部分站点及东南内陆地区的降水量峰值出现在下午。段春锋等(2013)认为中国各地降水峰值时间多出现在下午和后半夜, 其中东部多发生在下午, 西部多发生在后半夜。对于降水日变化的研究中最受关注的夜雨现象, 已有研究表明, 不仅在青藏高原东部的四川盆地(胡迪和李跃清, 2015; 范江琳等, 2019; Cheng et al,

2019), 新疆(韩云环等, 2014; 郭玉琳等, 2022)、青藏高原(张核真等, 2010; 余忠水, 2011; 余忠水等, 2011; 计晓龙等, 2017)、祁连山(Liu et al, 2017)、秦岭(张宏芳等, 2020)等地, 也都存在夜雨现象。

因中国地形复杂多样, 山地、平原、盆地、高原并存, 不同区域昼夜降水量变化特征各异。华北地区夏季和秋季昼降水量均呈减少趋势, 且夏季减少趋势明显; 春季和冬季昼降水量呈增加趋势(贾艳青等, 2016)。黄土高原年和雨季的昼夜降水量表现出下降趋势, 夜间高于白昼(安彬等, 2022)。淮河流域年夜雨量大部地区有增多趋势, 年昼雨量呈东部减少而西部增多的趋势(王胜等, 2011)。内陆河流域、珠江流域及东南诸河流域昼夜降水同增, 海河流域和黄河流域昼夜降水同减, 松花江-辽河流域和西南诸河流域降水昼增夜减, 淮河流域和长江流域降水昼减夜增(邓海军等, 2020)。新疆昼夜降水量均呈显著增加趋势, 且夜降水量增长趋势大于昼降水量(韩云环等, 2014)。究其原因, 贾艳青等(2016)研究指出, 华北夏季昼夜降水减少, 主要与夏季季风减弱、热带中东太平洋和印度洋海温偏暖等有关。韩云环等(2014)认为夜间强的上升运动和水汽辐合是导致新疆地区夜雨大于昼雨的环流机制。胡迪和李

跃清(2015)分析表明,因青藏高原及周边地区的复合地形与不同纬度大气环流的多尺度相互作用,造成了青藏高原东侧四川省夜雨时空变化的多样性、异常成因的复杂性。

西藏被誉为世界第三极,是青藏高原主体部分,平均海拔约 4000 m,也是全球气候系统敏感区与脆弱区(姚檀栋等,2000),降水量是影响自然环境的基础因子。目前,针对西藏降水的时空变化已开展了不少研究(杜军和马玉才,2004;杜军等,2014;次仁央宗等,2016;韩熠哲等,2017),也有学者对西藏昼夜降水的变化特征进行了研究(张核真等,2010;多典洛珠等,2020),但这些研究选取的西藏站点少或研究年限较早,缺乏对全域昼夜降水时空变化特征的详细研究。为此,本研究利用 1981—2020 年西藏 38 个气象站逐小时降水量资料,分析近 40 年昼夜降水量时空分布与变化特征,以期深入认识全球变暖对区域日降水循环的影响,为青藏高原生态文明高地建设、应对气候变化和防灾减灾提供科技支撑。

1 资料与方法

1.1 资料来源及处理

本研究选取 1981—2020 年西藏自治区 38 个气象站点逐小时降水量资料,数据由西藏自治区气象信息网络中心提供,均通过质量控制。基于各站点降水量数据,计算得到近 40 年西藏平均年、四季(上年 12 月至当年 2 月为冬季,3—5 月为春季,6—8 月为夏季,9—11 月为秋季)昼夜降水量以及夜降水率(夜间降水量占日降水总量的百分比)序列。常年值采用 1981—2010 年基准气候期的平均值。全文地图基于西藏自治区自然资源厅服务网站下载的标准地图绘制,审图号为藏 S(2022)004 号,底图边界无修改。

1.2 研究方法

1.2.1 线性倾向估计

线性倾向估计(魏凤英,2007)采用式(1)进行计算:

$$X = a + bt \quad (1)$$

式中: X 为昼夜降水量或夜降水率; t 为时间(本研究为 1981—2020 年); a 为回归常数; b 为回归系数,把 $b \times 10$ 称为昼夜降水量或夜降水率的年代际变化

趋势,其显著性水平可通过 t 与 X 之间的相关系数进行检验($P < 0.05$, $P < 0.01$ 和 $P < 0.001$)。

1.2.2 Mann-Kendall 突变检验

利用 Mann-Kendall 突变检验(以下简称 M-K 检验;魏凤英,2007)对近 40 年西藏年、季昼夜降水量和夜降水率的突变特征进行检验。

1.2.3 数据处理与绘图

采用 Excel 2007 软件对数据进行处理与分析,并利用 Tang and Zhang(2013)研发的 DPS 系统中 M-K 检验进行突变分析。降水量(率)的折线图采用 Excel 2007 软件制作;平均值的空间分布图先利用站点数据采用 Surfer 中的普通克里金插值生成空间栅格数据,然后运用 ArcGIS 绘制;变化趋势的空间分布图直接采用 ArcGIS 绘制。

2 结果分析

2.1 空间分布特征

2.1.1 多年平均值的空间分布

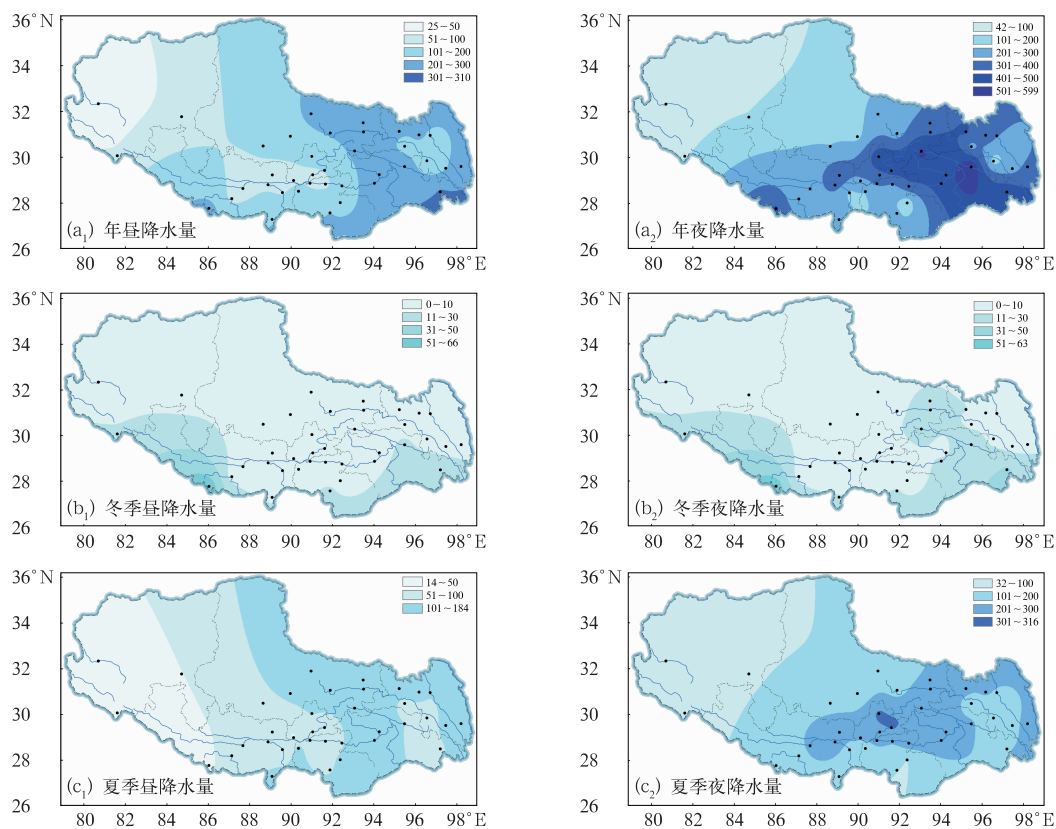
2.1.1.1 昼夜降水量的空间分布

由图 1a₁ 可知,西藏各地平均年昼降水量为 24.5~310.2 mm,总体上呈自东向西递减。如图 1a₂ 所示,各站平均年夜降水量为 41.8~599.0 mm,大致呈自东南向西北递减的分布特征。与年昼降水量比较,除隆子站外,各站年夜降水量偏多 4.0%~411.7%,其中雅鲁藏布江中游地区偏多 1 倍以上。

从图 1b 来看,西藏绝大部分站点冬季昼夜降水量不足 10 mm,尤其是雅鲁藏布江中游更少(不足 1 mm);最高值在聂拉木(大于 60 mm),白天略多于夜间。

春季各站昼降水量为 2.6~137.2 mm(图略),林芝市东南部大于 110 mm,阿里地区大部、雅鲁藏布江中游少于 10 mm。夜降水量为 2.9~199.5 mm(图略),林芝市大部、那曲市东南角大于 100 mm;阿里地区大部、日喀则市西南部不足 10 mm。各站夜降水量较昼降水量偏多 0.7%~297.5%,其中雅鲁藏布江中游偏多 1 倍以上。

夏季各地昼降水量为 13.6~184.0 mm(图 1c₁);其中,阿里地区、日喀则市西南部低于 50 mm,那曲市大部、雅鲁藏布江中游、昌都市西南部和林芝市东南部为 51~100 mm,其余各地高于 100 mm。如图 1c₂ 所示,夜降水量高值区位于拉萨市东北部,大



注:黑点为气象站。

图 1 1981—2010 年西藏(a)年、(b)冬季和(c)夏季昼降水量与夜降水量空间分布(单位:mm)

Fig. 1 Spatial distribution of (a) annual, (b) winter and (c) summer daytime precipitation and nighttime precipitation in Xizang from 1981 to 2010 (unit: mm)

于 300 mm;阿里地区西南部小于 50 mm。夏季仅隆子、班戈 2 个站表现出白天降水多于夜间的特征。

秋季昼降水量为 3.9~70.6 mm(图略),林芝市大部、那曲市东部等地大于 50 mm,阿里地区西部、珠穆朗玛峰脚下的定日站小于 10 mm。夜降水量为 4.1~153.0 mm(图略),其中波密、嘉黎、丁青为高值区,大于 100 mm;阿里地区为低值区,不足 20 mm。

2.1.1.2 夜降水率的空间分布

夜降水率高是西藏气候的又一特色。如图 2a 所示,西藏各站夜降水率为 48.9%~83.7%,其中,雅鲁藏布江中游是西藏夜降水的中心地带(大于 70.0%),以拉萨最高。昌都市东南部、那曲市北部、阿里地区北部和山南市南部等地低于 60.0%,以隆子最低。

从图 2b 可知,冬季各站夜降水率为 27.6%~73.6%,那曲市东部和拉萨河谷高于 70.0%,以拉萨最高;雅鲁藏布江上中游、昌都市中南部低于 50.0%,其中日喀则最低。

春季各站夜降水率为 49.5%~80.5%(图略),雅鲁藏布江中游大于 70.0%,拉萨仍为最高;那曲市中西部、隆子和察隅等地小于 55.0%,以隆子为最低。

由图 2c 可见,夏季各站夜降水率为 48.0%~84.7%,其分布规律与年值基本一致。拉萨仍是全区最高值,那曲市中西部和山南市南部等地低于 55.0%,其中隆子最低。

秋季各站夜降水率为 46.0%~82.2%(图略),高值中心仍在雅鲁藏布江中游(大于 70.0%),以南木林最高;小于 55.0%的地区在那曲市中西部、山南市南部和阿里地区西部,以狮泉河最低。

2.1.1.3 与地理参数的关系

采用 Pearson 相关系数方法,分析了季和年昼夜降水量与地理参数(经纬度、海拔高度)相关性,结果见表 1。由表 1 可知:(1)除冬季外,其余三个季节和全年的昼夜降水量与经度都存在显著的正相关;此外,春秋两季昼夜降水量以及全年夜降水量还

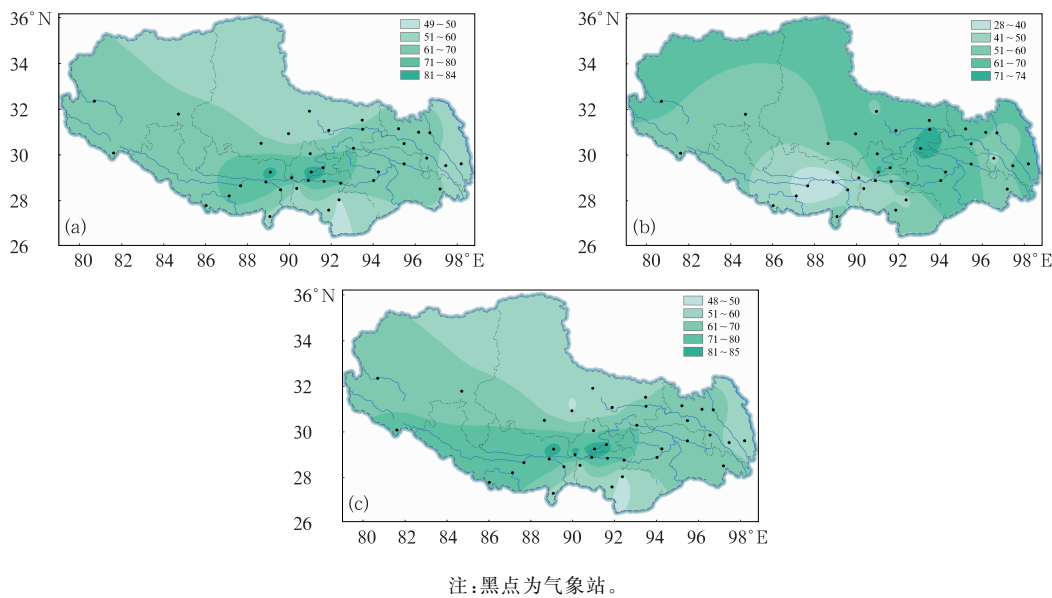


图 2 1981—2010 年西藏(a)年、(b)冬季和(c)夏季平均夜降水率空间分布(单位:%)
Fig. 2 Spatial distribution of (a) annual, (b) winter and (c) summer average
night-precipitation rate in Xizang from 1981 to 2010 (unit: %)

与海拔高度有着显著的负相关关系。(2)冬季夜降水率与经纬度呈显著的正相关,其中纬度的相关系数最大。夏秋两季夜降水率只与海拔高度有着显著的负相关;春季、全年夜降水率与地理参数的关系不显著。

综上所述,冬季昼夜降水量与地理参数的关系不显著;春季昼夜降水量与海拔高度的相关性最显著,夏秋两季和全年昼夜降水量与经度的相关系数最大。冬季夜降水率,高纬地区大于低纬地区;夏秋季夜降水率,高海拔地区小于低海拔地区。

表 1 1981—2010 年西藏年和四季平均昼夜降水量、夜降水率与经纬度、海拔高度的相关系数
Table 1 Correlation coefficients of annual and seasonal average daytime precipitation, nighttime precipitation
and night-precipitation rate with latitude, longitude and altitude in Xizang from 1981 to 2010

要素	地理参数	时间				
		春季	夏季	秋季	冬季	年
昼降水量	经度	0.438 **	0.685 ***	0.628 ***	−0.106	0.660 ***
	纬度	−0.196	0.171	0.097	−0.277	−0.001
	海拔高度	−0.620 ***	0.044	−0.325 *	−0.067	−0.317
夜降水量	经度	0.469 **	0.403 *	0.584 ***	0.007	0.527 ***
	纬度	−0.162	−0.123	0.008	−0.194	−0.140
	海拔高度	−0.641 ***	−0.270	−0.502 **	−0.268	−0.513 ***
夜降水率	经度	0.042	−0.275	0.069	0.345 *	−0.172
	纬度	−0.160	−0.259	−0.263	0.454 **	−0.210
	海拔高度	−0.239	−0.323 *	−0.340 *	−0.090	−0.251

注:*, **, *** 分别表示通过 $P<0.05$, $P<0.01$, $P<0.001$ 显著性检验。

2.1.2 变化趋势的空间分布

2.1.2.1 昼降水量变化趋势的空间分布

从近 40 年西藏各站春季昼降水量变化趋势来看(图 3a),仅有察隅、尼木、浪卡子、定日和普兰共 5 个站表现为减少,为 $-5.87 \sim -0.57 \text{ mm} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ (未通过显著性水平检验,以浪卡子最大);

其余站点均趋于增加,平均每 10 年增加 $0.29 \sim 6.75 \text{ mm}$ (9 个站 $P<0.05$),以嘉黎最大($P<0.001$)。

夏季(图 3b),34.2%的站昼降水量呈减少趋势,主要分布于日喀则市、林芝市和昌都市西北部,为 $-8.15 \sim -0.28 \text{ mm} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ (帕里最大, $P<0.05$)。

其余站点趋于增加(仅有 5 个站 $P < 0.05$),为 $0.40 \sim 12.52 \text{ mm} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ (申扎最大, $P < 0.01$)。

如图 3c 所示,55.3% 的站秋季昼降水量趋于减少,主要分布在阿里地区、日喀则市、那曲市西部、拉萨市、林芝市和昌都市西南部,平均每 10 年减少 $0.27 \sim 13.31 \text{ mm}$ (聂拉木最大, $P < 0.05$)。其余站点呈增加趋势,为 $0.02 \sim 6.12 \text{ mm} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ (嘉黎最大, $P < 0.01$)。

冬季(图 3d),57.9% 的站昼降水量呈增加趋势,主要位于阿里地区、日喀则市、那曲市、拉萨市和昌都市,增速为 $0.02 \sim 6.97 \text{ mm} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ (聂拉木最大)。其余站点趋于减少,为 $-2.99 \sim -0.01 \text{ mm} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$,减幅以察隅最大。

在年尺度上(图 3e),林芝市大部、日喀则市大部等地昼降水量呈减少趋势,为 $-12.35 \sim -0.07 \text{ mm} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$,减幅以察隅最大。其余 73.7% 的站倾向

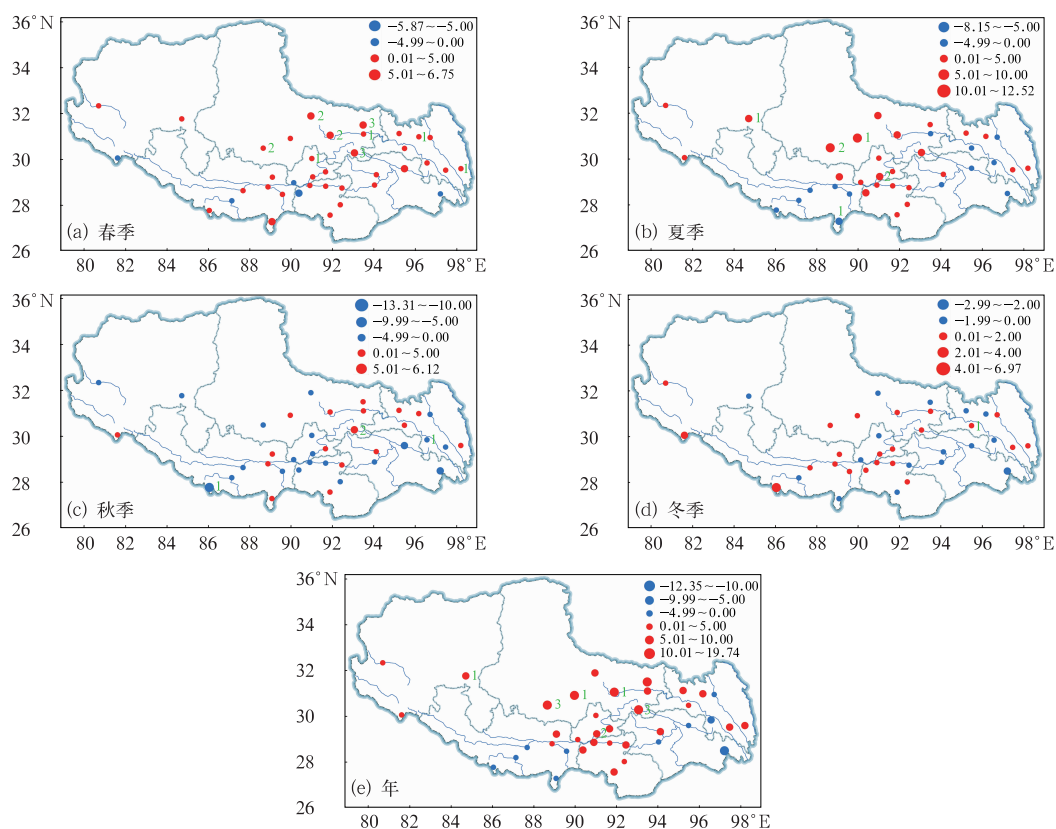
于增加,增幅为 $0.65 \sim 19.74 \text{ mm} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ (嘉黎最大, $P < 0.01$)。

2.1.2.2 夜降水量变化趋势的空间分布

在季尺度上,近 40 年西藏各站春季夜降水量只在狮泉河、普兰、聂拉木、嘉黎、类乌齐、洛隆和波密 6 个站上趋于减少(图 4a),为 $-5.96 \sim -1.28 \text{ mm} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$,减幅以普兰最大($P < 0.01$)。其余站点为增加趋势,为 $0.19 \sim 8.34 \text{ mm} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ (6 个站 $P < 0.05$),其中错那最大($P < 0.01$)。

夏季,78.9% 的站夜降水量趋于增加(图 4b),为 $0.26 \sim 26.09 \text{ mm} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ (南木林最大, $P < 0.01$)。趋势减少的站点主要在林芝市、洛隆和聂拉木等地,为 $-0.62 \sim -7.74 \text{ mm} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$,其中林芝减幅最大。

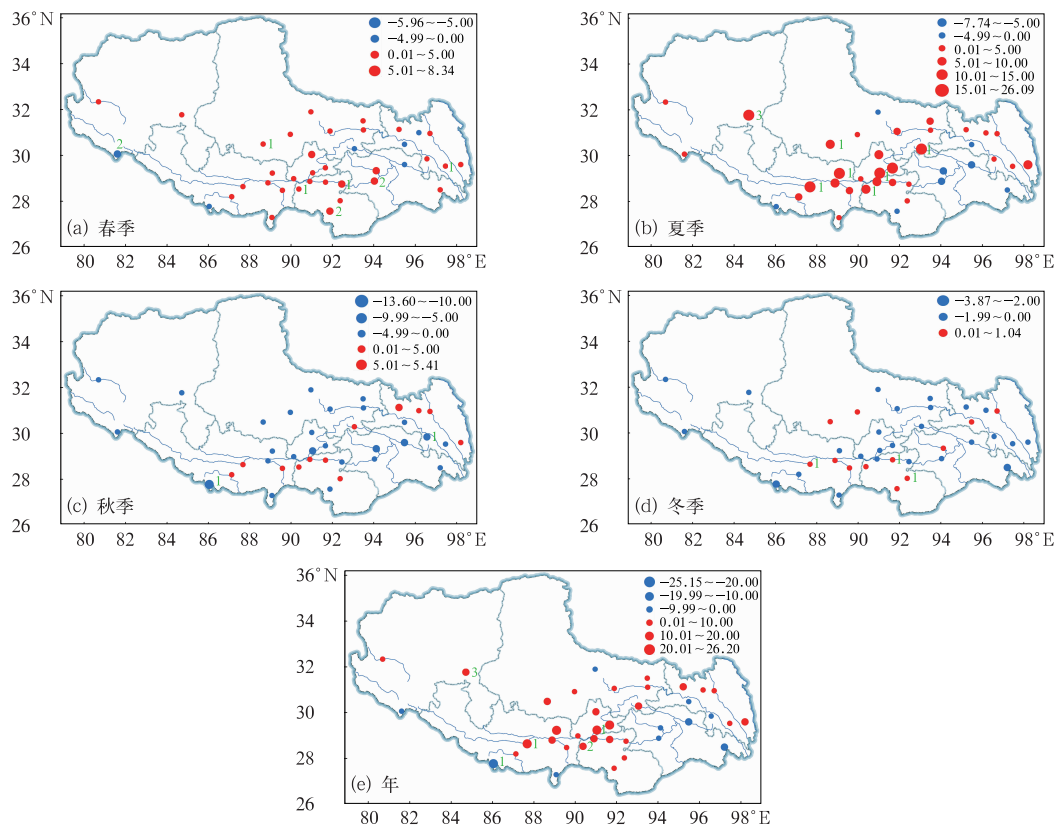
秋季夜降水量以减少的站点居多(图 4c),占比为 68.4%,平均每 10 年减少 $0.16 \sim 13.60 \text{ mm}$,减



注:绿色数字 1、2、3 分别表示 $P < 0.05$, $P < 0.01$, $P < 0.001$, 未标数字表示未通过显著性检验。

图 3 1981—2020 年西藏(a~d)四季和(e)年昼降水量变化趋势[单位: $\text{mm} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$]及其显著性空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of linear trend [unit: $\text{mm} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$] and its significance for daytime precipitation in (a) spring, (b) summer, (c) autumn, (d) winter and (e) the whole year in Xizang from 1981 to 2020



注:绿色数字 1、2、3 分别表示 $P < 0.05$, $P < 0.01$, $P < 0.001$, 未标数字表示未通过显著性检验。

图 4 1981—2020 年西藏(a~d)四季和(e)年夜降水量变化趋势[单位: $\text{mm} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$]及其显著性空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of linear trend [unit: $\text{mm} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$] and its significance for nighttime precipitation in

(a) spring, (b) summer, (c) autumn, (d) winter and (e) the whole year in Xizang from 1981 to 2020

幅以聂拉木最大($P < 0.05$)。趋于增加的站点主要分布于昌都市、雅鲁藏布江中游,增幅为 $0.06 \sim 5.41 \text{ mm} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ (丁青最大)。

冬季,只有 31.6% 的站点夜降水量趋于增加,主要分布在日喀则市东部、山南市和那曲市西部(图 4d),为 $0.01 \sim 1.04 \text{ mm} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ (江孜最大)。其余站点呈减少趋势,为 $-3.87 \sim -0.01 \text{ mm} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$,减幅以聂拉木最大。

由图 4f 可知,年夜降水量趋于减少的站点仅占 26.3%,主要位于林芝市、昌都市中部和日喀则市南部,为 $-25.15 \sim -1.21 \text{ mm} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$,减幅以聂拉木最大($P < 0.05$)。其余站点趋于增加,平均每 10 年增加 $1.31 \sim 26.20 \text{ mm}$ (南木林最大)。

2.1.2.3 夜降水率变化趋势的空间分布

从近 40 年西藏春季平均夜降水率变化趋势来看(图 5a),60.5% 的站趋于减少,主要分布在那曲市、昌都市和山南市,平均每 10 年变化 $-3.96\% \sim -0.09\%$,以安多最大。其余站点呈增加趋势,平均

每 10 年变化 $0.05\% \sim 7.74\%$,以拉孜最大。

如图 5b 所示,各站夏季平均夜降水率以增加为主(占 63.2%),平均每 10 年变化 $0.02\% \sim 2.57\%$ (拉孜最大, $P < 0.001$)。趋于减少的站点主要在阿里地区大部、那曲市中西部和山南市东部,平均每 10 年变化 $-2.73\% \sim -0.29\%$,以普兰最大。

由图 5c 可知,秋季平均夜降水率表现为增加的站点占 42.1%,主要分布在阿里地区大部、昌都市北部、拉萨市大部和山南市大部,平均每 10 年变化 $0.09\% \sim 3.25\%$,以泽当最大($P < 0.05$)。其余站点呈减少趋势,平均每 10 年变化 $-3.36\% \sim -0.02\%$,以班戈最大。

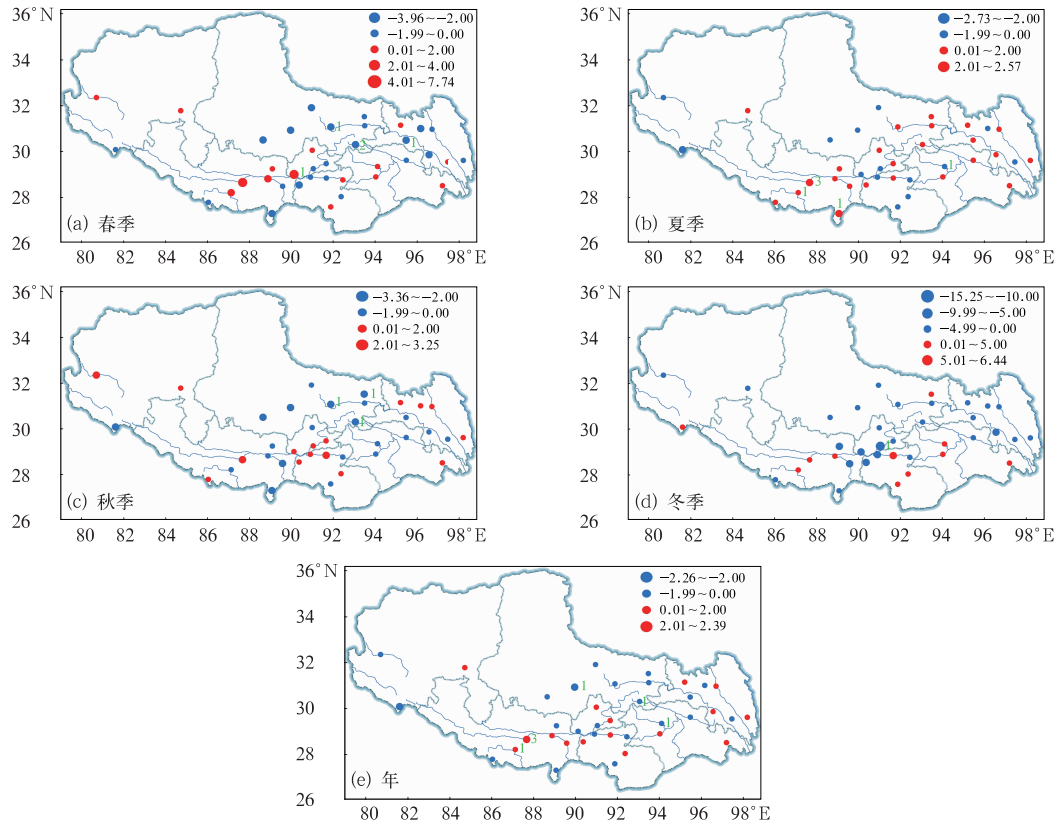
冬季各站平均夜降水率以减少为主(图 5d),占 71.1%,主要分布于阿里地区大部、那曲市、昌都市、拉萨市、山南市西部以及日喀则市东部及南部,平均每 10 年变化 $-15.25\% \sim -0.26\%$,减幅以拉萨最大($P < 0.01$)。其余站点呈增加趋势,平均每 10 年变化 $0.42\% \sim 6.44\%$ (泽当最大)。

从图 5e 可知,年平均夜降水率趋于增加的站点(占 42.1%)主要分布在阿里地区东部、日喀则市、拉萨市东部和北部,平均每 10 年变化 0.02%~2.39%(拉孜最大, $P<0.001$)。其余站点为减少趋势,平均每 10 年变化 -2.26%~-0.04%,减幅以

普兰最大。

2.1.2.4 与地理参数的关系

采用 Pearson 相关系数方法,分析了不同降水量(率)变化趋势与地理参数的相关性(表 2)。结果显示:(1)冬春两季昼降水量变化趋势只与经度关



注:绿色数字 1、2、3 分别表示 $P<0.05$, $P<0.01$, $P<0.001$, 未标数字表示未通过显著性检验。

图 5 1981—2020 年西藏(a~d)四季和(e)年平均夜降水率变化趋势[单位: $\% \cdot (10 \text{ a})^{-1}$]及其显著性空间分布
Fig. 5 Spatial distribution of linear trend [unit: $\% \cdot (10 \text{ a})^{-1}$] and its significance for average night-precipitation rate in (a) spring, (b) summer, (c) autumn, (d) winter and (e) the whole year in Xizang from 1981 to 2020

表 2 1980—2020 年西藏年和四季昼夜降水量、夜降水率变化趋势与经纬度、海拔高度的相关系数

Table 2 Correlation coefficients of linear trend for annual and seasonal daytime precipitation, nighttime precipitation and night-precipitation rate with latitude, longitude and altitude in Xizang from 1980 to 2020

要素	地理参数	时间				
		春季	夏季	秋季	冬季	年
昼降水量	经度	0.419 *	-0.202	0.124	-0.384 *	-0.026
	纬度	0.257	0.360 *	0.381 *	-0.086	0.469 **
	海拔高度	0.066	0.519 ***	0.361 *	0.132	0.637 ***
夜降水量	经度	0.272	-0.253	0.059	0.021	-0.107
	纬度	-0.183	0.097	0.248	0.111	0.118
	海拔高度	-0.056	0.397 *	0.256	0.137	0.378 *
夜降水率	经度	-0.270	0.146	-0.104	-0.050	-0.011
	纬度	-0.289	-0.139	-0.136	-0.182	-0.231
	海拔高度	-0.196	-0.050	-0.239	-0.127	-0.135

注:*, **, *** 分别表示通过 $P<0.05$, $P<0.01$, $P<0.001$ 显著性检验。

系显著,分别呈负相关和正相关。夏秋两季以及年昼降水量变化趋势不仅与纬度呈显著正相关,还与海拔高度存在显著的正相关关系;(2)年、季夜降水量变化趋势与经纬度的相关性不显著,只有夏季、年夜降水量与海拔高度有着显著的正相关关系($P < 0.05$);(3)夜降水率变化趋势与地理参数的相关性不显著,说明西藏各地夜降水率的变化与大地形无关,可能受局地气候的影响。

2.2 时间变化特征

2.2.1 多年平均值的月与季变化

如图 6a 所示,1981—2010 年西藏平均昼夜降水量的月变化曲线均呈单峰型,最大值都出现在 7 月,最小值皆在 12 月;各月平均夜降水量较昼降水量偏多 30.8%~110.3%。夜降水率的月变化曲线呈多峰型(图 6b),第 1 峰值出现在 8 月;第 2、第 3 峰值分别在 11 月、3 月;最大谷值在 12 月(56.7%)。

在季节分配上,西藏平均昼夜降水量均为夏季最多,秋季次之,冬季最少(图 6c);且季平均夜降水量较平均昼降水量偏多 45.5%~105.8%。同样,西藏平均夜降水率以夏季最高,其次是秋季,冬季最低(图 6d)。

2.2.2 变化趋势

就西藏 38 个站平均而言,近 40 年平均的年昼降水量以 $4.40 \text{ mm} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ 的速度增加(图 7a),主要表现在春、夏季,增幅分别为 $2.64 \text{ mm} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$

($P < 0.001$)、 $2.10 \text{ mm} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ 。冬季昼降水量呈弱的增加趋势 [$0.22 \text{ mm} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$],而秋季昼降水量趋于减少 [$-0.49 \text{ mm} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$]。年夜降水量也呈增加趋势(图 7b),平均增幅为 $6.32 \text{ mm} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$,大于昼降水量增幅。年夜降水量增加主要是春、夏季夜降水量增加的贡献,增幅分别为 $2.38 \text{ mm} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ ($P < 0.05$)、 $6.36 \text{ mm} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$,其中夏季夜降水量增幅明显大于昼降水量,春季夜降水量增幅略小于昼降水量。而秋、冬季夜降水量均趋于减少,减幅分别为 $-0.28 \text{ mm} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ 、 $-2.05 \text{ mm} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ 。

近 40 年西藏平均冬、春、秋季夜降水率均表现为减小趋势,平均每 10 年分别减小 1.94% ($P < 0.05$)、0.48% 和 0.27%。虽然夏季夜降水率略有增加 [$0.08\% \cdot (10 \text{ a})^{-1}$],也未影响年夜降水率趋于减小(图 7c)的趋势,减幅为 $-0.64\% \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ ($P < 0.05$)。

2.2.3 年代际变化

表 3 给出了 1981—2020 年西藏平均年、季昼降水量与夜降水量距平(各年代平均值与常年值的差值)的年代际变化。从表 3 中可以看出:(1)年昼夜降水量在 20 世纪 80 年代偏少,90 年代至 21 世纪 10 年代偏多。(2)春季昼夜降水量在 20 世纪 80—90 年代偏少,进入 21 世纪后偏多。夏季昼、夜降水量仅在 20 世纪 80 年代偏少,其余 3 个年代偏多。(3)秋季,20 世纪 90 年代昼降水量偏少、夜降水量偏

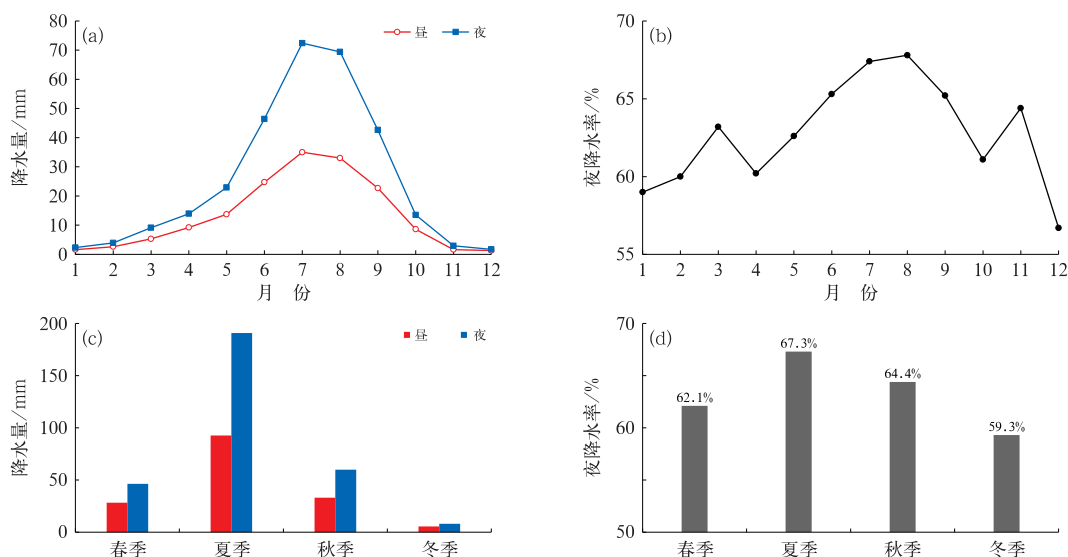


图 6 1981—2010 年西藏(a,c)昼夜降水量,(b,d)夜降水率的(a,b)各月和(c,d)四季变化

Fig. 6 (a, b) Monthly and (c, d) seasonal variations of (a, c) daytime precipitation, nighttime precipitation and (b, d) night-precipitation rate in Xizang from 1981 to 2010

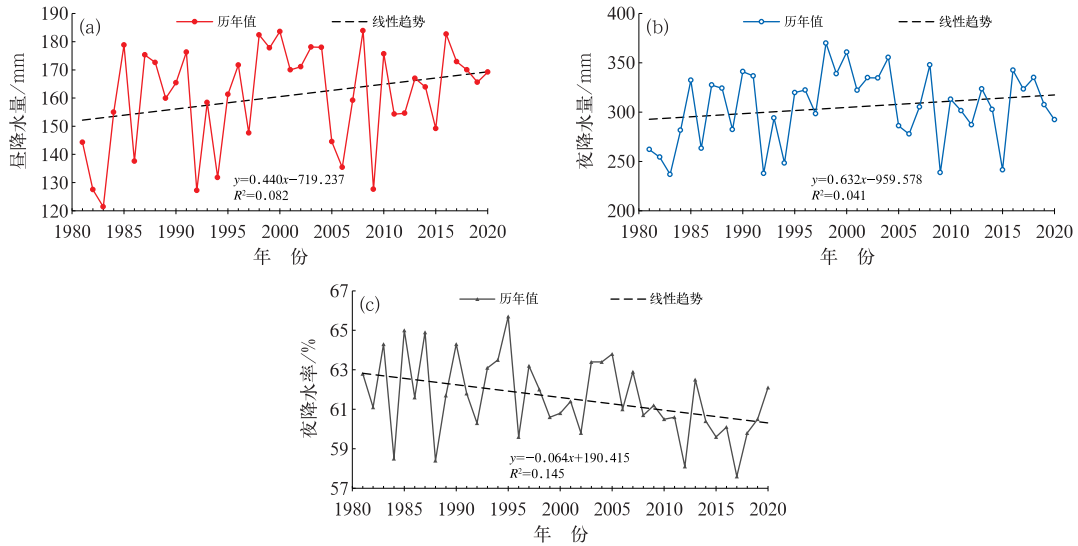


图 7 1981—2020 年西藏年(a)昼降水量,(b)夜降水量和(c)夜降水率的变化
Fig.7 Annual variation of (a) daytime precipitation, (b) nighttime precipitation and (c) night-precipitation rate in Xizang from 1981 to 2020

多,80 年代都偏多,21 世纪 00 年代、10 年代均偏少。
(4)冬季,昼降水量与夜降水量变化不同,20 世纪 80 年代均偏多,21 世纪 00 年代都偏少,20 世纪 90 年代昼降水量偏少、夜降水量偏多,而 21 世纪 10 年代相反。

(5)总体来看,20 世纪 80 年代年昼夜降水量明显偏少,是近 40 年里最少的年代。年昼夜降水量的最大值分别出现在 21 世纪 10 年代和 20 世纪 90 年代,前者是由于春夏两季偏多,后者是因夏秋两季偏多。

表 3 1981—2020 年西藏昼夜降水量、夜降水率距平的年代际变化

Table 3 The interdecadal variation of mean anomalies of daytime precipitation, nighttime precipitation and night-precipitation rate in Xizang from 1981 to 2020

要素	时间	年代			
		20 世纪 80 年代	20 世纪 90 年代	21 世纪 00 年代	21 世纪 10 年代
昼降水量/mm	春季	−2.1	−0.9	2.9	4.6
	夏季	−5.9	4.6	1.3	1.6
	秋季	1.4	−0.8	−0.6	−2.2
	冬季	0.9	−0.4	−0.6	1.5
	年	−5.7	2.5	3.0	5.5
夜降水量/mm	春季	−3.2	−2.7	6.0	1.3
	夏季	−12.4	8.6	3.8	8.0
	秋季	0.6	1.7	−2.2	−8.0
	冬季	0.5	0.3	−0.9	−0.3
	年	−14.5	7.9	6.7	1.0
夜降水率/%	春季	0.5	−1.4	0.9	−2.0
	夏季	0.2	−0.4	0.3	0.3
	秋季	−0.4	0.7	−0.2	−1.1
	冬季	0.6	1.2	−1.9	−4.8
	年	0.3	0.1	−0.2	−1.9

注:距平为各年代平均值与常年值的差值。

另外,从西藏平均年、季夜降水率距平的年代际变化来看(表 3),20 世纪 80 年代除秋季偏低外,其余季节均偏高,致使年夜降水率偏高,是近 40 年中最高的年代。90 年代春夏两季夜降水率偏低、秋冬

两季偏高,21 世纪 00 年代与 20 世纪 90 年代正好相反。进入 21 世纪 10 年代,夏季夜降水率略偏高,其余季节均偏低(尤其是冬季),造成年夜降水率偏低,为近 40 年中最底的年代。

2.2.4 突变分析

采用 M-K 突变检验方法分析了 1981—2020 年西藏平均全年和四季昼夜降水量的突变时间(表 4, 图 8)。春季昼降水量的 UF 曲线在 1981—1999 年期间呈振荡上升,之后至 2020 年上升趋势明显,UF 曲线在 2006 年超过了+1.96 线,表明昼降水量增加趋势明显。UF 和 UB 曲线在 2000 年出现交叉,且交叉点位于±1.96 之间,确定 2000 年发生了突变,由偏少跃变为偏多,突变后的春季昼降水量较突变前偏多 23.4%(图 8a)。同理分析发现,春、冬季

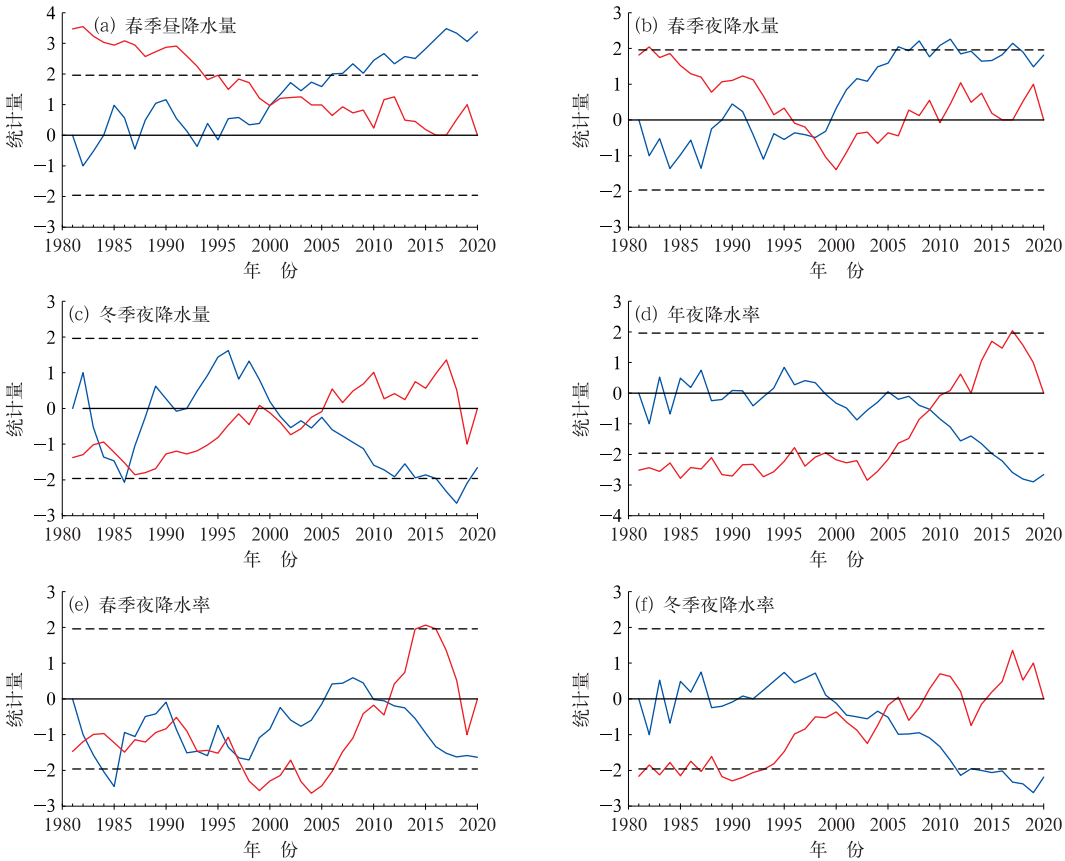
夜降水量分别在 1998 年、2003 年出现了气候突变(图 8b,8c),春季夜降水量由少到多,突变后较突变前偏多 18.2%;冬季夜降水量由多到少,突变后较突变前偏少 8.5%。其余季节和全年的昼夜降水量均未出现突变(表 4)。

此外,M-K 检验还显示,西藏平均年夜降水率的 UF 曲线在 1981—2005 年期间在 0 线附近上下振荡,之后至 2020 年呈快速下降趋势,UF 曲线在 2015 年越过了一-1.96 线,表明年夜降水率减少趋势明显(图 8d)。UF 和 UB 曲线在 2009 年出现交叉,

表 4 1981—2020 年西藏昼夜降水量、夜降水率的突变年份
Table 4 Mutation year of daytime precipitation, nighttime precipitation and night-precipitation rate in Xizang from 1981 to 2020

要素	春季	夏季	秋季	冬季	年
昼降水量	2000 年↑	/	/	/	/
夜降水量	1998 年↑	/	/	2003 年↓	/
夜降水率	2011 年↓	/	/	2004 年↓	2009 年↓

注:“/”表示无突变年,“↑”“↓”分别表示增加和减少。



注:蓝色线为 UF,红色线为 UB,黑色断线为 0.05 显著性临界值。

图 8 1981—2020 年西藏昼夜降水量、夜降水率的 M-K 检验

Fig. 8 The M-K test results of daytime precipitation, nighttime precipitation and night-precipitation rate in Xizang from 1981 to 2020

且交叉点位于 ± 1.96 ,可确定 2009 年出现了突变,由相对偏高期跃变为相对偏低期,突变后较突变前偏低 1.8%。同理,春、冬夜降水率的突变年份分别在 2011 年和 2004 年(图 8e,8f),都是由偏高变为偏低,突变后较突变前分别偏低 2.0%和 4.3%。夏、秋季夜降水率突变点不明显(表 4)。

3 结论与讨论

3.1 结 论

(1)西藏各站平均年昼降水量为 24.5~310.2 mm,总体上呈自东向西递减;平均年夜降水量为 41.8~599.0 mm,由东南向西北递减;除隆子站外,夜降水量较昼降水量偏多 4.0%~411.7%。各站年平均夜降水率为 48.9%~83.7%,以拉萨最高。

(2)近 40 年西藏 73.7%站点年昼夜降水量均趋于增加,增幅分别为 0.65~19.74、1.31~26.20 mm·(10 a)⁻¹;呈减少趋势的站点主要分布在林芝市大部、日喀则市大部,平均每 10 年分别减少 0.07~12.54、1.21~25.15 mm。其中,63.2%的站点夜降水量变幅大于昼降水量变幅,57.9%的站点年夜降水率倾向于减少,以那曲市最明显。

(3)近 40 年西藏平均昼降水量以 4.40 mm·(10 a)⁻¹的速度增加,主要表现在春夏两季。平均年夜降水量也趋于增加[6.32 mm·(10 a)⁻¹]。因冬春秋三季夜降水率均减小,导致年夜降水率变小。

(4)在年代际变化上,西藏 20 世纪 80 年代年昼夜降水量明显偏少,是近 40 年里最少的年代;年昼夜降水量最大值出现年代不同,前者在 21 世纪 10 年代,是由于春夏两季偏多,而后者在 20 世纪 90 年代,是因为夏秋两季偏多。夜降水率的最高、最低值分别出现在 20 世纪 80 年代和 21 世纪 10 年代。

(5)在时间转折上,西藏仅春季昼夜降水量、冬季夜降水量分别在 20 世纪 90 年代末和 21 世纪初发生了气候突变,前者增多,后者变少。2004 年、2011 年和 2009 年分别是冬季、春季和年夜降水率的突变时间。

3.2 讨 论

夜雨现象最为明显的区域是青藏高原、四川盆地、云贵高原(段春峰等,2013)。青藏高原夜雨率空间分布具有明显的区域差异性,在西藏中西部夜雨

率呈明显的“纬向型”分布,西藏东部呈“西北—东南”走向(余忠水等,2011),这与本研究的结论基本一致。因西藏境内有东西向的喜马拉雅山脉、冈底斯山、念青唐古拉和唐古拉山脉,以及雅鲁藏布江谷地,而在“三江”(怒江、澜沧江、金沙江)流域,则是南北向的横断山脉等,这些山脉和流域谷地的走向十分有利于夜雨率的形成(余忠水等,2011)。此外,地表植被稀少,夜间也利于形成强盛的山风,河谷的湿润空气上升,成云致雨(段春峰等,2013)。

在全球气候变化背景下,中国不同区域的夜雨率变化特征各异,如四川地区夜雨率总体呈北部减少南部增多(张博和李国平,2015)。陕西西部及中北部、内蒙古包头至呼和浩特、祁连山以东等区域夜雨率呈上升趋势,山西中部及东北部、宁夏银川至内蒙古鄂托克旗等区域夜雨率下降趋势明显(安彬等,2022)。本研究分析认为,近 40 年西藏年降水率北部和南部边缘地区减少、中部和东部增多。同样,西藏昼夜降水量变化也具有明显的差异。由于青藏高原的复合地形与不同纬度大气环流的多尺度相互作用(丁乙等,2024),造成了青藏高原昼夜降水量、夜雨时空变化的多样性,其原因较为复杂,还有待进一步研究。此外,近几十年青藏高原实施的植树造林、退耕还林等生态修复工程,加之气候趋于暖湿化(徐祥德,2020;中国气象局气候变化中心,2023),青藏高原水源涵养、防风固沙生态系统功能逐步提升,特别是森林水源涵养功能和草地防风固沙功能显著增强(王欠鑫等,2023),这些对局地昼夜降水量的分布是否有影响,还存在不确定性,仍需进行深入的研究。

参考文献

- 安彬,肖薇薇,朱妮,2022. 1960—2017 年黄土高原昼夜降水变化特征[J]. 水土保持研究,29(2):132-138,144. An B, Xiao W W, Zhu N, 2022. Characteristics of change in diurnal precipitation in the Loess Plateau during 1960—2017[J]. Res Soil Water Conserv, 29(2):132-138,144(in Chinese).
- 次仁央宗,柯宗建,陈丽娟,等,2016. 西藏夏季降水的季节内变化特征及其影响系统[J]. 气象,42(11):1342-1350. Ciren Y Z, Ke Z J, Chen L J, et al, 2016. Intraseasonal variation characteristics of summer precipitation over Tibet and the corresponding large-scale circulation anomalies[J]. Meteor Mon, 42(11):1342-1350 (in Chinese).
- 邓海军,郭斌,曹永强,等,2020. 1961—2016 年中国昼夜降水变化的时空格局[J]. 地理研究,39(10):2415-2426. Deng H J, Guo B, Cao Y Q, et al, 2020. Spatial and temporal patterns of daytime

- and nighttime precipitation in China during 1961—2016[J]. Geogr Res, 39(10):2415-2426(in Chinese).
- 丁乙, 窦晶晶, 王迎春, 等, 2024. 华北平原及沿山和沿海五个城市夏季短历时降水过程的日变化分析[J]. 气象学报, 82(4): 490-509. Ding Y, Dou J J, Wang Y C, et al, 2024. Diurnal variation analysis of short-duration rainfall events in the North China Plain and five cities along mountains and along the coast during the summer season[J]. Acta Meteor Sin, 82(4): 490-509(in Chinese).
- 杜军, 路红亚, 建军, 2014. 1961—2012年西藏极端降水事件的变化[J]. 自然资源学报, 29(6): 990-1002. Du J, Lu H Y, Jian J, 2014. Change in extreme precipitation events over Tibet from 1961 to 2012[J]. J Nat Resour, 29(6): 990-1002(in Chinese).
- 杜军, 马玉才, 2004. 西藏高原降水变化趋势的气候分析[J]. 地理学报, 59(3): 375-382. Du J, Ma Y C, 2004. Climatic trend of rainfall over Tibetan Plateau from 1971 to 2000[J]. Acta Geogr Sin, 59(3): 375-382(in Chinese).
- 段春锋, 曹雯, 缪启龙, 等, 2013. 中国夏季夜雨的空间分布特征[J]. 自然资源学报, 28(11): 1935-1944. Duan C F, Cao W, Miao Q L, et al, 2013. Spatial distribution of night rainfall in summer over China[J]. J Nat Resour, 28(11): 1935-1944(in Chinese).
- 多典洛珠, 周顺武, 宋倩倩, 等, 2020. 西藏拉萨汛期降水日变化特征[J]. 干旱气象, 38(1): 58-65. Duo D L Z, Zhou S W, Song Q Q, et al, 2020. Diurnal variation characteristic of precipitation during flood season in Lhasa of Tibet Autonomous Region[J]. J Arid Meteor, 38(1): 58-65(in Chinese).
- 范江琳, 曹萍萍, 冯良敏, 等, 2019. 1961—2018年四川盆地夜雨特征分析[J]. 高原山地气象研究, 39(4): 24-30. Fan J L, Cao P P, Feng L M, et al, 2019. Analysis of night precipitation characteristics in Sichuan Basin in recent 58 years[J]. Plateau Mountain Meteor Res, 39(4): 24-30(in Chinese).
- 郭玉琳, 赵勇, 周雅蔓, 等, 2022. 新疆天山山区夏季降水日变化特征及其与海拔高度关系[J]. 干旱区地理, 45(1): 57-65. Guo Y L, Zhao Y, Zhou Y M, et al, 2022. Diurnal variation of summer precipitation and its relationship with altitude in Tianshan Mountains of Xinjiang[J]. Arid Land Geogr, 45(1): 57-65(in Chinese).
- 韩云环, 马柱国, 杨庆, 等, 2014. 增暖背景下新疆昼夜降水的变化特征[J]. 气候与环境研究, 19(6): 763-772. Han Y H, Ma Z G, Yang Q, et al, 2014. Changing characteristics of daytime and nighttime precipitation in Xinjiang under global warming[J]. Climatic Environ Res, 19(6): 763-772(in Chinese).
- 韩熠哲, 马伟强, 王炳赞, 等, 2017. 青藏高原近30年降水变化特征分析[J]. 高原气象, 36(6): 1477-1486. Han Y Z, Ma W Q, Wang B Y, et al, 2017. Climatic characteristics of rainfall change over the Qinghai-Tibetan Plateau from 1980 to 2013[J]. Plateau Meteor, 36(6): 1477-1486(in Chinese).
- 胡迪, 李跃清, 2015. 青藏高原东侧四川地区夜雨时空变化特征[J]. 大气科学, 39(1): 161-179. Hu D, Li Y Q, 2015. Spatial and temporal variations of nocturnal precipitation in Sichuan over the eastern Tibetan Plateau[J]. Chin J Atmos Sci, 39(1): 161-179(in Chinese).
- 计晓龙, 吴昊旻, 黄安宁, 等, 2017. 青藏高原夏季降水日变化特征分析[J]. 高原气象, 36(5): 1188-1200. Ji X L, Wu H M, Huang A N, et al, 2017. Characteristics of the precipitation diurnal variation over Qinghai-Tibetan Plateau in summer[J]. Plateau Meteor, 36(5): 1188-1200(in Chinese).
- 贾艳青, 张勃, 张耀宗, 等, 2016. 中国华北地区昼夜降水时空变化特征[J]. 地理与地理信息科学, 32(5): 103-109. Jia Y Q, Zhang B, Zhang Y Z, et al, 2016. Characteristics of spatio-temporal variation of day and night precipitation in North China[J]. Geogr Geo-Inf Sci, 32(5): 103-109(in Chinese).
- 李冉, 王改利, 张永华, 等, 2024. 藏东南墨脱地区降水特征分析[J]. 气象, 50(3): 303-317. Li R, Wang G L, Zhang Y H, et al, 2024. Study on precipitation characteristics in Medog, southeastern Tibetan Plateau[J]. Meteor Mon, 50(3): 303-317(in Chinese).
- 唐菁, 陈生, 李峙, 等, 2023. 基于雷达观测的华南夏季降水类型日变化的时空分布特征[J]. 气象, 49(3): 279-290. Tang J, Chen S, Li Z, et al, 2023. Spatio-temporal distribution characteristics of diurnal variation of summer rainfall in South China based on radar observation[J]. Meteor Mon, 49(3): 279-290(in Chinese).
- 汪小康, 崔春光, 刘柯, 等, 2024. 中国主雨季极端小时降水时空分布和日变化特征[J]. 气象, 50(4): 393-406. Wang X K, Cui C G, Liu K, et al, 2024. Spatio-Temporal distribution and diurnal variation of extreme hourly precipitation in China during the main rainy season[J]. Meteor Mon, 50(4): 393-406(in Chinese).
- 王欠鑫, 曹巍, 黄麟, 2023. 青藏高原生态系统功能稳定性演化特征及分区[J]. 地理学报, 78(5): 1104-1118. Wang Q X, Cao W, Huang L, 2023. Evolutionary characteristics and zoning of ecosystem functional stability on the Qinghai-Tibet Plateau[J]. Acta Geogr Sin, 78(5): 1104-1118(in Chinese).
- 王胜, 谢五三, 唐为安, 等, 2011. 1961—2009年淮河流域昼夜降水变化特征[J]. 生态学报, 30(12): 2881-2887. Wang S, Xie W S, Tang W A, et al, 2011. Change characteristics of day and night precipitation in Huaihe River Basin in 1961—2009[J]. Chin J Ecol, 30(12): 2881-2887(in Chinese).
- 魏凤英, 2007. 现代气候统计诊断与预测技术: 第2版[M]. 北京: 气象出版社. Wei F Y, 2007. Modern Climatic Statistical Diagnosis and Prediction Technology[M]. 2nd ed. Beijing: China Meteorological Press(in Chinese).
- 徐祥德, 2020. 气候变化与青藏高原大气水分循环[M]. 北京: 气象出版社. Xu X D, 2020. Climate Change and Atmospheric Water Cycle on the Qinghai-Xizang Plateau[M]. Beijing: China Meteorological Press(in Chinese).
- 姚檀栋, 刘晓东, 王宁练, 2000. 青藏高原地区的气候变化幅度问题[J]. 科学通报, 45(1): 98-106. Yao T D, Liu X D, Wang N L, 2000. Magnitude of climate change on the Qinghai-Xizang Plateau[J]. Chin Sci Bull, 45(1): 98-106(in Chinese).
- 宇如聪, 李建, 陈昊明, 等, 2021. 中国降水日变化[M]. 北京: 科学出版社. Yu R C, Li J, Chen H M, et al, 2021. Daily Variation of Precipitation in China[M]. Beijing: Science Press(in Chinese).
- 余忠水, 2011. 1955—2007年拉萨市雨季夜雨率变化特征[J]. 气象,

- 37(12):1584-1588. Yu Z S, 2011. The night rain rate variations of Lhasa in rainy season during 1955—2007[J]. Meteor Mon, 37(12):1584-1588(in Chinese).
- 余忠水, 康世昌, 蒋建莹, 2011. 青藏高原夏季夜雨率空间分布及其变化特征[J]. 山地学报, 29(5):627-632. Yu Z S, Kang S C, Jiang J Y, 2011. Spatial and temporal variations of the night-rain rate during summer over the Tibetan Plateau[J]. J Mountain Sci, 29(5):627-632(in Chinese).
- 曾秀娟, 李亚东, 舒守娟, 等, 2023. 复杂地形下浙江省夏季午后降水的空间估算及其影响因素[J]. 气象, 49(5):574-587. Zeng X J, Li Y D, Shu S J, et al, 2023. Spatial estimation and impact factors of summer afternoon precipitation in Zhejiang Province under complex terrain[J]. Meteor Mon, 49(5):574-587(in Chinese).
- 张博, 李国平, 2015. 全球气候变暖背景下四川地区夜雨的变化特征[J]. 中国科技论文, 10(9):1111-1116. Zhang B, Li G P, 2015. Night precipitation variation in Sichuan under global warming[J]. China Sciencepaper, 10(9):1111-1116(in Chinese).
- 张核真, 唐小萍, 普布卓玛, 2010. 近 46 年西藏高原昼夜降水变化趋势[J]. 气象科技, 38(2):205-208. Zhang H Z, Tang X P, Pubuzhuoma, 2010. Trends of day/night precipitation in Tibet Plateau in recent 46 years[J]. Meteor Sci Technol, 38(2):205-208(in Chinese).
- 张宏芳, 潘留杰, 陈昊明, 等, 2020. 秦岭及周边地区暖季降水日变化及其成因分析[J]. 高原气象, 39(5):935-946. Zhang H F, Pan L J, Chen H M, et al, 2020. Diurnal variations and causes of warm season precipitation in Qinling and surrounding areas[J]. Plateau Meteor, 39(5):935-946(in Chinese).
- 赵玮, 郝翠, 曹洁, 等, 2022. 近 40 年北京地区夏季降水日变化及不同持续时间降水事件的特征[J]. 大气科学, 46(5):1167-1176. Zhao W, Hao C, Cao J, et al, 2022. Diurnal variation characteristics of summer precipitation and precipitation events with different durations in Beijing in the past 40 years[J]. Chin J Atmos Sci, 46(5):1167-1176(in Chinese).
- 中国气象局气候变化中心, 2023. 中国气候变化蓝皮书(2023)[M]. 北京: 科学出版社. Climate Change Center of CMA, 2023. Blue Book on Climate Change in China (2023)[M]. Beijing: Science Press(in Chinese).
- Cheng Q P, Gao L, Zuo X A, et al, 2019. Statistical analyses of spatial and temporal variabilities in total, daytime, and nighttime precipitation indices and of extreme dry/wet association with large-scale circulations of Southwest China, 1961—2016[J]. Atmos Res, 219:166-182.
- Liu X M, Zhang M J, Wang S J, et al, 2017. Assessment of diurnal variation of summer precipitation over the Qilian Mountains based on an hourly merged dataset from 2008 to 2014[J]. J Geogr Sci, 27(3):326-336.
- Tang Q Y, Zhang C X, 2013. Data processing system (DPS) software with experimental design, statistical analysis and data mining developed for use in entomological research[J]. Insect Sci, 20(2):254-260.

(本文责编:戴洋)