

周芳弛,李国平,黄楚惠.四川山地暖季夜间暴雨的空间分布以及对海拔高度的依赖性[J].沙漠与绿洲气象,2023,17(4):78-86.

doi:10.12057/j.issn.1002-0799.2023.04.011

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



四川山地暖季夜间暴雨的空间分布 以及对海拔高度的依赖性

周芳弛¹,李国平^{1*},黄楚惠²

(1.成都信息工程大学大气科学学院,四川 成都 610225;2.四川省气象台,四川 成都 610072)

摘要:利用四川省2010—2019年2 165个国家及区域气象站逐小时降水资料,分区统计了四川暖季(5—9月)暴雨日夜间降水占日降水量的比例、夜间暴雨频次和夜间平均暴雨强度的基本特征,并通过趋势分析和地理加权回归等统计方法,分析了其空间分布及其与海拔高度的关系,得出:(1)四川暴雨日夜间降水占日降水量比例呈现自南向北递减的趋势,以海拔2 800 m为分界,表现为随海拔高度升高呈先增大、后减小的垂直分布特征,川西南山地与其他山地区域整体上升的变化趋势明显不同。(2)夜间暴雨频次较多的测站沿川西与川西南山地陡峭地形呈线性分布,夜间暴雨频次随海拔高度升高总体呈减小的特征,川西山地和川西南山地的频次最大值分别出现在海拔800和500 m。(3)四川夜间平均暴雨强度整体随海拔的升高而减小,大值区主要位于川西山地和川东北山地,海拔700 m处的峰值强度主要由川西山地贡献。(4)川西山地夜间暴雨次数较多且强度大,川西南山地夜间暴雨次数多但单次降水量较小,而川东北夜间暴雨的强度较大但次数较少。

关键词:夜间暴雨;频次和强度;空间分布;海拔高度;四川山地

中图分类号:P429

文献标识码:A

文章编号:1002-0799(2023)04-0078-09

夜雨是一种重要的降水现象,对空气、土壤湿度、气温、云辐射收支日循环和生态环境的形成等均有着潜在的重大作用^[1]。夜雨出现在全球的许多地方,中国青藏高原及周围地区夜雨较多,其中,四川盆地因其独特的地理位置,使其具有特殊的气候性质,是我国夜雨量最大的地区。

四川盆地位于青藏高原与长江中下游平原的过渡地带(即第二级阶梯地形区),是世界上地形最复杂的区域之一,有山地、丘陵、平原、盆地、高原五大地形。大部分研究认为夜雨的形成主要是特殊的地

形条件所致^[2-4],青藏高原东部和四川盆地西缘为地形等高线的密集点,从东至西形成陡峭的上升山势,是探讨降雨对海拔高度依赖性的绝佳区域^[5]。

在季风环流和陡峭地形的相互作用下,四川盆地的区域降水特性特别明显,如经常出现局地强降水,夜间降水异常频繁^[6-11]。周春花等^[12]统计了21世纪以来四川的强降水区域分布特征,发现盆地降水比高原多,夜晚多过白天。范江琳等^[13]得出四川盆地夜雨强度呈经向偶极型空间分布,夜雨高频区位于盆地西南部和南部,低频区位于盆地东北部和中部。薛羽君等^[14]分析了四川盆地及其周边地区的降水分布规律,得到盆地周边西南山地的降水峰值由夜间雨量和频率共同影响,东北山地主要由午前频率与后半夜雨量贡献。近年来,许多学者针对四川盆地及其周边地区夜间降水和海拔的关系进行了研究。Zhu等^[15]分析得出夜雨主要分布于峡谷地区、大地

收稿日期:2022-07-15;修回日期:2022-10-22

基金项目:国家自然科学基金(42175002,42075013,91937301)

作者简介:周芳弛(1998—),女,硕士,主要从事天气动力学研究。

E-mail:3519446548@qq.com

通信作者:李国平(1963—),男,教授,主要从事暴雨动力学、高原山地气象学等研究。E-mail:liguoping@cuit.edu.cn

形坡上以及附近的平原地带,沿大地形陡坡,夜雨区降水峰值呈由山区至平地的明显滞后特性。针对四川盆地的短时强降水,周秋雪等^[16-17]研究认为,频次以及雨强极值均随海拔高度的增加而下降;在增加测站数量的基础上进一步得到当海拔>1 200 m 时,暴雨日迅速减少。

对于四川盆地夜间降水的研究较多^[18-22],但对山地夜间暴雨精细特征的研究较少,四川山地指四川盆地周边海拔 500 m 以上起伏大、多呈脉状分布的高地,以往研究少有对四川山地及其暴雨进行明确界定和分区统计,且所用的气象测站数较少,尤其在山区分布较为稀疏,代表性不强,不利于对山地夜间暴雨的精细化研究。因此本文以四川西部山地、西南部山地和东北部山地为主要研究区域,重点统计分析 2010—2019 年暖季(5—9 月)降水量级达到暴雨及以上的事件,利用 4 841 个加密自动气象站(简称“加密站”)资料和 165 个国家基准气象站(简称“国家站”)资料,以期探究包括暴雨日夜间降水占日降水量的比例、夜间暴雨频次、夜间平均暴雨强度等在内的四川山地夜间暴雨灾害的详细特点,为政府准确预测、精细防治山区气象灾害及其衍生灾害,以及保护公民的生命财产安全提供科学依据。

1 资料和方法

本文基于四川省 165 个国家站(图 1)以及 4 841 个四川省加密气象站的逐时降水数据,时段为 2010—2019 年的暖季 5—9 月。为保证数据的可靠性,对降水数据进行了质量控制,剔除了在研究时段内缺测时次>20%的测站,最终筛选 2 165 个测站的逐时降水量作为本文研究使用的基础数据。

在近 10 年山地暴雨事件^[23]的研究基础上,本文选取 3 个区域即四川西部、西南部和东北部海拔 500~3 000 m 的山区作为主要研究区域。四川西部山区范围是 102°~105°E,30°~33°N,西南部山区范围是 102°~105°E,28°~30°N,东北部山区为 105°~108.5°E,30°~33°N,其中川西山区拥有 28 个国家站与 334 个加密站,川西南山区拥有 9 个国家站与 217 个加密站,川东北山区拥有 7 个国家站与 296 个加密站。

本研究的四川山地夜间暴雨指 20:00(北京时,下同)一次日 08:00,四川山地出现 1 h 累计雨量≥20 mm 且 3 h 累计雨量≥50 mm 的强降水。但对于盆周西部(川西高原)的甘孜、阿坝两州,雨量标准减半(即 1 h 累计雨量≥10 mm,且 3 h 累计雨

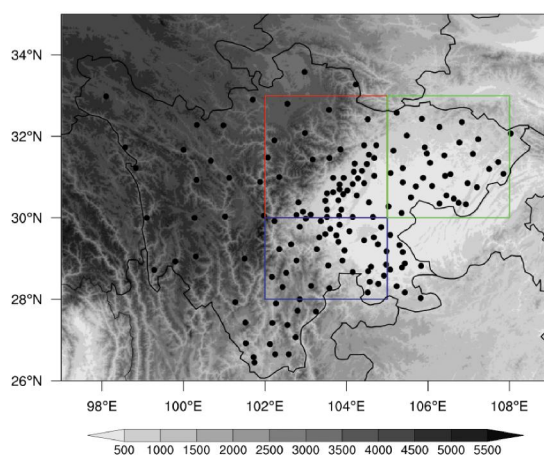


图 1 四川省地理及 165 个国家站分布
(红色矩形框代表川西山区,蓝色矩形框代表川西南山区,
绿色矩形框代表川东北山区)

量≥25 mm)^[24]。一般以 20:00—次日 08:00 降水量作为夜间降水量,以 20:00—次日 20:00 降水量作为日降水量。本文暴雨日夜间降水占日降水量的比例=暴雨日的夜间降水量/暴雨日的日降水量×100%,夜间暴雨频次为出现夜间暴雨的次数,夜间平均暴雨强度=夜间暴雨雨量/12 h,单位:mm/h。

本文主要应用了趋势分析方法^[25]和地理加权回归(Geographically Weighted Regression,GWR)模型^[26]。其中,各特征量随海拔高度变化的趋势采用了滑动平均分析和线性趋势分析,并对各相关系数进行了显著性水平检验。通过使用 GWR 模型,可以计算每个测站的暴雨特征量与海拔高度的关系,其公式如下:

$$P_i = c_0(x_i, y_i) + c_1(x_i, y_i)h_i + \varepsilon_i, \quad i=1, 2, \dots, n \quad (1)$$

式中: (x_i, y_i) 代表测站 i 的经度和纬度, n 为测站数, P_i 为暴雨特征量(暴雨特征量具体指暴雨日夜间降水占日降水量的比例、夜间暴雨频次和夜间平均暴雨强度), h_i 为地形高度, c_0 为海平面高度处的暴雨特征量, c_1 为本研究所关注的降水与地形高度的回归系数, ε_i 为误差项。

利用加权最小二乘法,得到测站 i 的回归系数的估计值,其公式为:

$$\hat{c}(x_i, y_i) = (h^T W(x_i, y_i) h)^{-1} h^T W(x_i, y_i) P, \quad i=1, 2, \dots, n \quad (2)$$

式中: $\hat{c}(x_i, y_i) = [\hat{c}(x_i, y_i), \hat{c}(x_2, y_2), \dots, \hat{c}(x_n, y_n)]^T$ 是测站 i 的回归系数矢量, $h = [h_1, h_2, \dots, h_n]^T$ 是测站 i 的自变量矢量, $W(x_i, y_i) = D_{\text{diag}}[W_{i1}, W_{i2}, \dots, W_{in}]$ 是测站 i 的 $n \times n$ 对角权重矩阵, P 为因变量的 $n \times 1$ 矢量。

参与测站 i 计算的样本 j 可以根据自身与测站

i 的距离进行权重分配,距离越近,分配的权重越大。选用 Gauss 函数法表示权重与距离之间的关系,函数形式如下:

$$W_{ij} = \exp\left(-\frac{1}{2} \left(\frac{d_{ij}}{b}\right)^2\right) \quad (3)$$

式中: W_{ij} 为权重, d_{ij} 为站点 i, j 之间的距离, b 为带宽,控制每个站点进行回归计算时的权重大小,本文运用校正的 Akaike 信息标准 (Corrected Akaike Information Criterion, AICc) 法^[27]来估计权重函数带宽参数。

2 四川暖季夜间暴雨各特征量的空间分布特征

四川地形结构复杂,夜雨特征明显,暴雨日夜间降水占日降水量的比例(图 2a)存在明显的区域差异。从总体上看,暴雨日夜间降水占比呈现自南向北逐渐下降的趋势。盆地内和攀西大部分地区的占比高于 60%,其中,高于 80%的大值区位于川西南山地、攀西地区以及海拔 500 m 以下的成都平原南部,而川西高原海拔 3 000 m 以上的部分为低值区,暴雨日夜间降水占比高于 60%的测站仅占 36.4%。

四川暖季的 2010—2019 年平均夜间暴雨频次(图 2b)同样具有显著的区域性差异,大值区沿山地陡峭地形呈线性分布。3 000 m 以上川西高原和攀西地区北部大部分测站未发生夜间暴雨,500 m 以下的成都平原区域平均夜间暴雨频次约 1 次,2 次及以上的夜间暴雨大部分集中在川西与川西南山地区域,其中川西山地在广元—绵竹—都江堰一带,有 1 个站(安县千佛镇站)出现 3 次夜间暴雨。川西南山地在雅安—峨眉山一带,有 3 个站出现 3 次夜间暴雨,与“雅安天漏”相符,原因为沿山地地形抬升及山谷风效应使得该区夜间暴雨频次较多^[28-29]。

由图 2c 可知,四川夜间平均暴雨强度主要集中在 5~8 mm/h,占有测站的 71.2%。夜间平均暴雨强度较大的测站主要聚集在川西山地、川东北山地、遂宁以及四川盆地南部。龙门山呈东北西南走向,对偏东气流有明显的强迫抬升作用,川西山地的强度大值测站几乎沿着龙门山走向呈带状分布,有 9 个站达到了 10 mm/h 以上强度,其中松潘小河乡达到 14.8 mm/h。川东北山地的夜间平均暴雨强度较高,其中青川县有 3 个站达到了 10 mm/h 以上强度。

结合四川暖季夜间暴雨频次和强度多年平均空

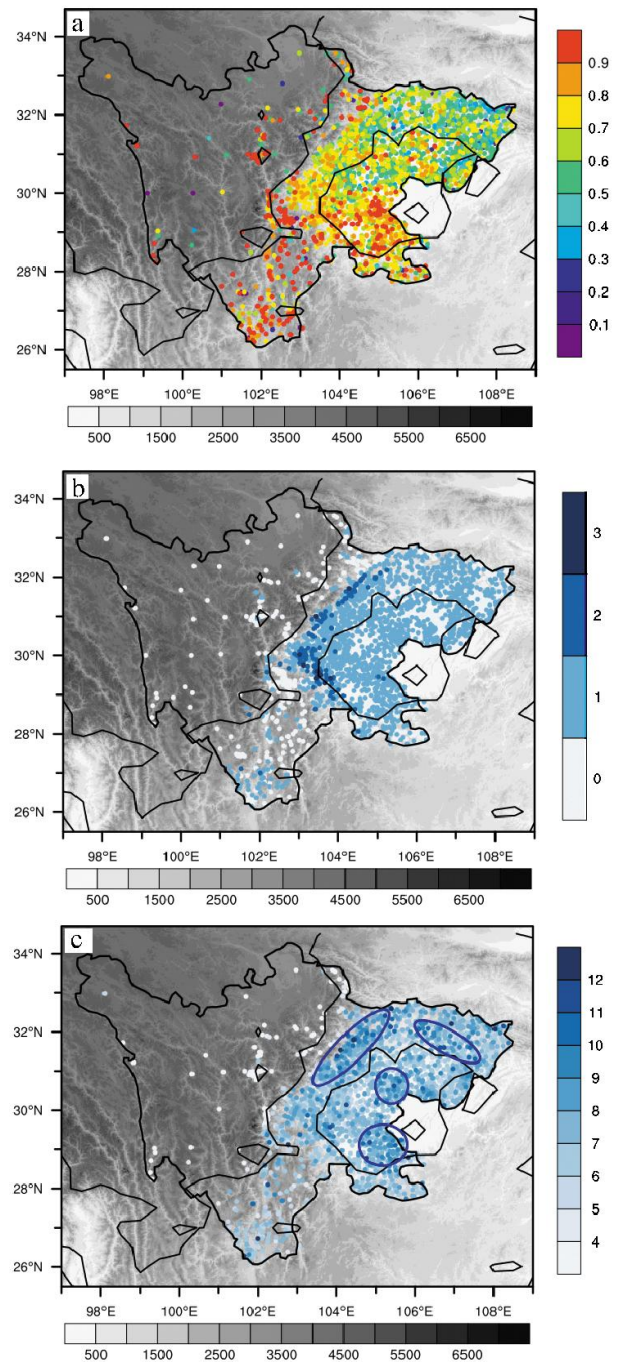


图2 2010—2019 年平均的四川暖季暴雨日夜间降水占日降水量的比例(a)、夜间暴雨频次(b,单位:次)、夜间平均暴雨强度(c,单位:mm/h)的空间分布(黑色细实线表示 500 和 3 000 m 等高线,蓝色圆框内为夜间平均暴雨强度较大的区域)

间分布来看,川西山地夜间暴雨特征是次数较多且强度大,川西南山地夜间暴雨特征为次数多,但单次降水量较小,川东北夜间暴雨特征是强度较大但频次较少。

3 四川暖季山地夜间暴雨随海拔高度的变化特征

3.1 暴雨日夜间降水占日降水量的比例随海拔高度的变化

为了认识四川暖季暴雨日夜间降水占日降水量的比例随海拔高度的变化规律,按照2 165个测站所在的海拔高度,以100 m的间隔分别计算暖季平均暴雨日夜间降水占日降水量的比例。暴雨日夜间降水占比随海拔高度的增加,以2 800 m(山地地形海拔末段)为界,表现出明显的“低—高一低”分段转折变化规律。对其进行分段线性拟合,前半段随海拔升高而增大的趋势明显,海拔每升高100 m,暴雨日夜间降水占比平均增大0.54%;后半段随海拔升高呈急剧下降的变化趋势,海拔每升高100 m,暴雨日夜间降水占比平均减小5.84%,都通过了0.01的显著性水平检验。

图3给出了四川三类山地暖季暴雨日夜间降水占日降水量的比例随海拔高度的垂直分布情况,海拔每上升100 m,川西与川东北山地平均增加0.67%和0.84%,均通过了0.05的显著性检验。仅川西南山地的暴雨日夜间降水占比与四川整体500~3 000 m趋势不同,以海拔1 600 m(山地地形海拔中段)为分界,随着海拔高度升高,先增大、后减小的“低—高一低”的起伏特征。川西南山地所表现出的与盆地整体不同的分段点与此处复杂地形与南支环流系统、水汽输送及其相互作用有关^[4],有待深入研究。

3.2 夜间暴雨频次随海拔高度的变化

四川夜间暴雨频次随海拔高度的升高呈现“低—高一低”的特征,最大值出现在海拔800 m,整体随海拔的升高呈波动下降趋势,且一元线性回归方程为: $y=-0.163h+6.669$,单位: $(100\text{ m})^{-1}$,即海拔每增加100 m,夜间暴雨频次平均减小16.3%。以800 m为界对该比例进行分段线性拟合,第一段随海拔升高而增大的趋势明显,海拔每增加100 m,频次平均增大71.5%;第二段随海拔升高而减小,两段均通过了0.01的显著性检验。

四川三类山地暖季夜间暴雨频次随海拔高度的垂直分布(图4)均随海拔升高呈下降趋势,川西山地的最大值出现在海拔800 m,海拔每增加100 m,夜间暴雨频次平均减小39%,通过了0.01的显著性检验。川西南山地频次最大值出现在500~600 m(山地地形海拔最低处),海拔每增加100 m,夜间暴雨频次平均减小34.2%,通过了0.01的显著性检验。

3.3 夜间平均暴雨强度随海拔高度的变化

四川夜间平均暴雨强度随海拔高度的变化与暴雨日夜间降水占日降水量的比例和频次的变化趋势不同,整体随海拔的升高呈波动下降的趋势,且一元线性回归方程为: $y=-0.139h+8.224$,单位: $(100\text{ m})^{-1}$,即海拔每增加100 m,夜间平均暴雨强度平均减小0.14 mm/h,通过了0.01的显著性检验。最大值出现在海拔700 m,达7.68 mm/h,海拔1 700 m还存在一个较弱峰值,达7.03 mm/h。

从四川三类山地暖季夜间平均暴雨强度随海拔高度的垂直分布情况(图5)可知,川西山地海拔每增加100 m,夜间平均暴雨强度平均减小0.25 mm/h,

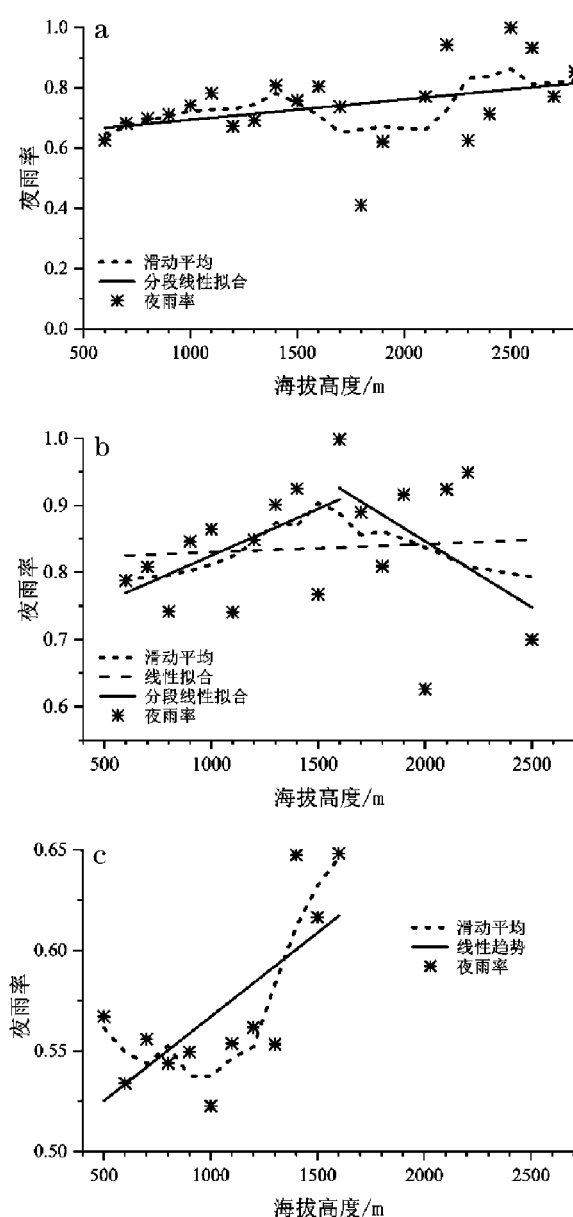


图3 2010—2019年5—9月三类山地暴雨日夜间降水占日降水量的比例随海拔高度的垂直分布(a为川西山, b为川西南山, c为川东北山)

通过了0.01的显著性检验。川西南山地夜间平均暴雨强度在海拔2 000 m达到最大值(8.32 mm/h)。川东北山地夜间平均暴雨强度整体随海拔的升高呈上升趋势。结合四川整体夜间平均暴雨强度,海拔700 m的峰值强度主要由川西山地的贡献。

3.4 夜间暴雨与海拔高度关系的空间分布特征

为了解四川暖季夜间暴雨与海拔高度关系的空间分布特征,采用地理加权回归(GWR)模型系统分析四川暖季暴雨与海拔高度的关系,图6给出了四川暖季各暴雨特征量与海拔高度的回归系数空间分布及概率密度分布(PDF)柱形图。测站的颜色对应不同回归系数的大小,正(负)回归系数表示特征量随海拔高度升高而增加(减小),而回归系数的绝对

值越大则表明特征量随海拔高度升高而增加(减小)得越多。

如图6a所示,暴雨日夜间降水占日降水量的比例随海拔升高而增加幅度较大的测站主要位于川西山地与500 m以下成都平原的交界区,其中金牛区测站回归系数最大,为 $0.52 \times 10^{-3} \text{ m}^{-1}$,反之随海拔升高而减小较多的测站主要分布在成都平原中部。观察二者之间的回归系数分布(图6b)可知,整体上负回归系数略多于正回归系数,概率密度峰值对应的回归系数范围为 $(-0.1 \sim 0) \times 10^{-3} \text{ m}^{-1}$ 。回归系数正负大值区全部集中在四川盆地中部且分布较为密集,由此可知,暴雨日夜间降水占日降水量的比例与海拔高度的正负相关性在四川盆地中部存在显著差异。

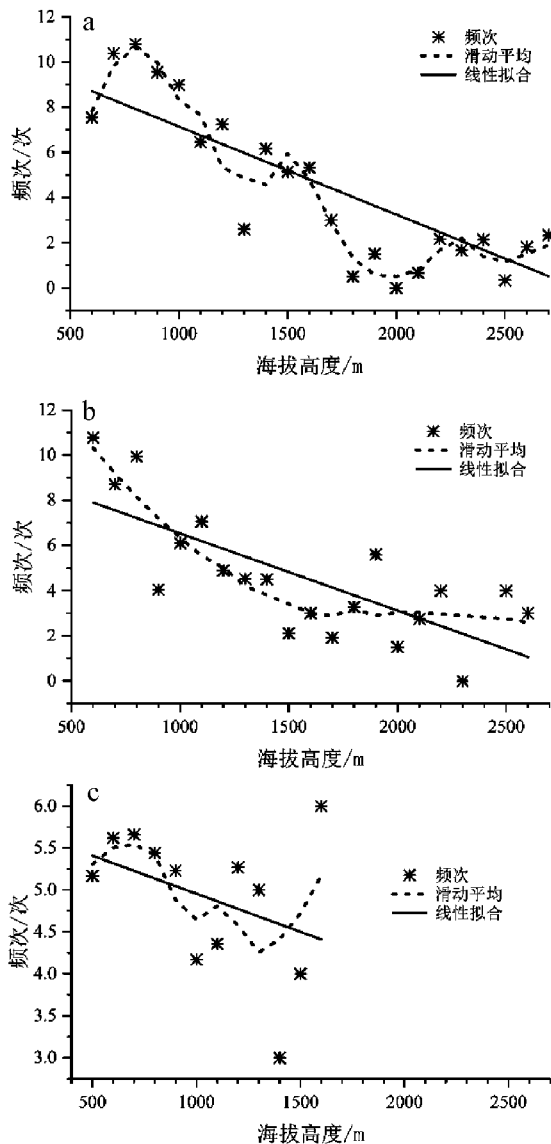


图4 2010—2019年5—9月三类山地夜间暴雨频次随海拔高度的垂直分布
(a为川西山, b为川西南山地, c为川东北山地)

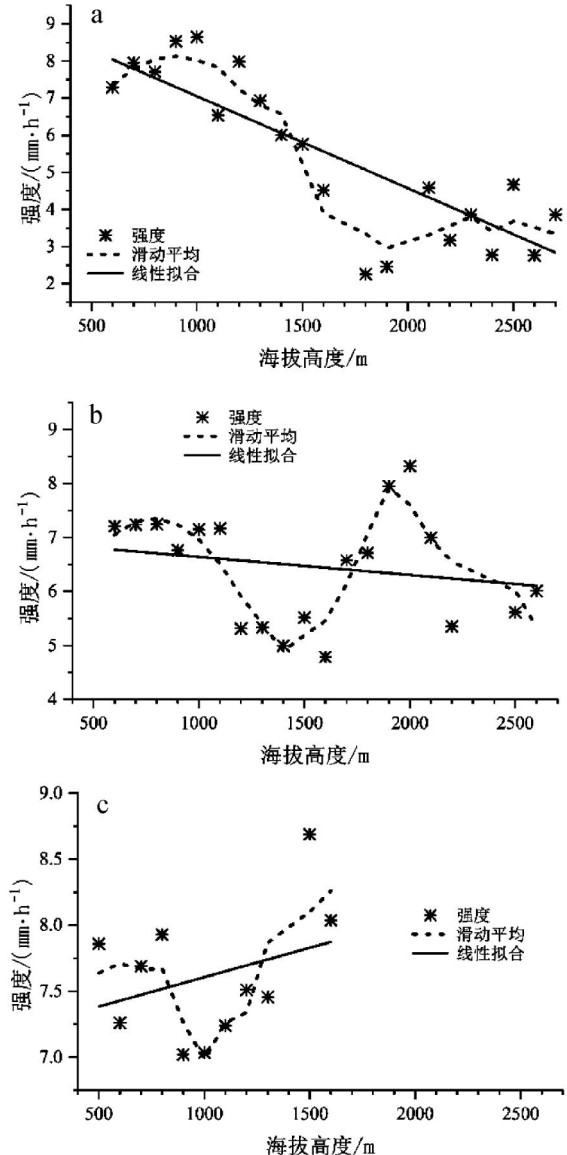


图5 2010—2019年5—9月三类山地夜间平均暴雨强度随海拔高度的垂直分布
(a为川西山, b为川西南山地, c为川东北山地)

通过观察暖季夜间暴雨频次与海拔高度的回归系数空间分布(图 6c)可知,夜间暴雨频次随海拔升高而增加幅度较大的测站主要位于川西山地一带。川西南山地的负回归系数较小,最小的为新添站,为 $-0.96 \times 10^{-2} \text{ m}^{-1}$ 。从二者之间的回归系数分布(图6d)可知,概率密度峰值范围为 $(-0.2 \sim 0) \times 10^{-2} \text{ m}^{-1}$,64%以上的测站回归系数为负值,说明四川大部分地区暖季夜间暴雨频次呈现出随海拔高度升高而减小的特点。而正回归系数的测站数量较少且概率密度分

布较广,此现象表明虽然暖季夜间暴雨频次随海拔高度升高而增加的测站较少,但增加幅度较大,这与夜间暴雨频次与海拔高度变化(图 7)的前半段趋势相符。

暖季夜间平均暴雨强度与海拔高度的回归系数空间分布如图 6e 所示,随海拔升高而增加的测站集中分布在四川山地地区以及攀西地区,其中增加较大的测站主要位于川西山地,绵阳站回归系数最大,达到 $0.48 \times 10^{-2} \text{ mm} \cdot (\text{h} \cdot \text{m})^{-1}$ 。根据二者之间的回归系

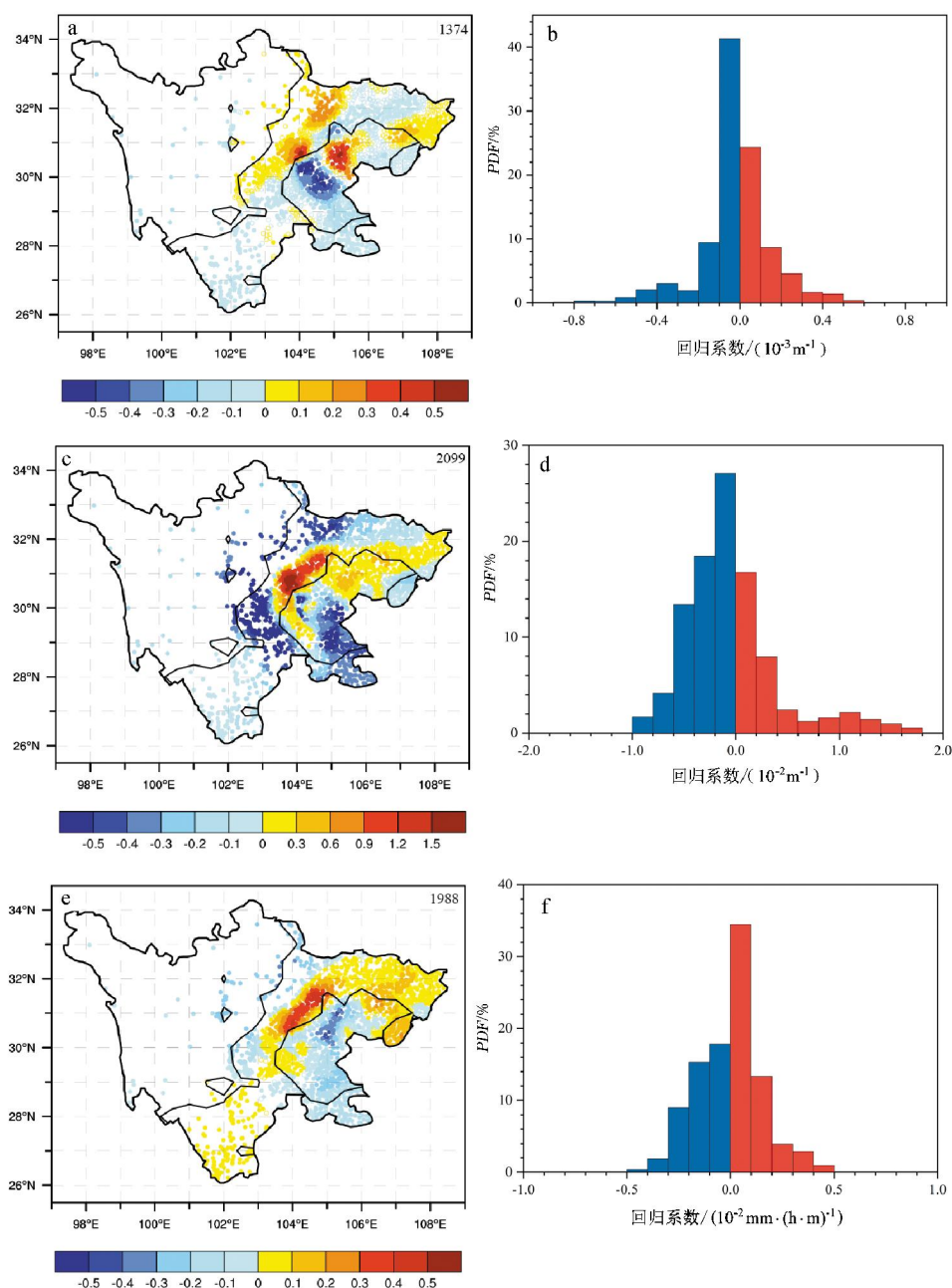


图6 四川暖季平均暴雨日夜间降水占日降水量的比例(a、b,单位: 10^{-3} m^{-1})、夜间暴雨频次(c、d,单位: 10^{-2} m^{-1})、夜间平均暴雨强度(e、f,单位: $10^{-2} \text{ mm} \cdot (\text{h} \cdot \text{m})^{-1}$)与海拔高度的回归系数空间分布(a、c、e 实心圆点表示通过 0.05 的显著性检验的测站;右上角的数字为通过显著性水平检验的测站数)及概率密度分布(b、d、f)柱状图

数分布(图 6f)可知, $(0\sim0.1) \times 10^{-2} \text{ mm} \cdot (\text{h} \cdot \text{m})^{-1}$ 出现概率最大,这类测站主要集中在攀西地区。从较密集的概率密度分布可知,暖季夜间平均暴雨强度随海拔高度的变化较弱,说明其可能受其他地形因素和水汽的影响较大。

各类夜间暴雨特征量与海拔高度关系的空间分布表明回归系数的正负、大小在四川不同地区存在显著差异。

四川山地与平原的交界区存在一个与海拔高度相关性明显变化的夜间暴雨带。图 7 选取了川西山地与川西南山地交界处 ($29^{\circ}\sim30.5^{\circ}\text{N}$, $102.5^{\circ}\sim104.6^{\circ}\text{E}$),基本沿地形梯度方向,自西向东划分了 6 个区域,观察各个区域的夜间暴雨雨量、频次和强度随地形的分布特征。其中 1 区(1 861.1 m)和 2 区(1 497 m)为山地区,3 区(932.4 m)和 4 区(498.6 m)为交界区,5 区(447.2 m)和 6 区(437.4 m)属于地形起伏度较小的平原地区。每个分区内所有测站夜间暴雨雨量、夜间暴雨频次和夜间平均暴雨强度的统计以盒须图显示。雨量和频次的峰值位于 2 区,强度峰值位于 3 区(图 7)。夜间暴雨雨量和频次在不同区域间的变化幅度明显大于夜间平均暴雨强度,且在出现峰值之后的区域,各特征量与地形高度呈正相关。

4 结论与讨论

利用四川省 2010—2019 年 2 165 个气象站逐小时降水资料,分区统计了四川暖季(5—9 月)暴雨日夜间降水占日降水量的比例、夜间暴雨频次和夜间平均暴雨强度的空间分布以及随海拔高度的变化特征,得到以下结论:

(1)四川夜雨特征明显,暴雨日夜间降水占日降水量的比例具有显著的区域性差异,呈现自南向北递减的趋势。大值区位于川西南山地、攀西地区以及海拔 500 m 以下的成都平原南部,川东北山地以及川西高原为明显的低值区。

(2)四川暴雨日夜间降水占日降水量的比例以海拔 2 800 m 为分界,前段随海拔高度的升高而增加,后段减小趋势明显。川西南山地暴雨日夜间降水占日降水量的比例以海拔 1 600 m 为分界呈先增大、后减小的“低—高—低”的垂直分布特征,与其他山地整体上升的变化趋势不同。

(3)夜间暴雨频次较多的测站沿川西与川西南山地陡峭地形呈线性分布,川西山地和川西南山地夜间暴雨频次最大值分别出现在海拔 800 m 和山地地形海拔最低处(500~600 m)。虽然暖季夜间暴雨频次随海拔高度升高而增加的测站较少,但增加幅度较大。

(4)四川夜间平均暴雨强度随海拔的升高而减

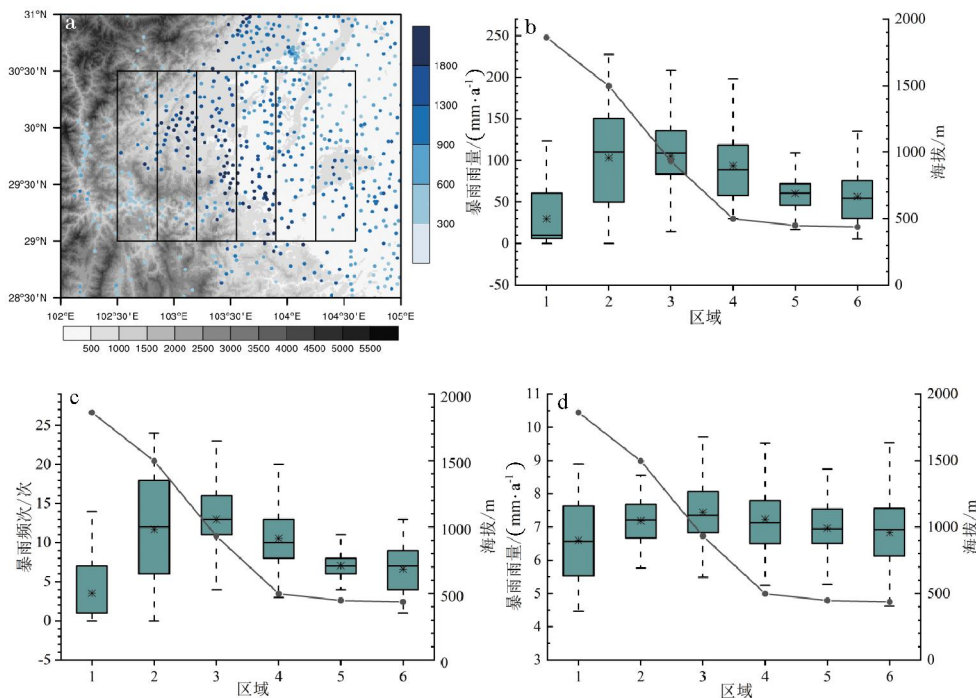


图 7 四川山地与平原交界区中段海拔(填色)、夜间暴雨雨量(实心圆)分布(a,单位: $\text{mm} \cdot \text{a}^{-1}$)以及各子区域所有测站夜间暴雨雨量(b)、夜间暴雨频次(c)和夜间平均暴雨强度(d)的盒须图统计
(盒体表示 25%~75%,盒体内横线表示中位数,星号表示均值,灰色点线为各子区域的平均海拔)

小,海拔每增加 100 m,夜间平均暴雨强度平均减小 0.14 mm/h,海拔 700 m 的峰值强度主要由川西山地贡献,夜间平均暴雨强度随海拔高度升高而增加幅度较大的测站主要位于川西山地低海拔一带。

(5)川西山地夜间暴雨次数较多且每次强度大,川西南山地夜间暴雨次数多但单次降水量较小,川东北夜间暴雨强度较大但次数较少。四川山地与平原的交界区存在一个与海拔高度相关性明显变化的夜间暴雨带,自西向东基本沿地形梯度方向划分 6 个区域,雨量和频次的峰值位于平均海拔 1 500 m 的区域,而强度峰值位于平均海拔 1 000 m 的区域。

由于四川地形、地貌的多样性与复杂性,加之对不同方向进入盆地气流的作用差异,山地夜间暴雨各特征量在水平分布和垂直变化上呈现明显差别。本文虽初步揭示了盆周山地不同区域夜间暴雨的分布特征以及与海拔高度的关系,但尚未对其形成机制进行分析。此外,山区的迎风面容易出现强降水,这种地形的影响与地形尺度以及空间分布(地形类型)有关,不能完全用海拔高度解释。因此,后续对山地夜间暴雨进行数值模拟和诊断分析,进而揭示四川山地不同区域夜间暴雨形成机理以及随海拔高度变化的物理机制是非常必要的。

参考文献:

- [1] RICKENBACH T M.Nocturnal cloud systems and the diurnal variation of clouds and rainfall in southwestern Amazonia [J].Monthly Weather Review,2004,132:1201-1219.
- [2] 宇如聪,李建.中国大陆日降水峰值时间位相的区域特征分析[J].气象学报,2016,74(1):18-30.
- [3] 沈沛丰,张耀存.四川盆地夏季降水日变化的数值模拟[J].高原气象,2011,30(4):860-868.
- [4] 肖递祥,杨康权,俞小鼎,等.四川盆地极端暴雨过程基本特征分析[J].气象,2017,43(10):1165-1175.
- [5] 马玉坤,马俊强,李菲,等.青藏高原边坡临夏地区短时强降水时空分布及海拔特征分析[J].沙漠与绿洲气象,2022,16(3):16-23.
- [6] 段春锋,曹雯,缪启龙,等.中国夏季夜雨的空间分布特征[J].自然资源学报,2013,28(11):1935-1944.
- [7] 林之光.我国的地形性夜雨[J].气象,1982,8(6):18-20.
- [8] 白莹莹,张焱,高阳华,等.四川盆地降水变化的区域差异[J].地理科学,2011,31(4):478-484.
- [9] 李强,邓承之,张勇,等.1980—2012 年 5—9 月川渝盆地小时强降水特征研究[J].气象,2017,43(9):1073-1083.
- [10] 毛冬艳,曹艳察,朱文剑,等.西南地区短时强降水的气候特征分析[J].气象,2018,44(8):1042-1050.
- [11] 董新宁,吴遥,黄安宁,等.川渝地区夏季极端降水日变化特征分析[J].大气科学,2023,47(2):259-272.
- [12] 周春花,青泉,师锐.21 世纪以来四川强对流天气特征分析[J].高原山地气象研究,2009,29(4):40-44.
- [13] 范江琳,曹萍萍,冯良敏,等.1961—2018 年四川盆地夜雨特征分析[J].高原山地气象研究,2019,39(4):24-30.
- [14] 薛羽君,白爱娟,李典.四川盆地降水日变化特征分析和个例模拟[J].地球科学进展,2012,27(8):885-894.
- [15] ZHU L M,LIU J Z,ZHU A X,et al.Spatial distribution of diurnal rainfall variation in summer over China[J].Journal of Hydrometeorology,2018(19):667-677.
- [16] 周秋雪,刘莹,冯良敏,等.2008—2012 年四川强小时雨强的时空分布特征[J].高原气象,2015,34(5):1261-1269.
- [17] 周秋雪,康岚,蒋兴文,等.四川盆地边缘山地强降水与海拔的关系[J].气象,2019,45(6):811-819.
- [18] 胡迪,李跃清.青藏高原东侧四川地区夜雨时空变化特征[J].大气科学,2015,39(1):161-179.
- [19] JIN X,WU T W,LI L.The quasi-stationary feature of nocturnal precipitation in the Sichuan Basin and the role of the Tibetan Plateau[J].Climate Dynamics,2013,41(3-4):977-994.
- [20] 曾波,王钦,伍清.近 56 年四川地区不同季节昼夜降水特征分析[J].高原山地气象研究,2018,38(3):7-16.
- [21] 李娟.四川盆地夜雨的时空变化特征及形成机理研究[D].南京:南京信息工程大学,2021.
- [22] 卢萍,宇如聪,周天军.2003 年 8 月“巴蜀夜雨”过程的模拟和分析研究[J].气象学报,2008(3):371-380.
- [23] 黄楚惠,李国平,张芳丽,等.近 10 年气候变化影响下四川山地暴雨事件的演变特征[J].暴雨灾害,2020,39(4):335-343.
- [24] 李国平,孙建华,王晓芳,等.西南山地暴雨的特征与机理[M].北京:科学出版社,2022:1-253.
- [25] 汪治桂,王兴丽,吉哲君,等.1976—2019 年甘南高原汛期不同等级降水时空变化特征[J].沙漠与绿洲气象,2022,16(2):56-63.
- [26] 张铭明,李建,甘玉婷,等.基于 GWR 模型的中国中东部降水与海拔高度关系特征分析[J].暴雨灾害,2021,40(1):1-11.
- [27] HURVICH C M,SIMONOFF J S,TSAL C.Smoothing parameter selection in non-parametric regression using an improved akaike information criterion[J].Journal of the Royal Statistical Society, Series B,1998,60:271-293.
- [28] 曾庆存,宇如聪,彭贵康,等.“雅安天漏”研究Ⅲ:特征、物理量结构及其形成机制[J].大气科学,1994(6):649-659.
- [29] LI Y Q,LI D J,SONG Y,et al.Characteristics of the precipitation over the eastern edge of the Tibetan Plateau [J].Meteorology and Atmospheric Physics,2009,106(1-2):49-56.

Spatial Distribution of Nighttime Rainstorms in Warm Season in Sichuan Mountains and the Dependence on Altitude

ZHOU Fangchi¹, LI Guoping¹, HUANG Chuhui²

(1.School of Atmospheric Sciences, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China;
2.Sichuan Meteorological Observatory, Chengdu 610072, China)

Abstract Using the hourly precipitation data of 2 165 national and regional meteorological stations in Sichuan province from 2010 to 2019, the basic characteristics of the ratio of nighttime precipitation to daily precipitation on rainstorm days, nighttime rainstorm frequency and average nighttime rainstorm intensity in the warm season (from May to September) in Sichuan were calculated by region. Through statistical methods such as trend analysis and geographically weighted regression, its spatial distribution and its relationship with altitude were analyzed. The results showed that: (1) The ratio of nighttime precipitation to daily precipitation on rainstorm days in Sichuan showed a decreasing trend from south to north, with an altitude of 2 800 m as the boundary, showing a vertical distribution characteristic of increasing first and then decreasing with the increase of altitude. The trend of southwestern Sichuan mountains was obviously different from the overall rising trend of other mountains. (2) Stations with more frequent rainstorms at night were linearly distributed along the steep terrain of western and southwestern Sichuan mountains. The frequency of nighttime rainstorm generally decreased with the increase of altitude. The maximum frequency of the western and southwestern Sichuan mountains respectively occurred at 800 m and 500 m above sea level. (3) Average nighttime rainstorm intensity in Sichuan decreased with the increase of altitude, and the high-intensity area was mainly located in the western and northeastern mountains of Sichuan. The peak intensity at the altitude of 700 m was mainly contributed by western Sichuan mountains. (4) The nighttime rainstorms in western Sichuan mountains were characterized by more frequent and strong intensity each time. There were many heavy rainstorms at night in southwestern Sichuan mountains, but the single precipitation was small. The nighttime rainstorms in northeast Sichuan mountains were strong but less frequent.

Key words nighttime rainstorm; frequency and intensity; spatial distribution; altitude; Sichuan mountains