

文章编号: 1008-2786-(2019)3-400-09

DOI:10.16089/j.cnki.1008-2786.000433

未来气候变化情景下横断山北部灾害易发区 极端降水时空特征

李沁汶^{1,2}, 王玉宽^{1*}, 徐佩¹, 逯亚峰¹

(1. 中国科学院、水利部成都山地灾害与环境研究所 山区发展中心, 成都 610041; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要: 极端降水是导致气候变化下滑坡、泥石流等山地灾害变化的重要因素。极端降水的时空特征作为气候变化下山地灾害风险的研究热点之一, 为滑坡等山地灾害危险性评价和构建山地社会安全空间奠定了重要基础。尤其对于地形复杂、灾害频发的横断山地区, 高精度的极端降水时空特征研究有利于优化国土空间, 促进当地减轻灾害风险与加强气候变化适应相结合。本研究以横断山北部岷山、邛崃山和大雪山为例, 充分考虑区域复杂地形的影响, 在全球气候模式降水数据的基础上, 采用统计降尺度的方法, 获取该区域 2010—2060 时段的逐日降水数据(空间分辨率 $1 \times 1 \text{ km}$); 并充分考虑极端降水可能对物理事件造成的影响, 构建包括绝对量指数、频度指数和强度指数的极端降水评价指标体系。研究表明, 未来气候变化下, 研究区极端降水总体呈现增加—减少—增加的趋势, 短时极端降水和持续性极端降水的空间分布相对一致。就短时极端降水而言, 大部分区域发生 50 mm 以上极端降水事件的次数较多, 而研究区中部邛崃山区甚至会发生超过 100 mm 的极端降水事件。持续性事件的分布受地形阻隔作用影响, 主要发生在大雪山高山区域和邛崃山区。结合研究区地理环境条件, 地质灾害风险在未来气候变化情景下可能增加。

关键词: 气候变化, 极端降水指标, 时空格局, 易灾地区

中图分类号: P954

文献标志码: J

极端降水是诱发地质灾害的重要影响因素^[1]。在过去的一个世纪, 全球气候变化导致极端降水事件频发, 山洪、泥石流等灾害也随之增加。根据 IPCC5 针对未来气候变化的趋势预估与分析表明, 未来气候变化的影响可能进一步加剧, 极端天气事件发生频率更高^[2]。中国西部山区, 既是气候变化的敏感区, 又是地质灾害的高发区。在气候变化背景下, 山区地质灾害可能频率更高, 范围更广, 影响更为深刻^[3-4]。为适应气候变化, 制订与完善具有针对性的防灾减灾对策, 需要利用最新的气候变化

预估结果对我国西部山区未来气候变化背景下的极端降水时空分布特征及其诱发的地质灾害风险进行分析^[5]。

通过分析历史的致灾降水特征, 划定极端降水阈值, 评估与分析其时空分布是一种评估极端降水的有效方法^[6]。针对极端降水的阈值划定, 需要根据不同的灾害类型及其地理环境进行确定^[7-8]。在气候变化背景下, 虽然已有部分研究开展了气候变化背景下极端降水的时空特征分析, 但是已往的研究以年或月降水的尺度开展评估, 不仅难以与目前

收稿日期(Received date): 2018-07-16; 改回日期(Accepted date): 2019-06-19

基金项目(Foundation item): 中国清洁发展机制基金赠款项目“四川省易灾地区应对气候变化的减灾战略”川(2013030); 国家自然科学基金项目(41701114)。[China Clean Development Mechanism Fund(2013030); National Natural Science Foundation of China(41701114)]

作者简介(Biography): 李沁汶(1987-), 女, 四川绵阳人, 博士研究生, 主要研究方向: 灾害风险管理。[LI Qinwen(1987-), female, born in Mianyang, Sichuan province, Ph. D., candidate, research on disaster risk management] E-mail: lesleyluvllee@gmail.com

* 通讯作者(Corresponding author): 王玉宽(1963-), 男, 博士, 研究员, 主要研究方向: 水文学及水资源管理。[WANG Yukuan(1963-), male, Ph. D., professor, specialized in hydrology and water resources management] E-mail: wangyukuan@imde.ac.cn

常用的极端降水划分标准对接^[9-10],而且评估结果也难以与地质灾害关联^[11]。基于日尺度的气候变化预估数据既可以直接利用当前极端降水指标体系进行评估,评估结果也能够较为直观地反映未来气候变化诱发地质灾害的风险。

四川省横断山区,位于中国第一、二阶梯的过渡带,是我国东南和西南两大季风交汇区,降水丰富,极端降水发生频率高于其他区域。同时,该区地理位置特殊,区域内地质灾害易发,且受汶川、雅安等地震的影响,为滑坡、泥石流等山地灾害提供了更敏感的孕灾环境。一旦发生极端降水,地质灾害风险也将随之增加。因此,本研究选取四川省横断山区为研究区,通过使用最新的 IPCC5 日尺度预估气候数据对横断山北部易灾地区极端降水时空变化特征进行分析。

1 数据与方法

1.1 数据来源与处理

气候情景数据使用美国 NEX-GDDP 项目的耦合多模式全球气候模式预估数据集在 RCP4.5 排放情景下的逐日平均降水。虽然该数据的气候模式时空精度较高,但对地形、季节变化等区域精细化特征表征不足^[12],需要结合地面站气象资料,使用降尺度方法以获取山地区域长时间序列且均一化分布的高时空分辨率未来气候变化降水资料^[13]。本研究使用系统偏差订正方法^[14-15]对预估数据进行处理,获取 2010—2060 年研究区逐日降水资料。进行系统偏差订正使用的历史气候数据源于四川省 50 个地面气象站点数据(图 1)。

根据偏差订正法的原理与公式,参考 Greg J. Holland 等人的研究^[16],未来气候变化日降水数据偏差订正表达式见公式 1。

$$Pr_d = \overline{M_{st,d}} + \overline{M_{prj,d}} - M_{prj,d} \quad (1)$$

式中, Pr_d 表示订正后日降水值, d 的取值为 1 ~ 365, $\overline{M_{st,d}}$ 表示历史逐日气候数据平均值, $\overline{M_{prj,d}}$ 表示气候变化降水预估值平均值。 $M_{prj,d}$ 表示气候变化降水预估值。

为获取研究区历史降水数据表面化数据,研究收集 1981—2010 年各站点逐日降水数据,利用薄盘样条插值方法(Anusplin)对站点数据进行插值,再计算各日的平均值。最后,按照上述公式对预估数

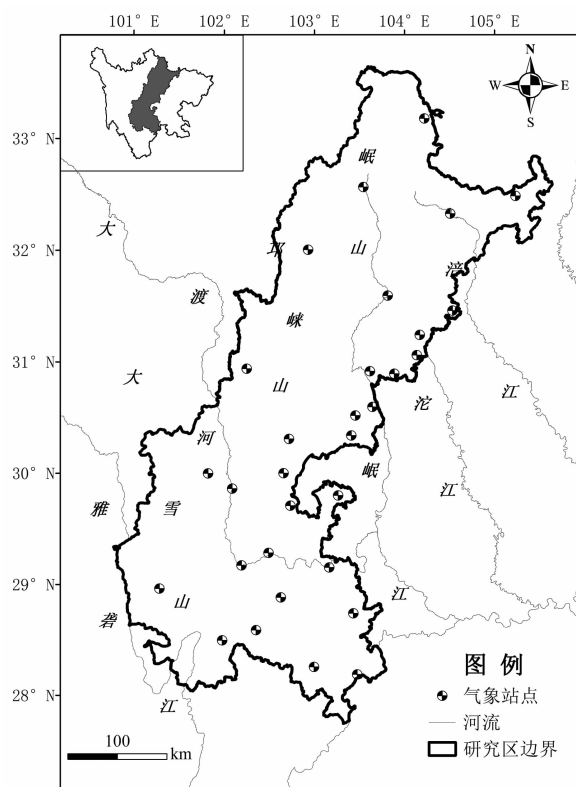


图 1 研究区地形及气象站点分布图

Fig. 1 Spatial distribution of observations in the study area

据进行订正,获取 2010—2060 年研究区逐日降水空间分布预估数据。

1.2 极端降水评估指标

参考世界气象组织气候委员会(WMO-CCI)常用的“气候变化诊断和指标”(http://etccdi.pacificclimate.org/list_27_indices.shtml),建立三类 13 个极端降水指数(表 1)。其中,绝对量指数包含 4 个基于不同阈值的降水日数(RD, Rd12, Rd50, Rd100),强度指数包含 3 个不同连续雨日的降水强度(Rx1, Rx3, Rx5),频次指数包含 6 个不同强度的极端降水发生频次(R3D, R3D50, R3D100, R5D, R5D50, R5D100)。季节划分采用气象学方法:3—5 月为春季,6—8 月为夏季,9—11 月为秋季,12 月至次年 2 月为冬季;11 月至次年 4 月非季风期,5—10 月季风期。同时考虑到研究区复杂地形对极端降水的影响,根据海拔和坡型分析极端降水的时空分布。

2 结果与分析

2.1 降水总体变化趋势

在 RCP4.5 排放情景下,未来 50 年研究区年平

均降水量总体呈减少趋势,然而降水量变化波动较大,呈现增加—减少—增加的变化趋势(图 2(a))。利用 Mann-Kendall 检验分析研究区降水突变发现未来 50 年降水量波动变化显著,波动范围 697.83 ~ 992.46 mm。2020 年以前年际波动较大,主要呈振荡增加的趋势;2020—2040 年有一个较为明显的减少趋势并在 2038 年之后转为增加;至 2060 年一直呈振荡增加的趋势。在 2010—2020 年和 2040—2060 年两个增加趋势期间存在多个突变点,表明年降水虽然呈现总体减少,但是不同年份内极端气象事件(干旱、暴雨)出现频率可能增加(图 2(b)),尤其是在 2010—2020 以及 2040—2050 的时段内,极端气象事件发生可能更为频繁。另一方面,降水距

平值的分析结果与 M-K 检验曲线结果呈现相同趋势,即增加趋势期间年际降水距平较大(图 2(c)),同样表明未来气候变化背景下研究区年降水变化较大,出现极端降水可能较大。

2.2 极端降水指数时空格局与分析

选取绝对量指数、强度指数和频次指数对极端降水空间分布特征进行分析。结果表明,研究区极端降水发生频次与分布格局差异明显。

绝对量指数分析结果表明,未来 50 年,研究区大部分区域均可能发生大于 12 mm 的日降雨,特别是四川盆地向川西高原过渡的缓坡丘陵,如龙门山—线青川、平武、北川、安县和绵竹等地,局部地区 12 mm 以上降水天数有可能超过 1000 d(图 3(a))。

表 1 极端降水指标体系

Tab. 1 Classification of the extreme precipitation indices

指标类型	极端降水指数	英文缩写	定义	单位
绝对量指数 Absolute indices	雨日日数	RD	年内降水量 ≥ 1 mm 日数	d
	侵蚀性降水日数	Rd12	年内降水量 ≥ 12 mm 日数	d
	暴雨日数	Rd50	年内降水量 ≥ 50 mm 日数	d
	大暴雨日数	Rd100	年内降水量 ≥ 100 mm 日数	d
强度指数 Intensity indices	1 日最大降水量	Rx1	年内最大降水量	mm
	3 日最大降水量	Rx3	年内连续 3 日降水最大值	mm
	5 日最大降水量	Rx5	年内连续 5 日降水最大值	mm
频次指数 Frequency indices	连续 3 日降水事件数	R3D	连续 3 日降水事件数	$d \cdot 50 a^{-1}$
	连续 3 日暴雨事件数	R3D50	连续 3 日暴雨事件数	$d \cdot 50 a^{-1}$
	连续 3 日大暴雨事件数	R3D100	连续 3 日大暴雨事件数	$d \cdot 50 a^{-1}$
	连续 5 日降水事件数	R5D	连续 5 日降水事件数	$d \cdot 50 a^{-1}$
	连续 5 日暴雨事件数	R5D50	连续 5 日暴雨事件数	$d \cdot 50 a^{-1}$
	连续 5 日大暴雨事件数	R5D100	连续 5 日大暴雨事件数	$d \cdot 50 a^{-1}$

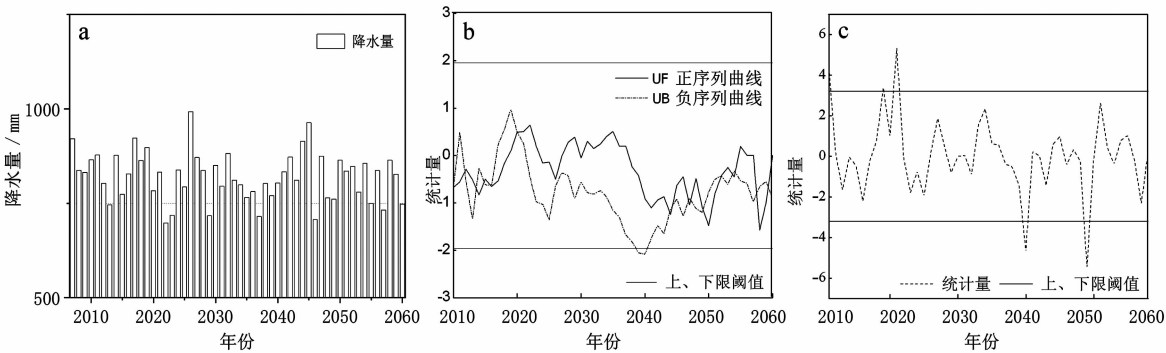


图 2 研究区总体年代际变化趋势:(a)平均降水量;(b)年降水量 M-K 检验;(c)降水量距平

Fig. 2 Inter-annual departure of extreme precipitation in study area;

(a) Regional average precipitation; (b) Precipitation Mann-Kendall test; (c) precipitation anomaly

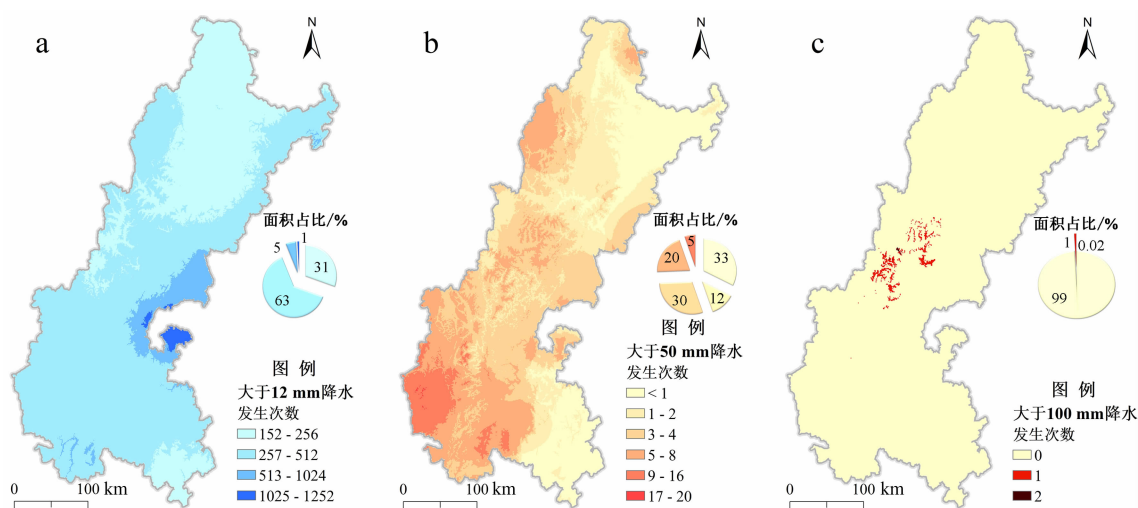


图3 极端降水绝对量指数空间分布:(a)侵蚀性降水日数;(b)暴雨日数;(c)大暴雨日数

Fig.3 Spatial distribution of the absolute indices:

(a) daily precipitation over 12 (mm); (b) daily precipitation over 50 (mm); (c) daily precipitation over 100 (mm)

发生 50 mm 以上降水的区域主要集中于岷山地区、大雪山地区和大渡河河谷等地(图 3(b))。相比发生 12 mm 以上降水的区域,发生 50 mm 以上降水的地区较少,发生频次下降明显。对于 100 mm 以上降水,除汶川、小金和宝兴区域的极高山区(海拔 ≥ 4500 m)外,大部分区域将不会发生(图 3(c))。降水绝对指数的时空分布格局的分析结果反映出研究区的降水受地形影响明显,特别是在高原向平原过渡的东面,属于东南季风的迎风坡一面,降水发生频次高,雨区集中。

强度指数分析结果表明,大部分区域均可能发生 50 mm 以上单次降水或连续降水,单日降水(图 4(a))超过 50 mm 的区域集中分布于邛崃山脉的夹金山、大相岭、折多山以西高海拔地区和大渡河河谷地区,尤其是邛崃山极高山地区,可能出现 100 mm 以上降水。Rx3(图 4(b))与 Rx5(图 4(c))分析结果在空间分布上呈现较好的一致性。从降水量上看,研究区大部分区域都可能发生累计 50 mm 以上降水,邛崃山、岷山和大雪山区域有可能发生超过 100 mm 以上降水。对不同指标的强度指数的对比与分析表明,未来气候变化背景下,研究区大部分地区发生单次高强度降水和短时连续强降水的可能较大,山地灾害风险不容忽视。

为降低气候变化预估的不确定性,以及预估单次降水可能出现的模型误差,对研究区连续多日极端降水发生频次进行分析,结果表明连续多日强降

水事件的空间格局预估结果与强度指数的空间分布预估结果较为一致。连续 3 日与 5 日均可能发生累计 50 mm 与 100 mm 极端降水。连续降水 R5D50(图 5(a))与 R3D50(图 5(b))的过程降水量相近,但 R5D50 的空间分布更能说明地形对降水的阻隔作用,而 R3D50 频次较高为大雪山高山区和盆边平原丘陵,较低为岷江和雅砻江河谷地区;R5D100(图 5(c))较高的区域增加了大渡河河谷地区;过程降水量最大的 R3D100(图 5(d))频次最高在大雪山高山区与邛崃山部分地区。历来的暴雨中心雅安地区,发生连续多日极端降水明显高于其他地区,但 R3D100 频次指数不显著,说明该区域极端降水雨日多,但日降水量较小。图 5 中频次指数均较高的大雪山和邛崃山区域应当重点关注。

2.3 山区地形和极端降水时空分布的关系

地形是影响区域降水的主要因素,研究区极端降水时空分布特征表明该区极端降水的分布受地形影响明显(图 6,图 7)。为明确气候变化和地形对降水量的作用,根据海拔梯度分别对近期和远期研究区平均降水量进行比较。如图 6 所示,海拔 1000 m 以下的区域未来降水量增加,且随海拔升高降水量增加幅度减小;海拔 1100 ~ 1500 m 的区域,随海拔升高降水量减少量急剧增加,到 2500 m 降水减少量基本不变,随后逐步增加,海拔 3500 m 时降水减少量达到最大之后迅速减少;4500 m 以上的极高山区则呈现明显的增加趋势。高海拔地区降水减

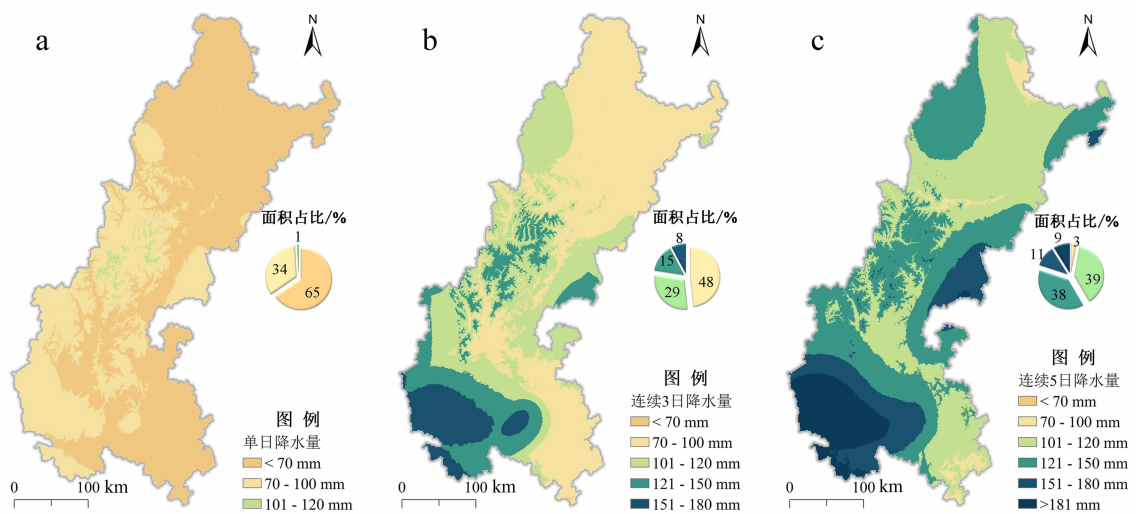


图4 极端降水强度指数空间分布:

(a)单日降水量;(b)连续3日降水量;(c)连续5日降水量

Fig.4 Spatial distribution of the intensity indices:

(a) daily precipitation; (b) cumulative precipitation in 3 days; (c) cumulative precipitation in 5 days

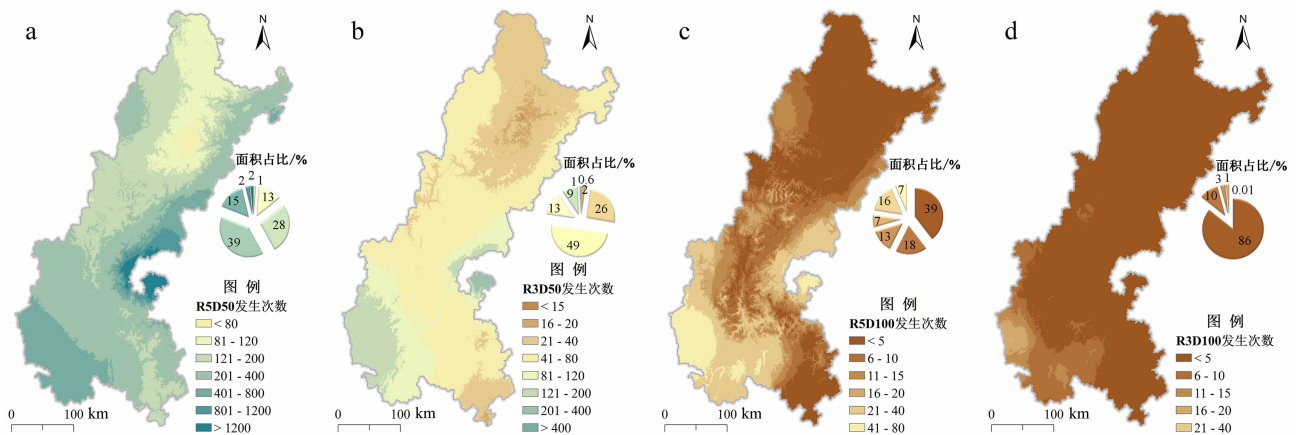


图5 极端降水频次指数空间分布:

(a)连续5日暴雨事件数;(b)连续3日暴雨事件数;(c)连续5日大暴雨事件数;(d)连续3日大暴雨事件数

Fig.5 Spatial distribution of the duration indices:

(a) the number of over 50 mm cumulative precipitation in 5 days; (b) the number of over 50 mm cumulative

precipitation in 3 days; (c) the number of over 100 mm cumulative precipitation in 5 days;

(d) the number of over 100 mm cumulative precipitation in 3 days

少量增加考虑和气候变暖相关。

对未来50年不同时段,不同坡型单次极端降水(Rd50)和连续性极端降水(R3d100)发生频次进行统计分析。结果表明,山区高频次极端降水主要集中在平缓地和陡峭斜坡,凸形坡和凹形坡均有分布;极陡坡极端降水频次较低,但凸形坡极端降水趋势较凹形坡更为显著。不同季节的分析结果发现,夏季与秋季是发生极端降水次数较多的季节,春季与

冬季较少。在未来不同的时段,极端降水发生频次与山区地形的关系并未发生变化,发生频次从大到小依次为平地-陡坡>极陡凸形坡>极陡凹形坡。研究区极端降水与山区地形的分析结果表明,从2011—2060时段,极端降水将对研究区平地与缓坡区域产生持续的影响,并且其影响在近中期(2021—2030年)以及中远期(2041—2050年),远期(2051—2060年)更为剧烈。

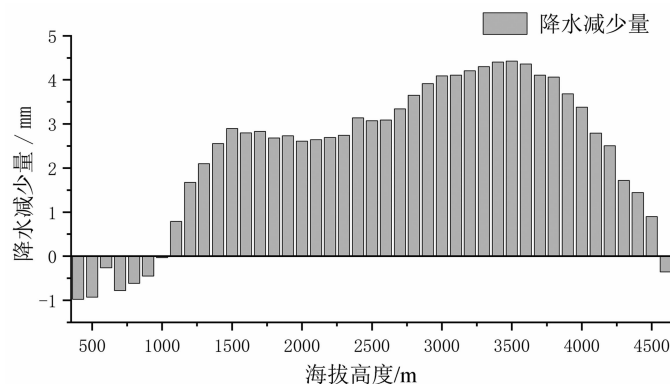


图6 气候变化和地形对极端降水的影响

Fig.6 Effects of climate change and topography on precipitation

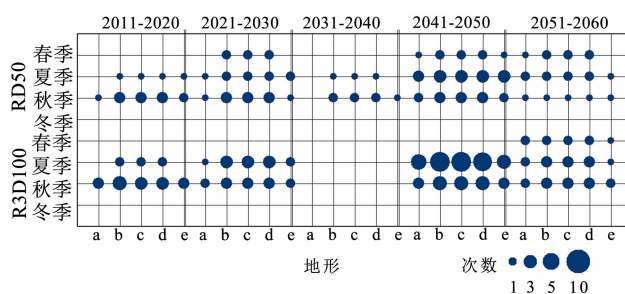


图7 未来气候变化情景下极端降水与坡型的时空变化

(a) 极陡凹形坡;(b) 陡峭凹形坡;(c) 平缓坡地;(d) 陡峭凸形坡;(e) 极陡凸形坡

Fig.7 Spatial and Temporal (seasonal and decadal) variations of extreme precipitation with slope pattern for a future climate change scenario

(a) steep concave slope;(b) concave slope ;(c) flat slope;(d) convex slope;(e) steep convex slope

3 讨论

3.1 气候变化情景下研究区极端降水时空格局成因分析

在区域尺度上,降水与下垫面的复杂程度关系密切。降水或极端降水的分布格局通常与区域的地形变化具有较高的一致性。本研究评估结果表明,四川省横断山区极端降水在空间上存在明显的分异特征。极端降水主要集中于中东部到西南部的区域内,结合地形的分析同样表明,极端降水的发生从平地到陡坡逐渐减少。形成此格局的原因在于研究区降水分别受我国东南和西南季风影响。中东部区域属东南季风迎风坡,降水量随海拔升高向西南方向逐渐减少。而西南部区域属西南季风迎风坡,同样,在地形作用下降水随西南向西北方向减少。通过与历史气象资料对比,本研究评估出的极端降水高发

区,与实际气象监测结果保持一致^[17]。可以认为,未来气候变化情景下,该区域极端降水的分布依然是地形与气候变化共同作用的结果。

对极端降水在不同时段的变化进行研究发现,相比中远期(2031—2040年)的气候变化,近期(2011—2030年)极端降水发生频次更高,这与大多数研究的评估结果相一致^[18],形成的原因可能与气候的周期性变化有关^[19-20]。对于气候变化下极端降水产生的影响及其适应对策而言,近期气候变化的影响可能更值得关注。

3.2 极端降水诱发地质灾害风险分析

山区地质灾害是极端天气与孕灾环境共同作用的结果。近年来,受汶川、雅安等地震影响,研究区滑坡、泥石流等地质灾害具备更加敏感的孕灾环境,同时诱发研究区发山地灾害极端降水的临界阈值进一步降低^[21-22]。根据研究区泥石流灾害发生的临界雨量阈值研究结果表明,汶川地区极端降水日降

水量阈值为 46 mm^[23],而贡嘎山磨西河流域日降水阈值为 20 mm^[24]。未来气候变化背景下研究区极端降水的结果分析表明,大部分区域极端降水强度呈现增大趋势,且降水量超过或达到 20 mm,并且出现连续 3 日或 5 日持续性降水可能较大,降水量超过 50 mm。持续降水的发生不仅可能降低极端降水阈值,也会使如泥石流灾害的孕灾环境加速发育^[25]。从地形位置上分析,陡峭地形区往往也是地质灾害易发区^[26-27]。结合极端降水发生的时空格局分析,受未来气候变化的影响,研究区内发生地质灾害风险进一步增加,尤其是可能出现多次高强度极端降水的邛崃山、岷山和大雪山区,需要针对性的制订适应气候变化的地质灾害应对策略。

相对年或月尺度评估极端降水影响的研究,基于日尺度的评估能够表征气候变化影响的过程性、持续性和区域性。虽然从极端降水发生的时间与空间的分布与年或月尺度极端降水的的结果较为一致^[17, 20, 28],但是由于气候变化的不确定性,更为详细以及考虑过程的指标有可能在一定程度上降低气候变化的不确定性,使得评估结果相对合理。

4 结论

本文基于逐日尺度气候变化预估数据,通过统计降尺度技术,并构建极端降水指标体系,对未来横断山北部地质灾害易发区的极端降水时空格局及其致灾风险进行分析。主要研究结论如下:

(1)在 2010—2060 年,研究区极端降水总体呈现增加—减少—增加的趋势。极端降水事件的年代际波动显著,尤以 2010—2020 及 2040—2050 年间突变最为显著。研究区地质环境复杂,极端降水极易诱发洪涝、崩塌、泥石流等山地灾害,因此当地目前面临的地质环境监测和灾害风险防治任务尤为紧迫。

(2)极端降水绝对量、强度及频次指数的评估结果表明,大部分区域可能会发生多次超过 50 mm 的极端降水,研究区中部的邛崃山区域,极端降水指数明显高于其他区域。研究区西南的大雪山区,短时和长历时极端降水的强度均较大,显著高于研究区东部平原向山地的过渡地带。极端降水的这种空间分布可能是区域地形与气候变化共同作用的结果。

(3)通过分析极端降水出现区域的局地地理环境,气候变化影响降水极端化可能增加地质灾害风险。研究区内极端降水高发区包括岷山、邛崃山和大雪山区的陡峭坡地,降水极端化意味着未来致灾降水量阈值可能更低,灾害风险将会进一步增加。

参考文献 (References)

- [1] GUZZETTI F, PERUCCACCI S, ROSSI M, et al. The rainfall intensity-duration control of shallow landslides and debris flows: an update[J]. *Landslides*, 2008, **5**(1): 3–17.
- [2] ALLAN R P, SODEN B J. Atmospheric warming and the amplification of precipitation extremes[J]. *Science*, 2008, **321**(5895): 1481.
- [3] FIELD C B, BARROS V R, MACH K, et al. Climate change 2014: impacts, adaptation, and vulnerability[J]. Contribution of Working Group II to the Third Assessment Report, 2014, **19**(2): 81–111.
- [4] AINUDDIN S, ROUTRAY J K, AINUDDIN S. People's risk perception in earthquake prone Quetta city of Baluchistan[J]. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 2014, **7**: 165–175.
- [5] 高杨,李滨,冯振,等. 全球气候变化与地质灾害响应分析[J]. *地质力学学报*, 2017, **23**(1): 65–77. [GAO Yang, LI Bin, FENG Zhen, et al. Global climate change and geological disaster response analysis[J]. *Journal of Geomechanics*, 2017, **23**(1): 65–77]
- [6] 迟潇潇,尹占娥,王轩,等. 我国极端降水阈值确定方法的对比研究[J]. *灾害学*, 2015, **30**(3): 186–190. [CHI Xiaoxiao, YIN Zhan'e, WANG Xuan, et al. A comparison of methods for benchmarking the threshold of daily precipitation extremes in China[J]. *Journal of Catastrophology*, 2015, **30**(3): 186–190]
- [7] 韦方强,徐晶,江玉红,等. 不同时空尺度的泥石流预报技术体系[J]. *山地学报*, 2007, **25**(5): 616–621. [WEI Fangqiang, XU Jing, JIANG Yuhong, et al. The System of debris flow prediction with different time and space scales[J]. *Mountain Research*, 2007, **25**(5): 616–621]
- [8] 铁永波,唐川. 汶川县城泥石流灾害风险评价研究[J]. *灾害学*, 2010, **25**(04): 43–47. [TIE Yongbo, TANG Chuan. Assessment of Wenchuan debris-flow risk[J]. *Journal of Catastrophology*, 2010, **25**(04): 43–47]
- [9] ZHAI Panmao, ZHANG Xuebin, WAN Hui, et al. Trends in total precipitation and frequency of daily precipitation extremes over China[J]. *Journal of Climate*, 2005, **18**(18): 1096–1108.
- [10] RHODES R I, SHAFFREY C, GRAY S L. Can reanalyses represent extreme precipitation over England and Wales? [J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2015, **141**(689): 1114–1120.
- [11] 尹占娥,田鹏飞,迟潇潇. 基于情景的 1951—2011 年中国极端

- 降水风险评估[J]. 地理学报, 2018, **73**(3): 405–413. [YIN Zhan'e, TIAN Pengfei, CHI Xiaoxiao. Multi-scenario-based risk analysis of precipitation extremes in China during the past 60 years (1951–2011) [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2018, **73**(3): 405–413]
- [12] 江志红, 陈威霖, 宋洁, 等. 7个IPCC AR4模式对中国地区极端降水指数模拟能力的评估及其未来情景预估[J]. 大气科学, 2009, **33**(1): 109–120. [JIANG Zhihong, CHEN Weilin, SONG Jie, et al. Projection and evaluation of the precipitation extremes indices over China based on seven IPCC AR4 coupled climate models [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2009, **33**(1): 109–120]
- [13] 周莉, 兰明才, 蔡荣辉, 等. 21世纪前期长江中下游流域极端降水预估及不确定性分析[J]. 气象学报, 2018, **76**(1): 47–61. [ZHOU Li, LAN Mingcai, CAI Ronghui, et al. Projection and uncertainties of extreme precipitation over the Yangtze River valley in the early 21st century [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2018, **76**(1): 47–61]
- [14] PIANI C, HAERTER J O, COPPOLA E. Statistical bias correction for daily precipitation in regional climate models over Europe [J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 2010, **99**(1): 187–192.
- [15] THRASHER B, MAURER E, MCKELLAR C, et al. Technical Note: bias correcting climate model simulated daily temperature extremes with quantile mapping [J]. *Hydrology & Earth System Sciences*, 2012, **16**(9): 3309–3314.
- [16] HOLLAND G, DONE J, BRUYERE C, et al. Model investigations of the effects of climate variability and change on future Gulf of Mexico tropical cyclone activity [C]//In: Offshore Technology Conference [C]. Houston: Offshore Technology Conference, 2010.
- [17] 胡豪然, 毛晓亮, 梁玲. 近50年四川盆地汛期极端降水事件的时空演变[J]. 地理学报, 2009, **64**(3): 278–288. [HU Haoran, MAO Xiaoliang, LIANG Ling. Temporal and spatial variations of extreme precipitation events of flood season over Sichuan Basin in last 50 years [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2009, **64**(3): 278–288]
- [18] 周长艳, 岑思弦, 李跃清, 等. 四川省近50年降水的变化特征及影响[J]. 地理学报, 2011, **66**(5): 619–630. [ZHOU Changyan, CEN Sixuan, LI Yueqing, et al. Precipitation variation and its impacts in Sichuan in the last 50 years [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2011, **66**(5): 619–630]
- [19] YUAN Zhe, YANG Zhiyong, YAN Denghua, et al. Historical changes and future projection of extreme precipitation in China [J]. *Theoretical & Applied Climatology*, 2015: 1–15.
- [20] 何干皓, 李龙国, 刘铁刚, 等. 岷江流域降水极值概率分布研究[J]. 何干皓, 李龙国, 刘铁刚, 等. 岷江流域降水极值概率分布研究[J]. 工程科学与技术, 2017, **49**(1): 78–85. [HE Ganhao, LI Longguo, LIU Tiegang, et al. Research on probability distribution of precipitation extremes in the Minjiang River Basin [J]. *Advanced Engineering Sciences*, 2017, **49**(1): 78–85]
- [21] 唐川. 汶川地震区暴雨滑坡泥石流活动趋势预测[J]. 山地学报, 2010, **28**(3): 341–349. [TANG Chuan. Activity tendency prediction of rainfall induced landslides and debris flows in the Wenchuan Earthquake areas [J]. *Mountain Research*, 2010, **28**(3): 341–349]
- [22] XU Mengzhen, WANG Zhaoyin, QI Lijian, et al. Disaster chains initiated by the Wenchuan earthquake [J]. *Journal of Mountain Science*, 2012, **65**(4): 975–985.
- [23] GUO Xiaojun, CUI Peng, LI Yong, et al. Intensity-duration threshold of rainfall-triggered debris flows in the Wenchuan earthquake affected area, China [J]. *Geomorphology*, 2016, **253**: 208–216.
- [24] 倪化勇, 李宗亮, 巴仁基, 等. 贡嘎山东坡磨西河流域泥石流暴发的临界雨量值初探[J]. 山地学报, 2007, **25**(6): 721–728. [NI Huayong, LI Zongliang, BA Renji, et al. Preliminary study on the critical rainfall condition of debris flows along Moxi River in the east slopes of the Mount Gongga [J]. *Mountain Research*, 2007, **25**(6): 721–728]
- [25] 崔鹏, 庄建琦, 陈兴长, 等. 汶川地震区震后泥石流活动特征与防治对策[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2010, **42**(5): 10–19. [CUI Peng, ZHUANG Jianqi, CHEN Xingchang, et al. Characteristics and countermeasures of debris flow in Wenchuan area after the Earthquake [J]. *Journal of Sichuan University (Engineering Sciences Edition)*, 2010, **42**(5): 10–19]
- [26] DOWLING C A, SANTIPPAUL M. Debris flows and their toll on human life: a global analysis of debris-flow fatalities from 1950 to 2011 [J]. *Natural Hazards*, 2014, **71**(1): 203–227.
- [27] 陈勇, 谭燕, 茆长宝. 山地自然灾害、风险管理与避灾扶贫移民搬迁[J]. 灾害学, 2013, **28**(2): 136–142. [CHEN Yong, TAN Yan, MAO Changbao. Mountain hazards, risk management, disaster-preventive and poverty-alleviating resettlement [J]. *Journal of Catastrophology*, 2013, **28**(2): 136–142]
- [28] 杜华明, 贺胜英. 岷江流域降水特征与旱涝灾害趋势分析[J]. 水土保持研究, 2015, **22**(1): 153–157. [DU Huaming, HE Shengying. The analysis on characteristics of precipitation and trends in drought and flood disasters in Minjiang River Basin [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2015, **22**(1): 153–157]

Changes of Extreme Precipitation Patterns for Disaster Prone Areas in the North of the Hengduan Mountains under Climate Change

LI Qinwen^{1,2}, WANG Yukuan^{1*}, XU Pei¹, LU Yafeng¹

(1. *Research Center of Mountain Development, Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China;* 2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

Abstract: Extreme precipitation may lead to various mountain hazards. Hence mountainous regions are faced with more uncertainties posed by a changing climate. In order to reduce the adverse impact of extreme precipitation and relevant mountain hazards, it is of vital importance to characterize the spatial-temporal distribution of extreme precipitation for the future. Many studies have analyzed the holistic distribution for future climate scenarios. However, there is still a lack of detailed information to depict daily extreme precipitation, which establishes the foundation for hazard dynamic analysis in specific locations. In this study, the recently released climate projection data were statistically downscaled by historical data from 50 local meteorology stations in and around the study area over the period 1981 – 2010. Based on the downscaled NEX-GDDP daily precipitation over the period 2010 – 2060, spatiotemporal patterns of extreme precipitation from three perspectives including intensity, frequency and duration had been analyzed for the disaster-prone area in the north Hengduan Mountains with spatial resolution 1×1 km. Results showed that the total precipitation tended to fluctuate greatly and regional variation existed in the study area. It's worth noting that both the frequency and spatial range of extreme precipitation presented a significant increasing trend in the RCP 4.5 scenario. Regarding duration index, the spatial patterns of short-term extreme precipitation were consistent with that of long-duration extreme precipitation except for the Min Mountains. For short-term extreme precipitation, rainstorms (≥ 50 mm) occurred more frequently in most of the study area while heavy rainstorms (≥ 100 mm) were projected to occur mainly in the Qionglai Mountains. In terms of long-duration extreme precipitation, the occurrence frequency was higher in alpine regions of the Qionglai Mountains and the Daxue Mountains, as well as the transition zones from mountain to plain, which may be caused by the passing – obstructing effect of terrain complexity. Moreover, extreme precipitations on the link with the distribution of local slope factors showed higher frequency in steep convex slope than concave slope, which was also confirming the similar local topography effect.

Key words: climate change; extreme precipitation index; spatial-temporal distribution; disaster-prone areas