

doi: 10.13866/j.azr.2017.06.05

2008—2014 年新疆夏季逐时雨强时空特征 及其影响因素^①

陈 荣 , 张明军 , 王圣杰 , 车彦军 , 王 杰 , 杜铭霞 , 杨 森

(西北师范大学地理与环境科学学院, 甘肃 兰州 730070)

摘 要: 基于中国自动气象站与 CMORPH 降水产品融合的逐时降水 $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ 网格数据集以及各概率下 5 min 雨强资料, 评估了该套格点数据集在新疆的可信度, 利用概率分布、变差系数与相关分析等方法, 分析了新疆地区夏季逐时雨强的时空分布特征, 并结合 NCEP/NCAR 2008—2014 年再分析格点资料对新疆逐时雨强变化的影响因素进行了分析。结果表明: ① 插值后的格点雨强空间分布与概率雨强空间分布基本一致, 格点雨强资料具有较好的可信度。② 全区各类逐时雨强发生频次及极值年际波动显著, 降水有极端化趋势; 全区逐时雨强发生频次空间分布不均衡, 逐时雨强发生频次北疆大于南疆, 西部大于东部; 而极值分布呈现东西分布的差异, 高值区主要集中在西部地区。③ 北疆白天的逐时雨强大于夜间的, 南疆则相反; 雨强日变化变差系数也是北疆较小, 南疆较大。④ 逐时雨强的空间分布与降水量的大致相似, 其分布差异的根本原因不在于水汽的多少, 而在于促成降水的动力条件及其他因素的差异。

关键词: 逐时雨强; 变差系数; 概率雨强; 时空分布; 新疆

气候变化可导致水文循环的剧烈改变, 从而对一系列气象水文过程造成极大影响, 主要表现在降水、蒸发、地表径流等过程的时空变化上⁽¹⁻²⁾。近年来, 极端降水事件引发的一系列自然灾害备受关注⁽³⁾, 其中暴雨、洪涝、滑坡等灾害不仅与降雨的持续时间有关, 还与降雨强度有密切联系。目前已有学者使用小时降水资料对降水日变化进行了研究⁽⁴⁻⁶⁾, 但对逐小时降水强度和降水频率的变化特征没有深入研究。然而, 受大气环流和地形的影响, 在不同地形的过渡地带, 容易发生强度大、时间集中的大雨或暴雨⁽⁷⁻¹¹⁾, 给人民的生命财产安全带来极大的危害。因此, 逐小时降雨强度研究工作的开展具有重要的现实意义。

短时的极强降雨是造成洪涝、泥石流的主要原因, 所以, 在防洪抗灾的实践中, 防灾部门迫切要求了解逐时雨强的时空分布特征以及最大雨强分布区域。然而, 目前国内外对雨强的研究大多集中在雨强的测定和预估上⁽¹²⁻¹⁴⁾, 对雨强空间分布差异和影响因素的研究较少。Huang 等⁽¹⁵⁾ 通过模拟降雨强

度对不同下垫面和坡度下渗的影响, 得出随着降雨强度的增加, 土壤蓄水力先增加后减小; Wei 等⁽¹⁶⁾ 研究了降雨强度对径流量的影响, 发现降雨强度增加 1.8 倍, 持续时间减少 16%, 而降水量增加了 13.96 倍; 姚莉等⁽¹⁷⁾ 在分析中国中东部逐时雨强时空分布时指出, 华北平原与东南沿海是雨强极大值出现最多的区域。近几年, 逐时雨强已作为重要的指标应用在降水变化的研究中^(6, 10, 17), 此外, 在强降水监测和预报工作中也需要把逐时雨强作为一项重要的影响因子。

新疆地处中国西北内陆, 生态环境脆弱。近年来, 中国西北地区气候出现由暖干向暖湿转变的趋势, 而新疆最为突出⁽¹⁸⁻¹⁹⁾, 其降水变化主要由夏半年极端降雨量和频次增加所致⁽²⁰⁻²¹⁾。20 世纪 80 年代后新疆呈现由旱转涝的趋势⁽²²⁾, 尤其是新疆“96·7”和“7·17”特大暴雨事件。为此, 深入分析新疆逐时雨强时空变化特征, 对于全面了解洪水灾害的易发区域、发展趋势, 建立防灾减灾系统具有十分重要的意义。

① 收稿日期: 2016-12-15; 修订日期: 2017-06-02

基金项目: 国家自然科学基金项目(41161012); 国家重大科学研究计划项目(2013CBA01801); 西北师范大学青年教师科研能力提升计划项目(NWNU-LKQN-15-8); 中国沙漠气象科学研究基金(Sqj2016001) 共同资助

作者简介: 陈荣(1991-), 男, 硕士, 主要从事全球变化与可持续发展方面的研究。E-mail: Recchen1991@163.com

通讯作者: 张明军。E-mail: mjzhang2004@163.com

由于以往研究中使用的降水资料为地面观测资料,虽然地面观测资料是目前最准确表征观测点降水量的数据源,但对于站点稀少和地形复杂地区的覆盖程度有限^[23],会造成精度较低、局地误差增加的缺陷,因而本文使用中国气象局国家气象信息中心发布的中国自动气象站与 CMORPH 降水产品融合的逐时降水 $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ 网格数据集,从逐时雨强发生频次、日变化变差系数等角度分析了新疆逐时雨强的时空分布特征,旨在认识新疆逐时雨强分布是否与降水量分布一致,以及是否有明显的区域差异,这对新疆洪涝灾害的防治和退化生态系统植被的保护具有重要指导意义。

1 研究区概况

新疆位于亚欧大陆内部,地理位置为 $34^\circ 15' \sim 48^\circ 10' \text{N}$, $73^\circ 20' \sim 96^\circ 25' \text{E}$,地貌类型以山地和盆地为主。境内蒸发量大,降水稀少,年均降水量仅为 146 mm,大部分区域年降水量变差系数介于 0.2 ~ 0.7^[24],且降水时空分布不均,北疆较南疆丰富,西部较东部丰富,山区较盆地丰富。境内冰川储蓄量丰富,占中国冰川总储量的 46.9%,河川以冰雪融水为主要补给,河川年径流量为 $8.79 \times 10^{10} \text{ m}^3$,湖泊面积超过 $1.29 \times 10^4 \text{ km}^2$ ^[25]。

为了能更清晰地反映新疆降雨强度的区域性差异特征,本文依据新疆地貌和气候特征并参考相关研究的分区结果,将新疆分为 7 个亚区(图 1),分别是北部的阿尔泰山(I)、准噶尔西部山地(II)和准噶尔盆地(III),中部的天山山地(IV)和吐鲁番—哈密盆地(V)(简称吐哈盆地),南部的塔里木盆地(VI)和昆仑山(VII)^[26-28]。北部山脉众多,但多为东西走向,且南北间山体不连续,山势较低,有利于

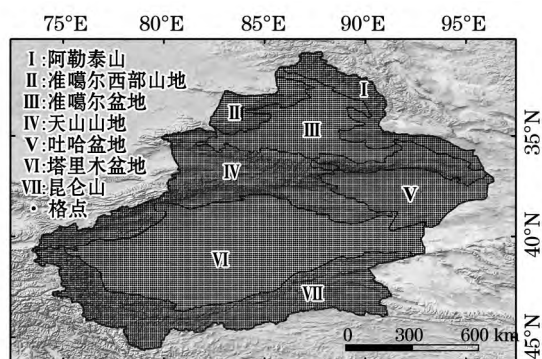


图 1 新疆格点分布示意图

Fig. 1 Distribution of gridded boxes in Xinjiang

西风气流进入准噶尔盆地,形成降水;中部的天山呈东西走向,东西绵延 1 700 km,山区平均海拔 4 000 m,降水较多,山间的吐哈盆地海拔最低,降水偏少;南部的塔里木盆地地处季风边缘,三面高山环绕,水汽输送复杂,降水较少;昆仑山位于新疆最南端,北部与塔里木盆地之间地势落差极大,南部山势和缓。

2 数据与方法

2.1 数据来源

本文所用中国气象局国家气象信息中心发布的中国自动站与 CMORPH 降水产品融合的逐时降水量 0.1° 网格数据集(1.0 版)(<http://cdc.cma.gov.cn>),时间序列为 2008—2014 年的 6 月 1 日 0 时至 8 月 31 日 23 时,空间分辨率为 $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ 。该数据集包含卫星和地面两个降水数据源:① 卫星反演的降水数据源自美国环境预测中心的实时卫星反演的 CMORPH 降水资料,时间分辨率是 30 min,空间分辨率是 8 km;② 地面观测资料选用全国 30 000 多个自动气象观测站的逐时降水量数据。已有许多质量和评估性工作^[29-30]表明该融合降水数据集质量较好,精度较高。从使用该数据集做出的研究成果^[6,23,31]来看,不仅准确抓住了降水的空间分布,且降水强度与地面观测相近,较好的保留了卫星反演降水的空间分布信息。此外,本文使用相关文献提供的各概率下 5 min 雨强资料^[32],对该数据集的可信度进行了验证,并利用 NCEP/NCAR 2008—2014 年再分析格点资料,对新疆逐时雨强变化的影响因素进行了分析。

2.2 研究方法

雨强又称降雨强度,指单位时间的降雨量。分为 5 min 雨强、10 min 雨强、1 h 雨强等,通常以 $\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 为单位。本文参照我国常用的降水等级划分标准^[33],将 1 h 降雨量 $\geq 0.1 \text{ mm}$ 的时次被判定为有降水发生,并根据 1 h 雨量的不同将新疆降雨强度分为三个等级: $\geq 0.1 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 、 $\geq 1 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 、 $\geq 4 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 。文中通过平均逐时雨强、各级雨强频次和极值等指标,利用概率分布、变差系数和相关分析等方法,对新疆各亚区各级逐时雨强的发生频次、日变化特征进行了多角度的探讨,并揭示了新疆地区逐时雨强的时空分布特征。

2.2.1 雨强日变化的变差系数 均方差是描述变量围绕平均值变动幅度的常用统计量,但用于空间

比较,则略显不足。为了消除变量本身量级的影响,通常取相对值作为比较的参数,即变差系数的大小。定义变差系数⁽³⁴⁾为:

$$C = \frac{S_x}{x_m} \quad (1)$$

式中: C 为雨强年平均频次的日变化变差系数; S_x 为雨强年平均出现频次的均方差; x_m 为雨强年平均出现频次的多年平均值。

2.2.2 概率雨强的计算 根据气候统计理论,假定降水随机变量 X 有 n 项记录,构成一样本。将记录从大到小排序,记为 $X_1, X_2, \dots, X_3, X_j, \dots, X_n$ 。样本中记录大于等于 X_j 的有 j 项,则降水随机变量大于等于 X_j 经验频率为:

$$P = P(X \geq X_j) = \frac{j}{n+1} \quad (2)$$

将各月 5 min 雨强记录从大到小排序,一个月中 5 min 的总样本数为:

$$IT_5 = \frac{1}{5} 440 t \quad (3)$$

式中: IT_5 为一个月中 5 min 总样本数; t 为该月天数。

在某概率(DAI)下的序号为:

$$IPQ_{DAI} = \text{int}(IT_5 \times DAI) + 1 \quad (4)$$

式中: int 表示取整(舍尾数); DAI 为概率; IPQ 为概率(DAI)下的序号。

序号下的 5 min 降水量即为该概率下的雨强。

3 结果分析

3.1 格点雨强资料可信度初步分析

对于连续 5 min 雨强的时间序列,按 5 min 雨强

值由大到小排列,其顺序位置的百分率为 a 处的 5 min 雨强,记为 x ,也就是说 5 min 雨强值大于等于 x 的概率是 a 。从概率为 0.1% 时间的雨强等值线分布(图 2b)可以看出,北疆雨强大于南疆,山区雨强大于盆地,其高值区分布在天山、阿尔泰山和准噶尔西部山地,低值区分布在塔里木盆地和吐哈盆地;而插值后的格点雨强的空间分布也是北疆大于南疆(图 2a),其高值区和低值区分布与概率雨强的分布基本一致,只是在部分小区域内存在差异,这可能是由于降水受下垫面因素影响较大,特别是在复杂地形控制下即使面积不大的区域内也可能出现明显的降水差异。新疆的站点稀疏,且分布不均,部分盆地地区的短时强降水被干旱背景所掩盖,而该套格点数据集可以弥补站点稀疏的缺陷,能有效利用地面观测和卫星反演降水各自的优势,在降水量值和空间上更为合理。因此,本文使用 $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ 网格数据集对新疆逐时雨强研究具有较好的可信度。

3.2 逐时雨强时空分布特征

3.2.1 逐时雨强发生频次及极值的时间分布 本文参照相关研究⁽³²⁾采用大于等于一定界值的雨强分类方法进行统计和分析处理。某格点某年某日出现 $0.1 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 以上的降水即判定该点出现 1 次降水,若同一天另外一时次又出现 $0.1 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 以上的降水,则频次依次累加,分别统计了新疆 17 548 个格点每年出现各类雨强的频次及极值。

从不同分区逐时雨强发生频次和极值的年变化(图 3)可以看出,新疆 3 类逐时雨强发生频次及极值年际波动显著,降水有极端化趋势。阿尔泰山、准噶尔西部山地、准噶尔盆地和天山山地逐时雨强发生频次在 2008—2013 年呈增加趋势,在 2013 年达到最大值;塔里木盆地、吐哈盆地和昆仑山逐时雨强

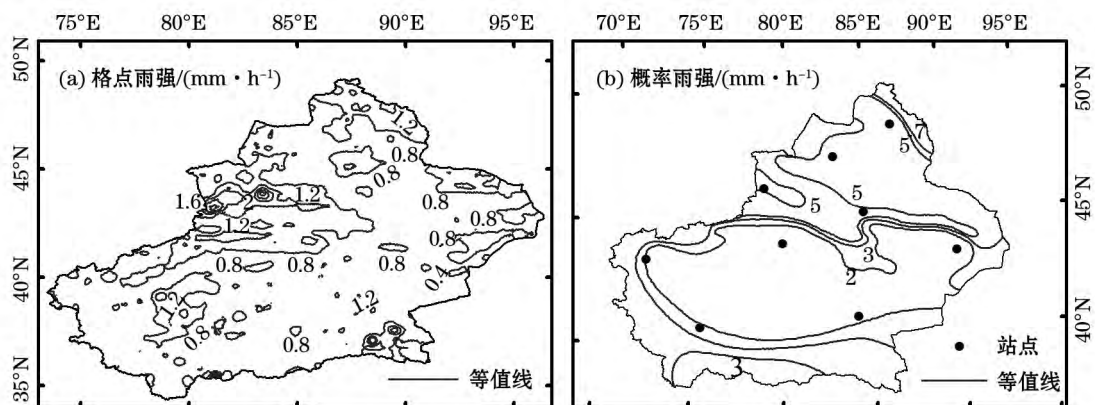


图2 新疆格点雨强和 0.1% 概率雨强⁽³²⁾ 空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of gridded rainfall intensity and 0.1% probability rainfall intensity

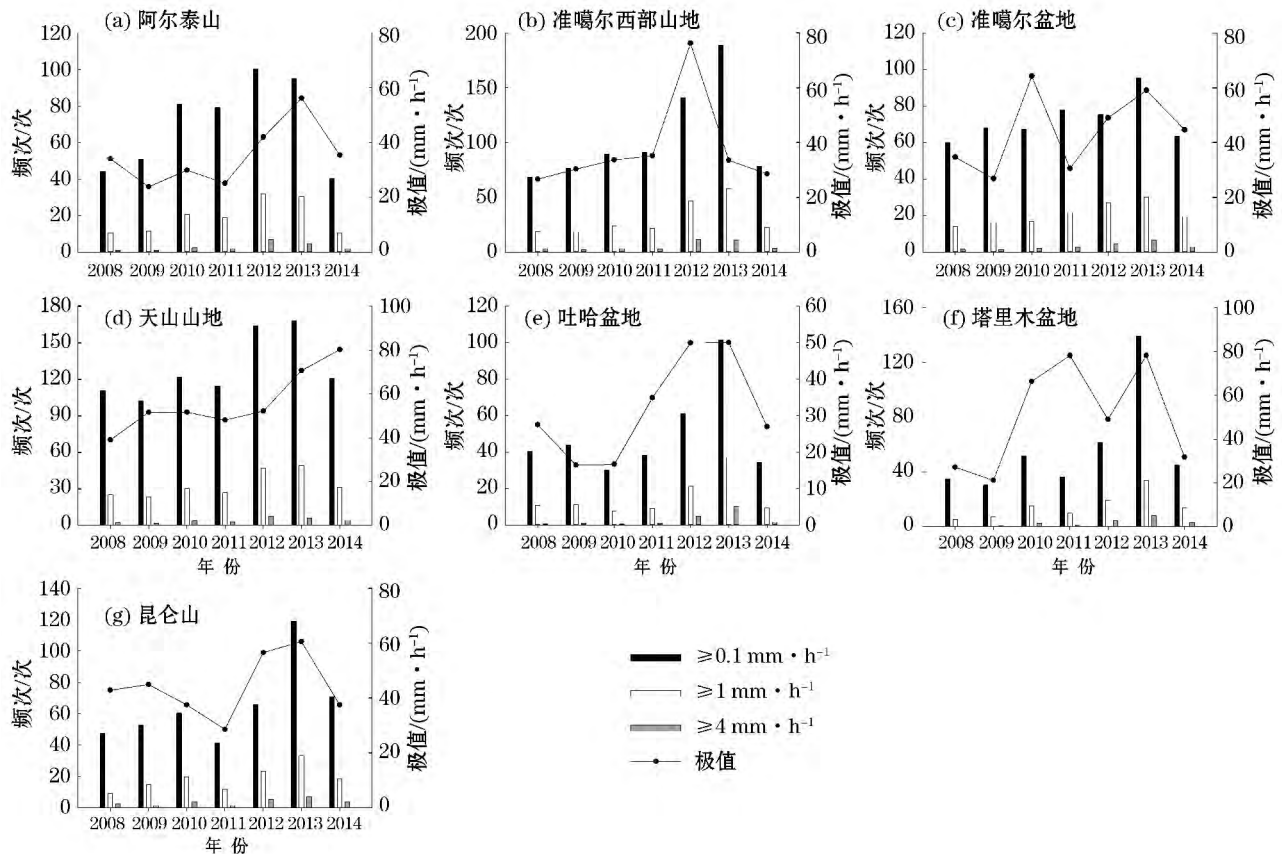


图3 2008—2014 年新疆夏季逐时雨强发生频次及极值的年变化

Fig. 3 Annual variation of frequency and extreme value of hourly rainfall intensity in Xinjiang in summer during the period from 2008 to 2014

发生频次的年际波动都呈多峰型的变化趋势 ($P < 0.01$) ,在 2013 年达到最大值。逐时雨强极值的年际波动除天山山地相对平缓外,其余 6 个分区年际波动非常显著 ($P < 0.01$) ,天山山地逐时雨强极值在 2014 年达到最大值,阿尔泰山、塔里木盆地和昆仑山逐时雨强极值的最大值出现在 2013 年,准噶尔西部山地和吐哈盆地的极值出现在 2012 年,而准噶尔盆地出现在 2010 年,全区逐时雨强极值的最大值在 2014 年出现在天山山地,其值超过了 $80 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 。

3.2.2 逐时雨强发生频次及极值的空间分布 新疆远离海洋,太平洋和印度洋的湿空气被高山阻隔,只有北冰洋和大西洋部分冷湿气流经西部山口进入北疆,所以全区干旱少雨⁽³⁵⁾。由各类逐时雨强发生频次的空间分布(图 4)可见,全区逐时雨强发生频次空间分布不均衡,以新疆中部的天山山脉为分界线,北疆逐时雨强发生频次大于南疆,西部的大于东部,这与以往的研究结果^(6, 27, 36)一致。此外,新疆地形复杂,各亚区之间也存在明显差异性,山区雨强发

生频次大于平原和盆地,迎风坡大于背风坡。

从图 4 可以看出, $\geq 0.1 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 逐时雨强在天山山地年均发生频次在 80 次以上,由于地形、海拔的原因,一些小区域发生频次甚至超过 240 次;在阿尔泰山、准噶尔西部山地和昆仑山,发生频次也在 80 次以上,阿尔泰山西北端和昆仑山中部发生频次超过 160 次;天山以南的塔里木盆地以及吐哈盆地是低值区,在 80 次以下。 $\geq 1 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 逐时雨强空间分布与 $\geq 0.1 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 的基本一致,在天山山地年均发生频次在 60 次以上,准噶尔盆地、吐哈盆地和塔里木盆地都在 30 次以下(图 4b)。 $\geq 4 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 逐时雨强发生频次比较少,且分布零散,只有部分山地和塔里木盆地中西部在 6 次以上(图 4c)。综上所述,天山山地是降雨的高发区,其次数是盆地的 2 倍多,天山西段的阿拉套山和阿尔泰山的西北端是强降雨的高发区。

从 2008—2014 年新疆夏季逐时雨强的极值分布(图 5)可以看出,逐时雨强极值的分布与其频次不同,呈现明显的东西分布差异。逐时雨强极值的

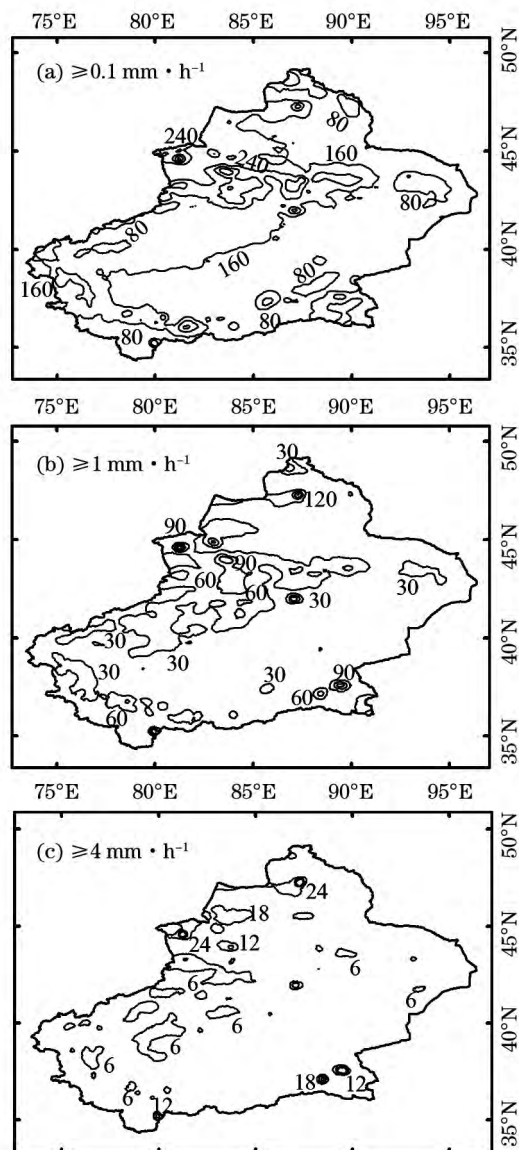


图4 2008—2014年新疆夏季逐时雨强发生频次分布特征
Fig.4 Distribution of frequency of hourly rainfall intensity in Xinjiang in summer during the period from 2008 to 2014

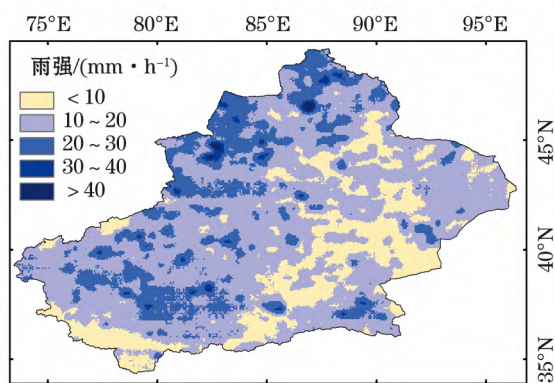


图5 2008—2014年新疆夏季逐时雨强极值的空间分布
Fig.5 Spatial distribution of extreme value of hourly rainfall intensity in Xinjiang in summer during the period from 2008 to 2014

高值区主要集中在西部地区,在阿尔泰山西北端、准噶尔西部山地、天山山地和塔里木盆地西部的部分地区雨强极值超过了 $40 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 。新疆南部的昆仑山是降雨的高发区,但并不是雨强极值的高值区。

3.3 逐时雨强日变化特征

3.3.1 逐时雨强日变化变差系数特征 新疆 $\geq 4 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 的逐时雨强发生频次较少,本文按公式(1)计算了 $\geq 0.1 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 和 $\geq 1 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 的逐时雨强变差系数,得到新疆地区 $\geq 0.1 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 和 $\geq 1 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 的逐时雨强年均发生频次日变化变差系数的空间分布特征(图6)。由此可见,逐时雨强日变化变差系数的空间分布与其频次相反,以天山山脉为界,北疆小于南疆。天山北部、准噶尔盆地和准噶尔西部山地的逐时雨强发生频次的变差系数都是最小的,一般小于 0.4,说明这里是雨强出现频率日变化最小的地区;天山南部、塔里木盆地和昆仑山是逐时雨强出现频率日变化最大的地区,变差系数都在 0.8 以上,说明这里一日不同时段逐时雨强出现几率很不相同,同类级别逐时雨强出现几率的日变化很大。

3.3.2 逐时雨强昼夜变化特征 如图 7a 和图 7b 所示,昼夜逐时雨强的空间分布特征基本一致,不论山区还是盆地,大部分地区的逐时雨强维持在 $0.4 \sim 1 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$,只有部分小区域超过 $1 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 。白天,准噶尔盆地西北部、准噶尔西部山地、天山山地以及昆仑山的部分地区是逐时雨强的高值区;夜间,准噶尔盆地南部、天山山地和塔里木盆地西北部是高值区。图 7c 是昼夜逐时雨强差值的空间分布特征,可以清晰地看出,天山以北白天的逐时雨强大于夜间,天山以南相反,大部分盆地地区夜间的逐时雨强大于白天。

3.4 逐时雨强与降水量的空间对比分析

降水量的大小不仅取决于降水时数,还与降水强度有密切的关系,杨晓丹^[37]曾用 Karl 等^[38]提出的降水量贡献的计算方法对西北地区降水量变化进行了讨论,并得出降水强度的变化对西北地区降水量的贡献较大。本文对逐时雨强和降水量的空间分布进行了对比分析,得出新疆夏季平均逐时雨强的空间分布与降水量大致相似(图8),呈现明显的区域分布差异,山区的逐时雨强与降水量大于平原和盆地,其高值区分布在天山、阿尔泰山和昆仑山;山

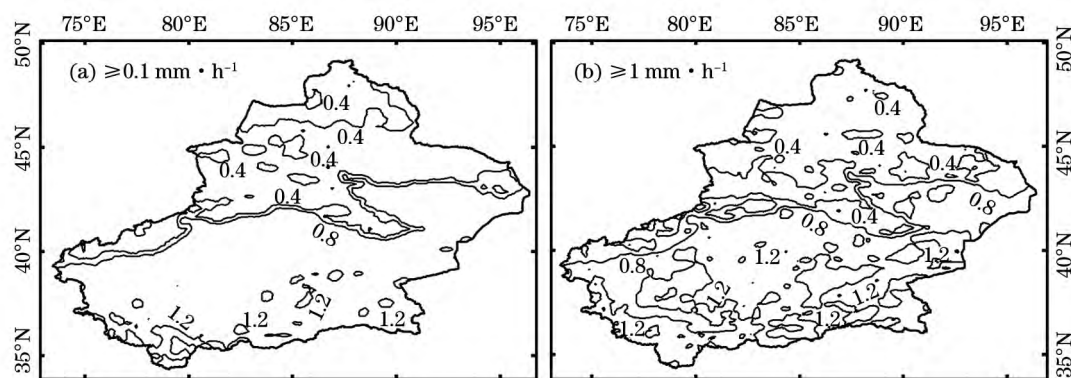


图 6 2008—2014 年新疆夏季逐时雨强日变化变差系数特征

Fig. 6 Daily variation coefficient of hourly rainfall intensity in Xinjiang in summer during the period from 2008 to 2014

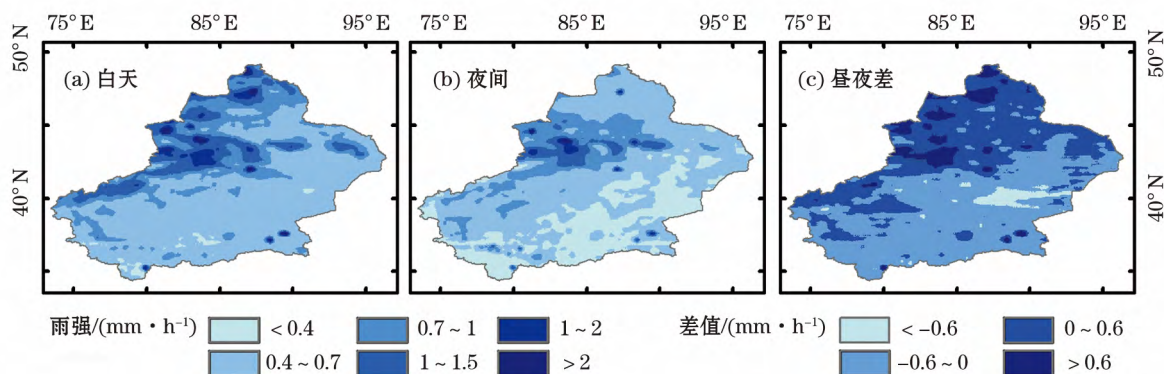


图 7 2008—2014 年新疆夏季逐时雨强昼夜变化特征

Fig. 7 Diurnal-nocturnal variation of hourly rainfall intensity in Xinjiang in summer during the period from 2008 to 2014

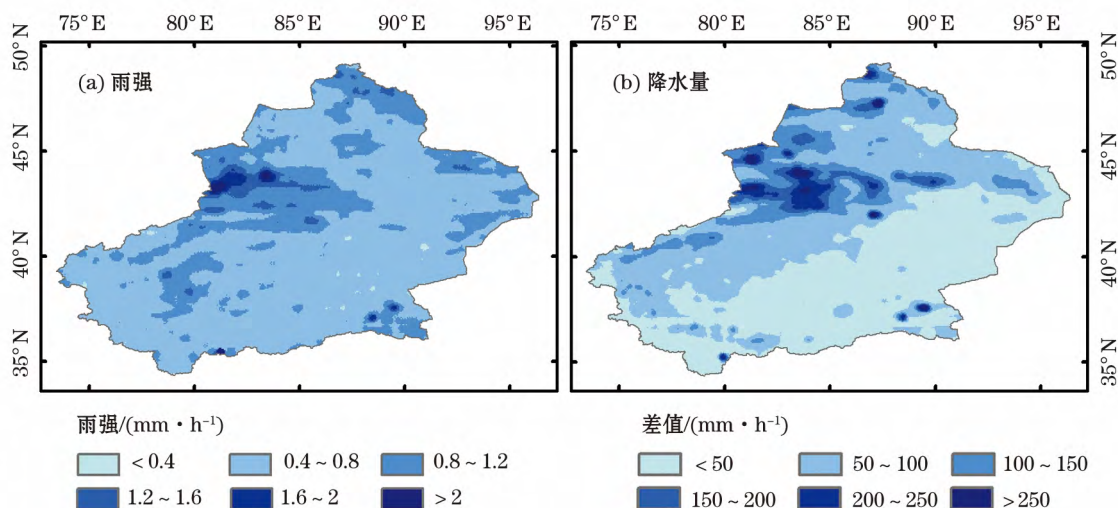


图 8 2008—2014 年新疆夏季逐时雨强与降水量的空间分布

Fig. 8 Spatial distribution of hourly rainfall intensity and volume in Xinjiang in summer during the period from 2008 to 2014

区与盆地的降水量相差较大,而逐时雨强相差较小,部分盆地地区也有强降水发生,可能因为时间太短和区域太小而被干旱背景所掩盖,如塔里木盆地的西部地区就有平均逐时雨强超过 $1 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 的降水发生。

3.5 影响因素分析

新疆地处西北内陆,降水空间分布复杂,它不仅与大气环流有关,还受地形和海拔等因素影响。本文分析了气温、地形和大气环流等对新疆逐时雨强时空分布的影响。从图 9 可以看出,天山、塔里木盆

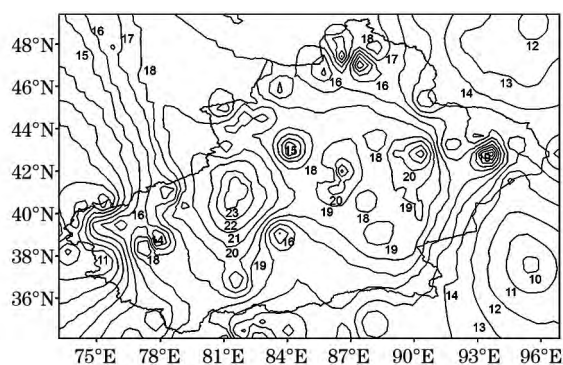


图9 2008—2014 年新疆夏季平均水汽含量
空间分布($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$)

Fig.9 Spatial distribution of mean water vapor content
in Xinjiang in summer during the period
from 2008 to 2014($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$)

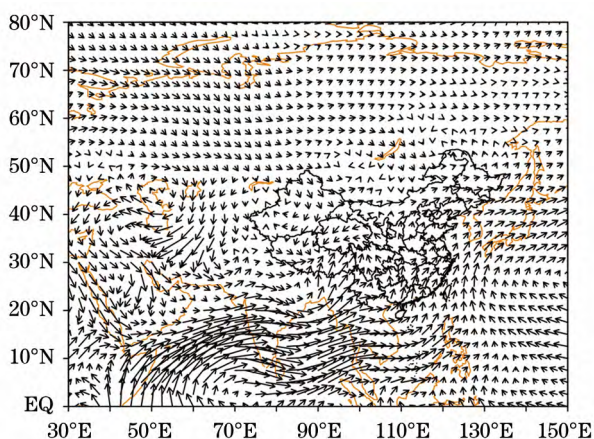


图10 2008—2014 年新疆夏季 850 hPa 风场分布示意图

Fig. 10 Spatial distribution of 850-hPa wind field over Xinjiang
in summer during the period from 2008 to 2014

表1 2008—2014 年夏季平均气温、海拔与逐时雨强的相关性分析

Tab.1 Correlation coefficients among mean air temperature, altitude and hourly rainfall intensity in Xinjiang
in summer during the period from 2008 to 2014

	I 区	II 区	III 区	IV 区	V 区	VI 区	VII 区
R (雨强-气温)	0.12	0.15	0.44	0.08	0.223	0.066	0.29
R (雨强-海拔)	0.306**	-0.07	-0.04	0.301	0.32**	-0.19*	-0.02

注: **、* 分别表示通过了 0.01 和 0.05 的置信度检验。

4 讨论

近 50 a 来,新疆整体呈增湿的趋势,而且得到了充分的证实。20 世纪末中国西北地区气候出现由暖干向暖湿转变的事实,而新疆最为突出⁽¹⁷⁻¹⁹⁾。近年来,新疆降水呈增加趋势,以山区最为明显⁽³⁶⁾;新疆降水量的增加是由降水频率和降水强度的增加引起的,并随着气候变暖,降水有极端化趋势⁽³⁶⁻³⁷⁾;

地、吐哈盆地和准噶尔盆地水汽含量的高值区,阿尔泰山和昆仑山反而为低值区,塔里木盆地北端是新疆水汽含量最大中心;新疆夏季主要受西风带控制,来自大西洋和北冰洋的海洋水汽与传输途中的内陆再循环水汽是新疆夏季主要水汽来源(图 10)。水汽含量分布与逐时雨强的空间分布差异较大,其高值区和低值区恰好相反,表明新疆降水强度差异的根本原因不在于水汽的多少,而在于促成降水的动力条件和其他因素的差异。

从表 1 可以看出,新疆 7 个亚区的逐时雨强与气温均成正相关关系,说明随着气温升高新疆逐时雨强呈增加趋势,且近地面气温的变化会引起气流的变化,从而影响局地的环流系统。在新疆,环流系统和地形是影响降水变化的关键因素,南疆处于天山山脉和帕米尔高原的背风坡下沉气流的控制下,其动力条件和水汽辐合条件不利于降水,所以其降水频次和降水强度小于天山北侧地区。在北疆地区,其西方没有高大山脉的阻挡,易于北方冷空气和西方暖湿气流长驱直入,在天山山脉的阻挡下发生交汇,天山北侧迎风坡起到抬升作用,有利于降水的发生。在迎风坡,随着海拔的升高,气温降低,空气中水汽逐渐达到饱和,成云制雨,而背风坡恰好相反,因此高程也是影响降水差异的重要因素之一。在阿尔泰山、天山和吐哈盆地逐时雨强和海拔成正相关关系,在其他地区成负相关关系,在阿尔泰山、塔里木盆地和吐哈盆地相关性显著(表 1)。

20 世纪 80 年代后新疆发生洪涝的概率增加,发生干旱的概率减小⁽²²⁾。本文得出与已有研究相似的结果,但与以往研究相比,使用的融合降水数据质量较好,精度较高,在降水的空间分布上更加合理,并且能准确跟踪强降水过程,在定量检测强降水中具有优势。

在全球变暖的背景下,新疆境外水汽输入量呈增加趋势,降水呈不同程度的增加趋势⁽³⁹⁻⁴⁰⁾。然

而,引起降水变化的因素很多⁽⁷⁻⁸⁾,因此,本文还利用 NCEP/NCAR 2008—2014 年再分析格点资料对新疆逐时雨强变化的影响因素进行了分析,得出新疆降水强度差异的根本原因不在于水汽的多少,而在于促成降水的动力条件和其他因素的差异,这也与早期研究结论⁽⁴⁰⁻⁴¹⁾相辅相成。此外,本文也存在些许不足之处,由于格点数据序列有限,本文未能对强降水的重现期进行分析。最后,还需指出的是,即使在年降水量较低的盆地地区,也会有强降雨、甚至暴雨产生,这对区域的干旱、洪涝灾害的防治与应对具有重要意义。

5 结 论

本文基于中国自动气象站与 CMORPH 降水产品融合的逐时降水 $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ 网格数据集,结合 NCEP/NCAR 2008—2014 年再分析格点资料,分析讨论了新疆夏季逐时雨强的时空分布特征及其影响因素,得出以下结论:

(1) 插值后格点雨强的空间分布与概率雨强空间分布基本一致,只是部分小区域存在差异,格点雨强资料具有较好的可信度。

(2) 全区各类逐时雨强发生频次及极值年际波动显著,降水有极端化趋势,其频次在 2013 年达到最大值,极值在 2014 年达到最大;全区逐时雨强发生频次空间分布不均衡,北疆逐时雨强发生频次大于南疆,西部大于东部,而极值分布呈现明显的东西分布差异,高值区主要集中在西部地区。

(3) 以天山为界,北疆逐时雨强出现频率日变化变差系数小于南疆,降水稳定性较好;天山以北白天逐时雨强大于夜间,天山以南相反,大部分盆地地区夜间的逐时雨强大于白天。

(4) 新疆夏季逐时雨强的空间分布与降水量大致相似,山区与盆地的降水量相差较大,而平均雨强相差较小,造成这种差异的根本原因不在于水汽的多少,而在于促成降水的动力条件和其他因素的差异。

参考文献(References):

(1) Zhang Q, Li J, Chen Y D, et al. Observed changes of temperature extremes during 1960–2005 in China: Natural or human-induced variation? [J]. Theoretical and Applied Climatology, 2011, 106 (3–4): 417–431.

(2) Zhang Q, Xu C Y, Chen Y D, et al. Comparison of evapotranspiration variations between the Yellow River and Pearl River basin, China [J]. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, 2011, 25(2): 139–150.

(3) 李佳秀, 杜春丽, 杜世飞, 等. 新疆极端降水事件的时空变化及趋势预测 [J]. 干旱区研究, 2015, 32(6): 1103–1112. (Li Jiaxiu, Du Chunli, Du Shifei, et al. Temporal-spatial variation and trend prediction of extreme precipitation events in Xinjiang [J]. Arid Zone Research, 2015, 32(6): 1103–1112.)

(4) Bartolini G, Grifoni D, Torrigiani T, et al. Precipitation changes from two long-term hourly datasets in Tuscany, Italy [J]. International Journal of Climatology, 2014, 34(15): 3977–3985.

(5) Li J, Yu R, Zhou T. Seasonal variation of the diurnal cycle of rainfall in southern contiguous China [J]. Journal of Climate, 2008, 21(22): 6036–6043.

(6) 朱小凡, 张明军, 王圣杰, 等. 2008—2013 年新疆夏季降水的日变化特征 [J]. 生态学杂志, 2016, 35(2): 478–488. (Zhu Xiaofan, Zhang Mingjun, Wang Shengjie, et al. Diurnal variation characteristics of precipitation of Xinjiang in summer during 2008–2013 [J]. Chinese Journal of Ecology, 2016, 35(2): 478–488.)

(7) 张强, 张杰, 孙国武, 等. 祁连山山区空中水汽分布特征研究 [J]. 气象学报, 2007, 65(4): 633–643. (Zhang Qiang, Zhang Jie, Sun Guowu, et al. Research on atmospheric water-vapor distribution over Qilianshan Mountains [J]. Acta Meteorologica Sinica, 2007, 65(4): 633–643.)

(8) 张强, 孙昭萱, 陈丽华, 等. 祁连山空中云水资源开发利用研究综述 [J]. 干旱区地理, 2009, 32(3): 381–390. (Zhang Qiang, Sun Zhaoxuan, Chen Lihua, et al. Research on atmospheric water-vapor distribution over Qilianshan Mountains [J]. Arid Land Geography, 2009, 32(3): 381–390.)

(9) 王春学, 马振峰, 邵鹏程, 等. 我国华西秋雨的气候变化规律及其影响因子 [J]. 干旱区研究, 2015, 32(6): 1113–1121. (Wang Chunxue, Ma Zhenfeng, Shao Pengcheng, et al. Climate variation of Huaxi autumn rain and the impact factors influencing it [J]. Arid Zone Research, 2015, 32(6): 1113–1121.)

(10) 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. (Zhou Qiuxue, Liu Ying, Feng Liangmin, et al. Analysis on temporal and spatial distribution characteristics of strong hour rainfall intensity in Sichuan during 2008–2012 [J]. Plateau Meteorology, 2015, 34(5): 1261–1269.)

(11) 黄秋霞, 赵勇, 何清, 等. 伊宁市主汛期降水日变化特征 [J]. 干旱区研究, 2015, 32(4): 742–747. (Huang Qiuxia, Zhao Yong, He Qing, et al. Daily variations characteristics of rainfall in flood season in Yining City [J]. Arid Zone Research, 2015, 32(4): 742–747.)

(12) Ferraro R R. SSM/I derived global rainfall estimates for climatological applications [J]. Journal of Geophysical Research, 1997, 102: 16715–16735.

(13) Joyce R J, Janowiak J E, Arkin P A, et al. CMORPH: A method that produces global precipitation estimates from passive microwave

- and infrared data at high spatial and temporal resolution (J). *Journal of Hydrometeorology* 2004 5(3): 487–503.
- (14) Ferraro R R, Weng F, Grody N C. Precipitation characteristics over land from the NOAA-15 AMSU sensor (J). *Geophysical Research Letters* 2000 27(17): 2 669–2 672.
- (15) Huang J, Wu P, Zhao X. Effects of rainfall intensity, underlying surface and slope gradient on soil infiltration under simulated rainfall experiments (J). *Catena* 2013 104: 93–102.
- (16) Wei W, Jia F, Yang L et al. Effects of surficial condition and rainfall intensity on runoff in a loess hilly area, China (J). *Journal of Hydrology* 2014 513: 115–126.
- (17) 姚莉, 赵声蓉, 赵翠光, 等. 我国中东部逐时雨强时空分布及重现期的估算 (J). *地理学报* 2010 65(3): 293–300. (Yao Li, Zhao Shengrong, Zhao Cuiguang et al. Temporal and spatial distributions of hourly rain intensity and recurrence periods in eastern and central China (J). *Acta Geographica Sinica* 2010 65(3): 293–300.)
- (18) 施雅风, 沈永平, 胡汝骥. 西北气候由暖干向暖湿转型的信号、影响和前景初步探讨 (J). *冰川冻土* 2002 24(3): 219–226. (Shi Yafeng, Shen Yongping, Hu Ruji. Preliminary study on signal impact and foreground of climatic shift from warm-dry to warm-humid in Northwest China (J). *Journal of Glaciology and Geocryology* 2002 24(3): 219–226.)
- (19) 赵兵科. 新疆夏季变湿的大气环流异常特征 (J). *冰川冻土*, 2006 28(3): 434–442. (Zhao Bingke. Atmospheric circulation anomalies during wetting summer over Xinjiang region (J). *Journal of Glaciology and Geocryology* 2006 28(3): 434–442.)
- (20) 杨莲梅. 新疆极端降水的气候变化 (J). *地理学报* 2003 58(4): 577–583. (Yang Lianmei. Climate change of extreme precipitation in Xinjiang (J). *Acta Geographica Sinica* 2003 58(4): 577–583.)
- (21) 赵勇, 黄丹青, 杨青. 新疆北部汛期降水的变化特征 (J). *干旱区研究* 2012 29(1): 35–40. (Zhao Yong, Huang Danqing, Yang Qing. Analysis on variation of precipitation in flood season in North Xinjiang (J). *Arid Zone Research* 2012 29(1): 35–40.)
- (22) 李剑锋, 张强, 陈晓宏, 等. 新疆极端降水概率分布特征的时空演变规律 (J). *灾害学* 2011 26(2): 11–17. (Li Jianfeng, Zhang Qiang, Chen Xiaohong et al. Spatial-temporal evolution pattern of probability distribution characteristics of extreme precipitation in Xinjiang Autonomous Region (J). *Journal of Catastrophology*, 2011 26(2): 11–17.)
- (23) 潘旻, 沈艳, 宇婧婧, 等. 基于最优插值方法分析的中国区域地面观测与卫星反演逐时降水融合试验 (J). *气象学报* 2012 70(6): 1 381–1 389. (Pan Yang, Shen Yan, Yu Jingjing et al. Analysis of the combined gauge-satellite hourly precipitation over China based on the OI technique (J). *Acta Meteorologica Sinica*, 2012 70(6): 1 381–1 389.)
- (24) 苏宏超, 沈永平, 韩萍, 等. 新疆降水特征及其对水资源和生态环境的影响 (J). *冰川冻土* 2007 29(3): 343–350. (Su Hongchao, Shen Yongping, Han Ping et al. Precipitation and its impact on water resources and ecological environment in Xinjiang Region (J). *Journal of Glaciology and Geocryology* 2007 29(3): 343–350.)
- (25) 沈永平, 苏宏超, 王国亚, 等. 新疆冰川、积雪对气候变化的响应 (I): 水文效应 (J). *冰川冻土* 2013 35(3): 513–527. (Shen Yongping, Su Hongchao, Wang Guoya et al. The response of glaciers and snow cover to climate change in Xinjiang I: Hydrological effect (J). *Journal of Glaciology and Geocryology* 2013 35(3): 513–527.)
- (26) 丁一汇. 中国气候 (M). 北京: 科学出版社 2013. (Ding Yihui. *Climate of China* (M). Beijing: Science Press 2013.)
- (27) 范彬彬, 罗格平, 张弛, 等. 新疆夏季降水时空分布的适用性评估 (J). *地理研究* 2013 32(9): 1 602–1 612. (Fan Binbin, Luo Geping, Zhang Chi et al. Evaluation of summer precipitation of CF-SR, ERA-Interim and MERRA reanalyses in Xinjiang (J). *Geographical Research* 2013 32(9): 1 602–1 612.)
- (28) 柴慧霞, 欧阳, 陈曦, 等. 新疆地貌区划的一个新方案 (J). *干旱区地理* 2009 32(1): 95–106. (Chai Huixia, Ou Yang, Chen Xi et al. A new schema of Xinjiang geom or phologic regionalization (J). *Arid Land Geography* 2009 32(1): 95–106.)
- (29) 江志红, 卢尧, 丁裕国. 基于时空结构指标的中国融合降水资料质量评估 (J). *气象学报* 2013 71(5): 891–900. (Jiang Zhihong, Lu Yao, Ding Yuguo. Analysis of the high-resolution merged precipitation products over China based on the temporal and spatial structure score indices (J). *Acta Meteorologica Sinica* 2013 71(5): 891–900.)
- (30) 沈艳, 潘旻, 宇婧婧, 等. 中国区域小时降水量融合产品的质量评估 (J). *大气科学学报* 2013 36(1): 37–46. (Shen Yan, Pan Yang, Yu Jingjing et al. Quality assessment of hourly merged precipitation product over China (J). *Transactions of Atmospheric Sciences* 2013 36(1): 37–46.)
- (31) 康延臻, 陈世红, 张莹, 等. 2008—2013 年库姆塔格沙漠及阿尔金山降水特征 (J). *中国沙漠* 2015 35(1): 203–210. (Kang Yanzhen, Chen Shihong, Zhang Ying et al. Precipitation during 2008–2013 in the Kumtagh Desert and Altun Mountains (J). *Journal of Desert Research* 2015 35(1): 203–210.)
- (32) 孙修贵. 中国主要城市降雨雨强分布和 Ku 波段的降雨衰减 (M). 北京: 气象出版社 2004. (Sun Xiugui. *The Rain Intensity Distribution and Ku Band Rain Attenuation* (M). Beijing: China Meteorological Press 2004.)
- (33) Zhang J C, Lin Z G. *Climate of China* (M). New York: Wiley and Shanghai Scientific and Technical Publishers, 1992: 376.
- (34) 屠其璞. 气象应用概率统计 (M). 北京: 气象出版社 1984. (Tu Qipu. *Meteorology Applied Probability and Statistics* (M). Beijing: China Meteorological Press 1984.)
- (35) 满苏尔·沙比提. 新疆地理 (M). 北京: 北京师范大学出版社, 2009. (Mansur Sabit. *Geography of Xinjiang* (M). Beijing: Beijing Normal University Press 2009.)
- (36) 李剑锋, 张强, 白云岗, 等. 新疆地区最大连续降水事件时空变化特征 (J). *地理学报* 2012 67(3): 312–320. (Li Jianfeng, Zhang Qiang, Bai Yungang et al. Spatio-temporal probability behaviors of the maximum consecutive wet days in Xinjiang, China

- (J). *Acta Geographica Sinica* 2012 ,67(3) : 312 – 320.)
- (37) 杨晓丹. 中国西北地区降水变化及其可能原因的诊断分析 (D). 北京: 中国气象科学研究院 ,2005. (Yang Xiaodan. The Characteristics and Possible Causes of Change in Precipitation in Northwest China during the Recent 50 Years (D). Beijing: Chinese Academy of Meteorological Science 2005.)
- (38) Karl T R ,Knight R W. Secular trends of precipitation amount ,frequency and intensity in the United States (J). *Bulletin of the American Meteorological Society* ,1998 ,79(2) : 231 – 241.
- (39) Li B ,Chen Y ,Shi X ,et al. Temperature and precipitation changes in different environments in the arid region of Northwest China (J). *Theoretical and Applied Climatology* ,2013 ,112(3/4) : 589 – 596.
- (40) 姚俊强 杨青 韩雪云 等. 乌鲁木齐夏季水汽日变化及其与降水的关系 (J). *干旱区研究* ,2013 ,30(1) : 67 – 73. (Yao Jun-qiang ,Yang Qing ,Han Xueyun ,et al. Analysis on daily variation of water vapor and its relationship with rainfall in Urumqi in summer (J). *Arid Zone Research* 2013 ,30(1) : 67 – 73.)
- (41) 俞亚勋 王劲松 李青燕. 西北地区空中水汽时空分布及变化趋势分析 (J). *冰川冻土* ,2003 ,25(2) : 149 – 156. (Yu Yaxun , Wang Jinsong ,Li Qingyan. Spatial and temporal distribution of water vapor and its variation trend in atmosphere over Northwest China (J). *Journal of Glaciology and Geocryology* ,2003 ,25(2) : 149 – 156.)

Spatio-temporal Variation of Hourly Rainfall Intensity and Its Affecting Factors in Xinjiang in Summer during the Period from 2008 to 2014

CHEN Rong , ZHANG Ming-jun , WANG Sheng-jie , CHE Yan-jun ,
WANG Jie , DU Ming-xia , YANG Sen

(College of Geography and Environmental Science , Northwest Normal University , Lanzhou 730070 , Gansu , China)

Abstract: Based on the 0.1° gridded hourly precipitation dataset merged from the automatic weather stations in China and the Climate Precipitation Center Morphing (CMORPH) precipitation product , and the 5-minute rainfall intensity under different probable conditions , the credibility of gridded datasets of precipitation in Xinjiang was evaluated , the spatiotemporal distribution of hourly rainfall intensity in Xinjiang was analyzed using the probability distribution , variation coefficient and correlation analysis , and the factors affecting the distribution of hourly rainfall intensity in Xinjiang were analyzed using the NCEP/NCAR global reanalysis grid data. The results are as follows:

① The spatial distribution of the gridded rainfall intensity was consistent with the rainfall intensity of probability , and the gridded rainfall data were highly reliable; ② In the whole region , the frequency of various types of hourly rainfall intensity and the interannual variations of extreme value were significant , and there was an extreme precipitation trend; the spatial distribution of frequency of hourly rainfall intensity was different , and the frequency of hourly rainfall intensity was much higher in north Xinjiang than in south Xinjiang and much higher in the western part than in the eastern part of Xinjiang. The distribution of extreme value in the east was different from that in the west , and the areas with high value of hourly rainfall intensity was mostly distributed in the west; ③ In north Xinjiang , the diurnal hourly rainfall intensity was higher than the nocturnal one , but it was opposite in south Xinjiang; the daily variation coefficient of rainfall intensity was lower in north Xinjiang than that in south Xinjiang; ④ The spatial distribution of average hourly rainfall intensity was similar to that of precipitation , the fundamental reason for the difference of precipitation was not the water vapor amount , and it is affected by the difference of dynamic conditions and other factors.

Key words: hourly rainfall intensity; variation coefficient; probability of rainfall intensity; spatiotemporal distribution; Xinjiang