

doi: 10.13866/j.azr.2017.04.23

1961—2013 年新疆雪雨比变化^①

王 杰 , 张明军 , 王圣杰 , 任正果 , 车彦军 , 强 芳

(西北师范大学地理与环境科学学院, 甘肃 兰州 730070)

摘 要: 基于中国国家气象信息中心发布的 1961—2013 年全国 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ 逐日降水量和逐日平均气温数据集以及气象站点日降水量和气温实测资料, 评估了该套格点降水资料在新疆地区的可信度, 并利用格点降水资料研究了新疆地区降雪量、降雨量以及雪雨比的时空变化和突变信息。结果表明: 内插到气象站点的格点降水数据和气象站点实测降水数据之间的偏差普遍较小, 偏差在 0.2 ~ 1.0 mm 的站点个数占总站点数的 72.55%, 在绝大多数区域二者之间的相关系数均在 0.80 以上; 1961—2013 年, 新疆降雪量呈微弱的增加趋势, 增加幅度为 $0.11 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$, 但没有通过 0.05 的显著性水平检验。降雨量以 $0.63 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$ 的速率呈明显的增加趋势 ($P < 0.0001$), 突变出现在 1992 年左右。雪雨比呈下降趋势, 幅度为 0.01 a^{-1} ($P < 0.05$), 突变出现在 1991 年左右; 降雪量、降雨量及雪雨比表现出一定的空间分布差异, 降雪量和降雨量在全区普遍呈增加趋势, 而雪雨比在天山山地以北呈增加趋势, 在天山山地以及天山山地以南主要呈减少趋势。在新疆冰川分布区域, 降雪量倾向率在新疆北部呈增加趋势, 而在新疆东南部呈减少趋势; 降雨量倾向率呈增加趋势, 且新疆东南部降雨量倾向率大于北部; 雪雨比倾向率呈现出与降雪量倾向率相似的变化趋势。

关键词: 雪雨比; 倾向率; 冰川; 新疆

降雪是积雪的重要补给来源, 降雪的变化必然会导致积雪发生变化。然而, 积雪的变化会对地表辐射平衡、水资源利用等方面产生深远的影响⁽¹⁻²⁾。积雪减少使得暴露在空气中的陆地面积增大, 导致陆面吸收的太阳辐射增加, 进一步促使气温的升高, 这种反馈过程在低海拔地区的春季表现得更为强烈⁽²⁻³⁾。在高寒地区, 积雪融水是农业灌溉、城市居民用水和生态环境等方面的主要补给水源⁽¹⁾。此外, 降雪还会影响到降雪与降水的比率(雪雨比)发生变化⁽⁴⁻⁵⁾。雪雨比变化是降水类型发生变化的直接结果, 不同的降水形态对地表辐射、春季径流、区域水资源产生不同的影响^(3, 6-7)。国内外已有学者对雪雨比的变化展开了研究^(4-5, 8-11)。Huntington 等⁽⁸⁾发现, 新西兰雪雨比呈显著的减少趋势。Knowles 等⁽⁹⁾分析得知, 美国西部雪雨比呈现显著减少趋势, 相同的结果在太平洋西北部、美国中部也有报道⁽¹⁰⁾。同时, 在瑞士的低海拔地区雪雨比呈显著的减少趋势⁽⁴⁾。我国天山地区在降雪量和降雨量呈增加趋势的情况下, 雪雨比也呈现减少趋势⁽⁵⁾, 而青藏高原雪雨比也呈减少趋势⁽¹¹⁾。

新疆地处我国西北干旱区, 是我国面积最大的行政省区。新疆深居欧亚大陆腹地, 沙漠、戈壁广布, 境内从北向南可分为阿尔泰山、准噶尔盆地和西部山地、天山山地、吐鲁番盆地、塔里木盆地等地貌单元⁽¹²⁾。新疆全年降水主要集中在高山地区, 其全年降水占新疆年总降水量的 84.3%⁽¹³⁾。作为降水的重要组成部分之一, 降雪在西北干旱区的水循环过程中扮演着十分重要的角色。在气候变暖的情况下, 对新疆地区雪雨比的研究非常缺乏。所以, 很有必要对新疆的雪雨比变化进行研究。本文基于新疆由暖干向暖湿转变的事实⁽¹⁴⁻¹⁶⁾, 在缺少完整地面降雪观测资料的情况下, 通过雪和雨临界温度将新疆 1961—2013 年的 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ 格点降水数据划分为降雪量(固态)和降雨量(液态), 旨在揭示新疆地区降雪量、降雨量、雪雨比的时空变化趋势和突变信息, 以及新疆冰川所在区域(冰川所在位置的 10 km 缓冲区)降雪量、降雨量和雪雨的年际变化趋势, 为进一步研究新疆积雪水文过程和水资源管理提供基础资料。

① 收稿日期: 2016-04-19; 修订日期: 2016-05-26

基金项目: 全球变化国家重大科学研究计划项目(2013CBA01801); 国家自然科学基金项目(41461003)资助

作者简介: 王杰(1989-), 男, 硕士研究生, 主要从事全球变化与可持续发展方面的研究。E-mail: geowangjie@163.com

通讯作者: 张明军。E-mail: mjzhang2004@163.com

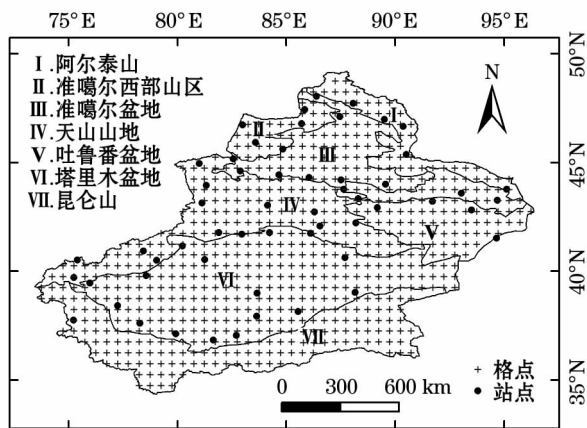


图1 新疆站点格点分布

Fig.1 Distribution of observation stations and grid boxes in Xinjiang

1 数据与方法

1.1 数据来源

依据资料的连续性及其最长时段性等标准,选取符合条件的新疆 51 个气象站(图 1),其地面气象站日降水量和日平均气温资料由中国国家气象信息中心提供,并经过严格的质量控制。覆盖新疆地区的 697 个格点数据来自中国国家气象信息中心气象资料室建立的中国地面降水日值 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 格点数据集(V2.0)和地面气温日值 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 格点数据集(V2.0),其数据误差较小,能够较为准确地反映我国不同区域的降水变化特征^[17]。

1.2 方法

降水类型的区分已有诸多模型,诸如 BATS 模型^[18]、DHSVH 模型^[19]、NCAR 模型^[20]以及 HBV 模型^[21]等,其模型多采用固定阈值的方法对降水类型进行划分。而韩春坛等^[22]、Chen 等^[23]根据中国气象局发布的基准气象站资料,利用概率统计的方法对中国固液态降水的临界温度做了研究。本文参考韩春坛等^[22-23]对降水类型临界温度研究的方法,采用概率统计的方法确定了新疆降雪和降雨临界温度。在此基础上,应用雪和雨临界温度对 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 格点降水进行了类型区分。

1.2.1 站点数据 由于 1979 年以后的气象站点降水数据并未对降水类型做标记,因此,本文采用 1961—1979 年的基准站日降水数据和日平均气温数据,分别筛选降雪数据(雨夹雪、暴雪,站点数据标记为 31XXX)和降雨和雪数据(站点数据标记为 30XXX),以及日降水数据所对应的日平均气温,确

定降雪和降雨的温度区间。若两者温度区间有交集,将温度交集以 0.5°C 为步长分成若干温度子区间,分别计算出每个温度子区间降雪和降雨的概率,将概率值的转折点所对应的温度子区间的下限定义为雪和雨的临界温度;若两者的温度区间没有交集,则把降雪的最高温度定为雪和雨的临界温度^[11]。

1.2.2 站点温度栅格化 在 ArcGIS 平台下应用克里金(Kriging)插值法(图 2),把站点雪和雨的临界温度从气象站所在地区扩展到广大的非气象站所在地,并用软件 ArcGIS 获取研究区栅格化的雪和雨的临界温度。

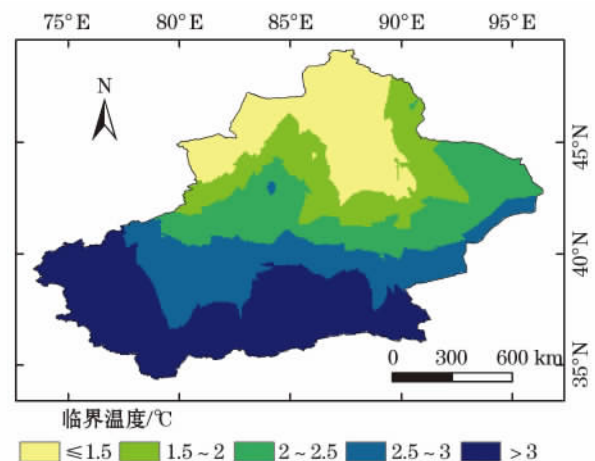


图2 新疆雨和雪临界温度的空间分布

Fig.2 Spatial distribution of the snowfall-rainfall critical temperature in Xinjiang

1.2.3 格点数据 用栅格化的雨和雪的临界温度来判断每个格点处的日降水为降雪或降雨,然后分别统计每年(当年 8 月 1 日到翌年的 7 月 31 日为一个研究周期)的降雪量和降雨量,并对近 53 a 的雪雨比变化进行了研究。

1.3 格点插值与偏差计算

采用指数值为 1 的反距离加权法(inverse distance weighted,简称 IDW)的插值方法,将离气象站点最近的 4 个格点数据进行加权平均,得到该位置的格点时间序列,以此比较插值到站点的格点降水数据与站点降水数据的差异,其公式如下:

$$P = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{P_i}{d_i}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{d_i}}, \quad (i = 1, \dots, n, n = 4) \quad (1)$$

式中: P_i 分别是邻近的 4 个格点的降水量(mm); d_i 分别是位于中间的气象站点距离邻近 4 个格点中心

的距离(m) i 是位于中间气象站点周边的气象站点的个数。

本文采用均方根偏差($RMSD$) 来计算站点降水数据和插值到站点的格点降水数据的差异, 即分别采用实测站点和相应的加权内插格点的时间序列, 按照如下公式计算:

$$RMSD = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (X_{\text{格点}} - X_{\text{站点}})^2_k} \quad (2)$$

式中: $X_{\text{格点}}$ 是插值到站点的格点降水量(mm); $X_{\text{站点}}$ 是站点降水量(mm); k 是降水数据的观测次数。

在数据处理后, 用非参数的森斜率^[24] 法来分析降雪量、降雨量和雪雨比的年际变化率, 用 Mann-Kendall 法来检验各要素线性趋势的显著性。在 ArcGIS 平台下绘制出各要素的倾向率变化的空间分布图, 并分析不同降水类型的空间分布特征。

2 结果分析

2.1 内插格点与实测资料对比分析

从不同站点降水量数据均方根偏差及相关系数可以看出, 绝大部分站点的内插格点数据与实测数据资料偏差较小、相关性较高(图 3)。偏差在 0.2 ~ 1.0 mm 的站点占总数的 72.55%, 相关系数在 0.75 以上的站点占总数的 84.31%。总体来看, 格点降水能够较好地反映新疆地区降水量。

从插值后格点和站点的均方根偏差空间分布情况可以看出, 整个区域内偏差的分布差异不大, 除了位于天山山地的几个站点日平均降水量的均方根偏差相对较大之外, 大部分站点的均方根偏差均在 1.2 mm 以下(图 4a)。而新疆绝大多数实测站点与

其对应的插值后格点降水量均有很好的相关性, 其中天山山地相关系数较小, 但也在 0.75 以上(图 4b)。均方根偏差与相关系数的空间分布特征大致相反, 即均方根偏差较小的站点恰好是相关性较好的站点, 反之, 均方根偏差较大的站点是相关性较差的站点。尽管天山地区部分内插格点偏差较大, 相关系数较小, 但从整个新疆地区来看, 格点数据能够很好地反映新疆地区降水的空间分布格局。

2.2 降雪量和降雨量的时空变化趋势

2.2.1 降雪量和降雨量的时间变化 降雪量和降雨量的变化决定着雪雨比的变化。新疆降雪量和降雨量的时间变化情况如图 5 所示。图 5a 为新疆 1961—2013 年降雪量的时间变化趋势, 可以看出新疆降雪量呈微弱的增加趋势, 其年际变化倾向率为 $0.11 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$, 从 10 a 滑动平均曲线可以看出新疆降雪量在研究时段内总体保持稳定。从新疆降雪量的 UF 曲线可以看出, 降雪量在 1988 年以前呈波动下降趋势, 之后略有上升, 但上升趋势不明显, 在 0.05 的显著性水平检验下, 降雪量并没有发生突变(图 5b)。1961—2013 年新疆降雨量以 $0.63 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$ 的速率呈明显的增加趋势($P < 0.0001$) (图 5c)。从 10 a 滑动平均曲线来看, 新疆降雨量在 1976 年前后发生明显变化, 在 1976 年之前有所波动, 但总体保持平稳, 而在 1976 年以后降水量出现了明显的增加趋势。从新疆降雨量的 UF 曲线可以看出, 1992 年之前 UF 曲线呈波动下降的变化趋势, 1992 年之后 UF 曲线呈明显的持续上升趋势, 在 0.05 的显著性水平检验下, 降雨量在 1992 年左右发生突变(图 5d)。

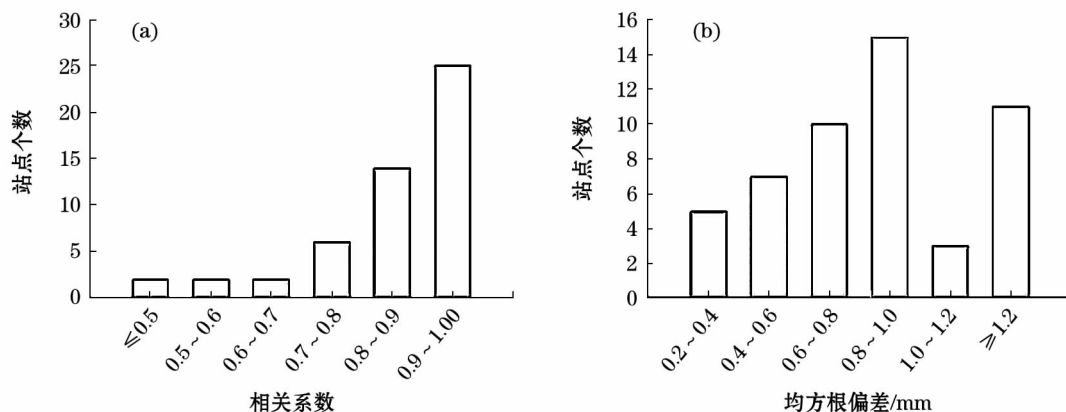


图 3 1961—2013 年新疆地区降水量内插格点数据在不同偏差(a) 及相关系数(b) 范围内的站点数

Fig.3 Number of the interpolated grid boxes of snowfall in different bias ranges (a) and different correlation coefficient ranges (b) in Xinjiang during the period of 1961 – 2013

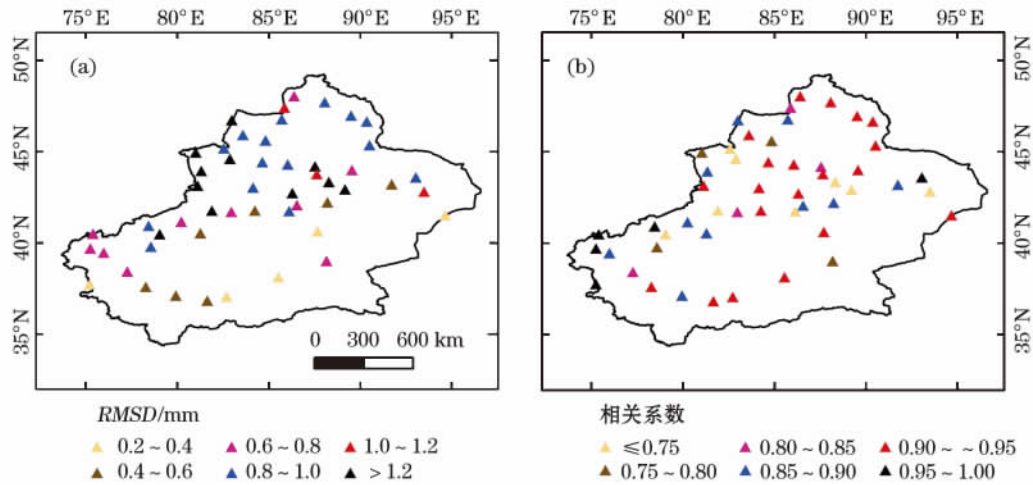


图4 1961—2013 年新疆内插格点降水偏差 (a) 以及内插格点与实测站点年降水量相关系数 (b) 的空间分布

Fig.4 Spatial distribution of precipitation bias in the interpolated grid boxes (a) and the correlation coefficient between the interpolated and observed annual precipitation (b) in Xinjiang during the period of 1961 – 2013

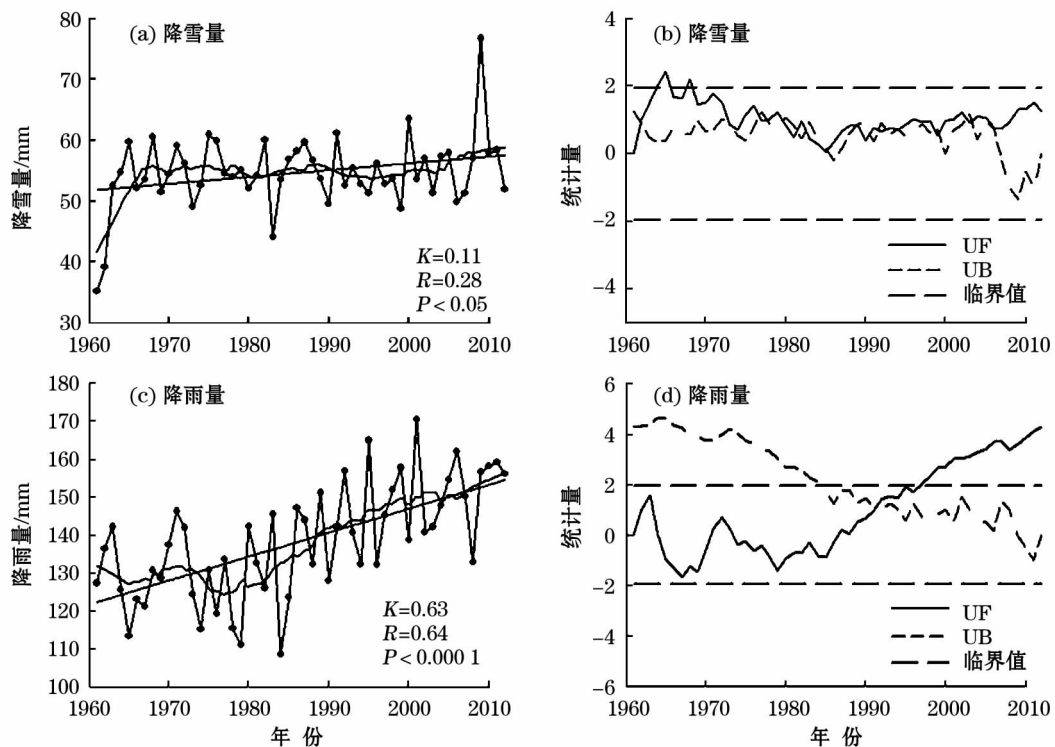


图5 1961—2013 年新疆降雪量和降雨量的时间变化及突变检验

Fig.5 Inter-annual variation and abrupt change of snowfall and rainfall in Xinjiang during the period of 1961 – 2013

2.2.2 降雪量和降雨量的空间分布 在 1961—2013 年,新疆降雪量和降雨量表现出一定的空间分布差异(图 6)。总体而言,新疆降雪量以增加趋势为主,呈增加趋势的格点数占格点总数的 73.60%,其中 28.07% 的格点通过了 0.05 的显著性水平检验,主要集中在阿尔泰山、天山山地北部、昆仑山西部以及准噶尔盆地等,增加幅度最大可达 4.45

$\text{mm} \cdot \text{a}^{-1}$ (图 6a)。从图 6b 可以看出,降雪量格点呈现出明显的南北两区的空间分布格局,塔里木盆地以南分布的格点呈显著减少趋势,而在盆地以北,降雪量显著的格点占格点总数的绝大部分,且呈增加趋势的格点居多;如图 6c 所示,新疆降雨量的年际倾向率在 $-0.13 \sim 3.07 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$ 变动,但呈增加趋势的格点明显占优,大部分都通过了 0.05 的显著

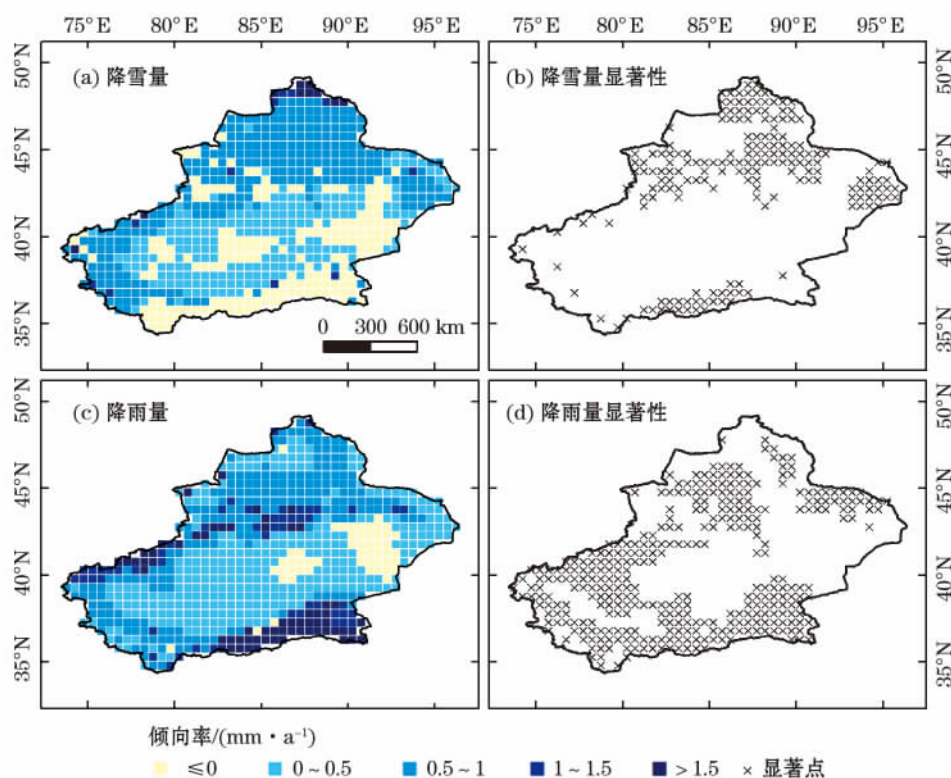


图 6 1961—2013 年新疆降雪量和降雨量变化趋势的空间分布

Fig. 6 Spatial distribution of the trends of snowfall and rainfall in Xinjiang during the period of 1961 – 2013

性水平检验,总体来说,除塔里木盆地和吐鲁番盆地的部分地区有降雨量呈减少趋势的格点分布外,大部分地区降雨量呈增加趋势,尤其在天山山地、昆仑山以及阿尔泰山降雨量增加趋势更为明显。在全区降雨呈大面积增加的情况下,降雨量显著的格点占了格点总数的 48.2%,大部分分布在降雨量较多的昆仑山、天山山地、准噶尔盆地及阿尔泰山等地(图 6d)。

2.3 雪雨比时空变化

1961—2013 年新疆雪雨比表现为下降趋势,其下降幅度为 0.01 a^{-1} ,且通过了 0.05 的显著性水平检验。从其 10 a 滑动曲线来看,新疆雪雨比以 1983 年左右为界,1983 年之前波动下降,其波动幅度较大,1983 年之后持续波动下降,但其波动幅度较小(图 7a)。从新疆雪雨比变化的 UF 和 UB 曲线变化趋势来看,UF 曲线总体趋于波动下降趋势,在 0.05 的显著性水平下,新疆雪雨比在 1991 年左右发生突变(图 7b),突变前均值为 0.68,突变后雪雨比有所下降,均值为 0.40,突变后雨雪比减少了 0.28。

从空间分布来看,在 1961—2013 年,新疆雪雨比倾向率在 $-0.85 \sim 0.50$ 范围内变化,呈上升趋势

的格点占总格点数的 61.6%,有 14.9% 的格点通过了 0.05 的显著性水平检验。呈上升趋势的格点大部分分布在塔里木盆地、准噶尔盆地、准噶尔西部山区、吐鲁番盆地以及阿尔泰山等地。相反,大部分呈下降趋势的格点却分布在降水相对比较充沛的山地,诸如天山山地、昆仑山等地(图 8a)。从图 8b 可以看出,雪雨比显著的格点较少,且大部分雪雨比显著的格点主要分布在雪雨比呈下降趋势的区域,只有少数雪雨比显著的格点分布在雪雨比呈上升的阿尔泰山地区和吐鲁番盆地等。

2.4 不同区域降雪量、降雨量与雪雨比变化

近 53 a 以来,新疆雪雨比倾向率均值在天山山地以北的阿尔泰山、准噶尔西部山区以及准噶尔盆地呈增加趋势,而在天山山地以南,除吐鲁番盆地雪雨比倾向率均值呈增加趋势外,其余地区雪雨比倾向率均值均呈减少趋势,且昆仑山降雪量倾向率均值的减少趋势较为明显。降雪量倾向率均值自北向南呈减少的变化趋势,除了昆仑山降雪量倾向率均值呈减少趋势外,其他地区降雪量均值均呈增加趋势。降雨量倾向率均值在新疆均呈增加趋势,且山区大于盆地,即阿尔泰山、天山山地以及昆仑山降雨

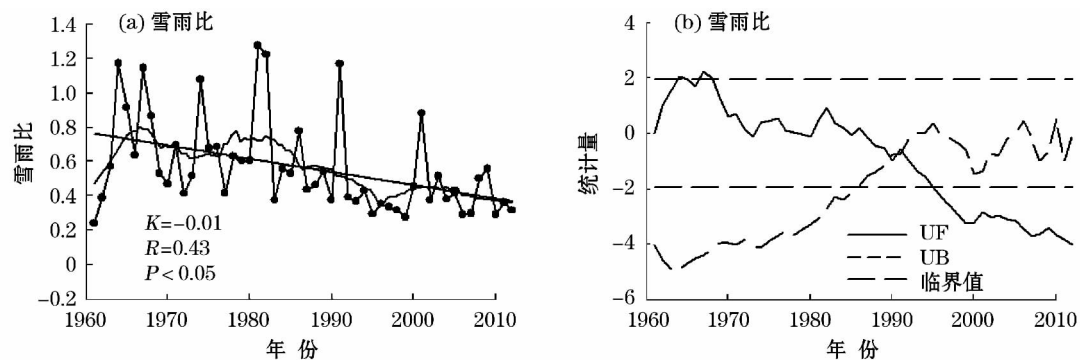


图 7 1961—2013 年新疆雪雨比的时间变化和突变分析

Fig. 7 Inter-annual and abrupt change of S/R ratio in Xinjiang during the period of 1961 – 2013

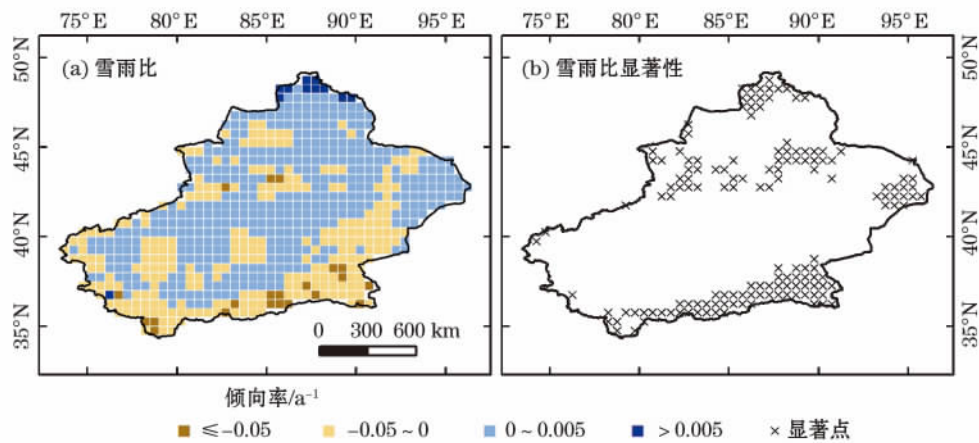


图 8 1961—2013 年新疆雪雨比变化趋势的空间分布

Fig. 8 Spatial distribution of the change trend of S/R ratio in Xinjiang during the period of 1961 – 2013

表 1 1961—2013 年新疆不同区域降雪量、降雨量
和雪雨比倾向率均值

Tab. 1 The average trends of rainfall , snowfall and
S/R ratio in different regions of Xinjiang
during the period of 1961 – 2013

区域	降雪量 /(mm · a ⁻¹)	降雨量 /(mm · a ⁻¹)	雪雨比 /(% · a ⁻¹)
阿尔泰山	0. 708	0. 555	0. 203
准噶尔西部山区	0. 237	0. 493	0. 072
准噶尔盆地	0. 336	0. 656	0. 082
天山山地	0. 072	0. 885	-0. 219
吐鲁番盆地	0. 071	0. 090	0. 033
塔里木盆地	0. 011	0. 267	-0. 051
昆仑山	-0. 189	1. 264	-2. 246

量倾向率均值均呈明显的增加趋势 ,而在准噶尔盆地、吐鲁番盆地以及塔里木盆地降雨量倾向率均值增加趋势次于山区(表 1) 。

2.5 冰川所在区域降雪量、降雨量与雪雨比的空间变化

从新疆冰川所在区域降雪量的空间变化可以看出 ,大部分冰川所在区降雪量倾向率呈增加趋势 ,阿

尔泰山冰川区降雪量增加趋势最为明显 ,而在天山山地西部以及昆仑山东部有部分冰川区降雪量呈减少趋势(图 9a) 。降雨量在新疆冰川所在区域整体呈增加趋势。昆仑山东部降雨量倾向率最大 ,昆仑山西部和天山山地次之 ,阿尔泰山地区降雨量增加趋势最小(图 9b) 。雪雨比受降雨量和降雪量变化的影响 ,在新疆冰川所在区域呈现出相应的变化。即除阿尔泰山冰川所在区雪雨比呈增加趋势外 ,新疆其他冰川所在区雪雨比均呈减少趋势 ,而且在昆仑山东部的部分地区雪雨比的减少趋势较为明显 (图 9c) 。

3 讨论

新疆高山地区冰川和积雪消融径流占总径流量的 45% 以上 ,积雪和冰川融水对新疆河流补给起到了至关重要的作用⁽²⁵⁾ 。而新疆冰川主要分布在阿尔泰山、天山山地以及昆仑山。阿尔泰山冰川是我国冰川面积年平均减少率最大 ,退缩最强烈的地方 ,自 1960—2009 年冰川面积减少了 36. 91%⁽²⁶⁾ 。天

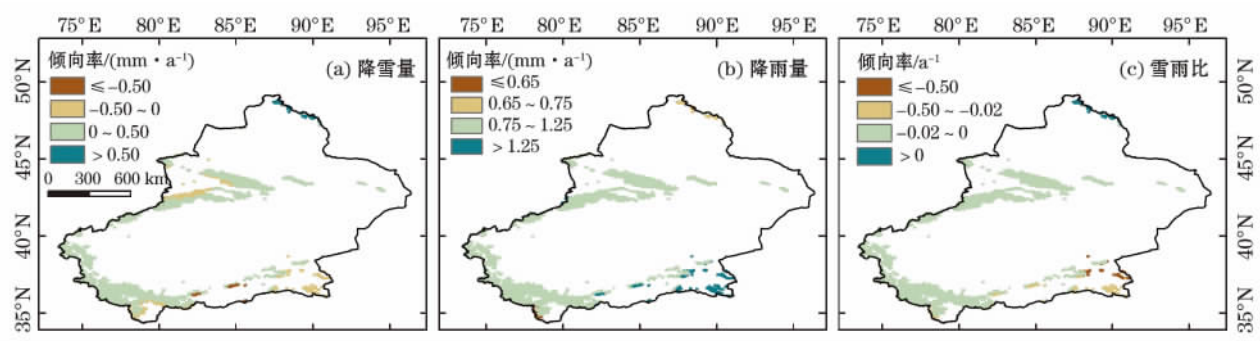


图9 1961—2013 年新疆冰川所在区域降雪量、降雨量和雨雪比变化趋势的空间分布

Fig.9 Spatial distribution of the change trends of snowfall, rainfall and S/R ratio in the glacial areas in Xinjiang during the period of 1961 – 2013

山山地冰川也处于退缩状态,近 50 a 冰川面积减少了 11.5%^[27]。昆仑山冰川亦出现退缩的态势,但昆仑山西段和东段的冰川面积变化不尽相同,西段冰川面积自 1976—2010 年减少了 4.1%^[28],东段 1990—2010 年减少了 12.03%^[29]。新疆冰川出现不同程度的退缩,其变化与气温和降水有关。本文得出的结果与已有研究相似,新疆地区降水(包括降雨和降雪)呈不同程度的增加趋势^[30-32],而降水增加主要归因于全球变暖所带来的境外输入水汽量的增加^[30-33],降雨量和降雪量呈现的增加趋势不同,导致在新疆的不同地区雪雨比呈现出不同的变化态势,如在新疆冰川所在区域雪雨比除阿尔泰山呈增加趋势外,其余冰川所在区均呈减少趋势,而且在昆仑山东部减少的趋势较为明显。由此可见,雪雨比增加的区域其冰川的退缩更为明显,而在雪雨比减少的地区冰川的退缩较为缓慢。可以推断降水不是冰川变化的主要因素。而在全球气温普遍升高的背景下,新疆气温在春夏秋冬四季表现出 1.5℃、0.8℃、1.2℃、1.6℃ 的升温,总体呈现了“北疆高,南疆低”的空间变化趋势^[15],而气温的增加趋势与新疆冰川面积减少趋势相似。已有研究显示,夏季气温增加 1℃,要保持平衡线不变,固态降水增幅在年降水量的 40% 以上,甚至增加约 1 倍^[34]。而在新疆阿尔泰山、天山山地以及昆仑山降雪量的增加幅度均未超出升温导致冰川的消融量,所以,在降水增加的情况下,冰川依旧出现大面积的退缩,说明导致新疆冰川面积退缩的主要原因是气温的不断升高,这与一些学者的研究^[27-28,35]结果相符。

本文基于 1961—1979 年站点降水和气温数据,采用概率统计的方法确定雪和雨的临界温度,并将其插值到新疆全区,以栅格化的雪和雨的临界温度

为依据,将 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 格点降水分为降雪和降雨。由于本研究所用新疆气象站点在山区和盆地都有分布,所以,该方法所获得的站点雪和雨的临界温度考虑到山区与盆地降水临界温度的差异,能够弥补模型(如 BATS 模型、DHSVH 模型、NCAR 模型及 HBV 模型等)所采用单阈值在复杂地形区精度较差的不足。然而,该过程也存在一些不足之处,在区分降水类型时并没有将雨夹雪分离出来,而且将降水为雨和雪划分到降雨之中。该做法低估了年降雪量,高估了年降雨量,所以,在研究新疆整个区域雪雨比变化过程中存在不足,在今后的研究中有必要对雨和雪的区分方法做进一步完善。

4 结论

(1) 选取的新疆 1961—2013 年 51 个气象站点和覆盖 697 个格点日降水和日平均气温资料,内插到气象站点位置的格点资料和气象站点实测数据之间的偏差普遍较小,偏差在 0.2~1.0 mm 的站点个数占总个数的 72.55%,在绝大多数区域两者之间的相关系数均在 0.80 以上。从整个新疆地区来看,格点数据能够很好地反映新疆降水的变化情况。

(2) 从时间尺度看,1961—2013 年新疆降雪量呈微弱的上升趋势,上升幅度为 $0.11 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$,但没有通过 0.05 的显著性水平检验。降雨量以 $0.63 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$ 的速率呈明显的上升趋势($P < 0.0001$),突变时间出现在 1992 年左右。雪雨比表现为略微的下降趋势,幅度为 0.01 a^{-1} ($P < 0.05$)。

(3) 从空间尺度看,新疆降雪量以增加趋势为主,呈增加趋势的格点数占格点总数的 73.60%,其中 28.07% 的格点通过了 0.05 的显著性水平检验。新疆降雨量也呈增加趋势,降雨量的年际倾向率在

$-0.13 \sim 3.07 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$, 但呈增加趋势的格点明显占优, 大部分都通过了 0.05 的显著性水平检验。新疆雪雨比倾向率在 $-0.85 \sim 0.50$ 范围内变化, 呈上升趋势的格点占总格点数的 61.6%, 其中有 14.9% 的格点通过了 0.05 的显著性水平检验。

(4) 新疆降雪量倾向率均值自北向南呈减小的变化趋势, 降雨量倾向率均值在新疆均呈增加趋势, 且山区大于盆地。雪雨比倾向率均值在天山山地以北呈增加趋势, 而在天山山地以及天山山地以南主要呈减少趋势。

(5) 新疆冰川所在区降雨量整体呈增加趋势, 且南部降雨量倾向率大于北部; 降雪量倾向率北部呈增加趋势, 而南部呈减少趋势; 雪雨比与降雪量倾向率呈现出相似的变化趋势。

参考文献 (References):

- (1) Yu L, Liu T, Bu K, et al. Influence of snow cover changes on surface radiation and heat balance based on the WRF model (J). *Theoretical and Applied Climatology*, 2016, doi: 10.1007/s00704-016-1856-0.
- (2) Mote P, Hamlet A, Salathé E. Has spring snowpack declined in the Washington Cascade? (J). *Hydrology and Earth System Sciences*, 2008, 12(1): 193-206.
- (3) Screen J A, Simmonds I. Declining summer snowfall in the Arctic (J). *Climate Dynamics*, 2012, 38(11/12): 2243-2256.
- (4) Serquet G, Marty C, Dulex J P, et al. Seasonal trends and temperature dependence of the snowfall/precipitation-day ratio in Switzerland (J). *Geophysical Research Letters*, 2011, 38(7). doi: 10.1029/2011GL046976.
- (5) Guo L, Li L. Variation of the proportion of precipitation occurring as snow in the Tian Shan Mountains, China (J). *International Journal of Climatology*, 2015, 35(7): 1379-1393.
- (6) Scipión D E, Mott R, Lehning M, et al. Seasonal small-scale spatial variability in alpine snowfall and snow accumulation (J). *Water Resources Research*, 2013, 49(3): 1446-1457.
- (7) Berghuijs W R, Woods R A, Hrachowitz M. A precipitation shift from snow towards rain leads to a decrease in streamflow (J). *Nature Climate Change*, 2014, 4(7): 583-586.
- (8) Huntington T G, Hodgkins G A, Keim B D, et al. Changes in the proportion of precipitation occurring as snow in New England (1949-2000) (J). *Journal of Climate*, 2004, 17(13): 2626-2636.
- (9) Knowles N, Dettinger M D, Cayan D R. Trends in snowfall versus rainfall in the western United States (J). *Journal of Climate*, 2006, 19(18): 4545-4559.
- (10) Feng S, Hu Q. Changes in the agro-meteorological indicators in the contiguous United States: 1951-2000 (J). *Theoretical and Applied Climatology*, 2004, 78(4): 247-264.
- (11) 王杰, 张明军, 王圣杰, 等. 基于高分辨率格点数据的 1961—2013 年青藏高原雪雨比变化 (J). *地理学报*, 2016, 71(1): 142-152. (Wang Jie, Zhang Mingjun, Wang Shengjie, et al. Change of snowfall/rainfall ratio in the Tibetan Plateau based on a gridded dataset with high resolution during 1961-2013 (J). *Acta Geographica Sinica*, 2016, 71(1): 142-152.)
- (12) 王静爱. 中国地理教程 (M). 北京: 高等教育出版社, 2007: 578-581. (Wang Jing'ai. *China Geography Tutorial* (M). Beijing: Higher Education Press, 2007: 578-581.)
- (13) 赵成义, 施枫芝, 盛钰, 等. 近 50 a 来新疆降水随海拔变化的区域分异特征 (J). *冰川冻土*, 2011, 33(6): 1203-1213. (Zhao Chenyi, Shi Fengzhi, Sheng Yu, et al. Regional differentiation characteristics of precipitation changing with altitude in Xinjiang region in recent 50 years (J). *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2011, 33(6): 1203-1213.)
- (14) 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.)
- (15) 李景林, 张山清, 普宗朝, 等. 近 50 a 新疆气温精细化时空变化分析 (J). *干旱区地理*, 2013, 36(2): 228-237. (Li Jinglin, Zhang Shanqing, Pu Zongchao, et al. Spatial-temporal variation of seasonal and annual air temperature in Xinjiang during 1961-2010 (J). *Arid Land Geography*, 2013, 36(2): 228-237.)
- (16) Zhu X F, Zhang M J, Wang S J, et al. Comparison of monthly precipitation derived from high-resolution gridded datasets in arid Xinjiang, Central Asia (J). *Quaternary International*, 2015, 358: 160-170.
- (17) 赵煜飞, 朱江. 近 50 年中国降水格点日值数据集精度及评估 (J). *高原气象*, 2014, 34(4): 414-420. (Zhao Yufei, Zhu Jiang. Establishment and assessment of the grid precipitation datasets in China for recent 50 years (J). *Journal of the Meteorological Sciences*, 2014, 34(4): 414-420.)
- (18) Yang Z L, Dickinson R E, Robock A, et al. Validation of the snow submodel of the biosphere-atmosphere transfer scheme with Russian snow cover and meteorological observational data (J). *Journal of Climate*, 1997, 10(2): 353-373.
- (19) Wigmosta M S, Vail L W, Lettenmaier D P. A distributed hydrology-vegetation model for complex terrain (J). *Water Resources Research*, 1994, 30(6): 1665-1679.
- (20) David-Labor E, Heilig M. Hydrologische prognosen in Niederösterreich (J). *Wiener Mitteilungen*, 2004, 164: 101-112.
- (21) Lindström G, Johansson B, Persson M, et al. Development and test of the distributed HBV-96 hydrological model (J). *Journal of Hydrology*, 1997, 201(1): 272-288.
- (22) 韩春坛, 陈仁升, 刘俊峰, 等. 固液态降水分离方法探讨 (J). *冰川冻土*, 2010, 32(2): 249-256. (Han Chuntan, Chen Rensheng, Liu Junfeng, et al. A discuss of the separating solid and liquid precipitations (J). *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2010, 32(2): 249-256.)
- (23) Chen R, Liu J, Song Y. Precipitation type estimation and validation in China (J). *Journal of Mountain Science*, 2014, 11(4): 917-925.
- (24) Sen P K. Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau (J). *Journal of American Statistical Association*, 1968, 39: 1379-1389.
- (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 responses of glaciers and snow cover to climate change in Xinjiang I. Hydrological effects (J). Journal of Glaciology and Geocryology, 2013, 35(3): 513–527.)
- (26) 姚晓军, 刘时银, 郭万钦, 等. 近 50 年来中国阿尔泰山冰川变化——基于中国第二次冰川编目成果 (J). 自然资源学报, 2012, 27(10): 1734–1745. (Yao Xiaojun, Liu Shiyin, Guo Wanqin, et al. Glacier change of Altay Mountain in China from 1960 to 2009 based on the second glacier inventory of China (J). Journal of Natural Resources, 2012, 27(10): 1734–1745.)
- (27) Wang S, Zhang M, Li Z, et al. Glacier area variation and climate change in the Chinese Tianshan Mountains since 1960 (J). Journal of Geographical Sciences, 2011, 21(2): 263–273.
- (28) 李成秀, 杨太保, 田洪泽. 近 40 年来西昆仑山冰川及冰湖变化与气候因素 (J). 山地学报, 2015, 33(2): 157–165. (Li Chengxiu, Yang Taibao, Tian Hongzhen. Variation of western Kunlun Mountain glaciers monitored by remote sensing during 1976–2010 (J). Mountain Research, 2015, 33(2): 157–165.)
- (29) 姜珊. 基于遥感的东昆仑山冰川和气候变化研究 (D). 兰州: 兰州大学, 2012. (Jiang Shan. Research on Glacier and Climate Change in the Eastern Kunlun Mountains Based on Remote Sensing (D). Lanzhou: Lanzhou University, 2012.)
- (30) 蓝永超, 沈永平, 苏宏超, 等. 全球变暖情景下新疆降水的变化 (J). 干旱区资源与环境, 2008, 22(10): 66–71. (Lan Yongchao, Shen Yongping, Su Hongchao, et al. Study on precipitation variations in Xinjiang region under global warming (J). Journal of Arid Land Resources and Environment, 2008, 22(10): 66–71.)
- (31) 张延伟, 魏文寿, 姜逢清, 等. 近 50 年新疆气温和降水量变化及其与 NAO 指数的交叉小波谱分析 (J). 高原气象, 2012, 31(4): 947–982. (Zhang Yanwei, Wei Wenshou, Jiang Fengqing, et al. Relationship between the North Atlantic Oscillation and climate change in Xinjiang in recent 50 year (J). Plateau Meteorology, 2012, 31(4): 947–982.)
- (32) 戴新刚, 汪萍, 张凯静. 近 60 年新疆降水趋势与波动机制分析 (J). 物理学报, 2013, 62(12): 1–11. (Dai Xingang, Wang Ping, Zhang Kaijing. A study on precipitation trend and fluctuation mechanism in northwestern China over the past 60 years (J). Journal of Physical Sciences, 2013, 62(12): 1–11.)
- (33) 戴新刚, 李维京, 马柱国. 近十几年新疆水汽源地变化特征 (J). 自然科学进展, 2006, 16(12): 1651–1656. (Dai Xingang, Li Weijing, Ma Zhuguo. The variation of the water vapor sources of Xinjiang in recent years (J). Progress in Natural Science, 2006, 16(12): 1651–1656.)
- (34) 康尔泗. 高亚洲冰冻圈能量平衡特征和物质平衡变化计算研究 (J). 冰川冻土, 1996, 18(增刊): 12–22. (Kang Ersi. Characteristics of energy balance and computation on the mass balance change of the High-Asia cryosphere (J). Journal of Glaciology and Geocryology, 1996, 18(Suppl.): 12–22.)
- (35) 张明军, 王圣杰, 李忠勤, 等. 近 50 年气候变化背景下中国冰川面积状况分析 (J). 地理学报, 2011, 66(9): 1155–1165. (Zhang Mingjun, Wang Shengjie, Li Zhongqin, et al. Variation of glacier area in China against the warming in the past 50 years (J). Journal of Geographical Sciences, 2011, 66(9): 1155–1165.)

Change of Snowfall/Rainfall Ratio in Xinjiang during the Period of 1961–2013

WANG Jie, ZHANG Ming-jun, WANG Sheng-jie, REN Zheng-guo, CHE Yan-jun, QIANG Fang
(College of Geography and Environmental Science, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, Gansu, China)

Abstract: Based on the $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ daily precipitation and daily mean temperature datasets and the daily precipitation and temperature datasets measured by the meteorological stations and released by National Meteorological Information Center, the credibility of gridded datasets of precipitation in Xinjiang during the period of 1961–2013 was evaluated, and the spatiotemporal changes of rainfall, snowfall and snowfall/rainfall ratio (S/R) in Xinjiang were analyzed. The results showed that the deviation between the interpolated gridded data and the observed data was generally low. The deviation ranged from 0.2 to 1.0 mm at 72.55% stations. The correlation coefficients at most stations were higher than 0.80. Snowfall in Xinjiang was in a slight increase trend by a rate of $0.11 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$ during the period of 1961–2013, but it was not statistically significant at 0.05 level. Rainfall was in an obvious increase trend by a rate of $0.63 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$ ($P < 0.0001$), and the mutation occurred around 1992. S/R ratio was in a decrease trend by a rate of 0.01 a^{-1} ($P < 0.05$), and the mutation occurred around 1991. The spatial distribution of snowfall, rainfall and S/R was different, in which snowfall and rainfall were holistically in increase trends. The S/R was in an increase trend in the area north of the Tianshan Mountains, but in a decrease trend in the Tianshan Mountains and the area south of the Tianshan Mountains. In the area where modern glaciers are distributed, snowfall was in an increase trend in north Xinjiang, but in a decrease trend in southeast Xinjiang. Rainfall was in an increase trend, especially in southeast Xinjiang, and the S/R was in a trend similar to that of snowfall.

Key words: snowfall/rainfall ratio; trend; glacier; Xinjiang