

近 58 年天山降雪/降水量比率变化特征及未来趋势

秦 艳^{1,2}, 赵求东³, 孟 杰⁴, 丁建丽^{1,2*}

(1. 新疆大学资源与环境科学学院智慧城市与环境建模自治区普通高校重点实验室, 乌鲁木齐 830046; 2. 新疆大学绿洲生态教育部重点实验室, 乌鲁木齐 830046; 3. 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 兰州 730000; 4. 新疆水利厅, 乌鲁木齐 830000)

摘 要: 降雪/降水量比率 (S/P) 能够反映不同形态降水特征, 对气候变化十分敏感。该文基于天山及周边 49 个气象台站观测数据和 IPCC-CMIP5 气候情景数据, 分析了近 58 a 来中国天山山区冷季 (10-4 月) 降雪量、降水量和 S/P 时空变化特征, 并预估在 RCP4.5 排放情景下各指标的未来变化趋势。结果表明: 天山山区冷季 S/P 受地形影响, 呈山区大于盆地, 北坡大于南坡的分布格局, 与海拔显著正相关。1961—2018 年天山山区平均冷季降雪量、降水量均显著增加, S/P 变化不大, 在 0.35~0.67 之间波动, 以 -0.016%/10a 的速率呈微弱减少趋势; 平均气温变化是引起 S/P 变化的重要因素。在 RCP4.5 气候情景下, 天山山区未来冷季降雪量缓慢减少, 降水量显著增加, S/P 显著减少。相比基准期 (1986—2005 年), 到 2050s 冷季降雪量平均减少 8.9%, 降水量增加 10.1%, S/P 减少 14.7%。该研究对科学认识全球变暖背景下天山地区水文响应以及区域水资源调控具有重要意义。

关键词: 气候变化; 降雪量; 降水量; 天山; 未来趋势; 时空变化

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2020.04.018

中图分类号: P334⁺.92; TV121⁺.6

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2020)-04-0150-09

秦 艳, 赵求东, 孟 杰, 丁建丽. 近 58 年天山降雪/降水量比率变化特征及未来趋势[J]. 农业工程学报, 2020, 36(4): 150—158. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2020.04.018 http://www.tcsae.org

Qin Yan, Zhao Qiudong, Meng Jie, Ding Jianli. Variation characteristics and future trends of the snowfall/precipitation ratio in Tianshan Mountains in recent 58 years[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2020, 36(4): 150—158. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2020.04.018 http://www.tcsae.org

0 引 言

降水是水循环和能量循环的关键要素, 其主要形态有固态降雪和液态降雨。不同形态的降水将对地表物质和能量平衡、水循环产生极大的影响。当降雪发生时, 地表反射率急剧升高, 地面吸收的太阳辐射减少, 产生冷却效应^[1]。同时降雪以积雪形式存储于地表, 升温时融化补给河川径流。在中国西北干旱区, 山区融雪径流极大地缓解了中、下游枯水期的用水矛盾, 对农业生产十分重要^[2]。当降水以降雨形式发生时, 则会迅速下渗并汇集到河流或地下水中, 起到与降雪完全不同的作用。近几十年来, 随着全球变暖, 气温升高将引起更多的降水可能以降雨形式发生^[3-4], 进而引起积雪面积减少^[5], 积雪提前融化, 径流的季节分配改变等^[6]。对于高度依赖融雪径流的中国内陆干旱区来说, 这种雪-雨转换的微小变化都可能对农业生产和生态环境产生重要影响。因此, 开展不同降水类型变化研究至关重要。

降雪/降水量比率即降雪量与总降水量之比

(snowfall/precipitation, S/P), 作为气候变化的衡量指标之一, 能够直接反映不同形态降水比例变化, 受到国内外学者广泛重视。过去几十年来, 随着气温升高, 美国^[7-8]、新英格兰^[9]、加拿大北部^[10]等地 S/P 表现出不同程度的减少趋势。Serquet 等^[11]发现瑞士过去 100 年间降水中降雪发生的日数比例也呈显著减少趋势, 其变化与气温升高有关。此外, Berghuijs 等^[6]还关注了雪-雨转化的可能后果, 研究表明因气候变暖引起的降雪向降雨转变会导致径流量减少。与国外相比, 国内对降雪或降雨比率的相关研究起步较晚且数量有限。Guo 等^[12]分析 1961—2010 年天山山区气象站点冷季 S/P 变化表明天山山区平均 S/P 值呈微弱的减少趋势, 温度的变化是引起 S/P 变化的重要因素; 陈亚宁等^[5]对中亚天山 4 个区域过去 50 年来气象资料分析结果显示, 天山山区年降雪率从 1960—1998 年的 11%~24%降低到 2000 年以来的 9%~21%。王杰等^[13-14]利用气象格点数据, 分析 1961—2013 年青藏高原和新疆的雪雨比 (snowfall/rainfall, S/R) 变化特征, 结果表明青藏高原的雪雨比呈下降趋势, 新疆的雪雨比变化空间差异较大, 其中天山以北雪雨比增加, 天山以南以减少趋势为主, 新疆总体表现为略微减少趋势。任正果^[15]分析表明 1961—2013 年新疆雪雨比以每年 0.001 的速率微弱上升, 但预测未来雪雨比将会减少。上述对不同区域的 S/P 或 S/R 研究对于认识气候变化对不同降水形态比例变化特征具有很好的指导意义。但其中针对中国天山山区及周边相关研究, 因基础数据差异和降雪判别标准不同, 导

收稿日期: 2019-10-17 修订日期: 2020-02-01

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (41771470, 41961059, 41871059); 新疆教育厅自然科学基金重点项目 (XJEDUI20181008)

作者简介: 秦 艳, 讲师, 博士生, 主要从事干旱区气候变化与水文水资源研究。Email: qinyan0215@163.com

*通信作者: 丁建丽, 教授, 博士, 博士生导师, 主要从事干旱区资源环境遥感。Email: watarid@xju.edu.cn

致对天山局部 S/P 变化趋势结论尚不统一。降水相态转变一般包含降雪、雨夹雪、降雨 3 个阶段，已有研究中多未考虑季节交替期频繁出现的雨夹雪情况；此外，在气候持续变暖背景下，对 S/P 未来变化趋势的研究涉及较少。

位于欧亚大陆腹地的天山山脉，是干旱区域最大的“湿岛”。源于天山的河流均有冰雪融水补给，新疆 65% 的河流发源于此^[3]。近半个世纪以来，天山山区气温增幅^[16] (0.34°C/10a) 超过全球^[17] (0.175°C/10a) 和中国^[18] (0.22°C/10a) 平均增幅，是全球气候的敏感区域。随着气温持续升高，降雪受气候变化影响的复杂性和不确定性增加，进一步加剧了干旱区绿洲农业经济与荒漠生态两大系统间的水资源供需矛盾。深入分析天山山区 S/P 变化趋势及其与温度的关系，能够消除降水对降雪的影响，客观反映气候变暖对降雪的影响。因此，本文基于 1961—2018 年天山山区及周边 49 个气象台站观测数据，结合 IPCC-CMIP5 气候情景数据，采用多参数降雪识别方法，综合分析降雪量、降水量、S/P 降水指标的时空变化特征，并预估在 RCP4.5 中低排放情景下各指标的未来变化趋势。该研究有助于提升对天山山区降水变化的认知，为当地应对气候变化、区域水资源调控与管理提供参考。

1 研究区概况

中国境内的天山山脉地处 73°30′~96°06′ E, 39°36′~45°30′ N，是亚洲中部最大的山系，位于干旱和半干旱地区。由数列山地和山间盆地组成的纬向山脉组成，横跨新疆全境，绵延 1 700 km，平均宽度 250~350 km，呈不规则“X”型分布。南北分别与塔克拉玛干沙漠和库尔班通古特沙漠相接，地形独特，生态环境脆弱。山势西高东低，山脊平均海拔 4 000 m，是南北疆气候的分界岭。受纬向西风环流和地形影响，天山山区降水分布差异较大，西部和北部山区降水丰沛，年均降水量约 300 mm，其中伊犁河谷上游山区最大可达 1 000 mm，东部和南部降水稀少，不到 150 mm^[19]。山区冬季寒冷漫长，降水主要以降雪为主，是新疆三大山系降雪最多的山区^[20]。对于缺水的干旱地区，山区降水是冰川、积雪和径流的根本来源，对下游农业生产和经济可持续发展尤为重要。为便于描述各降雪指标的空间特征，以天山山脉主要山脊线将研究区划分为天山北坡、天山南坡和伊犁河谷三个区域，详见图 1。

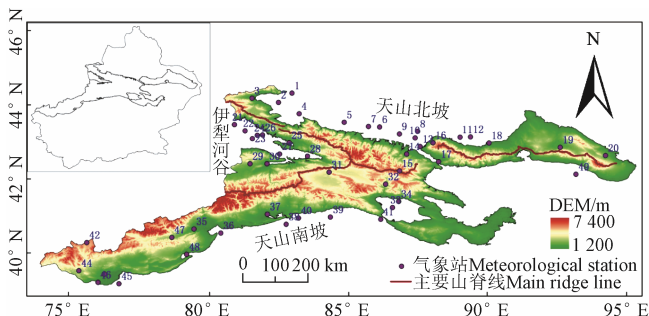


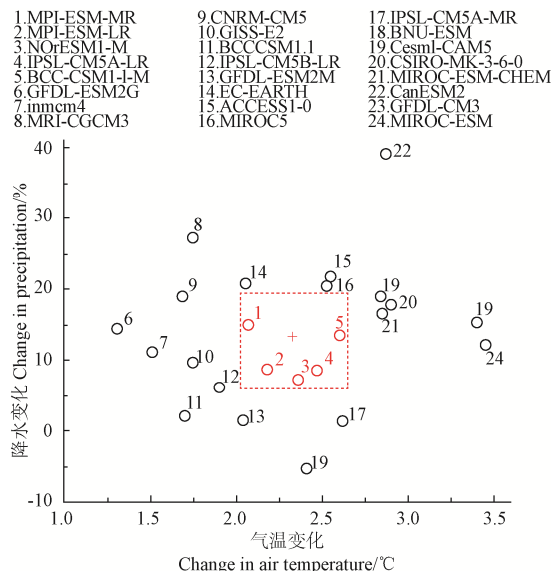
图 1 研究区示意图
Fig.1 Location of study area

2 数据及方法

2.1 站点观测数据和气候情景数据

本文收集天山山区及周边 61 个气象台站逐日降水量、气温、相对湿度、气压等资料，数据来源于中国国家气象信息中心。该数据发布前已经过严格的质量控制，其完整性和准确性良好。为进一步提升数据质量，依据资料的连续性、台站迁移等情况，最终选取天山山区及周边 1960 年 10 月—2018 年 4 月年均降雪量≥5 mm (水当量) 的 49 个站点，站点分布及详细信息见图 1 和表 1。考虑到该区域气象特征，降雪主要集中于 10 月—4 月，将上一年的 10 月 1 日至当年的 4 月 31 日定义为一个冷季，依此类推，得到 58 a (1961—2018 年) 的冷季气象数据。

IPCC-CMIP5 的全球气候模式 (general circulation model, GCM) 数据是目前进行未来气候预估的重要数据来源^[21]。为了分析气候变化背景下未来 S/P 的可能变化，本文选取了符合中国发展目标的中低端典型浓度路径 RCP4.5 排放情景，从完整包含降水量、气温、湿度、气压变量的 24 个模式中，提取气象站点所在格网的模式结果变量数据，分析 21 世纪中期 (2041—2060 年) 相对基准期 (1986—2005 年) 的冷季月降水量、平均气温关键指标变化程度，筛选出 5 个接近平均水平的 GCM 模式来研究未来冷季降雪量、降水量及 S/P 变化 (图 2)。具体包括 MPI-ESM-MR、MPI-ESM-LR、NorESM1-M、IPSL-CM5A-LR、BCC-CSM1-1-M 模式历史情景和未来 RCP4.5 排放情景下的日降水量、平均气温、相对湿度和气压数据。GCM 模式数据的获取及更多详细的相关信息可参考 CEDA (Centre for Environmental Data Analysis: <http://www.ceda.ac.uk>) 网站。



注：1-5 为选取的 GCMs 模式。

Note: 1-5 are the selected five GCMs.

图 2 RCP 4.5 情景下 GCMs 模式预估的 21 世纪中叶 (2041—2060 年) 冷季平均气温和降水相对于基准期 (1981—2005 年) 的变化情况

Fig.2 Projected change in cold season average air temperature and percentage in cumulative precipitation between the historical (1981—2005) and midcentury (2041—2060) periods under RCP4.5

表 1 气象站点信息
Table1 Information of meteorological stations

| 序号 No. | 站点 Stations | 纬度 Latitude/ °N | 经度 Longitude/ °E | 高程 Elevation/ m | 降雪量 Snowfall/ mm | 序号 No. | 站点 Stations | 纬度 Latitude/ °N | 经度 Longitude/ °E | 高程 Elevation/ m | 降雪量 Snowfall/ mm |
|-----------|----------------|-----------------------|------------------------|-----------------------|------------------------|-----------|----------------|-----------------------|------------------------|-----------------------|------------------------|
| 1 | 阿拉山口 | 45.18 | 82.58 | 286 | 22.2 | 26 | 伊宁县 | 43.97 | 81.53 | 771 | 97.1 |
| 2 | 博乐 | 44.9 | 82.07 | 533 | 29.9 | 27 | 巩留 | 43.47 | 82.23 | 776 | 54.5 |
| 3 | 温泉 | 44.97 | 81.02 | 1 354 | 40.3 | 28 | 新源 | 43.45 | 83.3 | 929 | 85.8 |
| 4 | 精河 | 44.62 | 82.9 | 321 | 20.8 | 29 | 昭苏 | 43.15 | 81.13 | 1 855 | 72.0 |
| 5 | 乌苏 | 44.43 | 84.67 | 478 | 38.0 | 30 | 特克斯 | 43.18 | 81.77 | 1 211 | 46.0 |
| 6 | 石河子 | 44.32 | 86.05 | 444 | 52.6 | 31 | 巴音布鲁克 | 43.03 | 84.15 | 2 459 | 45.0 |
| 7 | 沙湾 | 44.33 | 85.62 | 523 | 50.6 | 32 | 巴伦台 | 42.73 | 86.3 | 1 738 | 7.8 |
| 8 | 蔡家湖 | 44.2 | 87.53 | 441 | 35.7 | 33 | 焉耆 | 42.08 | 86.57 | 1 057 | 6.8 |
| 9 | 呼图壁 | 44.13 | 86.82 | 522 | 44.6 | 34 | 和硕 | 42.25 | 86.8 | 1 087 | 9.9 |
| 10 | 昌吉 | 44.02 | 87.43 | 579 | 48.8 | 35 | 乌什 | 41.22 | 79.23 | 1 397 | 11.7 |
| 11 | 吉木萨尔 | 44.02 | 89.17 | 735 | 43.7 | 36 | 阿克苏 | 41.17 | 80.23 | 1 105 | 8.1 |
| 12 | 奇台 | 44.02 | 89.57 | 794 | 44.6 | 37 | 拜城 | 41.78 | 81.9 | 1 230 | 15.2 |
| 13 | 乌鲁木齐 | 43.78 | 87.62 | 919 | 78.2 | 38 | 新和 | 41.53 | 82.62 | 1 015 | 7.1 |
| 14 | 小渠子 | 43.57 | 87.1 | 2 161 | 140.9 | 39 | 轮台 | 41.78 | 84.25 | 978 | 6.0 |
| 15 | 天山大西沟 | 43.1 | 86.83 | 3 544 | 295.3 | 40 | 库车 | 41.72 | 83.07 | 1 083 | 7.7 |
| 16 | 天池 | 43.88 | 88.12 | 1 935 | 146.0 | 41 | 库尔勒 | 41.75 | 86.13 | 933 | 5.3 |
| 17 | 达板城 | 43.35 | 88.32 | 1 104 | 6.4 | 42 | 吐尔杂特 | 40.52 | 75.4 | 3 507 | 153.0 |
| 18 | 木垒 | 43.83 | 90.28 | 1 271 | 79.4 | 43 | 阿图什 | 39.72 | 76.17 | 1 299 | 15.9 |
| 19 | 巴里坤 | 43.6 | 93 | 1 651 | 46.7 | 44 | 乌恰 | 39.72 | 75.25 | 2 178 | 35.0 |
| 20 | 伊吾 | 43.27 | 94.7 | 1 730 | 15.5 | 45 | 伽师 | 39.5 | 76.73 | 1 213 | 7.5 |
| 21 | 霍尔果斯 | 44.2 | 80.42 | 774 | 66.5 | 46 | 喀什 | 39.47 | 75.98 | 1 291 | 13.1 |
| 22 | 霍城 | 44.05 | 80.85 | 641 | 64.6 | 47 | 阿合奇 | 40.93 | 78.45 | 1 986 | 24.6 |
| 23 | 察布查尔 | 43.85 | 81.15 | 601 | 57.8 | 48 | 柯坪 | 40.5 | 79.05 | 1 163 | 6.1 |
| 24 | 伊宁 | 43.95 | 81.33 | 664 | 74.9 | 49 | 哈密 | 42.82 | 93.52 | 738 | 7.3 |
| 25 | 尼勒克 | 43.8 | 82.57 | 1 106 | 80.7 | | | | | | |

注：降雪量为 1961—2018 年多年平均降雪量，单位为 mm 水当量。
Note: Snowfall is the annual average snowfall during 1961 to 2018, the unit is mm water equivalent.

2.2 降雪识别方法

因气象观测数据集对 1979 年后降水类型（降雨/降雪/雨夹雪）未做标注，需依据其他气象资料对降水类型进行判识，进而确定日降雪量。常用的降水类型识别方法有单临界气温阈值法^[22]、双临界气温阈值法^[23-24]及湿球温度阈值法^[25]等。相比干球温度，湿球温度能解释蒸发冷却效应，对降雪的发生判断更具优势^[23]。Ding 等基于中国气象台站观测数据，建立的包含湿球温度、气压、相对湿度和高程的多要素降水类型判识方案计算单日降雪量。该方案通过比较湿球温度与临界温度判断降水类型，判识准确度高于临界气温阈值等方法^[26]。故本文采用该方案计算单日降雪量

$$P_s = P \cdot f_s \quad (1)$$

式中， P_s 、 P 分别为日降雪量和日降水量，mm； f_s 为固态降雪比例，可由下式计算

$$f_s = \begin{cases} 1 & T_w \leq T_{min} \\ \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{T_w - T_0}{\Delta S}\right)} & T_{min} < T_w < T_{max} \\ 0 & T_w \geq T_{max} \end{cases} \quad (2)$$

当日均湿球温度 T_w 低于临界低温 T_{min} ，降水全部为

降雪；大于临界高温 T_{max} ，降水全部为降雨；介于临界阈值之间，降水类型为雨夹雪，其固态降雪比例 f_s 与湿球温度呈指数关系； T_w 、 T_{min} 、 T_{max} ，计算公式如下

$$T_w = T_a - \frac{e_{sat}(T_a)(1 - RH)}{0.000\ 643 p_s + \frac{\partial e_{sat}}{\partial T_a}} \quad (3)$$

$$T_{min} = \begin{cases} T_0 - \Delta S \ln \left[e^{\left(\frac{\Delta T}{\Delta S}\right)} - 2e^{-\left(\frac{\Delta T}{\Delta S}\right)} \right] & \frac{\Delta T}{\Delta S} > \ln 2 \\ T_0 & \frac{\Delta T}{\Delta S} \leq \ln 2 \end{cases} \quad (4)$$

$$T_{max} = \begin{cases} 2T_0 - T_{min} & \frac{\Delta T}{\Delta S} > \ln 2 \\ T_0 & \frac{\Delta T}{\Delta S} \leq \ln 2 \end{cases} \quad (5)$$

式中 T_a 为日平均温度， $^{\circ}\text{C}$ ； p_s 为大气压，hPa；RH 为相对湿度，取值范围为 0~1； $e_{sat}(T_a)$ 为气温 T_a 对应的饱和水汽压，可由 Tetens 经验方程得到^[27]； T_0 、 ΔT 和 ΔS 分别为相对湿度 RH、高程 Z 计算的参数，计算如下

$$T_0 = -5.87 - 0.104\ 2Z + 0.088\ 5Z^2 + 16.06RH - 9.614RH^2 \quad (6)$$

$$\Delta T = 0.215 - 0.099RH + 1.018RH^2 \quad (7)$$

$$\Delta S = 2.374 - 1.634RH \quad (8)$$

联合公式 (1) — (8)，可根据每日的降水量 P 、气温 T_a 、相对湿度 RH 、气压 p_s 和站点高程 Z ，计算每日的降雪量 P_s ，详细推导过程见文献[26]。该方法充分结合站点逐日综合气象条件和地形特点判断降水类型，已在中国不同地区的降雪识别研究中得到较好的应用[28-30]。为进一步验证在天山降雪识别精度，本文以 1979 年前数据集原始标注降雪类型为真值，对比验证得出天山山区各站点降水日类型识别精度范围在 84.53%~98.82%。其中，仅吐尔尕特站和天山大峡谷两个高海拔站点精度低于 90%，平均精度达 94.69%。表明该参数化降雪识别方案精度较高，能够满足天山地区降雪分析需求。

2.3 GCM 模式降尺度方法

目前，气候预测主要依赖全球气候模式 (GCM)，但由于其分辨率较低，难以对区域未来气候变化做出详细预测。通常借助动力降尺度或者统计降尺度方法来弥补这一不足。相对于动力降尺度的复杂计算过程，统计降尺度采用经验统计方法建立大尺度气象变量与区域气象观测变量的统计关系，并将这种关系应用到未来气候情景数据，一定程度上修正了 GCM 的系统误差，且方法简单易行。为得到气象站点尺度未来气象变化信息，本文选用分位数映射偏差校正 (bias-correction with quantile delta mapping, QDM) 统计降尺度方法[31]对 GCM 模式的输出数据进行降尺度。该方法通过对预报因子降水量 P 采用比值偏差校正，其他气象要素 (T_a 、 RH 、 p_s) 采用差值校正，能够有效校正系统分布偏差，常被用于对气候模式变量降尺度[31-33]。具体计算原理如下

$$\hat{x}_{m,r}(t) = F_{o,r}^{-1} \left\{ F_{m,r} \left[x_{m,r}(t) \right] \right\} \quad (9)$$

$$\Delta_m(t) = \begin{cases} \frac{x_{m,f}(t)}{F_{m,r}^{-1} \left\{ F_{m,f} \left[x_{m,f}(t) \right] \right\}} & \text{降水量} \\ x_{m,f}(t) - F_{m,r}^{-1} \left\{ F_{m,f} \left[x_{m,f}(t) \right] \right\} & \text{其他气象要素} \end{cases} \quad (10)$$

$$\hat{x}_{m,f}(t) = \begin{cases} F_{o,r}^{-1} \left\{ F_{m,f} \left[x_{m,r}(t) \right] \right\} \Delta_m(t) & \text{降水量} \\ F_{o,r}^{-1} \left\{ F_{m,r} \left[x_{m,r}(t) \right] \right\} + \Delta_m(t) & \text{其他气象要素} \end{cases} \quad (11)$$

式中 $F_{o,r}$ 和 $F_{m,r}$ 分别为历史模拟参考时段的观测数据和所在 GCM 格网模拟数据经验累积分布函数； $F_{m,f}$ 为未来时段模式模拟的日气象数据经验累积分布函数； $x_{m,r}(t)$ 和 $x_{m,f}(t)$ 是 GCM 模拟的参考期和未来的模式输出日气象数据； $\hat{x}_{m,r}(t)$ 和 $\hat{x}_{m,f}(t)$ 为经过降尺度后的日气象数据。详细算法见文献[31-32]。

此外，文中采用线性回归对天山地区过去和未来不同降水指标变化进行趋势分析，同时采用相关系数法分析 S/P 与海拔、气温之间的相互关系。

3 结果分析

3.1 S/P 的空间分布特征

依据多参数的降雪识别算法计算研究区降雪序列，

统计多年平均冷季 (10-4 月) S/P 空间分布情况 (图 3)。天山山区 S/P 空间差异显著，多数中低山站点 S/P 值低于 0.5，其余高海拔山区站点 S/P 值较大，在 0.5~1.0 之间，其中吐尔尕特、天山大西沟站冷季 S/P 值最大接近于 1。呈现出山区大于盆地，北坡大于南坡的分布格局。经统计 S/P 与高程显著线性相关 (图 4)，相关系数为 0.79，表明 S/P 随海拔增大的分布特征。

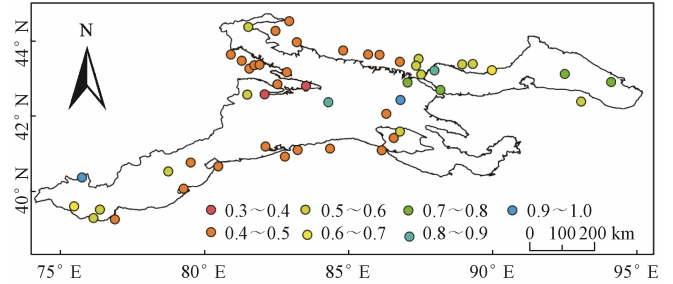


图 3 多年平均 S/P 值空间分布图

Fig.3 Spatial distribution of annual average S/P ratio

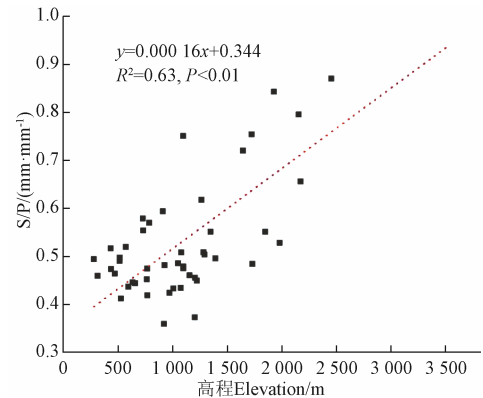


图 4 多年平均 S/P 值与高程的散点图

Fig.4 Scatter plots of annual average S/P ratio and elevation

3.2 降雪量、降水量及 S/P 时空变化特征

降雪量和降水量的变化决定着 S/P 比值变化趋势，为此逐站点计算 1961—2018 年天山山区冷季 (10-4 月) 降雪量、降水量及 S/P 线性趋势，同时以全部站点平均值估算天山山区各指标的年际变化情况 (图 5)。可以看出，天山山区降雪量、降水量及 S/P 时空变化趋势差异显著。其中，过去 58 a 来天山山区冷季降雪量表现为明显的上升趋势。所有站点的降雪量变化倾向率均为正，显著增加的站点达 30 个，占站点总数的 61.22%，集中分布在中天山北部和伊犁河谷地区。整个天山山区平均冷季降雪量以 3.56 mm/10 a 速率显著增加，研究时段内平均增加了 20.65 mm。降水量的变化趋势与降雪量类似，也表现为显著的增加趋势。空间上，全部站点冷季降水量倾向率均大于零，且有 32 个站点 (69.39%) 增加趋势显著 ($P<0.05$)，显著增加的站点多分布在天山北坡和伊犁河谷地区。时间上来看，天山山区整体平均冷季降水量也表现为明显的增加趋势，增加速率为 6.12 mm/10 a，过去 58 a 来平均增加了 35.50 mm。

进一步分析 1961—2018 年天山山区冷季 S/P 的时空

变化特征。可以看出, 尽管降雪量、降水量明显增加, 但两者增加趋势同步, 导致 S/P 变化程度较小。呈减少趋势站点数量 (26 个) 略多于增加趋势的站点 (23 个), 但多数站点 (95.92%) 趋势未通过显著性检验, 仅天山

大西沟和阿合奇两个站点显著减少 ($P < 0.05$)。从整个区域平均 S/P 值变化趋势来看, 过去 58 a 来总体变化平稳, S/P 值在 0.35 ~ 0.67 之间波动, 平均倾向率为 $-0.016\%/10a$, 呈微弱减少趋势。

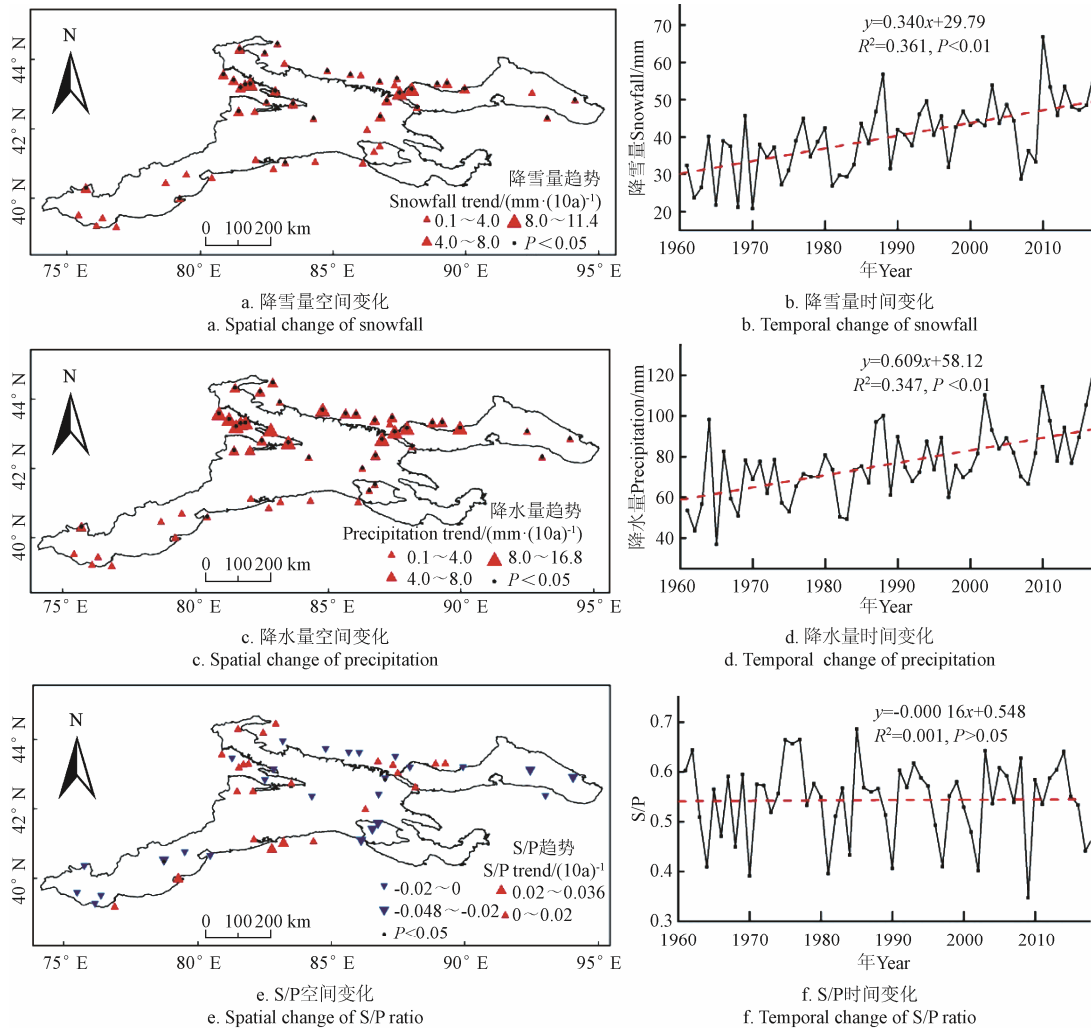


图 5 1961—2018 年天山山区降雪量、降水量和 S/P 的时空变化趋势

Fig.5 Spatial-temporal change of snowfall, precipitation and S/P ratio in Tianshan Mountains from 1961 to 2018

3.3 温度对 S/P 的影响

一般来讲, 气温是决定降水相态的关键因素。为分析气温对 S/P 变化的影响, 本文统计了 58 a 来天山山区及周边站点冷季平均湿日气温 (有降水发生时的平均气温), 并分析平均湿日气温与 S/P 的关系 (图 6)。由图 6a 可知, 各站点的冷季平均湿日气温主要分布在 $-12 \sim 2 \text{ }^\circ\text{C}$ 之间, 与 S/P 呈显著的负相关关系 ($P < 0.01$), 相关系数达 -0.82 。从各站湿日气温变化率与 S/P 变化率的散点图来看 (图 6b), 气温变化率与 S/P 变化率也呈显著 ($P < 0.05$) 的负相关关系, 相关系数为 -0.54 。过去 58 a 来, 各站点平均湿日气温在 $-0.50 \sim 0.67 \text{ }^\circ\text{C}/10 \text{ a}$ 之间变化, 绝大多数 (77.55%) 站点降水期气温呈增加趋势; 相应地有 53.06% 的站点 S/P 呈减少趋势。表明气温增加 (减少) 导致 S/P 减小 (增大), 平均气温变化是引起 S/P 变化的重要因素。

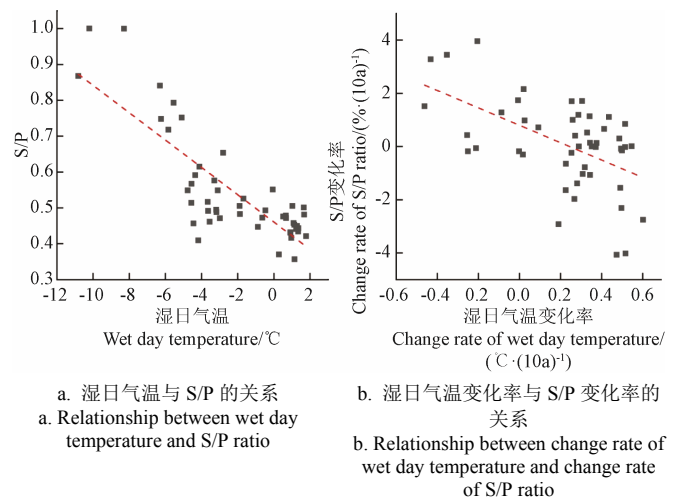


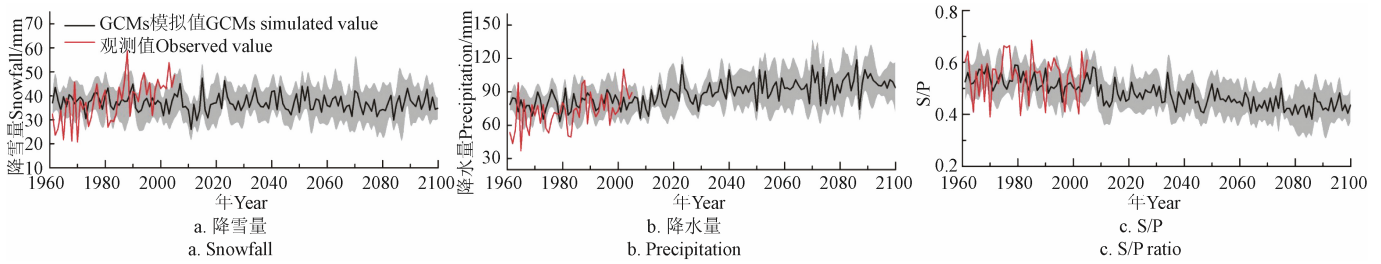
图 6 平均湿日气温与 S/P 关系

Fig.6 Relationship between average wet day temperature and S/P ratio

3.4 未来预估

为考虑未来气候变化对降水相态和 S/P 的影响, 本文选出 5 个 RCP4.5 情景下的 GCM 模式输出结果, 进行 QDM 统计降尺度, 得到降尺度后的站点历史模拟与未来预估数据。图 7 展示了天山山区及周边站点观测和多模式平均冷季降雪量、降水量、S/P 的历史及未来(1961—2100 年)变化趋势。可以看出, 降尺度后的 GCMs 模拟结果基本重现了各指标的基准期变化特征, 多年平均冷季降雪量、降水量和 S/P 模式模拟值与观测值相对误差均小于 10%, 表明采用 QDM 降尺度方法分析降雪量、降水量及雪雨比未来变化趋势可行。

从图 7a 可知, 天山山区平均冷季降雪量的预估时段(2006—2100 年)变化趋势不明显, 预计 2040 s±5 以前降雪量呈缓慢增加趋势, 之后降雪量逐步减少, 总体呈缓慢下降趋势。冷季降水量未来呈明显的增加趋势, 在 2080 s±5 左右达到峰值。可以看出, 尽管冷季降水量显著增加, 但由于气温的升高, 导致越来越多的站点中降水由降雪向降雨转变, 从而引起 S/P 值的持续减少。在 2020 s±5 之前 S/P 缓慢下降, 随后开始明显减少, 平均 S/P 值预计从 2010 s 年的 0.52 降至 2090 s 的 0.43。预估结果表明随着气温的持续升高, 未来天山山区降水量将增加, 更多降水以降雨形式发生, 气温对降水形态的影响将加剧。



注: 黑色线为 5 个模式模拟结果的平均值, 灰色部分为 5 个模式模拟结果的范围。
Note: Solid black lines represents the ensemble means; gray swath represents the spans of results from 5 GCMs.

图 7 天山山区平均冷季降雪量、降水量和 S/P 的历史及未来的变化

Fig.7 Historical and future variations of snowfall, precipitation and S/P ratio in cold season in Tianshan Mountains

图 8 显示了 5 个 CMIP5 模式预估天山山区及周边站点在 21 世纪中叶(2041—2060 年)的降雪量、降水量及 S/P 相对于基准期(1986—2005 年)平均变化情况。到 2050 s, 天山山区降雪量以减少趋势为主, 其中 70% 的站点减少, 主要分布在伊犁河谷地区; 而天山中段部分站点降雪量较基准期略有增加, 增幅在 10% 以内。整体来看, 区域站点平均的年降雪量减少约 8.9%。

与降雪量不同, 降水量表现为明显的增加趋势, 除博州和塔里木盆地边缘个别站点呈略微减少趋势, 其余 80% 的站点增加趋势明显。区域平均年降水量较基准期增加 10.1%。受降雪量和降水量影响, 天山山区及周边站点 S/P 呈减少趋势, 仅两个站点 S/P 略微增加, 其余 47 个站点均表现为减少趋势。2050s 区域平均 S/P 较基准期减少 14.7%。

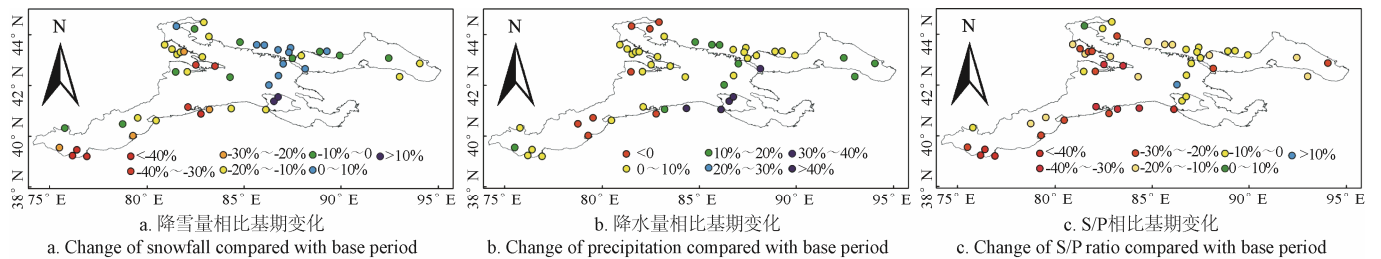


图 8 RCP4.5 气候情景下, 2050s 天山山区及周边站点冷季降雪量、降水量及 S/P 相比基准期的变化

Fig.8 Changes of snowfall, precipitation, S/P ratio in cold season in Tianshan Mountains and surrounding stations in the 2050s compared with base period under scenario of RCP4.5

4 讨论

天山山区是气候变化的敏感地区, 在整个中亚及中国气候变化中占有重要地位。近 50 多年来, 天山山区冷季气候变化与西北干旱区同步, 表现为增暖增湿的趋势^[3,28,34]。本文基于多参数降雪判识标准识别降雪序列, 计算得出近 58 a 来天山山区及周边降雪量、降水量显著增加趋势下, S/P 呈微弱的减少趋势。这与陈亚宁等^[5], Guo 等^[12]对天山 1961—2010 年 S/P 变化空间分布及变化趋势相似, 多数站点变化趋势不显著的结论一致。但本文得到的平均冷季 S/P 仅以-0.016%/10 a 速率变化, 明显

弱于文献^[12]中 S/P 变化趋势(-0.6%/10 a)。这主要是由于本文考虑了雨夹雪混合降水形态情况。作为降水相态转变的中间环节, 雨夹雪天气在季节转换期频繁发生, 对雨夹雪天气的考虑有助于客观的反映不同形态降水的变化规律。此外, 研究时段和站点选择的不同也是引起 S/P 变化趋势偏差的另一原因。

当前, 以气候变暖为主要特征的气候变化正在并将持续对降雪、降雨比例产生重要影响。未来气候变暖将导致降水形态由降雪向降雨转换的预判被广泛接受^[3-6], 但现有研究缺乏从定量角度预估未来 S/P 变化趋势和程度。本研究选取接近平均变化程度的 5 个 GCM 模式

RCP4.5 排放情景, 经 QDM 降尺度计算结果, 预估未来降雪量、降水量和 S/P 变化情况, 这有助于科学认识未来升温背景下不同形态降水的变化过程。但另一方也看到, 尽管本研究通过多模式集合平均及统计降尺度方法, 一定程度上提高了预估结果的可靠性。然而, 精确估算未来各指标的变化趋势还存在一定的挑战, 主要体现在 GCM 气候模式预估结果的不确定性。研究表明^[35-37], 不同模式因参数化、气候强迫、分辨率等不同, 对气候变量的模拟性能也不同, 多数模式对温度的预估可靠性高于降水, 不同 GCM 模式的输出结果差异较大。此外, 基于变量历史观测和模拟的统计关系在未来依然成立的前提假设也将导致未来预估的不确定性^[38]。从预估结果来看, 降尺度后的 GCM 结果对各指标平均态模拟效果较好, 但对趋势变化模拟能力有限; 各站点 2050s 的降雪量、降水量、S/P 较基准期变化幅度均较大 (近 50%), 这些都反映出预估结果存在较大不确定性。因此今后将进一步探索提高模式预估精度的模式集成及降尺度方法, 开展气候变化对降水量及降雪比率的影响评价, 以及由此引发的径流改变等问题的研究工作。

5 结 论

1) 天山山区冷季 S/P 受地形影响, 呈山区大于盆地, 北坡大于南坡的分布格局, 与海拔存在显著正相关关系。

2) 过去 58 a 来天山山区冷季降雪量、降水量均表现为明显的上升趋势, 显著增加的站点多分布在天山中部及伊犁河谷地区。冷季 S/P 变化不大, 在 0.35~0.67 之间波动, 以 0.016%/10a 的速率呈微弱减少趋势。S/P 与平均湿日气温显著正相关, 过去 58 a 平均气温变化是引起 S/P 变化的重要因素。

3) 5 个 IPCC-CMIP5 模式 RCP4.5 气候情景预估数据表明, 未来天山山区平均冷季降雪量变化趋势不明显, 呈缓慢减少趋势, 冷季降水量明显增加, S/P 明显减少; 相比基准期, 到 21 世纪中期, 区域平均冷季降雪量减少 8.9%, 降水量增加 10.1%, S/P 减少 14.7%。

【参 考 文 献】

- [1] Cohen J, Rind D. The effect of snow cover on the climate[J]. *Journal of Climate*, 1991, 4(7): 689—706.
- [2] 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 effect[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2013, 35(3): 513—527. (in Chinese with English abstract)
- [3] Chen Yaning, Li Weihong, Deng Haijun, et al. Changes in central Asia's water tower: Past, Present and Future[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 35458.
- [4] Ingram W J. Constraints on future changes in climate and the hydrologic cycle[J]. *Nature*, 2002, 419(6903): 224—232.
- [5] 陈亚宁, 李稚, 方功焕, 等. 气候变化对中亚天山山区水资源影响研究[J]. *地理学报*, 2017, 72(1): 18—26.
- Chen Yaning, Li Zhi, Fang Gonghuan, et al. Impact of climate change on water resources in the Tianshan Mountains, Central Asia[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72(1): 18—26. (in Chinese with English abstract)
- [6] 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.
- [7] Song F, Qi H. Changes in winter snowfall/precipitation ratio in the Contiguous United States[J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2007, 112: D15109.
- [8] 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.
- [9] 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(17): 2626—2636.
- [10] Wei H, Cunde X, Tingfeng D, et al. Changes in the proportion of precipitation occurring as Rain in Northern Canada during Spring-Summer from 1979 — 2015[J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2018, 35(9): 1129—1136.
- [11] 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): 128—136.
- [12] Guo L, Li L. Variation of the proportion of precipitation occurring as snow in the Tianshan Mountains, China[J]. *International Journal of Climatology*, 2015, 35(7): 1379—1393.
- [13] 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, 26(9): 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, 26(9): 142—152. (in Chinese with English abstract)
- [14] 王杰, 张明军, 王圣杰, 等. 1961—2013 年新疆雪雨比变化[J]. *干旱区研究*, 2017, 34(4): 889—897.
Wang Jie, Zhang Mingjun, Wang Shengjie, et al. Change of snowfall /rainfall ratio in Xinjiang during the period of 1961—2013[J]. *Arid Zone Research*, 2017, 34(4): 889—897. (in Chinese with English abstract)
- [15] 任正果. 1961—2013 年新疆雪雨比变化及未来趋势预测研究[D]. 兰州: 西北师范大学, 2015.
Ren Zhengguo. Study the Ratio of Snowfall to Rainfall During 1961—2013 and the Future Trend Prediction in Xinjiang[D]. Lanzhou: Northwest Normal University, 2015. (in Chinese with English abstract)

- [16] Jiang, Yuanan, Chen Ying, Zhao Yizhou, et al. Analysis on changes of basic climatic elements and extreme events in Xinjiang, China during 1961—2010[J]. *Advances in Climate Change Research*, 2013, 4(1), 20—29.
- [17] Harris I, Jones P, Osborn T, et al. Updated high-resolution grids of monthly climatic observations: The CRU TS3. 10 Dataset[J]. *International Journal of Climatology*, 2014, 34: 623—642.
- [18] 《第二次气候变化国家评估报告》编写委员会. 第二次气候变化国家评估报告[M]. 北京: 科学出版社, 2011.
- [19] 仇家琪, 孙希华. 天山积雪初步研究[J]. *干旱区地理*, 1992, 15(3): 9—21.
Qiu Jiaqi, Sun Xihua. Preliminary study on snow cover in the Tianshan Mountains[J]. *Arid Land Geography*, 1992, 15(3): 9—21. (in Chinese with English abstract)
- [20] 胡汝冀. 中国天山自然地理[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2004: 10—29.
- [21] IPCC. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Final Draft Underlying Scientific-Technical Assessment[M]// Stocker T F, Qin D, Plattner G K, et al. eds. Cambridge, UK and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2013, 5.
- [22] Clark M P, Slater A G, Barrett A P, et al. Assimilation of snow covered area information into hydrologic and land-surface models[J]. *Advances in Water Resources*, 2006, 29(8): 1209—1221.
- [23] Liu Junfang, Chen Rensheng. Discriminating types of precipitation in Qilian Mountains, Tibetan Plateau[J]. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 2016, 5: 20—32.
- [24] Wigmosta M S, Vail L W, Lettenmaier D P. A Distributed hydrology-vegetation model for complex terrain[J]. *Water Resources Research*, 1994, 30: 1665—1679.
- [25] Schuur T J, Park H S, Ryzhkov A V, et al. Classification of precipitation types during transitional winter weather using the RUC model and polarimetric radar retrievals[J]. *Journal of Applied Meteorology & Climatology*, 2012, 51(4): 763—779.
- [26] Ding Baohong, Yang Kun, Qin Jun, et al. The dependence of precipitation types on surface elevation and meteorological conditions and its parameterization[J]. *Journal of Hydrology*, 2014, 513(11): 154—163.
- [27] Murray F W. On the computation of saturation vapor Pressure[J]. *Journal of Applied Meteorology*, 1967, 6(1): 203—204.
- [28] 秦艳, 丁建丽. 1961—2016年中国天山不同级别降雪事件变化特征分析[J]. *水科学进展*, 2019, 30(4): 457—466.
Qin Yan, Ding Jianli. Variation characteristics of different levels of snowfall events in China's Tianshan Mountains during 1961—2016[J]. *Advances in Water Science*, 2019, 30(4): 457—466. (in Chinese with English abstract)
- [29] 章诞武, 丛振涛, 倪广恒. 1956—2010年中国降雪特征变化[J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2016, 56(4): 381—386.
Zhang Danwu, Cong Zhentao, Ni Guangheng. Snowfall changes in China during 1956—2010[J]. *Journal of Tsinghua University (Science and technology)*, 2016, 56(4): 381—386. (in Chinese with English abstract)
- [30] Zhu X, Wu T, Ren L, et al. Characteristics of the ratios of snow, rain and sleet to precipitation on the Qinghai-Tibet Plateau during 1961—2014[J]. *Quaternary International*, 2016. doi: 10.1016/j.quaint.2016.07.030.
- [31] Cannon A J, Sobie S R, Murdock T Q. Bias correction of GCM precipitation by quantile mapping: How well do methods preserve changes in quantiles and extremes?[J]. *Journal of Climate*, 2015, 28: 6938—6959.
- [32] Eum H I, Cannon A J. Inter comparison of projected changes in climate extremes for South Korea: Application of trend preserving statistical downscaling methods to the CMIP5 ensemble[J]. *International Journal of Climatology*, 2017, 37: 3381—3397.
- [33] Li Donghuan, Zhou Tianjun, Zou Liwei, et al. Extreme high-temperature events over east Asia in 1.5°C and 2°C warmer futures: Analysis of NCAR CESM low-warming experiments[J]. *Geophysical Research Letters*, 2018, 45(3): 1541—1550.
- [34] 施雅风, 沈永平, 李栋梁, 等. 中国西北气候由暖干向暖湿转型的特征和趋势探讨[J]. *第四纪研究*, 2003, 23(2): 152—164.
Shi Yafeng, Shen Yongping, Li Dongliang, et al. Discussion on the present climate change from warm-wet in northwest China[J]. *Quaternary Sciences*, 2003, 23(2): 152—164. (in Chinese with English abstract)
- [35] 吴晶, 罗毅, 李佳, 等. CMIP5模式对中国西北干旱区模拟能力评价[J]. *干旱区地理*, 2014, 37(3): 499—508.
Wu Jing, Luo Yi, Li Jia, et al. Evaluation of CMIP5 modes' simulation ability in the northwest arid areas of China[J]. *Arid Land Geography*, 2014, 37(3): 499—508. (in Chinese with English abstract)
- [36] Wang Jujie, Zhou Botao, Qin Dahe, et al. Changes in mean and extreme temperature and precipitation over the arid region of Northwestern China: Observation and projection[J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2017, 34(3): 289—305.
- [37] 梁玉莲, 延晓冬. RCPs情景下中国21世纪气候变化预估及不确定性分析[J]. *热带气象学报*, 2016, 32(2): 183—192.
Liang Yulian, Yan Xiaodong. Prediction of climate change over China and uncertainty analysis during The 21st century under RCPs[J]. *Journal of Tropical Meteorology*. 2016, 32(2): 183—192. (in Chinese with English abstract)
- [38] 刘昌明, 刘文彬, 傅国斌, 等. 气候影响评价中统计降尺度若干问题的探讨[J]. *水科学进展*, 2012, 23(3): 427—437.
Liu Changming, Liu Wenbin, Fu Guobin, et al. A discussion of some aspects of statistical downscaling in climate impacts assessment[J]. *Advances in Water Science*, 2012, 23(3): 427—437. (in Chinese with English abstract)

Variation characteristics and future trends of the snowfall/precipitation ratio in Tianshan Mountains in recent 58 years

Qin Yan^{1,2}, Zhao Qiudong³, Meng Jie⁴, Ding Jianli^{1,2*}

(1. College of Resources and Environmental Sciences, Laboratory of Smart City and Environment Modelling of Higher Education Institute, Xinjiang University, Urumqi 830046, China; 2. Key Laboratory of Oasis Ecology, Ministry of Education, Xinjiang University, Urumqi 830046, China; 3. Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China; 4. Water Resources Bureau of Xinjiang, Urumqi 830000, China)

Abstract: Water resources in arid region of Northwest China depend heavily on mountain precipitation and snowmelt runoff. The precipitation falling as snow or rain has different hydrological effects. As a meteorological indicator reflecting snowfall/precipitation conversion, the ratio of snowfall to precipitation (S/P) is quite important, because even small changes in S/P may influence the runoff processes and available water resources. However, the long-term trend of S/P in Tianshan Mountains, China, which is critical to the future water management in the context of climate change, has been unclear. Based on the daily meteorological data from 49 stations during 1961—2018, this study conducted a parameterization scheme to desociate the snowfall from precipitation and analyze historical spatial-temporal variations of snowfall, precipitation and S/P during cold season (from October to April) within the above timeframe. Meanwhile, considering of the impacts of climate change on S/P, five GCM models of the fifth phase of the Coupled Model Intercomparison Project (CMIP5) at RCP4.5 emission scenarios were selected to project the future change of snowfall, precipitation and S/P by bias-correction with Quantile Delta Mapping (QDM). The results demonstrated that the S/P in Tianshan Mountains was affected by the topography. The S/P was larger in the mountain area than that in the basin, greater on the northern slopes than that on the southern slopes, which was significantly and positively correlated with the altitude. During the past 58 years, the snowfall and precipitation increased significantly, and the distribution of regions with the obvious changes were concentrated in the central region of the northern Tianshan Mountains and Yili River valley. Due to the synchronous trend of snowfall and rainfall, the S/P in Tianshan Mountains was found to fluctuate between 0.35 and 0.67, revealing a slight decrease trend at a rate of 0.016%/10a. A negative correlation was also noticeable between the average wet day air temperature and S/P, and air temperature change is an important factor for S/P change. Under the RCP4.5 climate scenario, it is estimated that the snowfall in cold season will increase slowly before 2040 ± 5 , and then gradually decrease, showing a slow declining trend overall. In contrast, precipitation will increase significantly in the future, reaching its peak around 2080s ± 5 . In this case, S/P presents a continuous declining trend during the 21st century, which is expected to decline from 0.52 in the 2010s to 0.43 in the 2090s. In comparison with the base period (1986—2005), snowfall in 70% sites in the Tianshan Mountains will reduced by the 2050s, with the average regional snowfall in cold season decrease by 8.9%; Whereas the precipitation of 80% stations increased, with the average regional precipitation increased by 10.1%. Affected by the amount of snowfall and precipitation, S/P of 47 out of 49 stations will decrease, and the average S/P in the 2050s will decrease by 14.7% comparing to the base period. Despite of the uncertainty in the projection results of the model, the quantitative analysis of future S/P in this study is helpful in understanding the changing process of different forms of precipitation and is of great significance to the regulation of regional water resources in relation to global warming.

Keywords: climate change; snowfall; precipitation; Tianshan Mountains; future trends; spatial-temporal change