

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2022.05.020

1979—2018年雅砻江中上游积雪时空变化及影响因素分析

吴南¹, 张珂^{1,2,3,4}, 管晓祥¹, 冯进^{1,2}, 黄应厚^{1,2}, 张企诺^{1,2}, 李运平^{1,2}

(1. 河海大学水文水资源学院, 江苏 南京 210098; 2. 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210098; 3. 河海大学长江保护与绿色发展研究院, 江苏 南京 210098; 4. 中国气象局-河海大学水文气象研究联合实验室, 江苏 南京 210098)

摘要: 基于1979—2018年积雪深度卫星数据及同期的格点型降水和气温观测资料, 分析了雅砻江中上游积雪时空分布及其影响因子, 利用相关分析法分析气候因子与地形因子对积雪深度时空分布的影响及贡献程度, 采用趋势分析法研究积雪特征和气候因子的时间变化规律。结果表明: 雅砻江中上游降水、气温、高程、坡度和坡向对年均雪深空间分布的贡献率分别为0.218、0.453、0.206、0.080和0.043, 气候因子的贡献程度明显高于地形因子; 研究区积雪期主要集中在10月至次年5月, 年降水量和年均气温呈显著上升趋势, 西北部 and 东南部积雪期变暖现象明显, 绝大部分区域年均雪深表现为不明显的减少趋势; 积雪深度与降水量的相关系数多为正值, 与气温的相关系数均为负值, 在区域中下游表现的相关性较强, 各影响因子与积雪深度的相关程度由强到弱依次为气温、高程、坡度、降水和坡向。

关键词: 雅砻江中上游; 积雪变化; 气候因子; 地形因子; 趋势分析; 相关性分析

中图分类号: P426.63⁺5; TV11 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-6933(2022)05-0151-08

Spatiotemporal variations of snow cover and its influencing factors in upper-middle reaches of the Yalong River from 1979 to 2018 // WU Nan¹, ZHANG Ke^{1,2,3,4}, GUAN Xiaoxiang¹, FENG Jin^{1,2}, HUANG Yinghou^{1,2}, ZHANG Qinnuo^{1,2}, LI Yunping^{1,2} (1. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. Yangtze Institute for Conservation and Development, Hohai University, Nanjing 210098, China; 4. China Meteorological Administration-Hohai University Joint Laboratory for HydroMeteorology Studies, Nanjing 210098, China)

Abstract: Based on snow depth satellite data and gridded observed precipitation and air temperature data from 1979 to 2018 in the upper-middle reaches of the Yalong River, the spatiotemporal distribution of snow cover and its influencing factors were analyzed. The correlation analysis method was employed to assess the correlation of the snow depth with climatic factors (precipitation and air temperature) and terrain factors (elevation, slope, and aspect), and the contribution rate of each factor to the spatial distribution of snow depth. Trend analysis was conducted to investigate the temporal changes of snow depth and climatic factors. The results show that the contribution rates of precipitation, air temperature, elevation, slope, and aspect to the annual mean snow depth are 0.218, 0.453, 0.206, 0.080, and 0.043, respectively, with the contributions of climatic factors to the spatial variability of snow depth being higher than those of terrain factors. Snow cover duration in the upper-middle reaches of the Yalong River usually spans from October to May of the next year. In this period, annual mean snow depth in most of the study area shows an insignificant decreasing trend, while annual precipitation and annual mean air temperature show significant increasing trends, especially in the northwest and southeast of the study area. The correlation coefficient of snow depth with precipitation across this region is mostly positive, while the correlation coefficient with air temperature is generally negative. Meanwhile, there are high correlations between snow depth and climate factors in the middle and lower parts of the study area. Air temperature has the highest correlation with snow

基金项目: 国家自然科学基金(51879067, 41775111); 陕西省水利科技计划(2019slkj-B1); 江苏省杰出青年基金(BK20180022)

作者简介: 吴南(1995—), 女, 硕士研究生, 主要从事水文水资源研究。E-mail: 1157080930@qq.com

通信作者: 张珂(1979—), 男, 教授, 博士, 主要从事水文水资源研究。E-mail: kzhang@hhu.edu.cn

depth, followed by elevation, slope, precipitation, and aspect.

Key words: upper-middle reaches of the Yalong River; snow cover change; climatic factor; terrain factor; trend analysis; correlation analysis

积雪是气候系统五大圈层中冰冻圈的重要组成部分,作为地球表面最活跃的生态要素之一^[1-2],其深度、雪盖面积、空间分布以及开始和结束时间等积雪特征对气候变化、水文过程以及生态影响等极为敏感,尤其对气候变化最为显著^[3-5]。站点和卫星遥感资料均表明,中国积雪主要分布在青藏高原、新疆北部、内蒙古和东北地区^[6]。青藏高原积雪分布以高海拔地区为主^[7],在全球气候变暖的背景下,受到的直接影响最为显著,积雪面积和深度易受到降水和温度的叠加影响^[8]。青藏高原积雪深度的变化会影响其下垫面的属性特征,进而影响高原与大气间热力的相互作用^[9-10],最终对流域下游的气候变化产生重要的影响^[11]。因此,研究积雪的时空变化具有重要的意义。

20 世纪 90 年代之前,青藏高原积雪普遍呈增长的趋势^[12],且在 80 年代增长趋势最为明显^[8],90 年代末,积雪开始显著减少^[13-14],其中东部地区积雪变化趋势最为显著^[15]。除多等^[16]研究发现,1981—2010 年青藏高原原积雪天数以平均每 10 a 减少 4.81 d 的变化率显著减少;白淑英等^[17]分析了 1979—2010 年高原积雪深度的年际变化,发现积雪深度平均每 10 a 增长 0.26 cm;相关研究还发现高原积雪天数和积雪深度的变化趋势并不同步^[18]。青藏高原的年内积雪变化主要体现在积雪期长,积雪时间主要集中在 10 月至次年 5 月^[12];积雪出现快,消退慢^[19]。柯长青等^[19]研究表明,青藏高原积雪及其变化的空间分布很不均匀,四周与腹地的积雪存在明显差异;青藏高原的积雪敏感区在不同季节也存在空间差异性。郝振纯等^[20-22]对高原积雪的分布情况及年际变化特征进行研究,发现采用不同的研究方法、资料长度、季节划分等,得到的结论各有差异。郑淑文等^[23-24]研究表明,积雪的时空变化由多种因素共同作用引起,气候因子和地形因子是最重要的影响因素。姜琪等^[25]利用 1961—2014 年高原 110 个气象站站点资料分析积雪特征及其影响因素,发现积雪深度随海拔呈增加趋势,且在不同季节,降水、气温与积雪深度表现出不同的相关性。沈鎏澄等^[26]发现在青藏高原中东部地区,不同季节积雪深度的影响因素不同,冬季降水起主导作用,其他季节气温起主导作用。此外,蒋元春等^[27]研究表明,积雪变化受到不同土地类型的影响。目前的研究大多分别基于气候因子或地形因子进行分析,极

少有研究将二者进行对比分析,高原积雪深度长时间序列的时空动态变化,积雪与主要气候因子(降水、气温)和地形因子(高程、坡度、坡向)的相互关系仍需要进一步研究。

雅砻江中上游研究区位于青藏高原东部(图 1),全年积雪覆盖变化显著,河道径流主要由降水、地下水和融雪补给,流域内多年平均流量大,积雪的时空分布对其径流量变化有直接的影响。由于雅砻江中上游地区水文和气象站点布设较少,针对该流域积雪分布的研究较少,本文依据研究区 1979—2018 年遥感反演的长系列逐日积雪深度数据及同期降水、气温栅格数据,分析积雪特征及气候、地形因子的时空分布和年际变化,并进行相关性分析,评价积雪深度对各影响因子的敏感性。旨在全面揭示研究区积雪深度的时空变化特征,初步探究雅砻江中上游积雪深度与气候因子、地形因子之间的关系。

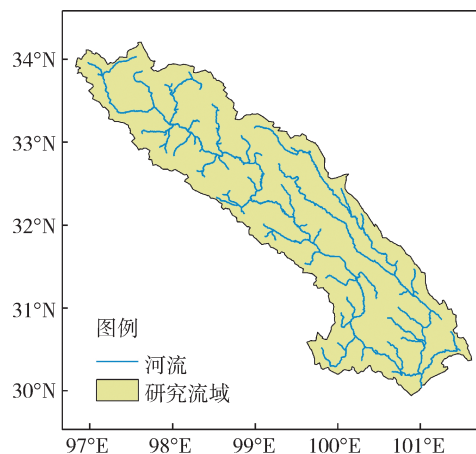


图 1 研究区地理位置

Fig. 1 Geographical location of study area

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

雅砻江是长江上游金沙江流域最大的一级支流,全长约 1 571 km,水能资源极为丰富。雅砻江以新龙县乐安乡以上为上游,乐安乡至无量河口为中游,无量河口以下为下游。雅江水文站位于东经 101°01',北纬 30°02',站点以上干流长 634 km,控制面积约 6.7 万 km²,占整个雅砻江流域面积的 52%。雅砻江中上游研究区海拔在 2 650 ~ 5 851 m 之间,地势西北高、东南低,地貌以山地为主,北部有大面积雪山分布。受地理环境

等因素约束,研究区内气象站及水文站站点分布较为稀疏。

1.2 数据来源与处理

采用由地理空间数据云 (<http://www.gscloud.cn/>) 提供的 DEM 数字高程数据,空间分辨率为 1 km,通过 ArcGIS 软件得到流域坡度、坡向的空间分布。降水、气温以及积雪数据资料均来自国家青藏高原科学数据中心 (<http://data.tpdc.ac.cn/zh-hans/>),其中,降水、气温数据来源于中国区域地面气象要素驱动数据集(1979—2018 年),时间分辨率为 3 h,空间分辨率为 0.1°,该数据集原始资料来自中国气象局的观测数据、再分析资料以及卫星遥感数据,剔除非物理意义值后,再利用 ANU-Spline 插值所得;积雪数据来源于中国积雪深度长时间序列数据集(1978—2020 年),时间分辨率为 1 d,空间分辨率为 25 km,该数据集由原始数据(经美国国家雪冰数据中心 SMMR(1979—1987 年)、SSM/I(1987—2007 年)和 SSMI/S(2008—2018 年)处理得到的逐日被动微波亮温数据(EASE-Grid))反演所得。研究中采用双线性插值法将降水、气温和积雪资料处理成空间分辨率为 1 km 的数据集。

根据积雪季节变化的特点,将当年 9 月 1 日至次年 8 月 31 日定义为一个积雪年^[28],依据 GB/T 35229—2017《地面气象观测规范》对积雪日的划分标准,当日积雪深度 $h < 0.5$ cm 时,记为 0 cm;当 $0.5 \text{ cm} \leq h < 1$ cm 时,记为 1 cm;当积雪深度符合观测要求,且 $h \geq 1$ cm 时,记为一个积雪日。一个积雪年内第一次出现 $h \geq 1$ cm 的日期为积雪初日;最后一次出现 $h \geq 1$ cm 的日期为积雪终日;积雪天数定义为积雪期(积雪初日至积雪终日)内有积雪深度记录值的所有累计天数;年均雪深为积雪年内所有积雪深度之和与该年内积雪天数的比值。儒略日表示以 1 年为 1 个周期,当年的第一天(即 1 月 1 日)计时为 1,在周期内从第 1 个儒略日开始以连续天数计算时间,当年的最后一天(即 12 月 31 日)计时为 365 或 366。

2 研究方法

2.1 趋势分析法

采用线性回归方法分析研究区积雪特征(积雪初日、积雪终日、积雪天数、积雪深度)以及气候因子(降水、气温)的变化趋势,以气候倾向率 S 表征各要素随时间的变化幅度。

此外,采用 Mann-Kendall 趋势检验法计算变化趋势的显著性,该方法由世界气象组织推荐,具有检测范围广、受人为因素影响小的优点^[25],目前

被广泛应用于水文、气象系列的趋势检验。该方法不需要样本服从某种分布,也不受异常值的干扰,能够有效区分某一过程是处于自然波动状态还是特定波动状态。其统计量 Z 为正值表示序列呈增加趋势,负值表示呈减少趋势, Z 值的绝对值大于 1.96 时,说明在 0.05 置信区间变化趋势显著。

2.2 相关分析法

采用相关分析法研究积雪深度和影响因素的相关程度,根据相关现象所表现的不同特征,对具有依存关系的变量研究其相关程度,用数学方法对其数值抽象化。

多元线性回归常用于通过多个自变量的最优组合来解释并预测因变量,每个自变量对应的回归系数表示该自变量对因变量变化的贡献程度。本文以气候因子(降水、气温)与地形因子(高程、坡度、坡向)为自变量,积雪深度为因变量,建立积雪特征和影响因素的多元线性回归关系,量化各因子对积雪深度变化的贡献率。

根据下式对每个自变量进行归一化处理,将其结果值映射到 $[0, 1]$ 区间内:

$$x' = \frac{x - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \quad (1)$$

式中: x' 为转换值; x 为原始值; $x_{\max}$ 为样本数据的最大值; $x_{\min}$ 为样本数据的最小值。

积雪深度和各因子对其贡献率的计算公式为

$$y = \sum_{i=1}^5 k_i x'_i + b \quad (2)$$

$$\eta_i = \frac{k_i}{\sum_{i=1}^5 k_i} \quad (3)$$

式中: y 为积雪深度; $x'_i (i=1, 2, \dots, 5)$ 分别为经归一化处理的降水、气温、高程、坡度、坡向值; $k_i (i=1, 2, \dots, 5)$ 分别为各因子的回归系数; b 为回归残差; η_i 为因子 i 对积雪深度的贡献率。

3 结果与分析

3.1 积雪深度及其影响因素的空间分布

研究区内高程、坡度和坡向以及 1979—2018 年积雪期内降水量、气温和积雪深度的多年平均值空间分布如图 2 所示。图 2(a)(b)(c) 表明,整体上流域西北地区海拔高、坡度缓,东南地区海拔低、坡度陡,坡向分布不均匀。图 2(d)(e)(f) 表明,流域中部地区降水最为丰富,西北和东南地区降水较少;受地形因子的影响,气温分布呈现西北低、东南高的趋势;由于地形因子与气候因子的共同影响,积雪深

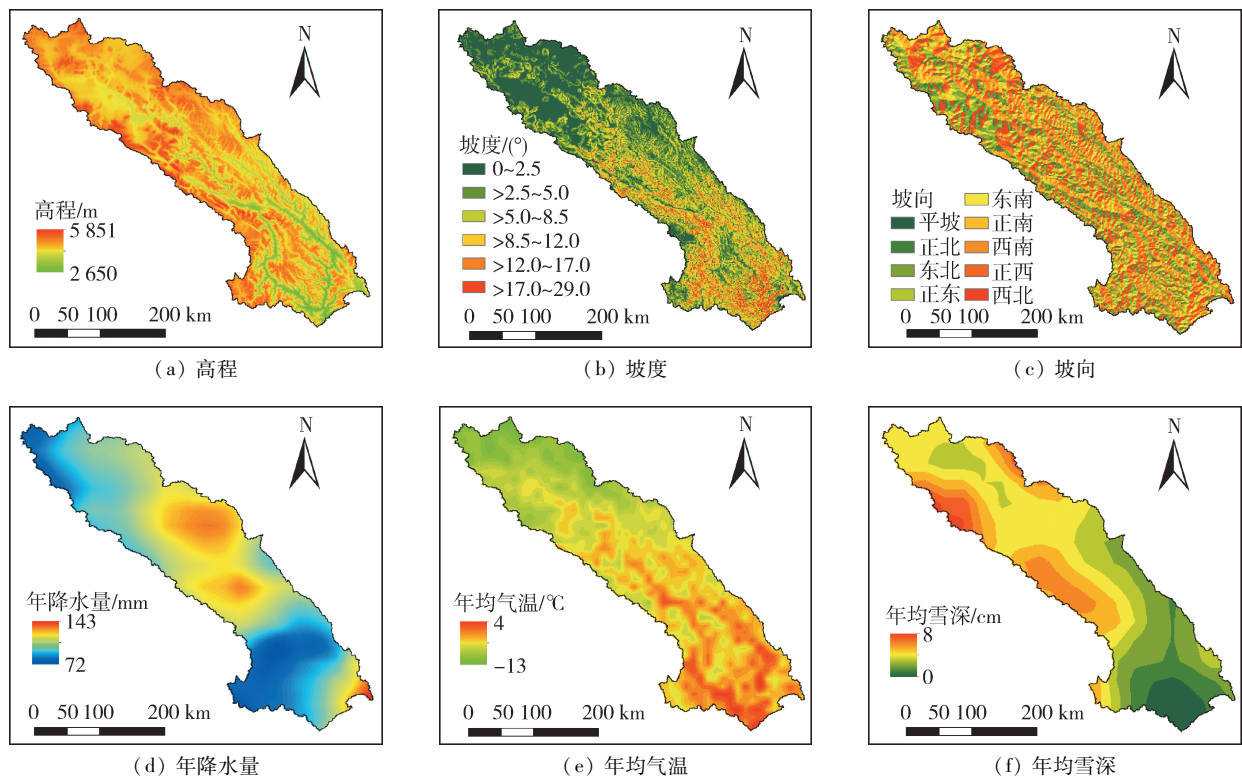


图2 积雪期内多年平均雪深及其影响因子空间分布

Fig.2 Spatial distributions of long-term annual mean snow depth and its influencing factors during snow cover period

度呈现西北大、东南小以及两边大、中间小的分布趋势。总体而言,雅砻江中上游地区是积雪深度较大的区域,这主要是由于海拔越高、气温越低,积雪越不易融化,而坡度越陡越不利于雪层的累积。

以气候因子(降水、气温)和地形因子(高程、坡度、坡向)为自变量,以多年平均雪深为因变量进行多元线性回归分析,计算1979—2018年积雪期内各影响因子对多年平均雪深的贡献率。结果表明,降水、气温和高程对积雪深度的贡献率较高,坡度与坡向的贡献率较低。降水、气温、高程、坡度和坡向对年均雪深空间分布的贡献率分别为0.218、0.453、0.206、0.080和0.043,可以看出,5个影响因子的贡献率由高到低分别为气温、降水、高程、坡度和坡向。对气候因子与地形因子的贡献率累积求和,可得到气候因子与地形因子对积雪深度的贡献率分别为0.671和0.329,气候因子的贡献率明显高于地形因子。

3.2 积雪特征与气候因子的时间变化

依据积雪特征定义及雅砻江中上游积雪遥感反演得到的逐日积雪深度数据,对研究区1979—2018年积雪特征随时间变化的趋势进行分析,结果如图3所示。从图3可以看出,雅砻江中上游积雪开始时间主要集中在10月和11月,积雪初日呈下降趋势,即每年的积雪开始时间逐渐提前;积雪结束时间主要集中在次年的4月和5月,积雪终日呈上升

趋势,即积雪结束时间逐渐延迟。不同积雪年间积雪期内的积雪天数总体呈增长趋势,积雪天数平均每10a增加7.52d,多年平均积雪天数为189d;不同积雪年间积雪期内的年均雪深变化幅度较大,总体呈减少趋势,年均雪深平均每10a减少0.33cm,多年平均雪深为3.98cm。

已有研究表明,在全球气候变暖大背景下,青藏高原积雪天数显著减少^[16],但该研究区1979—2018年积雪天数总体呈增加的趋势。从图3可以看出,积雪初日、积雪终日、积雪天数均在1987年前后发生了趋势变化,即表现为变化前积雪天数呈增加趋势,变化后呈略微减少趋势,这可能导致整个研究期表现为不明显的增长趋势。年均雪深在1987年后也表现出减小趋势,这与全球气候变暖相吻合。

对雅砻江中上游1979—2018年积雪期内年降水量和年均气温数据进行趋势分析,如图4所示。从图4可以看出,1979—2018年降水整体呈增长趋势,年降水量平均每10a增加11.47mm, Z 值为4.23,变化趋势显著;流域内气温变化趋势与降水相似,积雪期内气候变暖现象十分明显,年均气温平均每10a升高0.56℃, Z 值为5.47,呈显著上升趋势。

3.3 积雪深度与气候因子的空间演变

基于雅砻江中上游积雪期内年降水量、年均气

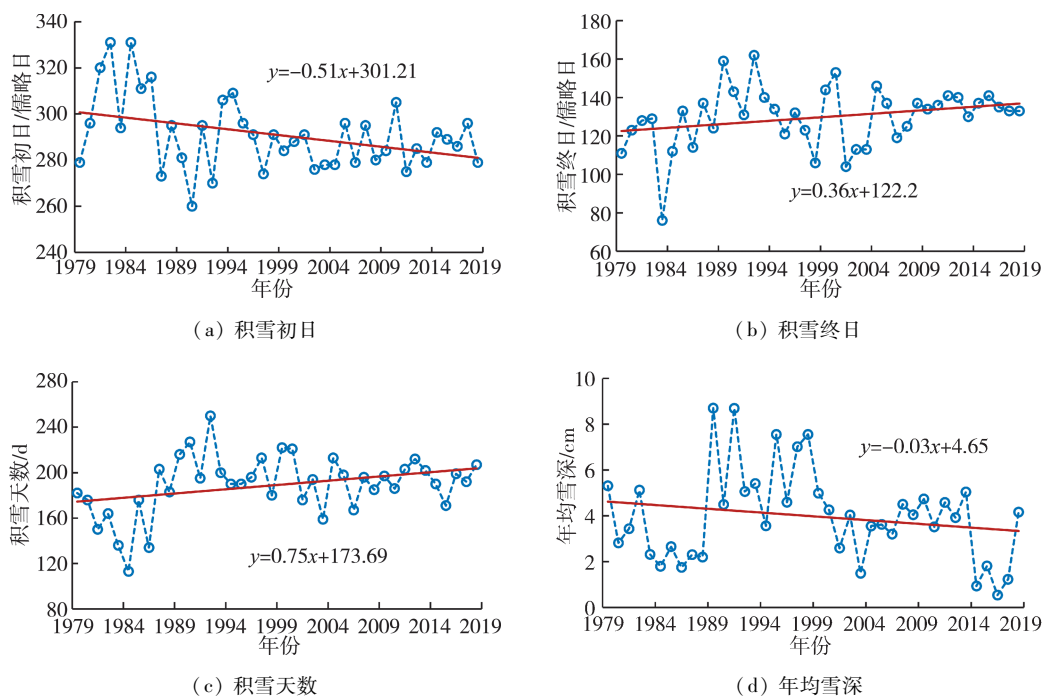


图3 积雪特征年际变化

Fig. 3 Interannual variations of snow cover characteristics

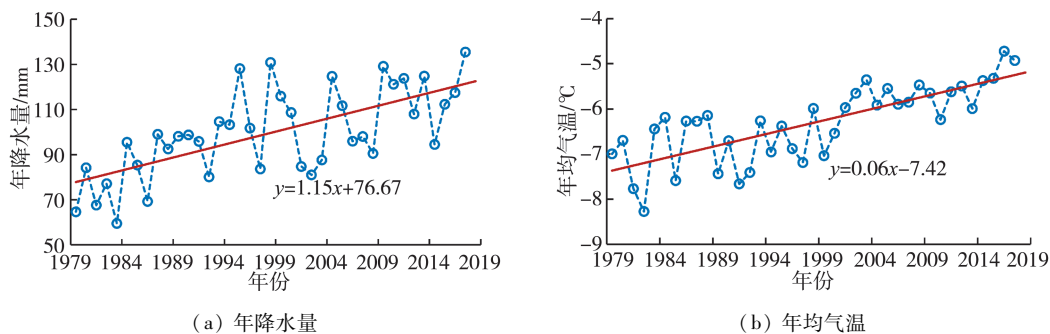


图4 气候因子年际变化

Fig. 4 Interannual variations of climatic factors

温和年均雪深格点数据,计算其 1979—2018 年气候因子倾向率 S 值和趋势检验 Z 值的空间分布,如图 5 和图 6 所示。结果表明,研究区积雪期内年降水量呈增加趋势,且绝大多数地区 Z 值高于 1.96,变化趋势显著。流域内大部分区域年均气温也呈上升趋势,其中,西北部 and 东南部升温显著,中部地区升温不明显。多年来流域内年均雪深多为下降趋势,但变化趋势不显著,极少部分区域年均雪深呈上升趋势。

气温较低时,降水的增加有助于积雪的累积,沈鑑澄等^[26]在研究青藏高原中东部地区积雪变化原因时,发现冬季(气温较低)积雪变化由降水主导,其他季节由气温主导。该研究区的降水在时间和空间尺度上均表现为显著增长的趋势,而积雪深度却表现出略微减少的趋势,这可能是由于研究区积雪天数较长,包含了冬、春两季。积雪期后期(即春

季),气温是积雪变化的主导因子,在全球气温升高的背景下,降水多以降雨的形式出现,这将导致积雪的消融,因此积雪变化是一系列因素共同作用的结果。

3.4 积雪深度及其影响因子相关性分析

在栅格尺度上计算 1979—2018 年积雪期内年均雪深与年降水量、年均气温的相关系数(r),分析比较年均雪深与 2 个气候因子的相关性以及空间分布规律,结果如图 7 所示。从图 7 可以看出,积雪深度与降水量的相关系数多为正值,极少部分区域为负值,整个研究区域积雪深度与气温的相关系数均为负值,即积雪期内降水增加、气温降低有利于积雪的形成。从相关系数在研究区的空间分布可以看出,研究区中下游区域积雪深度与降水量和气温的相关系数绝对值较高,说明在该区域积雪深度与这 2 个气候因子的相关性相对较强。

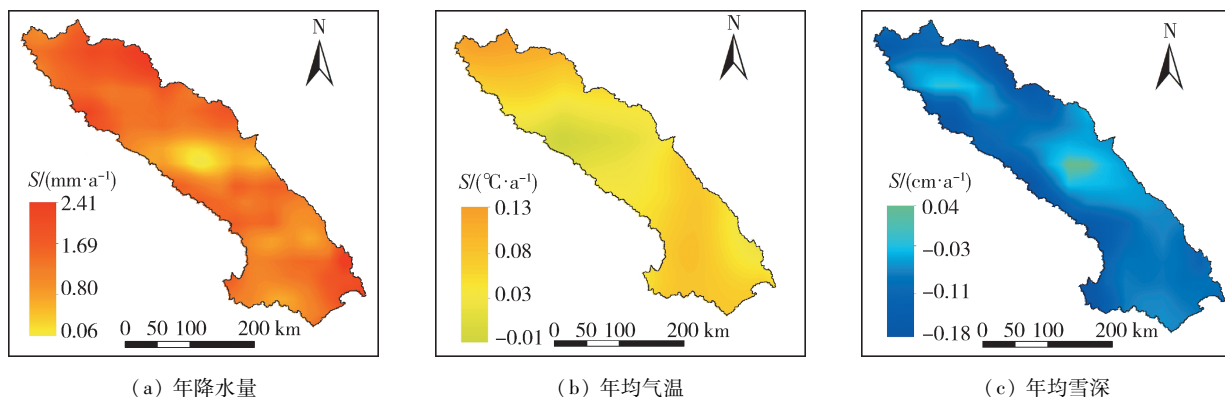


图5 积雪期内年降水量、年均气温与年均雪深倾向率

Fig. 5 Changing rates of annual precipitation, annual mean air temperature, and annual mean snow depth during snow cover period

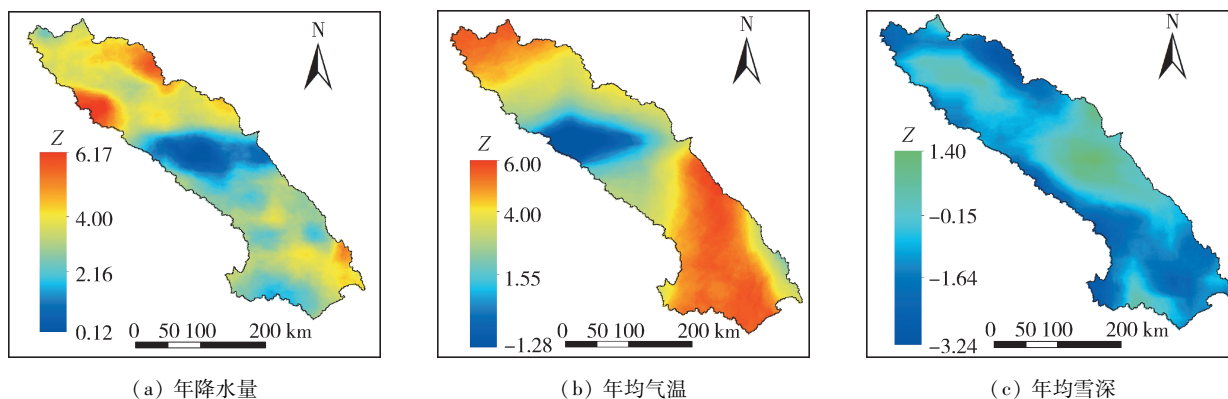


图6 积雪期内年降水量、年均气温与年均雪深趋势检验 Z 值

Fig. 6 Z values for trend detection of annual precipitation, annual mean air temperature, and annual mean snow depth during snow cover period

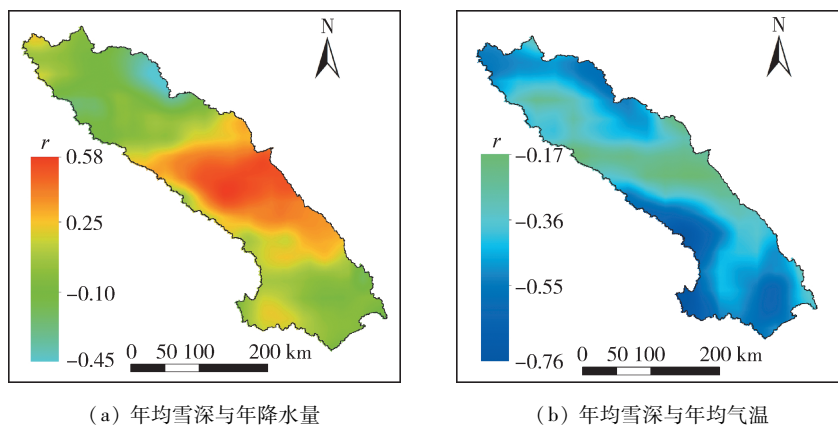


图7 积雪期内年均雪深与年降水量、年均气温的相关系数

Fig. 7 Correlation coefficients of annual mean snow depth with annual precipitation and annual mean air temperature during snow cover period

计算 1979—2018 年流域面平均雪深与气候因子(降水、气温)和地形因子(高程、坡度、坡向)的相关系数,结果表明,降水、高程与积雪深度呈正相关,相关系数较高,分别为 0.30 和 0.40;气温、坡度、坡向与积雪深度呈负相关,相关系数分别为 -0.56 、 -0.36 和 -0.04 。积雪深度与气温相关性最强,与

坡向相关性最弱,这表明在气候因子中,降水越多、气温越低,越有利于积雪的形成;在地形因子中,海拔越高、坡度越小,越容易积雪,坡向与积雪深度的相关性较小。该研究区各影响因子与积雪深度的相关程度由强到弱依次为:气温、高程、坡度、降水和坡向。

4 结 论

a. 1979—2018 年雅砻江中上游区域降水、气温、高程、坡度和坡向对年均雪深空间分布的贡献率分别为 0.218、0.453、0.206、0.080 和 0.043, 贡献率由高到低分别为气温、降水、高程、坡度和坡向, 气候因子的贡献率明显高于地形因子。

b. 雅砻江中上游积雪期主要集中在 10 月至次年 5 月, 不同积雪年间积雪期内积雪天数增长率为 0.752 d/a, 年均雪深变化幅度较大, 总体呈不明显的减少趋势, 极少部分区域年均雪深呈增加趋势。

c. 研究区绝大多数地区年降水量和年均气温呈显著上升趋势, 其中西北部 and 东南部积雪期内升温现象明显。积雪深度与降水量的相关系数多为正值, 与气温的相关系数均为负值, 且在研究区中下游区域, 积雪深度与这 2 个气候因子的相关性相对较强; 积雪深度与各影响因子的相关程度由强到弱依次为气温、高程、坡度、降水和坡向。

参考文献:

- [1] 李栋梁, 王春学. 积雪分布及其对中国气候影响的研究进展[J]. 大气科学学报, 2011, 34(5): 627-636. (LI Dongliang, WANG Chunxue. Research progress of snow cover and its influence on China climate[J]. Transactions of Atmospheric Sciences, 2011, 34(5): 627-636. (in Chinese))
- [2] 秦大河, 周波涛, 效存德. 冰冻圈变化及其对中国气候的影响[J]. 气象学报, 2014, 72(5): 869-879. (QIN Dahe, ZHOU Botao, XIAO Cunde. Progress in studies of cryospheric changes and their impacts on climate of China[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2014, 72(5): 869-879. (in Chinese))
- [3] ARMSTRONG R L, BRODZIK M J. Recent northern hemisphere snow extent: a comparison of data derived from visible and microwave satellite sensors[J]. Geophysical Research Letters, 2001, 28(19): 3673-3676.
- [4] 窦燕, 陈曦, 包安明, 等. 2000—2006 年中国天山山区积雪时空分布特征研究[J]. 冰川冻土, 2010, 32(1): 28-34. (DOU Yan, CHEN Xi, BAO Anming, et al. Study of the temporal and spatial distribute of the snow cover in the Tianshan Mountains, China[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2010, 32(1): 28-34. (in Chinese))
- [5] 徐冉, 铁强, 代超, 等. 雅鲁藏布江奴下水文站以上流域水文过程及其对气候变化的响应[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2015, 43(4): 288-293. (XU Ran, TIE Qiang, DAI Chao, et al. Study on hydrological process in upper basin of Brahmaputra River from Nuxia Hydrological Station and its response to climate change[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2015, 43(4): 288-293. (in Chinese))
- [6] HAN L, TSUNEKAWA A, TSUBO M, et al. Spatial variations in snow cover and seasonally frozen ground over northern China and Mongolia, 1988-2010[J]. Global and Planetary Change, 2014, 116: 139-148.
- [7] 车涛, 郝晓华, 戴礼云, 等. 青藏高原积雪变化及其影响[J]. 中国科学院院刊, 2019, 34(11): 1247-1253. (CHE Tao, HAO Xiaohua, DAI Liyun, et al. Snow cover variation and its impacts over the Qinghai-Tibet Plateau[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2019, 34(11): 1247-1253. (in Chinese))
- [8] QIN Dahe, LIU Shiyin, LI Peiji. Snow cover distribution, variability, and response to climate change in Western China[J]. Journal of Climate, 2006, 19(9): 1820-1833.
- [9] ZHANG Y, LI T, WANG B. Decadal change of the spring snow depth over the Tibetan Plateau: the associated circulation and influence on the East Asian summer monsoon[J]. Journal of Climate, 2004, 17(14): 2780-2793.
- [10] DING Y, YING S, WANG Z, et al. Inter-decadal variation of the summer precipitation in China and its association with decreasing Asian summer monsoon (part II): possible causes[J]. International Journal of Climatology, 2010, 29(13): 1926-1944.
- [11] LI W, GUO W, QIU B, et al. Influence of Tibetan Plateau snow cover on East Asian atmospheric circulation at medium-range time scales[J]. Nature Communications, 2018, 9(1): 4243.
- [12] 韦志刚, 黄荣辉, 陈文, 等. 青藏高原地面站积雪的空间分布和年代际变化特征[J]. 大气科学, 2002, 26(4): 496-508. (WEI Zhigang, HUANG Ronghui, CHEN Wen, et al. Spatial distributions and interdecadal variations of the snow at the Tibetan Plateau weather stations[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2002, 26(4): 496-508. (in Chinese))
- [13] 胡豪然, 梁玲. 近 50 年青藏高原东部冬季积雪的时空变化特征[J]. 地理学报, 2013, 68(11): 1493-1503. (HU Haoran, LIANG Ling. Spatial and temporal variations of winter snow over east of Qinghai-Tibet Plateau in the last 50 years[J]. Acta Geographica Sinica, 2013, 68(11): 1493-1503. (in Chinese))
- [14] XU W, MA L, MA M, et al. Spatial-temporal variability of snow cover and depth in Qinghai-Tibetan Plateau[J]. Journal of Climate, 2016, 30(4): 1521-1533.
- [15] VERNEKAR A D, ZHOU J, SHUKLA J. The effect of Eurasian snow cover on the Indian monsoon[J]. Journal of Climate, 1995, 8(2): 248-266.

- [16] 除多,杨勇,罗布坚参,等. 1981—2010 年青藏高原积雪日数时空变化特征分析[J]. 冰川冻土,2015,37(6): 1461-1472. (CHU Duo, YANG Yong, LUO Bujianshen, et al. The variations of snow cover days over the Tibetan Plateau during 1981-2010 [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2015, 37(6): 1461-1472. (in Chinese))
- [17] 白淑英,史建桥,沈渭寿,等. 卫星遥感西藏高原积雪时空变化及影响因子分析[J]. 遥感技术与应用,2014,29(6): 954-962. (BAI Shuying, SHI Jianqiao, SHEN Weishou, et al. Spatial and temporal variations of snow and influencing factors in Tibet Plateau based on remote sensing[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2014, 29(6): 954-962. (in Chinese))
- [18] 王澄海,王芝兰,崔洋. 40 余年来中国地区季节性积雪的空间分布及年际变化特征[J]. 冰川冻土,2009,31(2): 301-310. (WANG Chenghai, WANG Zhilan, CUI Yang. Snow cover of China during the last 40 years: spatial distribution and interannual variation [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2009, 31(2): 301-310. (in Chinese))
- [19] 柯长青,李培基. 青藏高原积雪分布与变化特征[J]. 地理学报,1998(3): 19-25. (KE Changqing, LI Peiji. Spatial and temporal characteristics of snow cover over the Qinghai-Xizang Plateau [J]. Acta Geographica Sinica, 1998(3): 19-25. (in Chinese))
- [20] 郝振纯,张磊磊,童凯,等. MODIS/Terra 遥感雪盖数据在青藏高原河源区的应用[J]. 河海大学学报(自然科学版),2012,40(5): 479-484. (HAO Zhenchun, ZHANG Leilei, TONG Kai, et al. Application of MODIS/Terra remote sensing data of snow cover to five rivers' source regions in Tibetan Plateau [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2012, 40(5): 479-484. (in Chinese))
- [21] 王珂,王娜,雍斌. 青藏高原羌塘内流区降水时空特征[J]. 水资源保护,2019,35(3): 25-32. (WANG Ke, WANG Na, YONG Bin. Analysis of spatio-temporal characteristics of precipitation in Qiangtang inner flow area of Qinghai-Tibetan Plateau [J]. Water Resources Protection, 2019, 35(3): 25-32. (in Chinese))
- [22] 管晓祥,张建云,鞠琴,等. 多种方法在水文关键要素一致性检验中的比较[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版),2018,39(2): 51-56. (GUAN Xiaoxiang, ZHANG Jianyun, JU Qin, et al. Comparison of consistency testing for key hydrological elements by using multiple statistical methods [J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power, 2018, 39(2): 51-56. (in Chinese))
- [23] 郑淑文,彭亮,何英,等. 基于 MODIS 的塔什库尔干河流域积雪覆盖时空变化及地形因子分析[J]. 水电能源科学,2019,37(10): 25-29. (ZHENG Shuwen, PENG Liang, HE Ying, et al. Analysis of spatial-temporal variation of snow cover and topographic factors in tashkurgan river based on MODIS [J]. Water Resources and Power, 2019, 37(10): 25-29. (in Chinese))
- [24] 冯曦,王船海,李书建,等. 基于能量平衡法的融雪模型多时间尺度模拟[J]. 河海大学学报(自然科学版),2013,41(1): 26-31. (FENG Xi, WANG Chuanhai, LI Shujian, et al. Multi-time scale simulations with snow melting models based on energy balance theory [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2013, 41(1): 26-31. (in Chinese))
- [25] 姜琪,罗斯琼,文小航,等. 1961—2014 年青藏高原积雪时空特征及其影响因子[J]. 高原气象,2020,39(1): 24-36. (JIANG Qi, LUO Siqiong, WEN Xiaohang, et al. Spatial-temporal characteristics of snow and influence factors in the Qinghai-Tibetan Plateau from 1961 to 2014 [J]. Plateau Meteorology, 2020, 39(1): 24-36. (in Chinese))
- [26] 沈鑫澄,吴涛,游庆龙,等. 青藏高原中东部积雪深度时空变化特征及其成因分析[J]. 冰川冻土,2019,41(5): 1150-1161. (SHEN Liucheng, WU Tao, YOU Qinglong, et al. Analysis of the characteristics of spatial and temporal variations of snow depth and their causes over the central and eastern Tibetan Plateau [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2019, 41(5): 1150-1161. (in Chinese))
- [27] 蒋元春,李栋梁,郑然. 1971—2016 年青藏高原积雪冻土变化特征及其与植被的关系[J]. 大气科学学报,2020,43(3): 481-494. (JIANG Yuanchun, LI Dongliang, ZHENG Ran. Variation characteristics of snow cover and frozen soil and their relationships with vegetation in the Tibetan Plateau from 1971 to 2016 [J]. Transactions of Atmospheric Sciences, 2020, 43(3): 481-494. (in Chinese))
- [28] 王海娥,李生辰,张青梅,等. 青海高原 1961—2013 年积雪日数变化特征分析[J]. 冰川冻土,2016,38(5): 1219-1226. (WANG Hai'e, LI Shengchen, ZHANG Qingmei, et al. Changes of the days with snow cover on the Qinghai Plateau during 1961-2013 [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2016, 38(5): 1219-1226. (in Chinese))

(收稿日期:2021-08-03 编辑:施业)