

黄河源区积雪变化时空特征及其与气候要素的关系

管晓祥^{1,2,3},刘翠善^{2,4},鲍振鑫^{2,4},金君良^{2,3,4},王国庆^{2,3,4*} (1.河海大学水文水资源学院,江苏 南京 210098; 2.水利部应对气候变化研究中心,江苏 南京 210029; 3.长江保护与绿色发展研究院,江苏 南京 210098; 4.南京水利科学研究院水文水资源与水利工程科学国家重点实验室,江苏 南京 210029)

摘要: 基于1979~2016年积雪深度数据和同期气象站的降水、气温观测资料,分析了黄河源区年均雪深和积雪天数的时空演变规律,采用弹性系数法和相关性分析法研究降水、气温对积雪的影响及其空间规律.结果表明,黄河源区积雪期集中在11月到次年4月,源头以及西北高山区积雪初日较早,终日较迟,同时也是年均雪深高值区,积雪天数较长.研究期(1979~2016)内黄河源区面均降水量呈现不显著的减少趋势,下降率为-2.43mm/10a,气温显著上升.面均年均雪深和积雪天数都呈现下降趋势,但趋势在0.05水平上不显著.积雪天数对积雪期降水、气温的弹性系数分别为0.513和-1.347,年均雪深的弹性系数分别为0.696和-0.219,高山寒冷的研究区上游的年均积雪对降水、气温变化更为敏感.降水减少是黄河源区积雪天数下降的主要影响因素,贡献率约为77.2%.积雪期降水和气温对年均雪深变化的贡献率分别为43.7%和56.3%.降水对黄河源区西部和北部年均雪深变化的贡献率较高,在南部和东部气温是影响年均雪深的优势因素.

关键词: 黄河源区; 积雪变化; 气候变化; 相关性分析; 弹性系数法

中图分类号: X16 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-6923(2021)03-1045-10

Spatial-temporal variability of the snow over the Yellow River source region and its influencing climate factors. GUAN Xiao-xiang^{1,2,3}, LIU Cui-shan^{2,4}, BAO Zhen-xin^{2,4}, JIN Jun-liang^{2,3,4}, WANG Guo-qing^{2,3,4*} (1.College of Hydrology and Water Resource Hohai University, Nanjing 210098, China; 2.Research Center for Climate Change, Ministry of Water Resources, Nanjing 210029, China; 3.Yangtze Institute for Conservation and Development, Nanjing 210098, China; 4.State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing 210029, China). *China Environmental Science*, 2021,41(3): 1045~1054

Abstract: Based on the long-term snow depth data from 1979 to 2016 and the precipitation, air temperature observation data series from meteorological stations during the same period, the temporal and spatial changing characteristics of the annual average snow depth and snow days in the Yellow River source region (YRSR) were analyzed to reveal the influence of climate change on snow cover. The elasticity coefficient method and the correlation analysis method were employed to quantitatively evaluate the sensitivities of snow cover to precipitation and air temperature changes in different zones of the YRSR. The results show that the duration of snow days in the YRSR was concentrated from November to next April. Earlier initial snow date and later final snow date usually occurred in the source and the northwest high mountainous area, with higher annual average snow depth and longer snow days. Over the research period (1979~2016), the areal-average precipitation showed an insignificant decreasing trend, with a decrease rate of -2.43mm/10a, while the air temperature increased significantly. Annual snow depth and number of snow days both showed a downward trend, but the trends are not significant at the 0.05 level. The elasticity coefficients of snow days to precipitation and air temperature in the duration of snow days were 0.513 and -1.347 respectively, and the elasticity coefficients of snow depth were 0.696 and -0.219, respectively. Comparatively, variations of snow cover in the upper reaches with high mountains and low temperature were more sensitive to climate change. The decrease in precipitation was the main factor for the decrease of snow days, with the relative contribution rate of 77.2%. The relative contribution rates of precipitation and air temperature to snow depth were 43.7% and 56.3%, respectively. The contribution rate of precipitation to snow depth was relatively higher in the northwest regions, and the air temperature was the dominant factor affecting the snow depth in the south and east parts of the YRSR.

Key words: Yellow River source region; snow cover change; climate change; correlation analysis; elasticity coefficient method

积雪是覆盖在地球表面上的雪层,是冰冻圈的重要组成部分,具有高反射率、高相变潜热、低热传导等属性特点,其积累与消融对地表辐射平衡、能量循环和水资源分配等具有重要影响,在全球和区域气候系统中起着重要的调节作用^[1-2].同时积雪对气候变化极具敏感性,全球变暖使得北半球的积雪面

积正呈现下降态势^[3-4].积雪变化引起的一系列水文效应、气候效应和灾害效应引起了学界广泛的关

收稿日期: 2020-07-28

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFC0404403,2017YFA0605004);国家自然科学基金资助项目(51879164,41961124007,91847301,92047203);中央高校基本科学研究业务费(2013-B200203016)

* 责任作者, 教授级高级工程师, gqwang@nhri.cn

注^[5-7],监测积雪变化并探讨其原因对研究全球水循环、气候变化有着极为重要的意义.相关研究表明,1992~2010年中国三大主要积雪区(青藏高原、新疆北部和东北-内蒙古地区)积雪日数都有显著下降趋势^[9],其中内蒙古地区积雪变化差异性显著,整体趋势为东北向西南方向逐步减少^[9],春季、冬季积雪覆盖率均与冬季降水量呈显著正相关,各季节积雪覆盖率基本与温度呈负相关关系^[10].由气候变暖引起新疆北部积雪为主补给的河流最大径流前移,夏季径流明显减少^[6],如北疆克兰河最大径流由6月提前到5月^[11].向燕芸等^[12]分析了天山开都河流域积雪及径流变化特征,结果表明融雪期在春季提前了约10.35d,而秋季延迟了约7.56d,温度对春季积雪变化影响较大,而降水则对冬季积雪变化影响较大.

青藏高原是北半球中低纬度海拔最高、积雪覆盖最大的地区,既是气候变化的敏感区,又对水资源系统产生重要影响.青藏高原1980~2018年积雪覆盖率呈下降趋势,尤其在2000年以后,积雪覆盖日数和雪深明显下降^[13].青藏高原东部的积雪变化最显著^[14],而江河源区恰好位于高原东部,其积雪主导了整个青藏高原积雪的变化,具有极好的代表性^[15].如杨建平等^[15]分析了长江黄河源区1970~1999年积雪空间分布与年代际变化.吕爱锋等^[16]利用流量质心时间表示融雪径流开始时间,分析了三江源融雪径流时间变化特征.刘晓娇等^[17]基于气象台站逐日雪深资料,研究黄河源区积雪特征值变化趋势,发现总体上呈现积雪初日推迟、终日提前、积雪期缩短和积雪日数减少趋势.已有关于积雪变化归因分析的研究多在站点尺度或者流域面均尺度上分析积雪特征值(如积雪天数和年均雪深)的变化及其与降水、气温的相关关系^[12,18-20],而多年平均积雪特征及演变的空间异质性没有得到很好的考虑.影响积雪变化的原因是多种因素共同作用的结果,气候因子对积雪的影响离不开地形因子的协同作用^[21],如处于相同的气候带,地势较低的地方相比于地势高的地方积雪面积减少速度更快^[1].此外积雪变化还受到不同土地覆盖类型的影响,蒋元春等^[22]指出不同区域植被覆盖情况对积雪冻土变化的影响具有显著差异.而黄河源区地貌类型多样,上游源头区以稀疏草原为主,中高覆盖度草原和湖泊沼泽是中游地区主要下垫面类型,下游地区多是高山峡谷地貌,受

地形、地貌影响,积雪变化特征及影响因素具有明显的空间异质性,分析积雪演变及其影响因素的空间分布特征更具有意义.

因此,本文依据黄河源区长时间系列遥感反演逐日积雪深资料,分析积雪天数和年均雪深在空间上的分布和演变规律,结合源区气象站点的降水、气温观测资料,分析气候要素和积雪特征变化的相关关系,评价积雪变化对气候要素的敏感性,以期提高对高寒山区积雪变化及其原因的认识.

1 研究流域及数据来源

黄河发源于青海省巴颜喀拉山北麓,黄河源区是指位于青藏高原东北部的黄河干流唐乃亥断面以上的集水流域,流域面积12.2万 km^2 ,约占整个黄河流域面积的15%,地理位置介于 $95^{\circ}50'E\sim 103^{\circ}30'E,32^{\circ}20'N\sim 36^{\circ}10'N$ 之间.流域海拔在2663~6253m,地势西高东低,如图1所示.黄河源区多年平均年降水量约为508mm,在气候区划上,黄河源区具有典型内陆高原气候特征,冷热两季交替,干湿季分明,无明显的四季之分,受地形和地理位置影响,流域东部和出口处的北部气温较高,西部及研究区中上游源头区气温较低.

黄河源区内及周边16个气象站点的降水、气温资料来源于国家气象科学数据中心(<http://data.cma.cn/>)的中国地面气候资料日值数据集,采用基于高程修正方法结合IDW(Inverse Distance Weighted)对气象数据进行插值处理,在利用气象站点观测数据对气温空间插值时,设定气温的垂直递减率为 $-0.55^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ ^[23].本文使用的积雪数据是由国家青藏高原科学数据中心提供的中国雪深长时间序列数据集.该数据集提供1979~2016年逐日的中国范围积雪厚度分布数据,空间分辨率为25km,采用EASE-GRID和经纬度2种投影方式,积雪深度数据的获取以及积雪反演算法说明详见网址<http://westdc.westgis.ac.cn/>.

依据青藏高原积雪季节变化的特点以及已有研究结果,本文将当年的9月1日至次年的8月31日定义为一个积雪年^[24].目前,中国积雪研究中对于积雪日的定义和划分标准不同.根据中国气象局发布的《地面气象观测规范》,平均雪深不足0.5cm(微量积雪)记为0cm,当积雪深度 $\geq 0.5\text{cm}$ 时,数值四舍五入,最

小值为 1cm,因此积雪深度达到或超过 1cm,记作一个积雪日.积雪天数定义为一个积雪年内积雪初日至积雪终日之间(即积雪期)积雪深度 $\geq 1\text{cm}$ 的累计天数;年均雪深是在一个积雪年内所有积雪深度累加,再除以

积雪深度的积雪天数,所得数值就是一个积雪年的年均雪深.其中,积雪初日定义为一个积雪年内首次出现积雪深度记录的日期;积雪终日的定义为一个积雪年内末次出现积雪深度记录的日期.

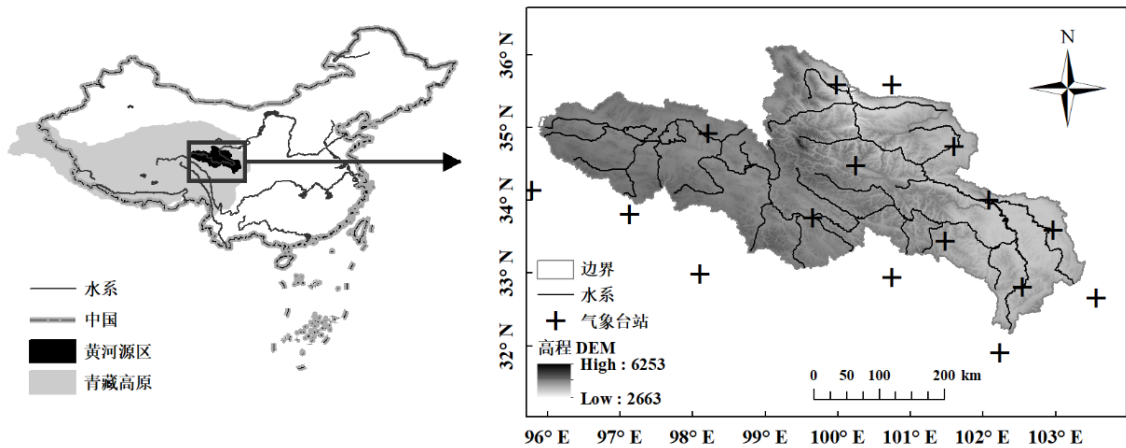


图1 黄河源区位置、地形及气象站分布

Fig.1 Topography and meteorological stations in or around the Yellow River source region (YRSR)

2 研究方法

2.1 趋势检验法

采用 Mann-Kendall 趋势检验法诊断径流序列演变的趋势特征及其显著性,该方法具有检验范围宽、受人为影响较小的特点,是目前水文、气象系列趋势检验方法中应用较多且具有理论意义的一种方法^[25],其统计量 MK 值的绝对值大于 1.96 时,即说明趋势在 0.05 置信水平上显著, MK 为正值表示增加趋势,负值表示减少趋势,具体计算公式详见参考文献^[24].

2.2 弹性系数法

选取 Pearson 相关分析方法,就积雪特征量与气候要素之间的相关性进行分析.考虑到相关性不能直接代表变量间的因果性,为进一步研究水文过程对气候变化的响应,采用 Zheng 等^[27]提出的敏感性系数计算方法:

$$\varepsilon_x = \frac{\bar{x}}{y} \cdot \frac{\sum(x-\bar{x})(y-\bar{y})}{\sum(x-\bar{x})^2} = \rho_{x,y} \cdot C_y / C_x \quad (1)$$

式中: ε_x 为 y 对气候要素 x 的敏感系数,指气象要素 x 变化 1%,引起的 y 变化 $\varepsilon_x\%$ ^[11]; \bar{x} 和 \bar{y} 分别为气象要素 x 与预测要素 y 的多年平均值, $\rho_{x,y}$ 为 x 和 y 的相关系数, C_x 和 C_y 分别为序列 x 和 y 的变异系数(方差

与均值的比值). x 可以为气温(T)或降水(P),预测要素 y 可以为年均积雪深或年积雪日数.

2.3 贡献率分析

作为一种预测分析,多元线性回归通常用于解释一个连续因变量与两个或多个自变量之间的关系,以回归系数表征自变量对因变量变化的贡献程度,该方法也常用于分析不同气候要素对流域蒸发的影响^[28-29].本文建立积雪特征量与降水和气温之间的多元线性回归关系,以量化气候因素对积雪变化的相对贡献率.为了消除不同量纲对回归计算的影响,在建立回归关系式时将自变量与因变量都归一化至[0,1]范围,具体计算贡献程度的表达式为:

$$y = a \cdot P + b \cdot T + \delta \quad (2)$$

$$\eta_P = \frac{|a|}{|a|+|b|}, \eta_T = 1 - \eta_P \quad (3)$$

式中: P 和 T 分别表示降水和气温, a 和 b 为回归系数, δ 为回归残差, y 同上; η_P 和 η_T 分别为降水和气温对积雪特征值 y 变化的相对贡献率^[29].

3 分析与结果

3.1 积雪特征与气候要素的空间分布

依据积雪初日和终日的定义及黄河源区积雪遥感反演得到的逐日系列数据,计算得到研究区

内多年平均积雪初日和积雪终日所处时期如图 2 所示.从图 2 中可以看出,黄河源区积雪开始和结束时间具有空间异质性,积雪初日和积雪终日受流域地形和多年平均气温的影响,西部源头区和北部边界区积雪期开始较早,集中在十月和十一月,积雪期结束较迟,主要在次年的四五月份;与黄河源其他地区相比积雪期较长.黄河源区积雪期内积雪天数和年均雪深多年平均分布情况如图 3

所示,从中可以看出源区上游至黄河源头以及西北部兴海气象站以上流域年均雪深较大,积雪深在 4cm 以上,同时积雪天数也较多;年均雪深和积雪天数峰值出现在研究区的北部.达日站一下的中下游河谷地区年均雪深较小,在 2cm 左右;积雪天数在 50d 左右.综上,黄河源区西部北部是积雪覆盖较为显著的地区,积雪期较长,年均雪深和积雪天数都高于其他地区.

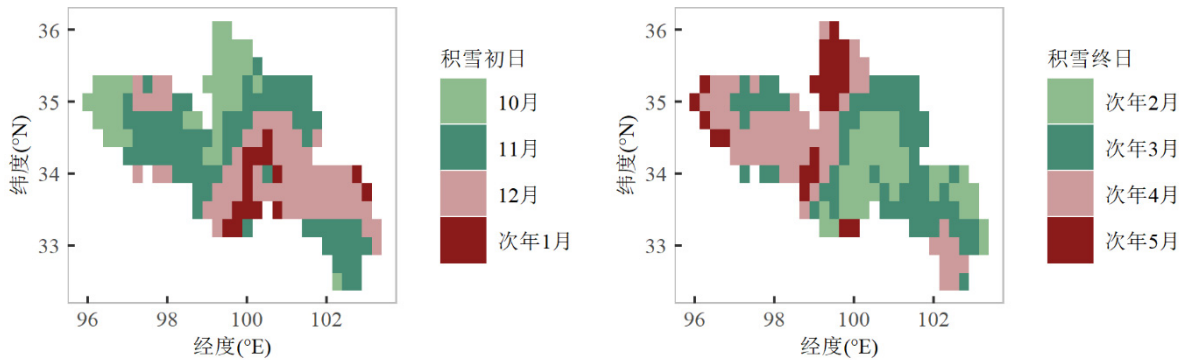


图2 黄河源区多年平均积雪初日、积雪终日日期空间分布
Fig.2 the initial and final snow date in the YRSR

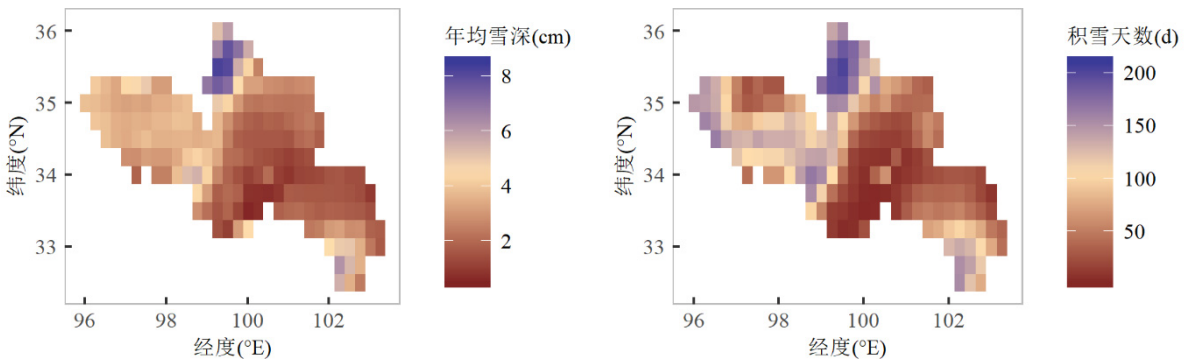


图3 黄河源区年均雪深与积雪天数多年平均值
Fig.3 Annual average snow depth and snow days in the duration of snow cover in the YRSR

依据气象资料计算黄河源区降水和气温的多年平均值,并比较水热条件的空间异质性.按积雪年计算降水、气温的多年平均分布结果如图 4 所示,从中可以看出黄河源区降水东多西少、南多北少,受地形影响气温东高西低、北高南低,总体而言东南部水热条件较好.一般而言,丰富的降水和较低的气温有利于积雪的形成,比较图 3 和图 4 中的结果发现积雪年降水的多年平均值的空间分布特点与年均雪深和积雪天数并不一致,这是因为积雪期多处于黄河源区的冬季,而黄河源区属高寒季风气候,年内

降水集中于夏秋季,所以积雪年降水不能很好地反映积雪特征的空间分布.

为此,本文计算积雪期降水和气温的多年平均值如图 5 所示,结果表明积雪期降水、气温的多年平均值在空间上较为离散,其值的变化不够光滑,这是由于积雪期的空间异质性所导致,不过积雪期气温的总体空间特征与积雪年气温空间分布规律(图 4)较为一致,这是因为气温主要受地形的影响;就降水而言,积雪期的多年平均降水空间特征与年均雪深和积雪天数的空间分布特征较为一致,即积雪期西

部北部降水多于东部南部地区.以下在分析黄河源区积雪特征与气候要素的关系中,即以积雪期为研

究期,计算积雪期内降水、气温的年系列值分析其与积雪天数、年均雪深的关系.

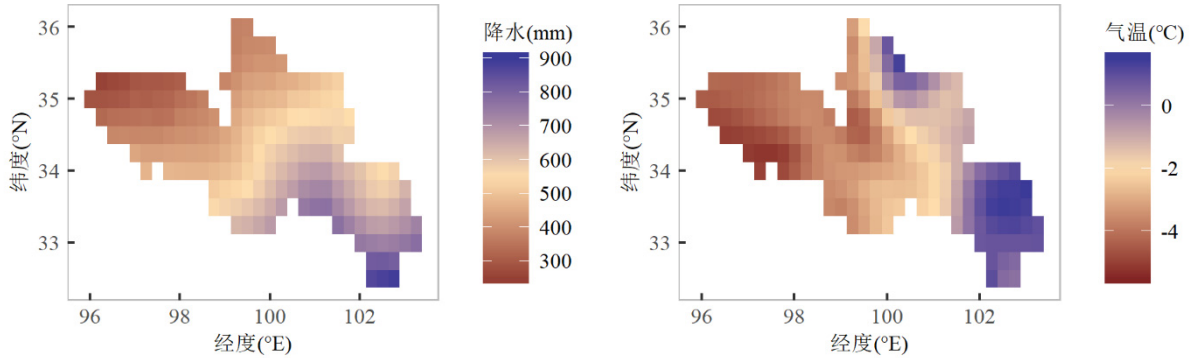


图4 黄河源区 1979~2016 年积雪年内多年平均降水、气温空间分布

Fig.4 Mean annual precipitation and air temperature during 1979~2016 in the YRSR

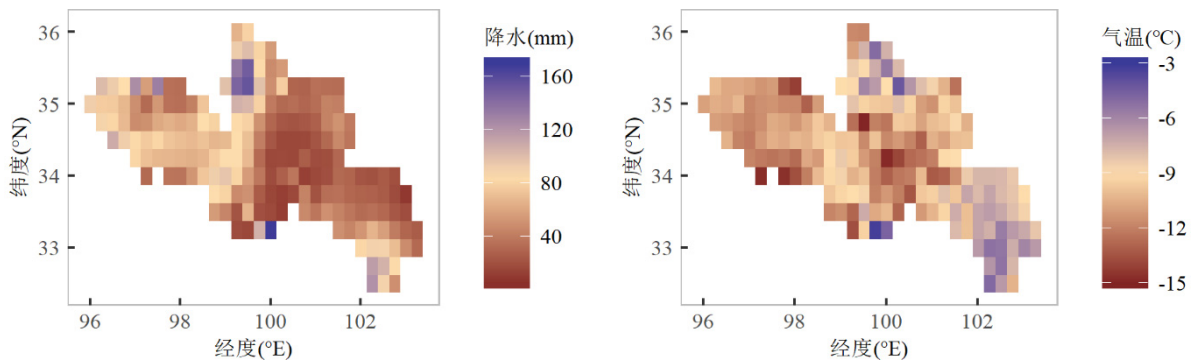


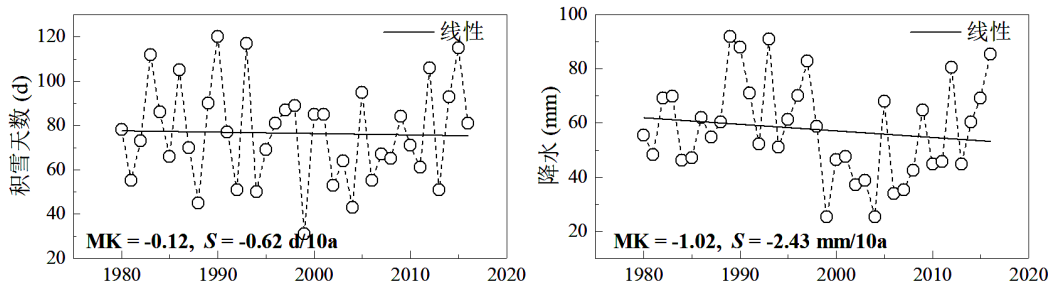
图5 黄河源区 1979~2016 年积雪期内多年平均降水、气温空间分布

Fig.5 Mean annual precipitation and air temperature in the duration of snow cover in the YRSR

3.2 气候要素与积雪特征时空变化分析

基于线性回归法计算积雪期降水、气温、积雪天数和年均雪深的变化率(即气候倾向率 S),并应用 MK 法诊断其变化趋势的显著性.黄河源区 1979~2016 年各要素流域面均年序列的变化情况如图 6 所示,就流域整体而言,1979~2016 期间面均降水

量呈现不显著的减少趋势,下降率为 $-2.43\text{mm}/10\text{a}$,而 2000 年之后呈现波动上升趋势;气温呈现显著的上升趋势,积雪期变暖十分明显.年均雪深和积雪天数都呈现不显著的下降趋势,MK 值小于 0 但未低于 -1.96 ,且 2000 年之后也呈现与降水量相似的变化特征,即略有上升.



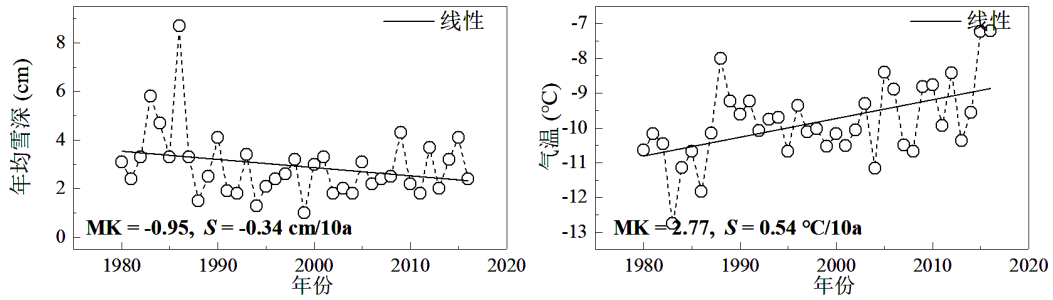


图 6 黄河源区面均降水、气温、积雪天数和年均雪深的年变化趋势

Fig.6 Variations of basin average precipitation, air temperature, snow days and annual average snow depth in the YRSR

基于格点分析各要素的演变趋势,计算得到气候倾向率 S 和 MK 法统计量值,其空间分布如图 7 和图 8.结果表明,在黄河源区绝大多数地区都能诊断出升温趋势,中下游升温显著;降水增加的地区

同样位于黄河源区的中下游地区,即流域东南部,降水减少的区域主要集中在达日气象站以上至黄河源头区域,且该区域积雪天数和年均雪深也呈下降趋势.

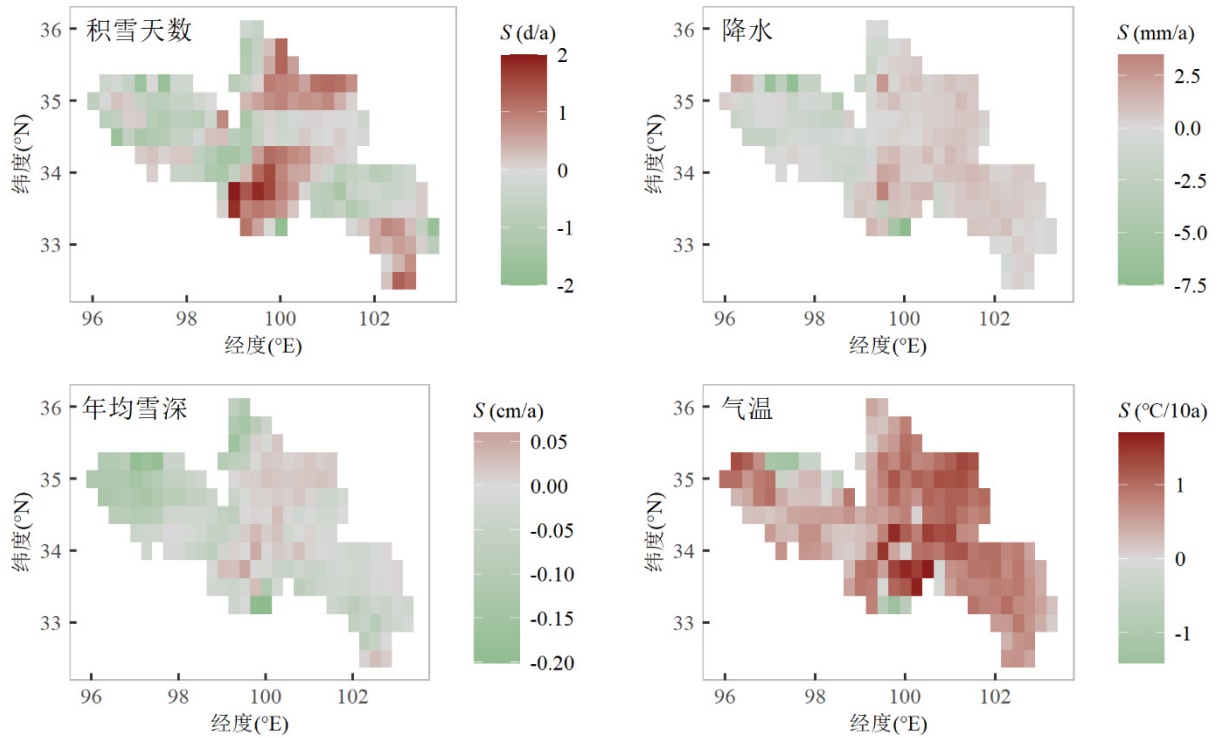
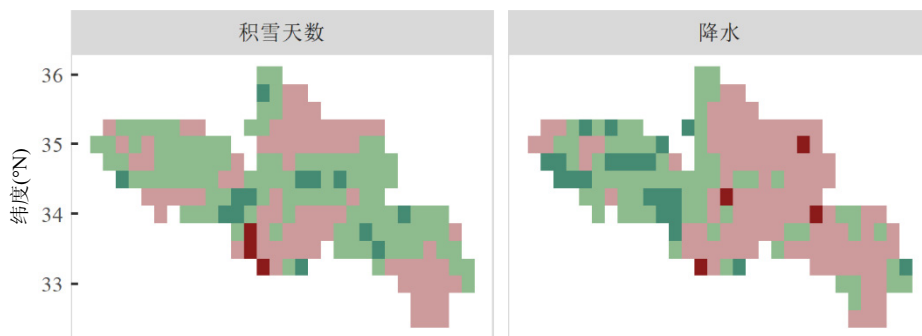


图 7 黄河源区 1979~2016 年积雪期内降水、气温、积雪天数与年均雪深气候倾向率

Fig.7 Changing rates of precipitation, air temperature, snow days and annual average snow depth during 1979~2016 in the YRSR



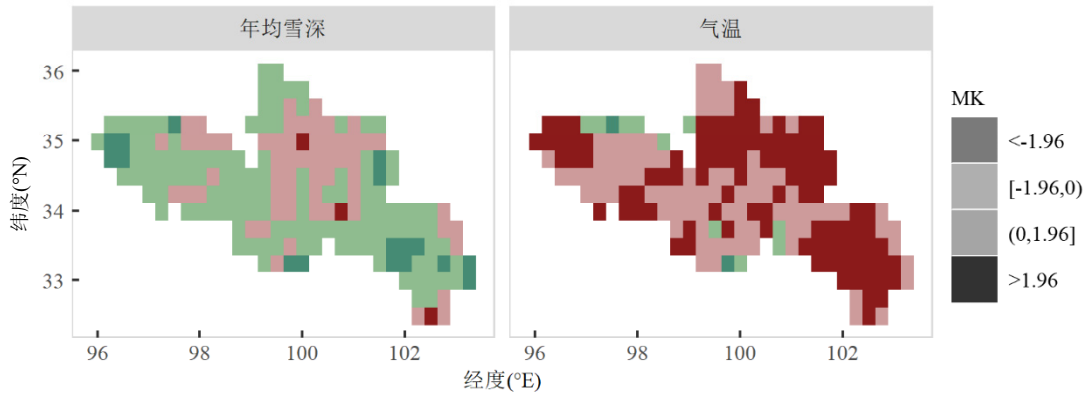


图 8 黄河源区 1979~2016 年积雪期内降水、气温、积雪天数和年均雪深变化趋势 MK 值

Fig.8 MK values for data series of the precipitation, air temperature, snow days and annual average snow depth during 1979~2016 in the YRSR

3.3 积雪变化对气候要素的敏感性

依据弹性系数公式,在像元尺度上计算积雪期年均雪深、积雪天数相对于降水、气温的弹性系数,分析比较年均雪深和积雪天数对气候要素的敏感性及其在空间上的分布规律,其结果如图 9 所示.总体而言,积雪特征值对降水的弹性系数多为正数,对气温的弹性系数多为负数.经计算,在流域平均尺度上积雪天数对降水、气温的弹性系数分别为 0.513

和-1.347,年均雪深对降水、气温的弹性系数分别为 0.696 和-0.219,即积雪期降水增加、气温降低有助于积雪.就弹性系数在黄河源区的空间分布规律(见图 9)而言,在黄河源区海拔高、气候寒冷的上游地区,年均雪深对降水、气温的弹性系数绝对值较高,在研究区的中游及下游地区,弹性系数绝对值较小,表明高山寒冷地区的积雪,相比暖湿的中下游河谷地区,对气候变化更为敏感.

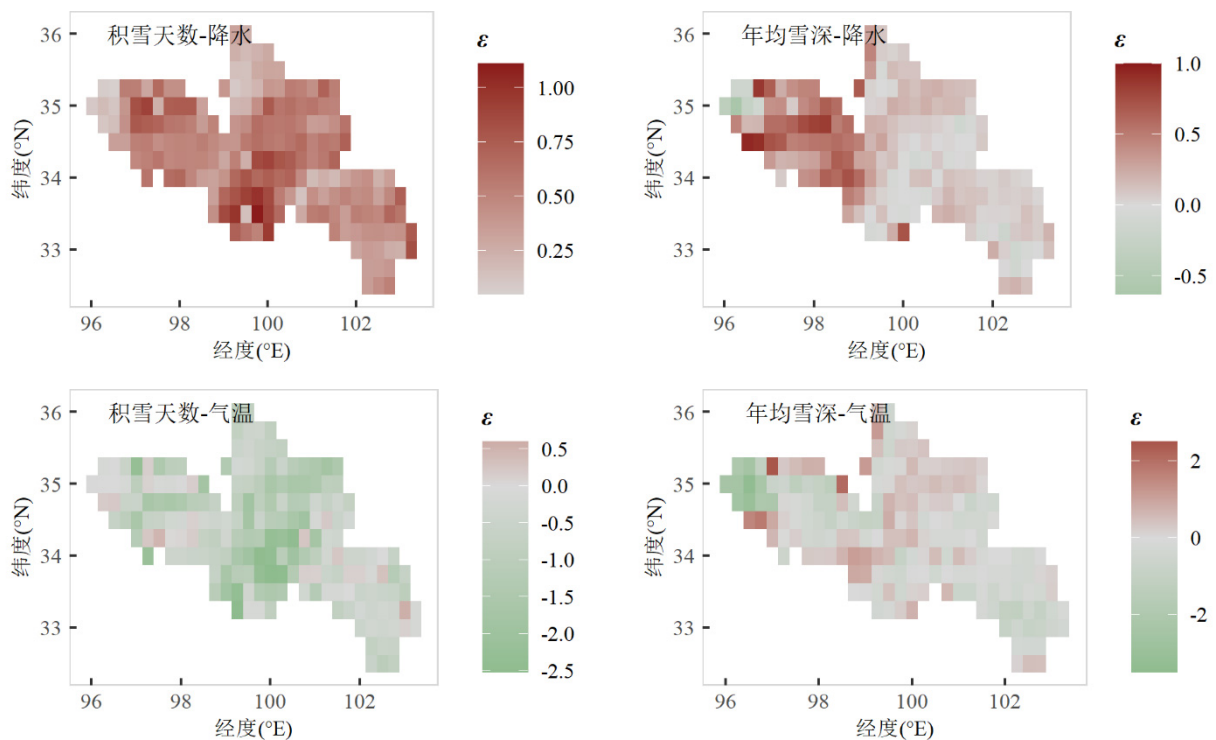


图 9 积雪天数和年均雪深对降水、气温的弹性系数

Fig.9 Elasticity coefficients of snow days and annual average snow depth to precipitation and air temperature

3.4 积雪变化贡献率分析

以年均雪深和积雪天数分别为因变量,降水、

气温为自变量做多元线性回归分析,计算降水、气温对积雪特征值变化的贡献率,结果如图 10 所示。结果表明,黄河源区积雪天数主要受降水变化的影响,经计算降水、气温对积雪天数变化的贡献率分别为 77.2%和 22.8%,这是因为黄河源区积雪期多在 11 月到次年 4 月之间,该时期流域气温较低,而依据积雪日的定义和划分标准(有积雪观测且积雪深度大于等于 1cm 计为一个积雪日),积雪天数主要受降水量的影响。降水、气温对年均雪深影响贡献的空间异质性较高,就流域面均尺度而言,降水、气

温对年均雪深变化的贡献率分别为 43.7%和 56.3%。从图 10 可以看出,降水对黄河源区西部和北部年均雪深变化的贡献率较高,在南部和东部气温是影响年均雪深的优势因素。结合图 4,积雪年多年平均降水量东南多、西北少,同样中下游低海拔的地区积雪年多年平均气温相比其他地区较高,所以研究区的东南地区气温是制约积雪的主要因素,而上游地区多年平均气温低于 -2°C ,导致气温的年代际波动对积雪的形成以及积雪特征值年代际演变的影响不是很显著。

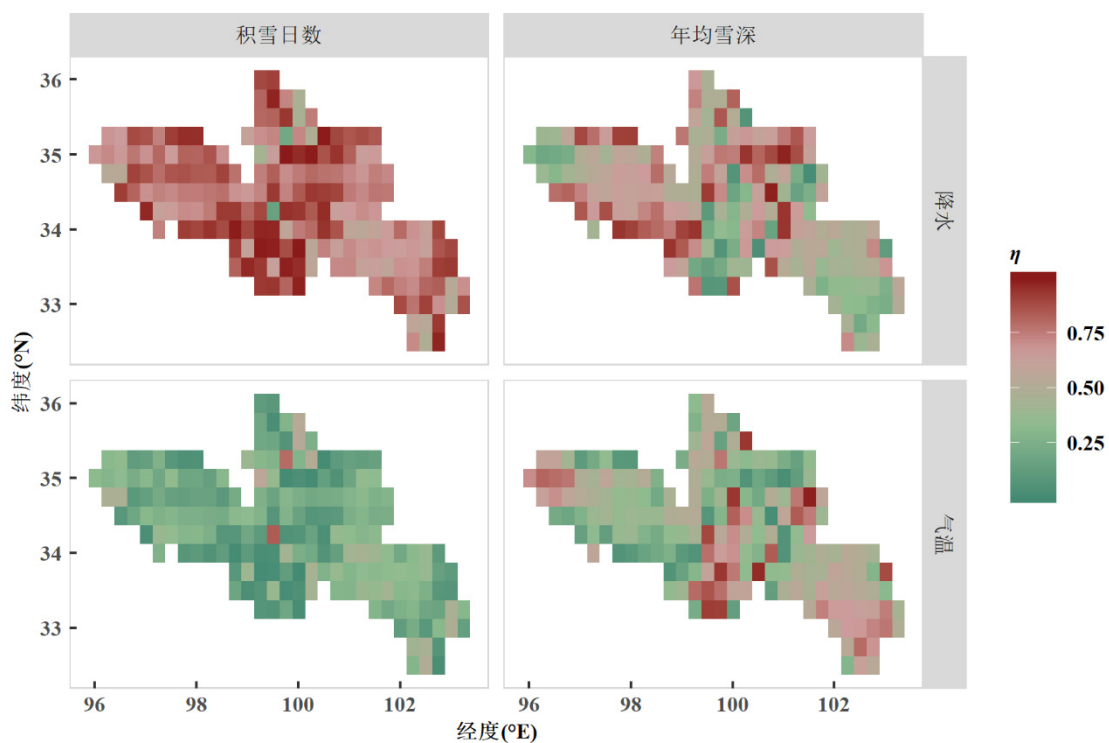


图 10 气候要素对积雪日数和年均雪深变化的相对贡献率

Fig.10 The relative contribution rates of climate variables to the variations of snow days and annual average snow depth

4 结论与讨论

4.1 讨论

已有研究表明,气温越高,降水量越大,积雪面积越小;反之,气温越低,降水量大,积雪不易融化,积雪面积增大^[1]。就年均雪深而言,春秋两季,影响积雪深度的关键性因子是气温,在冬季,降水量是影响雪深的主要因子。如在东北及其邻近地区,1960~2006 年期间年均积雪量呈现上升趋势,全年积雪的增多主要由冬季积雪增加而引起^[30];沈镗澄等^[31]研究青藏高原中东部积雪变化原因时,同样发现在不同季节

雪深的气象要素成因上,冬季(气温较低)积雪变化由降水主导,其余季节由气温主导;在新疆北部和天山山区,积雪初日、终日和积雪期长度主要受气温影响大于降水,该区域春季、秋季气温增暖是造成其积雪期减少、积雪初日显著推迟、积雪终日略提早的主要原因。综合来看,在我国三大主要积雪区,积雪特征都在某种程度上受气温和降水要素演变的影响,且影响方式上具有一定的相似性。而在高寒山区海拔也影响着积雪分布,随着海拔升高,雪深分布明显变化,最大雪深随海拔的增加而增加^[30, 32]。综上所述,气候变化导致区域水热条件的变化,从而影响着积雪

分布和特征值的变化.气温较低的情况下,如冬季平均气温低于春秋两季,海拔高处的多年平均气温低于低海拔地区,此时降水量是影响积雪的主要因素;而当降水量的时空间差异不显著时,则气温是影响积雪的主导因素.这在本文基于格点分析积雪特征值与气候因子关系中得到很好的体现,黄河源区地势西高东低,从而影响着源区内多年平均气温的空间分布特征,西部高海拔地区降水变化是积雪变化的重要贡献因素,在西南部气温的贡献率较高.

积雪变化是一系列因素影响的综合结果,本文只考虑了气候要素中最重要的两个因子(降水、气温)对积雪的影响,而关于其他气候气象因子如太阳辐射、气溶胶因子,积雪本身属性如颗粒大小、结构密度对积雪变化的影响,以及下垫面(植被、冻土)与积雪的耦合关系研究是未来该领域的研究重点,此外,研究积雪变化所带来的水文效应和灾害效应也是重点关注的研究领域,融雪径流作为高寒区流域径流的重要组成部分,进而对区域水平衡以及 4-5 月份积雪融化导致的春季洪涝^[33]及次生灾害等有着重要影响.因此,提升积雪变化及其水文生态效应的认识水平对区域水资源管理、生态环境保护具有重要的实际意义.

4.2 结论

4.2.1 黄河源区积雪期集中在 11 月到次年 4 月,源头以及西北高山区积雪初日较早,终日较迟,同时也是年均雪深高值区,在 4cm 以上,积雪天数相比其他地区较长.积雪期西北地区多年平均降水是流域东南地区的 1 到 2 倍,且多年平均气温较低.

4.2.2 1979~2016 黄河源区面均降水量呈现不显著的减少趋势,下降率为 $-2.43\text{mm}/10\text{a}$,气温呈现显著的上升趋势,积雪期变暖十分明显.流域面积平均年均雪深和积雪天数都呈现下降趋势,但趋势在 0.05 水平上不显著.除了研究区中部地区,积雪天数和年均雪深都不同程度地有所下降.

4.2.3 积雪变化与降水、气温的关系分析结果表明积雪天数对积雪期降水、气温的弹性系数分别为 0.513 和 -1.347 ,年均雪深的弹性系数分别为 0.696 和 -0.219 ,高山寒冷的研究区上游的年均积雪对降水、气温变化更为敏感.降水减少是黄河源区积雪天数下降的主要影响因素,贡献率约为 77.2%.积雪期降水和气温对年均雪深变化的贡献率分别为 43.7%和

56.3%.降水对黄河源区西部和北部年均雪深变化的贡献率较高,在南部和东部气温是影响年均雪深的优势因素.

参考文献:

- [1] 杨林,马秀枝,李长生,等.积雪时空变化规律及其影响因素研究进展[J].西北林学院学报,2019,34(6):96-102.
Yan L, Ma X Z, Li C S, et al. Research progress in spatio-temporal variation of snow cover and the influencing factors [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2019,34(6):96-102.
- [2] 史晋森,孙乃秀,叶浩,等.青海高原季节性降雪中的黑碳气溶胶[J].中国环境科学,2014,34(10):2472-2478.
Shi J S, Sun N X, Ye H, et al. Black carbon in seasonal snow across Qinghai Plateau [J]. China Environmental Science, 2014,34(10):2472-2478.
- [3] Choi G, A R D, Kang S. Changing northern hemisphere snow seasons [J]. Journal of Climate, 2010,23(19):5305-5310.
- [4] 王宁练,刘时银,吴青柏,等.北半球冰冻圈变化及其对气候环境的影响[J].中国基础科学,2015,(2):9-14,2.
Wang N L, Liu S Y, Wu Q B, et al. Recent progress in the study of the change of cryo-sphere in the northern hemisphere and its impacts on climate and environment [J]. China Basic Science, 2015,(2):9-14,2.
- [5] 沈永平,苏宏超,王国亚,等.新疆冰川、积雪对气候变化的响应(II):灾害效应[J].冰川冻土,2013,35(6):1355-1370.
Shen Y P, Su H C, Wang G Y, et al. The responses of glaciers and snow cover to climate change in xinjiang(II):Hazards effects [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2013,35(6):1355-1370.
- [6] 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 Y P, Su H C, Wang G Y, et al. The responses of glaciers and snow cover to climate change in xinjiang(II): Hydrological effects [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2013,35(3):513-527.
- [7] 杨建平,丁永建,方一平.中国冰冻圈变化的适应研究:进展与展望[J].气候变化研究进展,2019,15(2):178-186.
Yang J P, Ding Y J, Fang Y P, et al. Adaptation research of cryosphere change in China: advances and prospections [J]. Climate Change Research, 2019,15(2):178-186.
- [8] 钟镇涛,黎夏,许晓聪,等.1992~2010年中国积雪时空变化分析[J].科学通报,2018,63(25):2641-2654.
Zhong Z T, Li X, Xu X C, et al. Spatial-temporal variations analysis of snow cover in China from 1992~2010 [J]. Chinese Science Bulletin, 2018,63(25):2641-2654.
- [9] 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 & Planetary Change, 2014,116:139-148.
- [10] 孙晓瑞,高永,丁延龙,等.基于MODIS数据的2001~2016年内蒙古积雪分布及其变化趋势[J].干旱区研究,2019,36(1):104-112.
Sun X R, Gao Y, Ding Y L, et al. Distribution and trend of snow cover in inner mongolia from 2001 to 2016 based on MODIS data [J]. Arid Zone Research, 2019,36(1):104-112.
- [11] 沈永平,王国亚,苏宏超,等.新疆阿尔泰山区克兰河上游水文过程对气候变暖的响应[J].冰川冻土,2007,29(6):845-854.
Shen Y P, Wang G Y, Su H C, et al. Hydrological processes responding to climate warming in the upper reaches of Kelan River basin with snow-dominated of the Altay Mountains region, Xinjiang, China [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2007,29(6):845-854.
- [12] 向燕芸,陈亚宁,张齐飞,等.天山开都河流域积雪、径流变化及影响

- 因子分析 [J]. 资源科学, 2018,40(9):1855-1865.
- Xiang Y Y, Chen Y N, Zhang Q F, et al. Trends of snow cover and streamflow variation in Kaidu River and their influential factors [J]. Resources Science, 2018,40(9):1855-1865.
- [13] 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 T, He X H, Dai L Y, 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.
- [14] 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.
- [15] 杨建平,丁永建,刘俊峰.长江黄河源区积雪空间分布与年代际变化 [J]. 冰川冻土, 2006,28(5):648-655.
- Yang J P, Ding Y J, Liu J F. Distribution of snow cover and its inter-decadal variation in the source regions of the Yangtze and Yellow Rivers [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2006,28(5):648-655.
- [16] 吕爱锋,贾绍凤,燕华云,等.三江源地区融雪径流时间变化特征与趋势分析 [J]. 资源科学, 2009,31(10):1704-1709.
- Lv A F, Jia S F, Yan Y H, et al. Temporal variations and trend analysis of the snowmelt runoff timing across the source regions of the Yangtze River, Yellow River and Lancang River [J]. Resources Science, 2009, 31(10):1704-1709.
- [17] 刘晓娇,陈仁升,刘俊峰,等.黄河源区积雪变化特征及其对春季径流的影响 [J]. 高原气象, 2020,39(2):226-233.
- Liu X J, Chen R S, Liu J F, et al. Variation of snow cover and its influence on spring runoff in the source region of Yellow River [J]. Plateau Meteorology, 2020,39(2):226-233.
- [18] 秦艳,丁建丽,赵求东,等.2001~2015年天山山区积雪时空变化及其与温度和降水的关系 [J]. 冰川冻土, 2018,40(2):249-260.
- Qin Y, Ding J L, Zhao Q D, et al. Spatial-temporal variation of snow cover in the Tianshan Mountains from 2001 to 2015, and its relation to temperature and precipitation [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2018,40(2):249-260.
- [19] 王慧,王梅霞,王胜利,等.1961~2017年新疆积雪期时空变化特征及其与气象因子的关系 [J]. 冰川冻土, 2020,42(5):72-80.
- Wang H, Wang Y M, Wang S L, et al. Spatial-temporal variations characteristics of snow cover duration in Xinjiang from 1961 to 2017 and their relationship with meteorological factors [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2020,42(5):72-80.
- [20] 张晓闻,臧淑英,孙丽.近40年东北地区积雪日数时空变化特征及其与气候要素的关系 [J]. 地球科学进展, 2018,33(9):958-968.
- Zhang X W, Zang S Y, Sun L. Spatial-temporal variation characteristics of snow cover days in Northeast China in the past 40 years and their relationship with climatic factors [J]. Advances in Earth Science, 2018,33(9):958-968.
- [21] 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 S W, Peng L, He Y, 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.
- [22] 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 Y C, Li D L, Zheng R, et al. 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.
- [23] 姜欣彤,黎曙,周祖昊,等.基于高程分段的黄河源区NDVI和水热条件空间分布格局研究 [J]. 南水北调与水利科技, 2020,18(4):39-53.
- Jiang T X, Li S, Zhou Z H, et al. Study on the distribution pattern of NDVI and hydrothermal conditions in the Yellow River Headwaters based on elevation section [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2020,18(4):39-53.
- [24] 刘俊峰,杨建平,陈仁升,等.SRM融雪径流模型在长江源区冬克玛底河流域的应用 [J]. 地理学报, 2006,61(11):1149-1159.
- Liu J F, Yang J P, Chen R S, et al. The simulation of snowmelt runoff model in the Dongkemadi River Basin, headwater of the Yangtze River [J]. Acta Geographica Sinica, 2006,61(11):1149-1159.
- [25] 张建云,王国庆,金君良,等.1956~2018年中国江河径流演变及其变化特征 [J]. 水科学进展, 2020,31(2):153-161.
- Zhang J Y, Wang G Q, Jin J L, et al. Evolution and variation characteristics of the recorded runoff for the major rivers in China during 1956-2018 [J]. Advances in Water Science, 2020,31(2):153-161.
- [26] 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 X X, Zhang J Y, Ju Q, 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 (Natural Science Edition), 2018,39(2):51-56.
- [27] Zheng H, Zhang L, Zhu R, et al. Responses of streamflow to climate and land surface change in the headwaters of the Yellow River Basin [J]. Water Resources Research, 2009,45(7):641-648.
- [28] 钟巧,焦黎,李稚,等.博斯腾湖流域潜在蒸散发时空演变及归因分析 [J]. 干旱区地理, 2019,42(1):103-112.
- Zhong Q, Jiao L, Li Z, et al. Spatial and temporal changes of potential evapotranspiration and its attribution in the Bosten Lake Basin [J]. Arid Land Geography, 2019,42(1):103-112.
- [29] Guan X, Zhang J, Yang Q, et al. Changing characteristics and attribution analysis of potential evapotranspiration in the Huang-Huai-Hai River Basin, China [J]. Meteorology and Atmospheric Physics, 2021,133:97-108.
- [30] 陈光宇.东北及邻近地区积雪的时空变化规律及影响因子分析 [D]. 南京:南京信息工程大学, 2011.
- Chen G Y. Analysis on temporal-spatial characteristics of cumulative snow depth and its influence factors in Northeast of China and its vicinity [D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science and Technology, 2011.
- [31] 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 L C, Wu T, You Q L, 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.
- [32] 王金叶,常宗强,金博文,等.祁连山林区积雪分布规律调查 [J]. 西北林学院学报, 2001,(S1):14-16.
- Wang J Y, Chang Z Q, Jin B W, et al. Investigation on distribution rule of snowpack in Qilian Mountains forest region [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2001,(S1):14-16.
- [33] Yuan F, Wang B, Shi C, et al. Evaluation of hydrological utility of IMERG Final run V05 and TMPA 3B42V7 satellite precipitation products in the Yellow River source region, China [J]. Journal of Hydrology, 2018,567:696-711.

作者简介: 管晓祥(1995-),男,江苏淮安人,河海大学硕士研究生,从事水文水资源模拟方面的研究.发表论文 20 篇.