不同气候情景下玛纳斯河流域山区冰雪覆被格局空间模拟

焦浩洋，徐丽萍，张正勇

（石河子大学理学院，新疆石河子 832003）

摘要：为探讨未来高寒区冰雪覆被格局对地形、高程及气候因子的响应，以新疆玛纳斯河流域为研究样区，以玛纳斯河流域 1970 年至 2000 年的气候数据作为基准期数据，利用 SRES A1B、A2 和 B1 情景下区域气候模式的气候情景数据分析不同气候因素的影响，基于 ArcGIS 利用图形叠置法计算模拟分析了三种不同气候情景下的冰雪覆被格局。结果表明：1）玛纳斯河流域气温在时间上呈现波动性上升的趋势，在空间上呈现山区明显低于平原地区的态势；2）同一时间流域内冰雪覆被格局局部变化明显，且三种不同情景下的模拟分布图总体上呈现出相似的变化特征；3）玛纳斯河流域山区冰雪覆被格局对不同情景模式的气候响应存在差异。A2 情景下山区冰雪覆被格局变化程度较 A1B 及 B1 情景更为明显。

关键词：水文学；模拟；不同气候情景；冰雪覆被格局；玛纳斯河流域

中图分类号：P343.6　　**文献标识码：**A　　**文章编号：**1674-2850(2018)24-2487-10

Spatial simulation of snow cover pattern in mountainous area of Manas river basin under different climate scenarios

JIAO Haoyang, XU Liping, ZHANG Zhengyong

(*College of Sciences*, *Shihezi University*, *Shihezi*, *Xinjiang* 832003, *China*)

Abstract: In order to explore the response of snow cover pattern to topography, elevation and climatic factors in the future alpine region, the Manas river basin in Xinjiang was taken as the sample area, and the climatic data of the Manas river basin from 1970 to 2000 were taken as the baseline period data. The climatic scenario data of regional climatic models under SRES A1B, A2 and B1 scenarios were used to analyze the effects of different climatic factors. Based on ArcGIS, the snow cover patterns under three different climate scenarios were simulated and analyzed by using graphical overlay method. Results show that: 1) The temperature of Manas river basin has a rising volatility trends in time, but on the space, the temperature on mountain is significantly lower than that on the plain region. 2) At the same time, the local changes of snow cover pattern were obvious, and the simulated distribution diagrams of three different scenarios generally show similar variation characteristics. 3) The climate response of snow cover pattern in mountain area of Manas river basin is different under different scenario mode. The change in snow cover pattern of A2 scenario mountain area is significantly higher than A1B and B1 scenarios.

Key words: hydrology; simulation; different climate scenarios; snow cover pattern; the Manas river basin

0 引言

联合国政府间气候变化专门委员会（Intergovernmental Panel on Climate Change，IPCC）第五次评估

基金项目：国家自然科学基金（31760151，41761108）

作者简介：焦浩洋（1996—），男，本科生，主要研究方向：土地覆被变化与景观生态

通信联系人：徐丽萍，副教授，主要研究方向：土地覆被变化与景观生态. E-mail: xlp-tea@shzu.edu.cn

报告中指出，21世纪中期全球地表气温将随温室气体的排放持续升高[1]，基于不同的气候变化情景，地表平均气温变化也不同。全球气候变化所导致的气温和降水改变必然影响冰雪覆被分布格局[2~3]。在冰雪相对集中的亚洲地域，冰雪覆被变化及其影响受到国际政界、学界的高度关注[4]。国内外对于冰川与气候关系的研究早期是用数理统计方法探讨冰川变化与气候波动之间的关系[5]，也有通过模拟冰川后退实验的研究，表明前人的估计值要高于其预测的温度升高带来的冰川和小雪帽的加速消融导致的海平面上升幅度[6~8]。冰川对气候响应的模拟研究主要是关于冰川变化对径流量影响的定量关系研究[9]。冰雪覆被格局受气候、地形、地貌等多因子共同作用的影响，在冰川变化及其影响因子的相关研究中多采用常规统计回归方法。随着遥感技术在冰川变化研究中的广泛应用，也有很多学者基于地理信息系统（geographic information system，GIS）及数字高程模型（digital elevation model，DEM）研究地形对冰川变化的影响，但由于各因子之间存在多重相关性，这些方法往往会造成研究结果精度不高、模型难以解释等问题，鉴于此，也有综合考虑地形、气候和气候因子对高寒区冰川分布格局的影响。从不同尺度对不同研究区的分析都得出一致的结论：随着气候的变化，气温波动升高，冰川呈退缩趋势[10~12]。然而，对未来气候及其相关因子影响下的冰雪覆被格局的模拟研究还很少。

在气候变暖的大背景下，西北干旱区冰雪消融退缩加剧，冰雪数量和规模均呈减少趋势[13]，玛纳斯河流域冰雪面积也出现了不同程度的缩减[14]，对该地区的河流水文特性、水资源、生态环境和社会经济发展方面产生重大影响。GIS 图形叠置法更易于说明冰雪覆被格局与各因素之间复杂的相关关系，并使得未来不同情景下的冰雪覆被分布格局可视化。本文对未来不同气候情景下的冰雪覆被变化进行预测及可视化表达，研究对干旱区中下游净流量预测、水资源管理等具有重要意义。

1　研究区与研究方法

1.1　研究区概况

玛纳斯河流域地处天山中段北坡，经纬度范围为E85°01′～86°32′，N43°27′～45°21′（如图1所示）。流域上游依连哈比尔尕山最高峰值为 5 242.5 m. 海拔3 900 m（永久雪线）以上的高山和极高山地区为永久冰雪覆盖区域，现代冰雪比较活跃。《中国冰川目录》[15]统计数据显示，玛纳斯河发源于依连哈比尔尕山乌代肯尼河的 43 号冰雪，是准噶尔内流水系中冰雪数量最多和规模最大的河流，在玛纳斯河流域共有冰雪 1 379 条，总面积 1 035.68 km^2，总储量 73.02 km^3，该流域内冰雪面积占天山北麓冰雪面积的 32%[16~20]. 年均气温和年降水量随海拔变化不同，在 3 900 m 以上地区，年均温＜–10℃，年降水量＞500 mm[16]. 玛纳斯河是发源于准噶尔盆地南缘的最大的一条河流，该流域的水资源主要来自于冰雪融水。河流纵贯玛纳斯河流域，全长达 324 km，

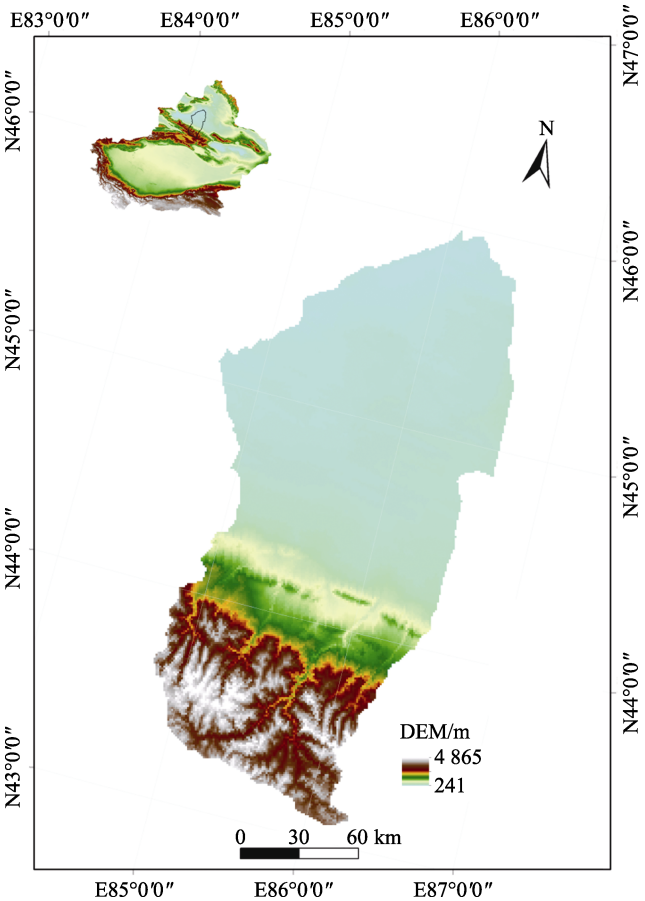

图1　研究区概况

Fig. 1　Survey of research area

年平均径流量为 11.9×10^8 m^3.

1.2 研究方法

1.2.1 景观类型分类

本文在分析时应用非监督分类和监督分类对影像进行预分类，所用数据如表 1 所示，然后通过目视解译以提高分类精度。将玛纳斯河流域分为冰雪与非冰雪两类景观类型进行研究分析。

表 1 数据来源表

Tab. 1 Data source table

数据类型	所用数据	数据来源
栅格数据	新疆 30 m 分辨率 DEM 数据	NASA（美国太空总署）
	2005、2015 Landsat 5 TM 影像	USGS 网站
矢量数据	新疆各级行政界限、主要城镇、主要道路、水系	NGCC 网站
统计数据	新疆维吾尔自治区土地利用总体规划（2006 年至 2020 年）、新疆统计年鉴，政府工作报告	相关政府网站

1.2.2 利用图形叠置法与 GIS 模拟

GIS 图形叠置法易于说明冰雪覆被格局与各因素之间复杂的相关关系，使得冰雪覆被的分布格局可视化。对栅格数据重分类后，再利用栅格计算器计算得出模拟数据。

本文通过 1970 年至 2000 年期间的气候数据，得出研究区的温度与降水量信息，通过与分类图像叠加的分析，确定冰雪覆被出现概率较高的地区。在此基础上利用 2030s 时期 3 种不同气候情景下的气候数据，综合模拟得出玛纳斯河流域冰雪覆被格局。

2 数据来源与处理

2.1 数据来源

研究采用了玛纳斯河流域 1980 年、1990 年、2000 年、2005 年及 2010 年的 Landsat 遥感影像数据与 30 m 分辨率的 DEM 图像。1975 年至 2010 年的气温和降水数据，来自于中国气象科学数据共享服务网（http://cdc.Cma.gov.cn/）。1970 年至 2000 年的玛纳斯河流域基准期气象数据，来自于世界气候数据网站。不同情景下的模拟气象数据，来自于气候变化农业与粮食安全（Climate Change Agriculture Food Security，CCAFS）发布的 2020 年至 2049 年全球多年月平均气温和降水量数据（http://www.ccafs-climate.org/），该数据是由 IPCC 的 SRES 研究团队利用大气环流模型（general circulation model，GCM）驱动模拟的数据。

2.2 气候数据的处理与选择

本文对气象站点插值数据与世界气候发布的网格地球系统（earth system grid，ESG）数据进行了对比。气象站点插值数据由于站点较少，层次变化不明显，且山区部分的气候特征相较于世界气候数据反映较差（如图 2 所示）。

世界气候发布的数据没有被降尺度或经过任何其他处理，较好地包含了空间地物信息，保留了最原始的变量信息（如图 3 所示）。因此本研究采用了世界气候发布的空间分辨率为 30 m 的气象数据。

2.2.1 未来气候情景下的气温与降水分布图

SRES 定义了 4 种不同的温室气体排放情景（A1、A2、B1、B2），每种情景都代表着不同的统计学、社会、经济、技术、环境的发展，为未来世界设计了 4 种可能的社会经济发展框架，这种发展变化趋势是不可避免的。

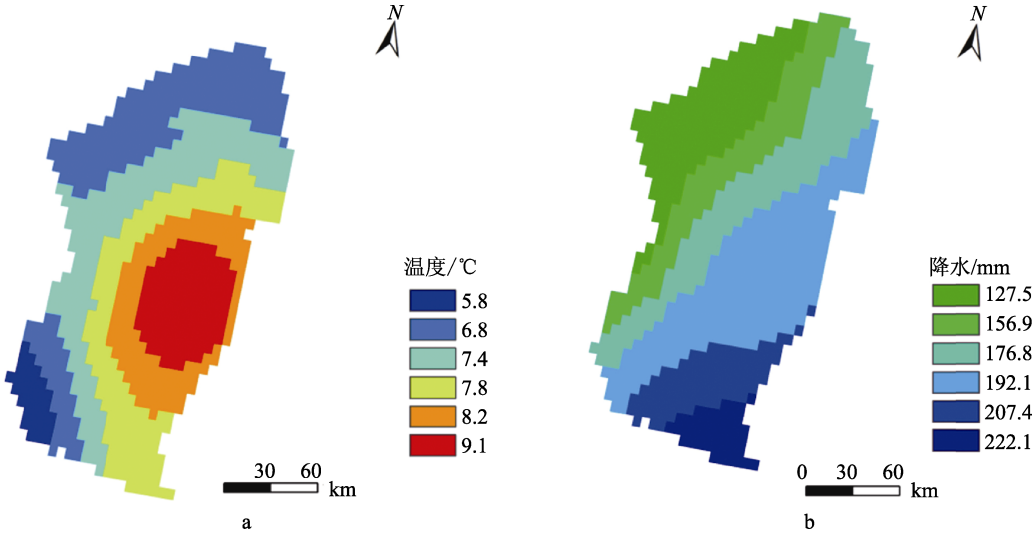

图 2　气象站点插值数据

Fig. 2　Meteorological station interpolation data

a—气温；b—降水

a-Temperature; b-Precipitation

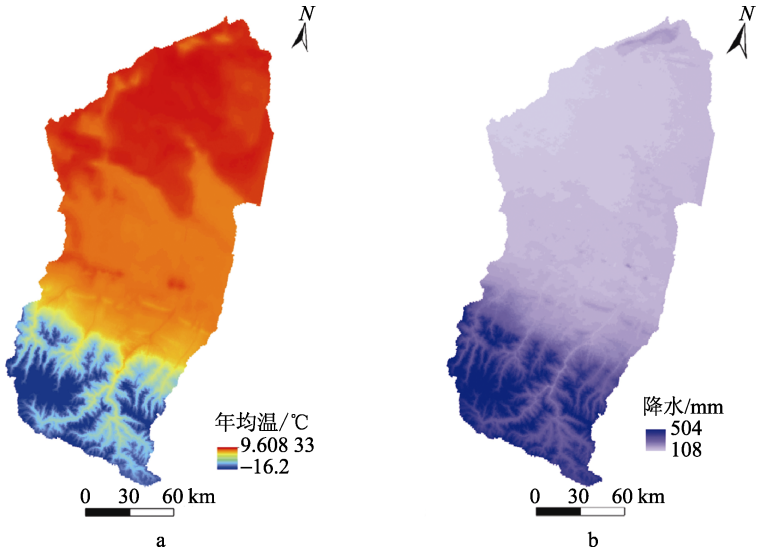

图 3　ESG 数据

Fig. 3　ESG data

a—年均温分布图；b—降水分布图

a-Annual mean temperature distribution map; b-Precipitation distribution map

A1 情景表示未来世界更加协调。根据技术特征，A1 情景可划分为三个子类，其中 A1B 情景下的未来世界经济增长迅速，但全球人口增长较为缓慢，在 21 世纪中叶出现峰值，随后减少，未来会迅速出现新的和更高效的技术，强调所有能源间的平衡性，表现为中排放情景。

A2 情景下的未来世界更加分化，发展极不均，不同地区间的人口出生率趋同缓慢，全球人口持续增长，经济发展为区域性的，人均经济增长和技术变化速度低于其他情景系列，表现为高排放情景。

B1 情景下的世界更加统一，更加节能环保，与 A1B 系列相似，表现为低排放情景。

根据全球未来碳排放量和经济发展的协调关系，本文选取 A1B、A2、B1 三种情景为模拟的前提情

景。在 ArcGIS 中对三种情景下的气温和降水数据分别进行转换、定义投影、裁剪和重采样，得到分布图，如图 4 所示。

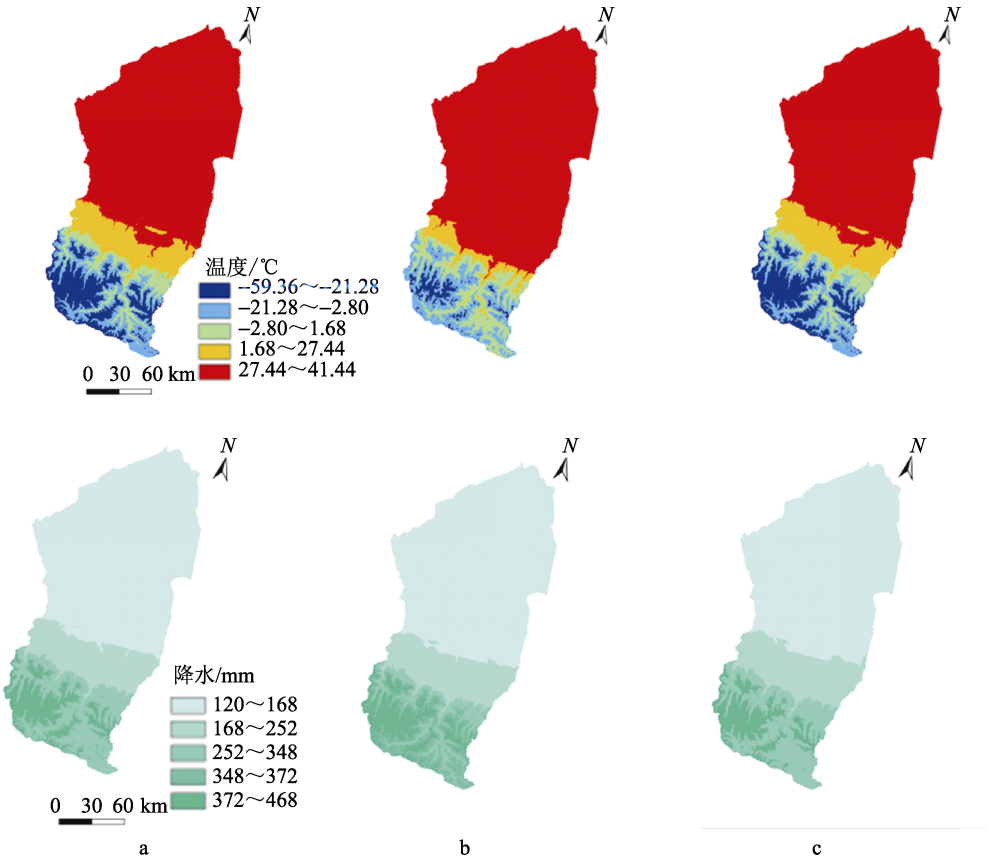

图 4 A1B、A2 和 B1 三种气候情景下的气温及降水分布图

Fig. 4 Distribution maps of temperature and precipitation in A1B, A2 and B1 climate scenarios

a—A1B 情景下的气温与降水分布图；b—A2 情景下的气温与降水分布图 c—B1 情景下的气温与降水分布图

a-Distribution map of temperature and precipitation under A1B scenario; b-Distribution map of temperature and precipitation under A2 Scenario; c-Distribution map of temperature and precipitation under B1 scenario

2.2.2 冰雪覆被格局适宜性等级的确定

位于玛纳斯河流域上游山区的天山支脉喀拉乌成山、依连哈比尔尕山及比依克山为天山山区第二大高山带山结，海拔高度为 5 000～5 500 m，其冰川总面积仅次于托木尔峰地区。地理位置因子反映气候和环流的大背景，地形因子反映局地地形的影响，气候因子反映冰川形成的气候条件[21]。根据数据的可获取性、可操作性、可量化性和相关性，考虑到特殊的地形特征、山体南北跨度大以及地理位置对冰雪覆被格局的影响，高程、坡度、坡向及气温和降水对冰川分布具有显著作用。在 ArcGIS 10.2 中对 DEM 数据进行裁剪，计算坡度、坡向；对气候要素进行计算、裁剪并重采样使得栅格大小为 60 m×60 m. 将 DEM、气温、降水、坡度、坡向图叠加分析。

选取全球尺度下 1970 年至 2000 年 30 m 分辨率的月平均气温和年降水量数据。流域内南部气温明显低于中西部，山区尤为明显，山区年均降水量略低于平原地区（如图 5 所示）。

在此基础上，进而通过叠加分析得到基准期气温、降水下的玛纳斯河流域冰雪覆被范围（如图 6 所示）。

根据 1980 年、1990 年、2000 年分类影像图与基准期气温、降水叠加分析得出冰雪覆被格局的适宜

分布范围，并对各个因子进行重分类。如表 2 所示。

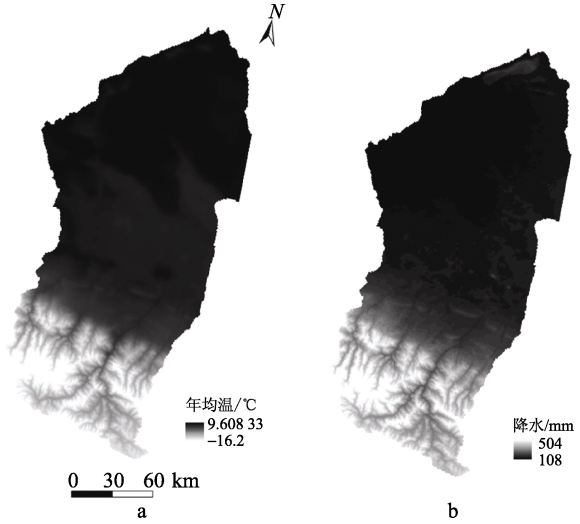

图 5　玛纳斯河流域基准期的气温（a）、降水（b）分布图

Fig. 5　Distribution map of temperature (a) and precipitation (b) in the baseline period of Manas river basin

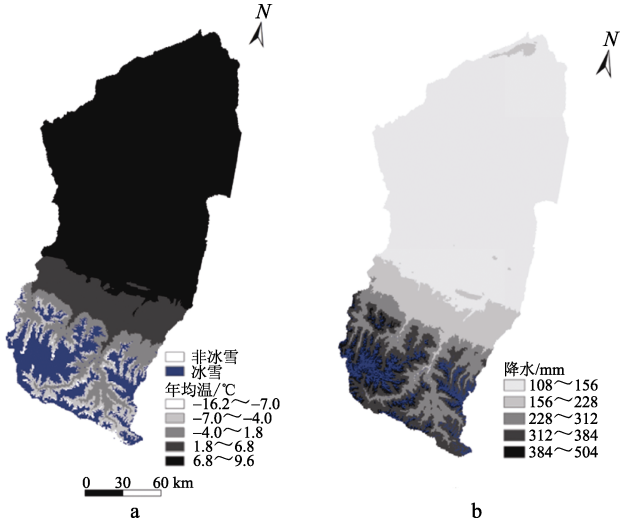

图 6　玛纳斯河流域基准期气温（a）、降水（b）下的冰雪覆被范围图

Fig. 6　Snow cover scope map of temperature (a) and precipitation (b) in the baseline period of Manas river basin

表 2　各因子的适宜性等级划分

Tab. 2　Hierarchies of each factor suitability

重分类	气温/℃	降水/mm	DEM/m	坡向/°	坡度/°
1	＜−7.0	＞348	＞3 500	＜112.5	＜20
0	＞−7.0	＜348	＜3 500	112.5～360	＞20

2.2.3　模拟精度检验

通过模拟图像与 2000 年实际冰雪覆被格局分类图的比较，计算 Kappa 系数值为 0.869，模拟精度较好（如图 7 所示）。

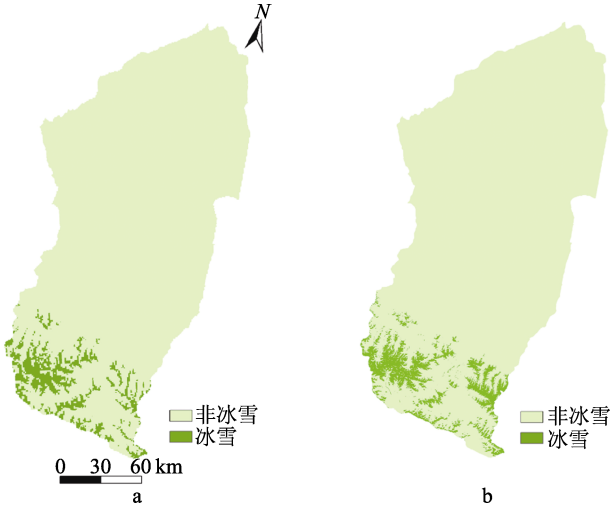

图 7　2000 年玛纳斯河流域冰雪覆被格局模拟图（a）与分类图（b）

Fig. 7　Simulated diagram (a) and classified diagram (b) of snow cover patterns in Manas river basin in 2000

3　结果与分析

3.1　玛河流域气候分析

1）研究区气候变化分析

1975 年至 2010 年玛河流域年平均气温及降水量的变化和线性分析均呈显著升高并保持暖湿化的趋势，气温及降水量倾斜度值分别为 0.072℃·a^{-1}、2.199 mm·a^{-1}，36 年间的平均气温为 7.27℃，平均降水量为 177.36 mm（如图 8 所示）。这与一些学者提出的在全球气候变暖的背景下西北地区气候将由暖干趋势向暖湿趋势转变的结论[22]一致。

2）不同气候情景下的气候变化分析

三种情景模式下，未来时段平均气温均比基准期有所增加，变化趋势与全球变化总趋势基本一致。

A1B 情景和 B1 情景下平均气温增加 1.4℃，增幅为 1.4～1.5℃，降水量平均增加 2.54%～4.84%. A2 情景下气温增加最为明显，为 4.6℃，降水量平均值有所下降，减少 3.6%.

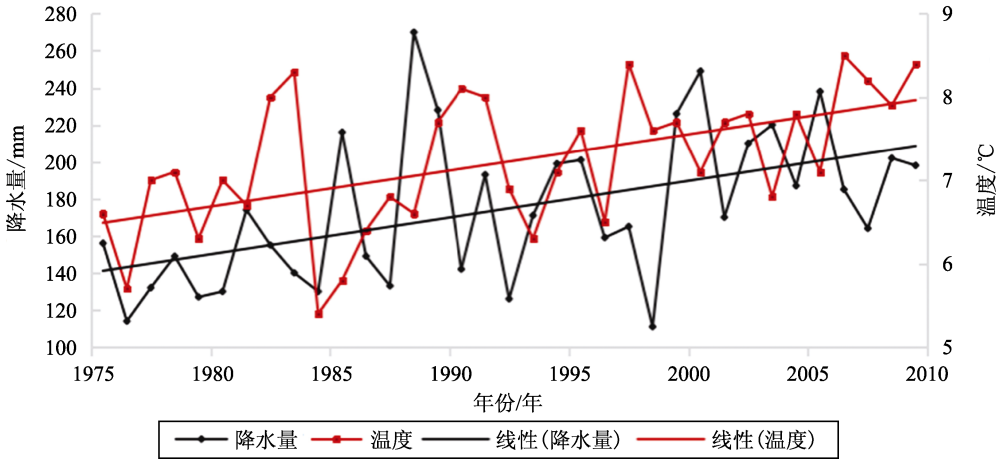

图 8 温度和降水量的年均变化及线性趋势

Fig. 8 Annual variation and linear trend of temperature and precipitation

3.2 不同气候情景下的模拟结果

在 2030s 这一时期，三种气候情景下流域山区东南部冰雪覆被面积变化比较一致，相较于基准期面积消退明显，可以看出该地区对这三种气候变化的响应均较为敏感（如图 9 所示）。

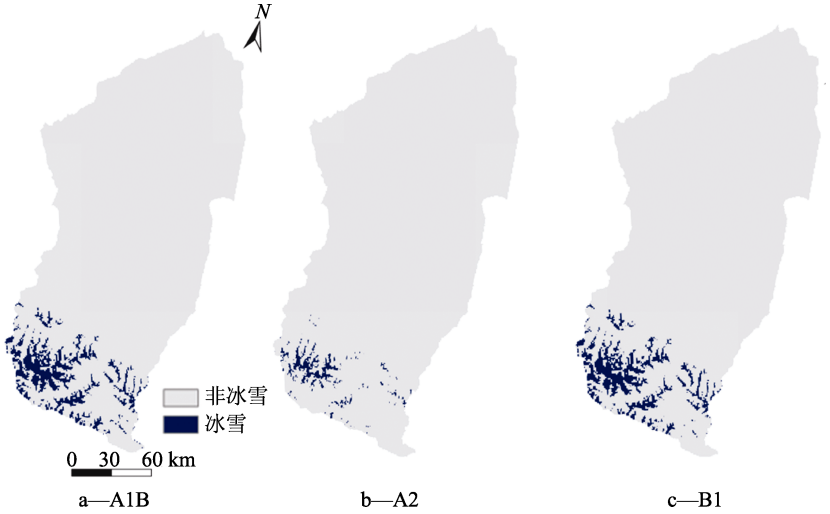

图 9 不同气候情景下的冰雪覆被格局模拟图

Fig. 9 Simulated map of snow cover pattern under different climate scenarios

相较于基准期多年平均面积，A2 情景下冰雪面积减少量最高，达到 61.01%，而 A1B 与 B1 情景下面积虽有变化但不明显（如表 3 所示）。

表 3 不同气候情景下的面积变化比较

Tab. 3 Comparison of area changes under the different climate scenarios

情景模式	基准期多年平均面积/km^2	未来时期多年平均面积/km^2	面积变化率/%
A1B	1 506.64	1 398.64	7.17
A2		587.44	61.01
B1		1 366.45	9.30

在 A1B 情景下，玛纳斯河流域冰雪覆被面积为 1 398.64 km^2，略低于基准期玛纳斯河流域冰雪覆被面积。在分布范围上也与基准期分布范围类似，基本位于高程 3 500 m 以上，在玛纳斯河流域东南部有零星分布。

在 A2 情景下，冰雪面积减少较明显，相较于基准期减少了一半以上，面积为 587.44 km^2，主要在中部冰雪分布比较集中的区域。在空间分布范围上有明显的后退趋势，主要位于海拔 4 000 m 以上的高山区。

在 B1 情景下，冰雪覆被面积与 A1B 相比变化不大，面积为 1 366.45 km^2. 其分布范围与 A1B 情景下的分布情况相似，但是最南部地区冰雪减少量略小于 A1B 情景。

4　讨论与结论

4.1　讨论

IPCC 采用了 24 个大气环流模型在不同气候模式下驱动运行，不同模式下结果差异很大[23]。本文选取了 A1B、A2、B1 三种比较典型的气候情景数据，基于 ArcGIS 对不同气候情景下的冰雪覆被格局进行了模拟，反映出气候变化会对冰雪覆被格局产生极大影响。

不同学者根据不同景观类型的特征会选取不同的气候因子及驱动模型进行预测，从而分析得出对人们最有益的发展方式。本文从 A1B、A2、B1 三种模拟结果来看，B1 情景下，2030 年至 2049 年冰雪覆被格局受干扰程度最小，A2 情景下冰雪覆被格局变化剧烈。由此可以看出，在今后的发展中，经济结构应该向服务和信息转变。

在研究冰雪覆被对气候的响应中，大多是结合积雪融水径流量变化进行的，随着新疆气候由暖干向暖湿转变，雪崩、冰川泥石流和冰湖洪水等冰雪灾害发生频率呈上升趋势[6]，因此，在以后的研究中若能结合积雪融水径流量变化，对干旱区的水资源合理利用及灾害防治将更具有指导意义。

4.2　结论

本文利用 IPCC 发布的 A1B、A2 及 B1 情景下的全球 2020 年至 2049 年气候格网数据，模拟了三种情景下玛纳斯河流域山区冰雪覆被格局的空间分布特征。结果显示，三种情景下玛河流域山区冰雪覆被格局受气候影响显著，整体上模拟结果与发展趋势比较吻合。本文主要得出以下结论：

1）玛纳斯河流域气温在时间上呈现波动性上升的趋势，基本上每年以 0.072℃的速率上升；在空间上玛纳斯河流域气温呈现东高西低的分布态势，流域的最高温在北部，最低温在西南部。这与山区冰雪覆被范围相一致。

2）20 年来玛纳斯河流域冰雪景观格局的破碎化程度逐渐加深，冰雪面积逐渐减小，景观由冰雪转为裸地的面积加大，但总体变化速率有所降低。

3）三种不同情景下的模拟分布图总体上呈现相似的变化特征，同一时间流域内冰雪覆被格局局部变化明显，东南部区域的冰雪消减程度明显高于其他地域。可见，东南部区域对气候变化的响应要敏感于其他地区，这说明在未来气候变化情景下该流域内东南部环境变化更剧烈。

4）玛纳斯河流域山区冰雪覆被格局对相同情景模式的气候响应存在差异，A2 情景下山区冰雪覆被格局变化程度明显高于 A1B 及 B1 情景。即经济快速发展、各区域发展不协调的情况下，冰雪覆被格局对气候变化的响应更为敏感。B1 情景是环保节约和协调的发展方式，其对山区冰雪覆被格局未来的变化影响最小。

[参考文献] (References)

[1] 董思言，高学杰. 长期气候变化——IPCC 第五次评估报告解读[J]. 气候变化研究进展，2014，10（1）：56-59.
DONG S Y, GAO X J. Long-term climate change: interpretation of IPCC fifth assessment report[J]. Climate Change Research, 2014, 10(1): 56-59. (in Chinese)

[2] 葛全胜，王芳，王绍武，等. 对全球变暖认识的七个问题的确定与不确定性[J]. 中国人口·资源环境，2014，24（1）：1-6.
GE Q S, WANG F, WANG S W, et al. Certainty and uncertainty in global warming studies[J]. China Population Resources and Environment, 2014, 24(1): 1-6. (in Chinese)

[3] 陈泮勤，程邦波，王芳，等. 全球气候变化的几个关键问题辨析[J]. 地球科学进展，2010，25（1）：69-75.
CHEN P Q, CHENG B B, WANG F, et al. Discrimination on several key issues of global climate change[J]. Advances in Earth Science, 2010, 25(1): 69-75. (in Chinese)

[4] 李志斐. 气候变化与中国周边地区水资源安全[J]. 国际政治研究，2015，36（4）：37-55.
LI Z F. Climate change and water resources security in China’s peripheral areas[J]. The Journal of International Studies, 2015, 36(4): 37-55. (in Chinese)

[5] NYE J F. On the theory of the advance and retreat of glaciers[J]. Geophysical Journal of Royal Astronomical Society, 2010, 7(4): 431-456.

[6] OERLEMANS J. Quantifying global warming from there treat glaciers[J]. Science, 1994, 264(5156): 243-245.

[7] GERD W, NOBUYOSHI I. The effect of slope, exposure and mountain Screening on the solar radiation of McCall Glacier, Alaska: a contribution to the international hydrological dceade[J]. Journal of Glaeiology, 1974, 13(68): 213-226.

[8] JACOB T, WAHR J, PFEFFER W T, et al. Recent contributions of glaciers and ice caps to sea level rise[J]. Nature, 2012, 482: 514-518.

[9] 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（5）：513-527.
SHEN Y P, SU H C, WANG G Y, et al. Response of glaciers and snow cover to climate change in Xinjiang (I): hydrological effects[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2013, 35(5): 513-527. (in Chinese)

[10] 李培基. 冷圈对全球变暖的响应与海面上升[J]. 冰川冻土，1994，16（3）：274-282.
LI P J. Response of cold circle to global warming and sea surface rise[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1994, 16(3): 274-282. (in Chinese)

[11] 刘时银，鲁安新，丁永建，等. 黄河上游阿尼玛卿山区冰川波动与气候变化[J]. 冰川冻土，2002，24（6）：701-707.
LIU S Y, LU A X, DING Y J, et al. Glacier Fluctuations and the inferred climate changes in the A’Nyêmaqên mountains in the source area of the Yellow river[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2002, 24(6): 701-707. (in Chinese)

[12] 刘时银，上官冬辉，丁永建，等. 20 世纪初以来青藏高原东南部岗日嘎布山的冰川变化[J]. 冰川冻土，2005，27（1）：55-63.
LIU S Y, SHANGGUAN D H, DING Y J, et al. Glacier changes in Gangrigabu mountain in the southeast of Qinghai-Tibet plateau since the early 20th century[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2005, 27(1): 55-63. (in Chinese)

[13] 付在毅，许学工，林辉平，等. 辽河三角洲湿地区域生态风险评价[J]. 生态学报，2001，21（3）：365-373.
FU Z Y, XU X G, LIN H P, et al. Regional ecological risk assessment of in the Liaohe River Delta wetlands[J]. Acta Ecologica Sinica, 2001, 21(3): 365-373. (in Chinese)

[14] 张九天，何霄嘉，上官冬辉，等. 冰川加剧消融对我国西北干旱区的影响及其适应对策[J]. 冰川冻土，2012，34（4）：848-854.
ZHANG J T, HE X J, SHANGGUAN D H, et al. Impact of glacier enhanced melting on arid areas in northwest China and its adaptive measures[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2012, 34(4): 848-854. (in Chinese)

[15] 沈永平. 中国冰川目录[M]. 兰州：中国科学院兰州冰川冻土研究所，2002.
SHEN Y P. Glacier inventory of China[M]. Lanzhou: Lanzhou Institute of Glacier and Permafrost, Chinese Academy of Sciences, 2002. (in Chinese)

[16] 刘艳，李杨，张璞. 玛纳斯河流域融雪径流与积雪-气象因子分析[J]. 水土保持研究，2010，17（2）：145-149.
LIU Y, LI Y, ZHANG P. Correlation analysis on snow-climate factors and its effects on snowmelt runoff in Manasi river basin[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2010, 17(2): 145-149. (in Chinese)

[17] 郭鹏，徐丽萍，常存. 近 20 a 来玛纳斯河流域南山冰雪动态变化特征分析[J]. 地球信息科学学报，2014，16（5）：762-769.
GUO P, XU L P, CHANG C. Analysis of dynamic change characteristics of snow and ice in Nanshan mountain of Manas river basin in recent 20 years[J]. Journal of Geo-Information Science, 2014, 16(5): 762-769. (in Chinese)

[18] 张宏锋，欧阳志云，郑华，等. 新疆玛纳斯河流域冰川生态系统服务功能价值评估[J]. 生态学报，2009，29（11）：5877-5881.
ZHANG H F, OUYANG Z Y, ZHENG H, et al. Valuation of glacier ecosystem services in the Manas river watershed, Xinjiang[J]. Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(11): 5877-5881. (in Chinese)

[19] 徐根生. 玛纳斯河上游积雪变化及其与径流量相关性研究[D]. 乌鲁木齐：新疆师范大学，2010.
XU G S. Study on snow cover change and its relation with runoff in the upper Manas river[D]. Urumqi: Xinjiang Normal University, 2010. (in Chinese)

[20] 禹朴家，徐海量，张青青，等. 1959-2007 年玛纳斯河流域干湿季气候变化趋势[J]. 冰川冻土，2010，32（6）：1121-1129.
YU P J, XU H L, ZHANG Q Q, et al. Climate change trends in the dry and wet seasons of the Manas river basin from 1959 to 2007[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2010, 32(6): 1121-1129. (in Chinese)

[21] 张正勇，刘琳，徐丽萍. 冰川分布格局对地理因子响应机制[J]. 生态环境学报，2018，27（2）：290-296.
ZHANG Z Y, LIU L, XU L P. Response mechanism of glacier distribution patterns to geographical factors[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2018, 27(2): 290-296. (in Chinese)

[22] 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 Y F, SHEN Y P, LI D L, et al. Characteristics and trends of climate transition from warm-dry to warm-wet in northwest China[J]. Quaternary Sciences, 2003, 23(2): 152-164. (in Chinese)

[23] 沈阳，于晶，郭水良. 不同气候变化情境下中国木灵藓属和蓑藓属植物的潜在分布格局[J]. 生态学报，2015，35（19）：6449-6459.
SHEN Y, YU J, GUO S L. *Macromitrium* and *Orthotrichum* distribution patterns under different climate warming scenarios in China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(19): 6449-6459. (in Chinese)