

文章编号:1673-9469(2026)02-0093-10

DOI:10.3969/j.issn.1673-9469.2026.02.011

# 天山北坡不同 MODIS 积雪产品精度评价及其时空特征分析

李文豪<sup>1,2</sup>, 宋宏利<sup>1</sup>, 刘兴宇<sup>1</sup>, 张晓楠<sup>3\*</sup>

(1. 河北工程大学 地球科学与工程学院, 河北 邯郸 056038; 2. 中国科学院地理科学与资源研究所 陆地水循环及地表过程重点实验室, 北京 100101; 3. 河北工程大学 矿业与测绘工程学院, 河北 邯郸 056038)

**摘要:** 以新疆天山北坡为研究区域, 基于时序 Landsat 卫星影像及 SNOMAP 积雪制图算法, 生成特定时间基点的高精度积雪覆盖数据, 并将其作为“真值”评价三种 MODIS 积雪产品(中国 MODIS 逐日无云 500 m 积雪面积产品、北半球 MODIS 逐日无云积雪产品、亚洲高山区 MODIS 积雪指数与积雪物候产品)的数据精度。基于评价结果选择精度最高的 MODIS 积雪产品, 分析该区域 2001 年至 2020 年间积雪覆盖频率及其时空变化特征。结果表明:(1) 亚洲高山区 MODIS 积雪指数与积雪物候产品精度最高, 在总体精度、低估误差、积雪分类精度和 Kappa 系数等方面均优于其他 2 种产品;(2) 天山北坡年内积雪覆盖率呈周期性变化, 峰值出现在每年 12 月至次年 1 月, 谷值出现在每年 6 月至 8 月, 海拔 4 500 m 以上区域年内各月积雪覆盖率几乎均达 100%;(3) 多年平均积雪覆盖频率空间分布东西差异显著, 且随海拔升高而增加, 终雪日期在东部平原及天山附近显著提前, 凸显气候变暖对积雪物候的影响。

**关键词:** MODIS; 精度误差矩阵分析; 精度评价; 时空变化

**中图分类号:** P426.635

**文献标识码:** A

## Accuracy Evaluation and Spatiotemporal Characteristics Analysis of Different MODIS Snow Products on the Northern Slope of the Tianshan Mountains

LI Wenhao<sup>1,2</sup>, SONG Hongli<sup>1</sup>, LIU Xingyu<sup>1</sup>, ZHANG Xiaonan<sup>3\*</sup>

(1. School of Earth Science and Engineering, Hebei University of Engineering, Handan, Hebei 056038, China; 2. Key Laboratory of Water Cycle and Related Land Surface Processes, Institute of Geographic Science and Natural Resources Research of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 3. School of Mining and Geomatics Engineering, Hebei University of Engineering, Handan, Hebei 056038, China)

**Abstract:** Taking the northern slope of the Tianshan Mountains in Xinjiang as the study area, high-precision snow cover data at specific time benchmarks were generated based on the Landsat time-series satellite images and the SNOMAP snow mapping algorithm. These data were used as "ground truth" to evaluate the data accuracy of three MODIS snow products: MODIS daily cloud-free snow cover 500 m product for China, MODIS daily cloud-free snow product for Northern Hemisphere, and MODIS snow cover index and phenology product for High Mountain Asia. Based on the evaluation results, the MODIS snow product with the highest accuracy was selected to analyze the snow cover frequency and its spatiotemporal variation characteristics in the region from 2001 to 2020. The results showed that: (1) The MODIS snow cover index and phenology product for High Mountain Asia had the highest accuracy, outperforming the other two products in terms of overall accuracy, underestimation error, snow classification accuracy, and Kappa coefficient; (2) The Intra-annual snow cover fraction in the northern slope of

收稿日期:2024-10-10 修回日期:2024-11-21

基金项目:第三次新疆综合科学考察项目(2021xjkk0802);国家自然科学基金资助项目(32001130);河北省自然科学基金资助项目(D2019402067);中国科学院青年创新促进会资助项目(2020056)

第一作者:李文豪(2000—),男,山东桓台人,硕士,从事遥感产品精度验证方面的研究。

\*通信作者:张晓楠(1981—),女,河北深州人,硕士,副教授,从事国土资源遥感方面的研究。

the Tianshan Mountains showed periodic changes, with peaks occurring from December to January of the following year and troughs occurring from June to August. The snow cover rate in areas above 4 500 meters above sea level was almost 100% in every month of the year; (3) The spatial distribution of the multi-year average snow cover frequency showed significant differences, with obvious east-west variations, which increased with rising altitude. The snow end date was significantly advanced in the eastern plains and near the Tianshan Mountains, highlighting the impact of climate warming on snow phenology.

**Key words:** MODIS; accuracy error matrix analysis; accuracy evaluation; spatiotemporal variations

雪是陆地表面最活跃的元素之一。积雪对温度变化敏感,因此成为全球气候变化的重要指标<sup>[1]</sup>。积雪覆盖面积与持续时间直接影响地表的辐射和热量平衡,从而影响地气系统的能量交换过程<sup>[2]</sup>。此外,积雪对生产生活具有明显影响<sup>[3-5]</sup>,尤其在干旱和半干旱地区,积雪融水量对水资源储量至关重要,直接影响农牧业生产和生态平衡<sup>[6]</sup>。

中分辨率成像光谱仪(Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer, MODIS)因具有较高的空间分辨率和较短的时间重访周期,在气候研究、水文模拟、自然灾害监测等领域具有广泛的应用。近年来,多位学者基于 MODIS 数据采用不同算法生成了不同尺度的积雪产品<sup>[7-13]</sup>,其中,郝晓华等用决策树积雪检测算法和时空插值方法开发了中国区域 MODIS 逐日无云 500 m 积雪面积产品<sup>[7-8]</sup>;戴礼云利用 MODIS 和 AMSR-E/IMS 数据生成北半球 MODIS 逐日无云积雪产品<sup>[9-11]</sup>;唐志光等通过数据融合和去云技术生成一套亚洲高山区逐日无云 MODIS 积雪指数与积雪物候产品<sup>[12-13]</sup>。然而,不同积雪产品源自不同的科研团队及计算方法,采用的验证手段各不相同,产品之间无法直接进行精度比较,给生态环境模拟中积雪数据和选择带来了一定挑战。因此,采用统一的参考数据对已有积雪产品精度进行评价成为亟须解决的问题。已有研究表明,利用高分辨率影像验证低分辨率遥感数据的分类精度是可行的<sup>[14]</sup>,多位学者利用高分辨率 Landsat 数据对低分辨率数据进行了验证<sup>[15-16]</sup>。

新疆天山北坡地处高海拔地区,积雪丰富,是中国西北地区重要的水源涵养区和草原畜牧业基地,也是冰川研究和积雪监测的重要区域。但随着天山北坡经济带城市化进程加快,该地区水资源供需矛盾日益加剧,而积雪融水是干旱和半干旱地区缓解水资源危机的关键。因此,分析天山北坡积雪产品的精度及时空分布特征,不仅有助于深入了解该地区的积雪变化特点,理解高山气

候变化、区域水文循环和生态环境演变等问题,也可为区域水资源合理利用、积雪监测与雪灾防治提供数据支持<sup>[17]</sup>。

基于上述分析,本文以新疆天山北坡为研究区域,基于时序 Landsat 卫星影像及 SNOMAP 积雪制图算法,生成特定时间基点的高精度积雪覆盖数据,并将其作为“真值”,评价三种 MODIS 积雪产品(中国 MODIS 逐日无云 500 m 积雪面积产品、北半球 MODIS 逐日无云积雪产品、亚洲高山区 MODIS 积雪指数与积雪物候产品)的数据精度,基于评价结果选择精度最高的 MODIS 积雪产品,分析 2001—2020 年间积雪覆盖频率及其时空变化特征,旨在为区域气候变化、水文循环、积雪监测等研究的数据选择和科学决策提供参考依据。

## 1 研究区概况

如图 1 所示,研究区位于新疆天山北部,地理范围介于 79°15'E~96°32'E 和 42°10'N~47°15'N 之间,面积约为  $2.29 \times 10^5 \text{ km}^2$ ,海拔范围为 188~5 138 m,地势南高北低。该地区属于典型的温带大陆性干旱气候,气温年较差和日较差较大,降水稀少。研究区包含的天山北坡经济带是新疆人口最密集、城市化水平最高且经济发展最迅速的区域,乌鲁木齐市、昌吉市、石河子市等均位于该区域内。近年来,受气候变化与人类活动的双重影响,水资源匮乏、资源分配不合理等问题日益突出,严重威胁该地区的社会稳定与经济可持续发展。

## 2 数据与方法

### 2.1 研究数据

#### 2.1.1 多源 MODIS 积雪产品

中国 MODIS 逐日无云 500 m 积雪面积产品数据集(下文简称中国 MODIS)<sup>[7-8]</sup>以 MODIS 反射率产品 MOD/MYD09GA 为源数据,采用针对不同地表类型的决策树积雪判别算法和隐马尔科夫随机场模型的时空插值算法,生成 MODIS 逐日无云积

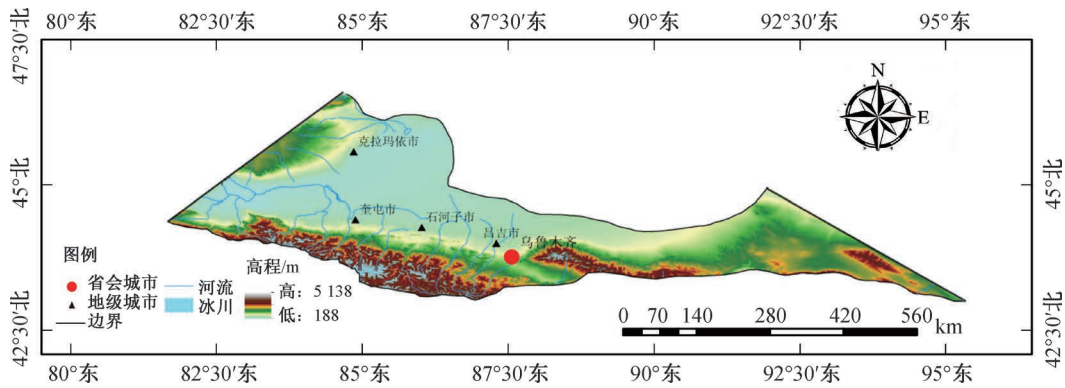


图 1 研究区域示意图

Fig. 1 Sketch map of the study region

雪面积数据。该数据集采用的空间参考基准为 WGS84 地理坐标系,空间分辨率为 500 m。

北半球 MODIS 逐日无云积雪产品(2000—2016 年)(下文简称北半球 MODIS)<sup>[9-11]</sup>以 MOD10A1 和 MYD10A1 逐日积雪产品,以及 AMSR-E 雪水当量产品作为主要输入数据。需要说明的是,在 AMSR-E 数据缺失的时段(2000 年 2 月 25 日至 2002 年 8 月 31 日,以及 2011 年 8 月 31 日至 2016 年 12 月 31 日),采用 IMS 雪冰产品进行替代。为有效消除云层干扰并生成最终的无云积雪影像,该数据集综合运用了多种合成方法:首先,将 MODIS 上午星(Terra)与下午星(Aqua)的积雪产品合成;然后,利用临近日期的数据进行补充合成;最后,再将 MODIS 产品与 AMSR-E/IMS 积雪产品融合,最终生成的北半球逐日无云积雪产品采用 Albers 等面积投影,空间分辨率为 500 m。

亚洲高山区逐日无云 MODIS 积雪指数(ND-SI)与积雪物候数据集(2000—2021 年)(下文简称高山区 MODIS)<sup>[12-13]</sup>是在 MODIS 逐日积雪产品(包括 Terra 上午星数据产品 MOD10A1 和 Aqua 下午星数据产品 MYD10A1)的基础上,通过同一天上午星与下午星数据融合以及三次样条函数插值去云算法,得到逐日无云积雪产品。该数据集采用的空间参考基准为 Albers 等积投影,空间分辨率为 500 m。

2. 1. 2 Landsat-8 OLI 数据

Landsat-8 OLI 卫星(<http://www.gscloud.cn/>)是美国陆地资源卫星系列的第 8 颗卫星,于 2013 年 2 月 11 日发射,搭载高性能的 Operational Land Imager(OLI)成像仪,空间分辨率为 30 m,重返周期为 16 d。30 m 空间分辨率能够清晰呈现出积雪覆盖区域的细节特征。通过分析不同波段反射率对雪的反射特性差异,可以构建积雪指数,从而有

效区分积雪与其他地物,进而监测积雪的分布规律并分析积雪覆盖范围变化特征。本研究选取积雪季 25 景研究区内晴空无云的 Landsat-8 OLI 影像(表 1)作为参考数据,用于计算归一化积雪指数,进而评价 3 种积雪产品的精度。

表 1 Landsat 数据

Tab. 1 Landsat data

名称	含云量/%
LC08_L2SP_144030_20140110_20200912_02_T1	3
LC08_L2SP_142030_20140112_20200912_02_T1	8
LC08_L2SP_140029_20140114_20200912_02_T1	2
LC08_L2SP_143030_20140119_20200912_02_T1	7
LC08_L2SP_146029_20140124_20200912_02_T1	8
LE07_L2SP_140029_20141224_20200905_02_T1	9
LC08_L2SP_139029_20141225_20200910_02_T1	2
LC08_L2SP_144030_20141228_20200910_02_T1	4
LC08_L2SP_142030_20141230_20200910_02_T1	9
LC08_L2SP_140029_20150101_20200910_02_T1	4
LC08_L2SP_140029_20150117_20200910_02_T1	5
LC08_L2SP_146029_20150127_20200909_02_T1	2
LC08_L2SP_146028_20150127_20200909_02_T1	1
LC08_L2SP_144029_20150129_20200910_02_T1	8
LC08_L2SP_140029_20161221_20200905_02_T1	1
LC08_L2SP_146028_20151213_20200908_02_T1	2
LC08_L2SP_141029_20151226_20200908_02_T1	0
LC08_L2SP_139030_20151228_20200908_02_T1	0
LC08_L2SP_138030_20160106_20200907_02_T1	5
LC08_L2SP_139029_20160113_20200907_02_T1	0
LC08_L2SP_140028_20160120_20200907_02_T1	1
LC08_L2SP_143030_20160125_20200907_02_T1	1
LC08_L2SP_140029_20160120_20200907_02_T1	2
LC08_L2SP_140029_20161221_20200905_02_T1	1
LC08_L2SP_143029_20161226_20200905_02_T1	0

### 2.1.3 DEM 数据

DEM 采用地理空间数据云 (<http://www.gscloud.cn/>) 提供的先进星载热发射和反射辐射仪全球数字高程模型 (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer Global Digital Elevation Model, ASTER GDEM), 其空间分辨率为 30 m, 通常采用 WGS 84 地理坐标系。

由于本文采用的原始数据在空间分辨率与空间基准上不一致, 无法从空间维度进行叠置分析。因此, 需要在 GIS 软件中对 3 种 MODIS 数据和 Landsat-8 OLI 数据进行区域裁剪、坐标系转换和重采样等预处理, 使其具有相同的空间参考基准和空间分辨率特征。

## 2.2 研究方法

### 2.2.1 精度误差矩阵分析

本文采用总体分类精度 (Overall Accuracy, OA)、低估误差 (Underestimation Error, UE)、高估误差 (Overestimation Error, OE)、积雪分类精度  $P$  和 Kappa 系数等精度评估指标对研究区域的 3 种产品进行精度评价。其中, Kappa 系数用于评价两幅图像之间的一致性, 取值介于 -1 到 1 之间, 且通常大于 0<sup>[18]</sup>。Kappa 系数  $\leq 0.40$ , 表明一致性差;  $0.40 < \text{Kappa 系数} \leq 0.60$ , 表明一致性中等;  $0.60 < \text{Kappa 系数} \leq 0.80$ , 表明一致性较高;  $0.80 < \text{Kappa 系数} \leq 1.0$ , 表明一致性极好<sup>[19]</sup>。具体精度评价指标计算公式如(1)–(6)所示:

$$OA = \frac{a + c}{a + b + c + d} \times 100\% \quad (1)$$

$$UE = \frac{b}{a + b} \times 100\% \quad (2)$$

$$OE = \frac{d}{c + d} \times 100\% \quad (3)$$

$$P = \frac{a}{a + b} \times 100\% \quad (4)$$

$$Kappa = \frac{OA - P_e}{1 - P_e} \quad (5)$$

$$P_e = \frac{(a + b)(a + c) + (c + d)(b + d)}{(a + b + c + d)^2} \quad (6)$$

式中:  $a$  表示 Landsat 和 MODIS 均识别为积雪的样本数量;  $b$  为 Landsat 监测到积雪, 但 MODIS 分类为非积雪的样本 (假阴性);  $c$  代表两者均分类为非积雪的样本数量;  $d$  表示 Landsat 监测到非积雪但 MODIS 分类为积雪的样本 (假阳性);  $P_e$  指偶然一致性, 即未经模型干预、仅凭偶然机会达成预测一

致的概率<sup>[20]</sup>。

### 2.2.2 归一化积雪指数

归一化积雪指数 (Normalized Difference Snow Index, NDSI) 是卫星遥感监测积雪的主要方法。Landsat-8 OLI 影像中的积雪信息可以通过 SNOWMAP 算法提取, 该算法通过对可见光和近红外波段进行归一化处理, 根据雪的反射特征, 选取适当的 NDSI 阈值, 将遥感影像进行二值化处理, 进而区分积雪和其他地表覆被。归一化积雪指数计算如式(7)所示:

$$NDSI = \frac{\text{band3} - \text{band6}}{\text{band3} + \text{band6}} \quad (7)$$

Hall 等<sup>[21]</sup> 研究表明,  $NDSI \geq 0.40$  可以作为积雪识别的阈值。由于水体具有在波段 5 反射率低的特性, 可将波段 5 反射率  $> 0.11$  作为排除水体干扰的附加条件。因此, 仅当像元同时满足  $NDSI \geq 0.40$  且波段 5 反射率  $> 0.11$  时, 才将其识别为积雪像元, 否则为非积雪像元, 最终生成积雪二值图像 (白色为积雪像元, 黑色为非积雪像元), 如图 2 所示。

### 2.2.3 积雪覆盖频率和频率变化趋势分析

积雪覆盖频率 (Snow Cover Frequency, SCF) 是指在不同时间下, 积雪像元累计出现的次数占总统计次数的比例, 用于反映积雪覆盖持续时间的整体特征<sup>[22]</sup>, 其计算公式如(8)所示。

$$SCF_{i,j} = \frac{\sum_{j=1}^{j_{\max}} \text{if\_snow}(j)}{j_{\max}} \times 100\% \quad (8)$$

式中:  $SCF_{i,j}$  表示第  $i$  年像元  $j$  的积雪覆盖频率, 当  $\text{if\_snow}(j) = 1$  时, 表示该像元为积雪, 当  $\text{if\_snow}(j) = 0$  时, 表示该像元为非积雪,  $j_{\max}$  为统计时段内像元  $j$  总统计次数。

为了分析区域积雪频率变化时空特征, 本文采用一元线性回归分析法趋势变化评估, 定量分析 2001—2020 年间天山北坡积雪覆盖频率的动态变化, 如式(9)所示:

$$\theta_{\text{slope}} = \frac{n \times \sum_{i=1}^n (i \times F_i) - \sum_{i=1}^n i \sum_{i=1}^n F_i}{n \times \sum_{i=1}^n i^2 - (\sum_{i=1}^n i)^2} \quad (9)$$

式中:  $\theta_{\text{slope}}$  表示斜率, 用于分析 2001—2020 年间年积雪覆盖频率变化趋势;  $\theta_{\text{slope}}$  为正值时表示呈现上升趋势;  $\theta_{\text{slope}}$  为负值时, 表示呈现下降趋势; 若  $\theta_{\text{slope}} = 0$  则认为无变化。为评估趋势变化显著性, 本研究采用 F 检验, 并将变化趋势划分为七个等级: 极显著升高、显著升高、不显著升高、无变化、不显著降低、显著降低和极显著降低<sup>[23]</sup>。

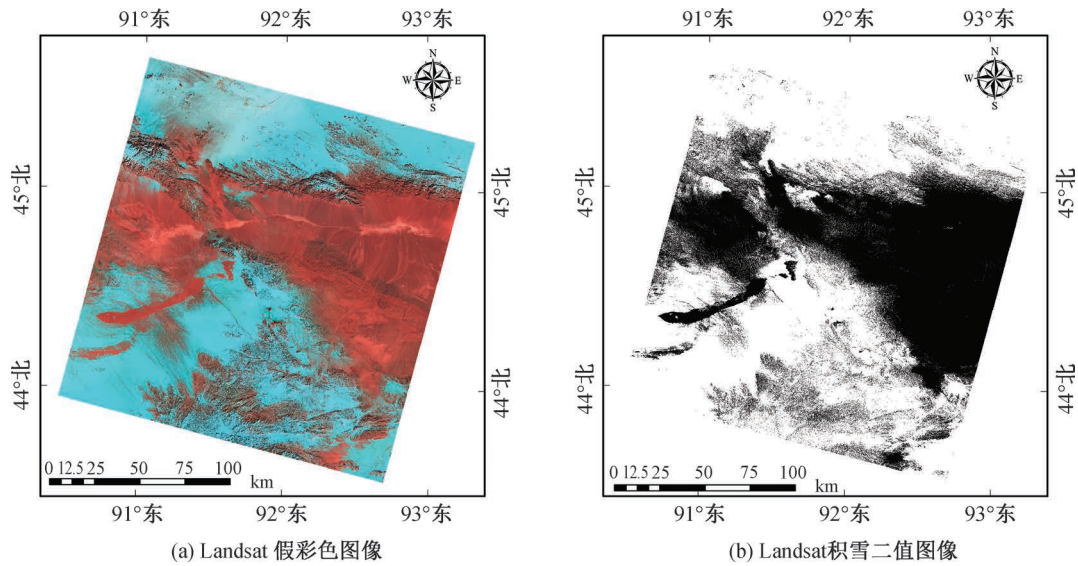


图 2 Landsat 假彩色图像与积雪二值图像对比  
Fig. 2 Comparison of Landsat false-color image and snowpack binary image

### 3 结果分析

#### 3.1 基于 Landsat 积雪数据的三种积雪产品精度评价

由表 2 可知,中国 MODIS、北半球 MODIS、高山区 MODIS 的总体精度分别为 77.94%、79.22% 和 82.20%,表明三种积雪产品均具有较高的总体分类精度;北半球 MODIS 的低估误差 UE 最小,仅为 5.68%,而中国 MODIS 和高山区 MODIS 的 UE 分别为 5.97% 和 11.56%;此外,三个产品的高估误差 OE 分别为 52.13%、52.78% 和 40.28%;北半球 MODIS 的积雪分类精度 P 值最高,达到 94.32%,而其他两种产品的积雪分类精度 P 值分别为 94.03% 和 88.44%;Kappa 系数统计结果显示,高山区 MODIS 与 Landsat 积雪数据的一致性较高,为 0.722,而中国 MODIS 和北半球 MODIS 的 Kappa 值分别为 0.617 和 0.677,也表现出较好的一致性。

表 2 三种产品平均 Kappa 系数

Tab. 2 Average Kappa coefficient of three products

产品精度评价	指标				
	OA/%	UE/%	OE/%	P/%	Kappa
中国 MODIS	77.94	5.68	52.13	94.03	0.617
北半球 MODIS	79.22	5.97	52.78	94.32	0.677
高山区 MODIS	82.80	11.56	40.28	88.44	0.722

评价结果表明,高山区 MODIS 在总体精度、低估误差、积雪分类精度和 Kappa 系数方面均表现出最高精度,优于其他两种产品,因此选择该产品

进行后续的时空特征分析。

#### 3.2 天山北坡积雪时空特征分析

##### 3.2.1 积雪覆盖频率和频率变化趋势分析

图 3(a) 显示,天山北坡多年平均积雪覆盖频率 SCF 呈现显著空间分异特征。其中,SCF > 70% 的永久积雪区(占 1.83%)主要分布于高海拔天山山脉;SCF 在 30% ~ 70% 的季节性富雪区(占 24.8%)环绕永久积雪区分布;SCF 在 5% ~ 30% 的区域(占 64.5%)覆盖时间较短,构成研究区主体;而 SCF ≤ 5% 的终年少雪区(占 8.8%)集中于低海拔地带。图 3(b) 表明近 20 年 SCF 存在明显年际变化与空间分异趋势,其中,中南部及西部 SCF 呈上升趋势,而中北部及东部(占 50.26%)总体呈下降趋势,其中东部海拔 < 2 000 m 区域下降最显著(占 10.75%);SCF 显著上升区域(占 4.16%)主要位于南部海拔 > 3 000 m 及中北部海拔 < 2 000 m 地区。

##### 3.2.2 积雪状况高程梯度分布特征

为研究天山北坡海拔高度带与积雪覆盖率的关系,研究区按海拔每间隔 1 000 m 划分为 6 个高度带。如图 4 所示,海拔 4 500 m 以上区域,各月积雪覆盖率均接近 100%,该区域表现出常年积雪覆盖特征。4 500 m 以下区域,随着海拔的升高,各高度带积雪覆盖率最小值出现的月份逐渐推迟。例如,海拔低于 500 m 地区最小值出现在 5 月份,1 500 ~ 2 500 m 高度带地区的最小值出现在 6 月,其余更高海拔带则出现在 7 月,这说明海拔高度是影响积雪覆盖率的重要因素。

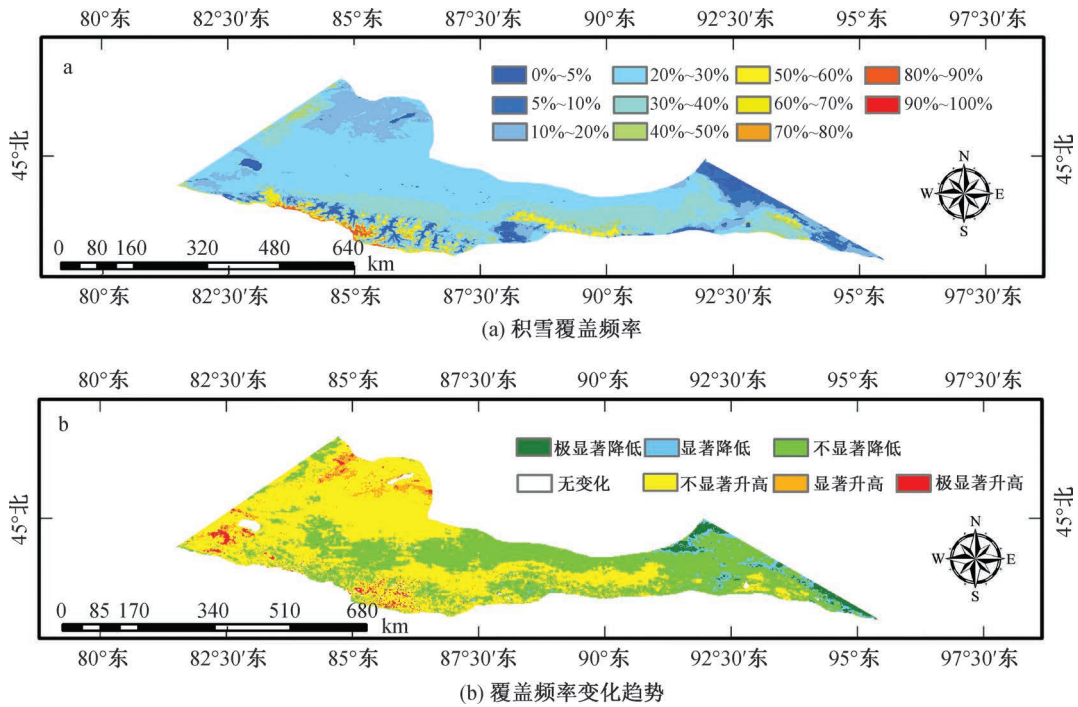


图3 积雪覆盖频率与覆盖频率变化趋势

Fig. 3 Interannual variation of snow cover frequency and coverage frequency variation trend

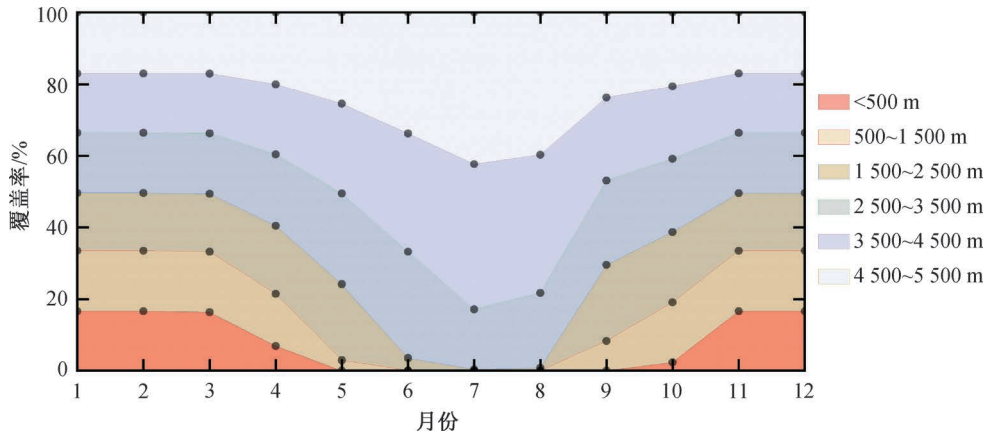


图4 天山北坡各海拔高度带积雪覆盖率的年内变化

Fig. 4 Intra-annual variations in snow cover at different altitudes on the northern slope of the Tian Shan

图5表明,随着海拔升高,积雪覆盖频率呈特定变化趋势。海拔2 000 m以下区域,积雪覆盖频率规律性不明显,可能受气温、风力及土壤类型等因素干扰;海拔2 000 m以上区域,覆盖频率则随海拔升高而增加。其主要原因在于:一方面,气温随海拔升高而递减,有利于冰雪积累;另一方面,高海拔区风力增强,能够促进水汽凝华成雪。

### 3.2.3 积雪覆盖频率变化

图6表明,研究区积雪覆盖频率呈现明显的先减后增季节性变化趋势。其中,1月份为高峰期,积雪覆盖率达90.85%;增长期集中于当年9月至次年1月(10月与1月增速显著);融化期主要发生

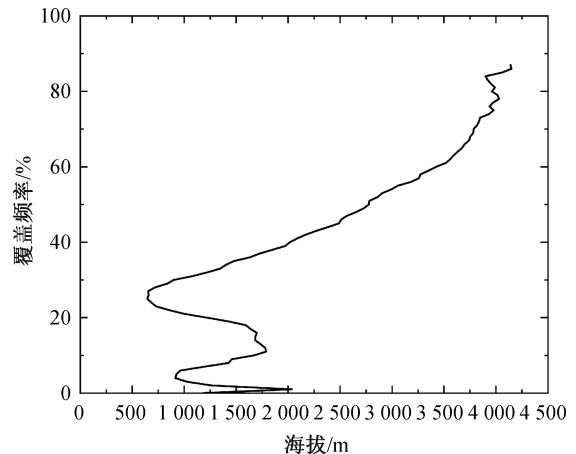


图5 海拔与积雪覆盖频率关系

Fig. 5 Relationship between altitude and snow cover frequency

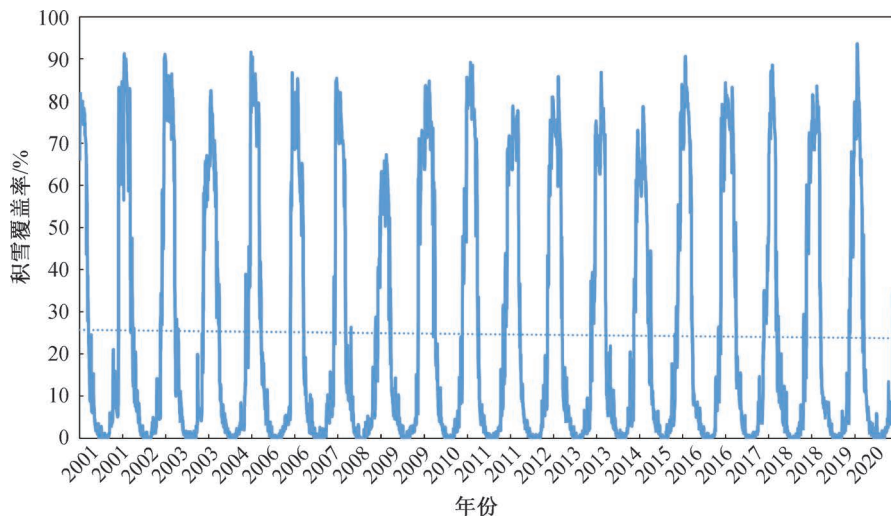


图 6 积雪覆盖率变化  
Fig. 6 Snow Cover Change

在 4—7 月,覆盖率从 4 月的 28.91% 降至 7 月的 3.05%。1—3 月积雪覆盖率变化较小且稳定(气温持续低于 0℃),该阶段无明显波动。整体上,积雪覆盖频率呈不显著下降趋势。

3.2.4 初雪日期和终雪日期

由图 7(a) 可知,天山北坡的初雪日期的空间分布比较复杂且时间跨度较长。初雪日期最早的地区位于天山北坡靠近天山地区的位置,每年 9 月前后开始降雪。而中部和东部平原地区的初雪日期集中在每年 10—12 月。总体来看,天山北坡初雪日期与海拔的关系密切,呈海拔越高,积雪

开始日期越早的规律。由图 7(b) 可知,天山北坡初雪日期的变化趋势整体并不显著,仅有极少部分区域存在提前或延后的情况,且无明显规律。

由图 8(a) 可知,天山北坡不同区域的终雪日期存在显著空间差异,且其空间分布与海拔高度的空间分布相似。终雪日期较早的地区是东部平原地区,在每年 11 月—12 月之间;大部分地区终雪日期出现在次年 3 月—4 月之间。而南部靠近天山部分地区的终雪日期在 5 月—6 月之间。由图 8(b) 可知,天山北坡终雪日期的变化趋势整体

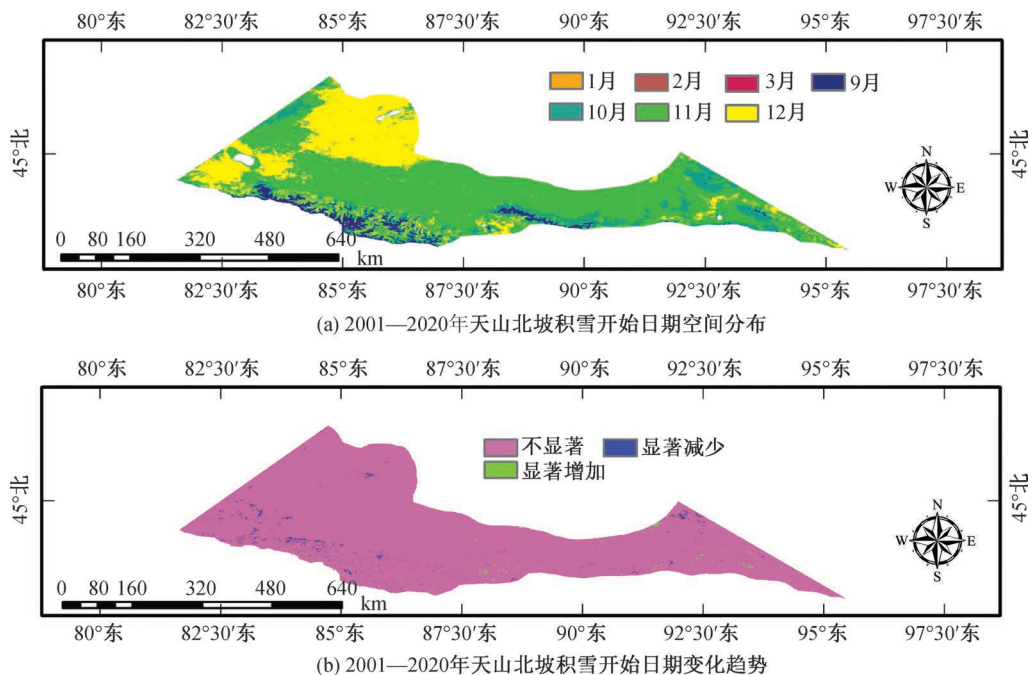


图 7 2001—2020 年天山北坡积雪开始日期空间分布与变化趋势

Fig. 7 Space Distribution and Trend Changes of Snow Onset Dates on the North Slope of the Tianshan Mountains from 2001 to 2020

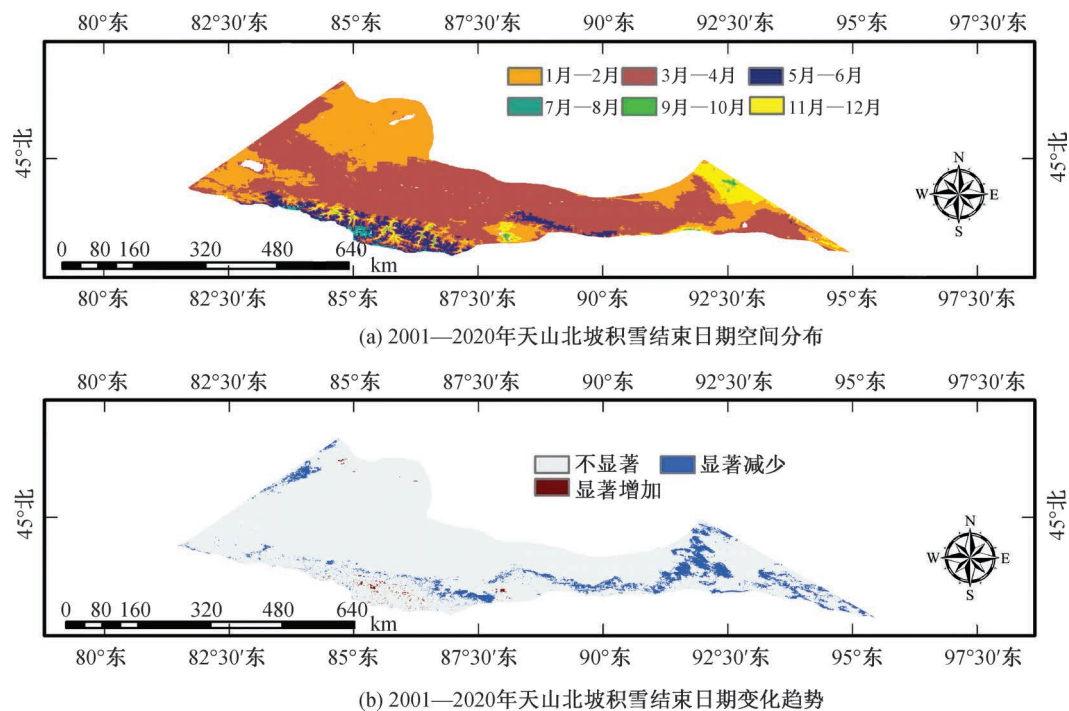


图8 2001—2020年天山北坡积雪结束日期空间分布与变化趋势

Fig. 8 Spatial Distribution and Trend Changes of Snowmelt Dates on the North Slope of the Tianshan Mountains from 2001 to 2020

并不显著, 相比之下, 终雪提前趋势比较明显, 主要分布在东部平原地区、靠近天山位置的区域和西北部部分地区。显著延后的区域主要集中在靠近天山附近的部分地区。

#### 4 结论

1) 精度评价结果表明, 三种积雪产品的总体精度均在80%左右。高山区MODIS产品在总体精度、低估误差、积雪分类精度和Kappa系数方面均优于其他两种产品。

2) 天山北坡多年平均积雪覆盖频率(SCF)呈现显著空间差异。高海拔地区SCF超过70%, 但该区域面积最小, 仅占区域总面积的1.83%。SCF介于30%~70%的区域占天山北坡总面积24.8%; SCF在5%至30%之间的低覆盖区, 分布最广, 占比达64.5%; 终年少雪区(SCF≤5%)占天山北坡总面积约8.8%。近20年间, SCF年际变化明显, 中南部和西部呈上升趋势, 而中北部和东部总体呈下降趋势, 尤其是海拔低于2000m的东部。SCF显著升高区域约占4.16%, 主要集中在南部海拔高于3000m和中北部海拔低于200m的地区。

3) 海拔高于4500m的区域, 年内各月积雪覆盖率均接近100%。积雪覆盖率年内变化趋势呈先减少后增加趋势, 1月份积雪覆盖率达到峰值。

经分析, 初雪日期变化不明显, 终雪日期有较为明显的区域提前现象, 主要分布在东部平原和天山附近。

#### 参考文献:

- [1] 潘保田, 李吉均. 青藏高原: 全球气候变化的驱动机与放大器——Ⅲ. 青藏高原隆起对气候变化的影响[J]. 兰州大学学报, 1996, 32(1): 108-115.  
PAN B T, LI J J. Qinghai-Tibet Plateau: driving force and amplifier of global climate change——Ⅲ. influence of Qinghai-Tibet Plateau uplift on climate change [J]. Journal of Lanzhou University (Natural Sciences), 1996, 32(1): 108-115.
- [2] 杨兴国, 秦大河, 秦翔. 冰川/积雪-大气相互作用研究进展[J]. 冰川冻土, 2012, 34(2): 392-402.  
YANG X G, QIN D H, QIN X. Progress in the study of interaction between ice/snow and atmosphere [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2012, 34(2): 392-402.
- [3] 周刚, 崔曼仪, 李哲, 等. 新疆春季融雪洪水危险性动态评价研究[J]. 干旱区研究, 2021, 38(4): 950-960.  
ZHOU G, CUI M Y, LI Z, et al. Dynamic evaluation of the risk of the spring snowmelt flood in Xinjiang [J]. Arid Zone Research, 2021, 38(4): 950-960.
- [4] 高婧, 井立红, 秦裕, 等. 新疆塔城地区大-暴雪特征及其与大气环流和海温的关系[J]. 干旱区研究, 2021, 38(2): 359-368.  
GAO J, JING L H, QIN R, et al. Snowstorm characteris-

- tics and its relationship with atmospheric circulation and sea surface temperature in Tacheng Region, Xinjiang[J]. *Arid Zone Research*, 2021, 38(2): 359-368.
- [5] 杨晓玲, 郭丽梅, 张春燕, 等. 河西走廊东部雪日时空演变特征[J]. *冰川冻土*, 2018, 40(6): 1133-1140.  
YANG X L, GUO L M, ZHANG C Y, et al. Characteristics of snowy days in east Hexi Corridor: temporal and spatial variations[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2018, 40(6): 1133-1140.
- [6] BARNETT T P, ADAM J C, LETTENMAIER D P. Potential impacts of a warming climate on water availability in snow-dominated regions[J]. *Nature*, 2005, 438(7066): 303-309.
- [7] 郝晓华, 孙兴亮, 纪文政, 等. 中国 MODIS 逐日无云 500 m 积雪面积产品数据集[DS/OL]. 国家冰川冻土沙漠科学数据中心(2022-05-10)[2024-10-10]. <http://www.ncdc.ac.cn/doi/10.12072/ncdc.I-SNOW.db0001>. 2020.  
HAO X H, SUN X L, JI W Z, et al. China MODIS daily cloud-free 500 m snow cover products dataset[DS/OL]. National Cryosphere Desert Data Center(2022-05-10)[2024-10-10]. <http://www.ncdc.ac.cn/doi/10.12072/ncdc.I-SNOW.db0001>. 2020.
- [8] HAO X H, HUANG G H, ZHENG Z J, et al. Development and validation of a new MODIS snow-cover-extent product over China[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2022, 26(8): 1937-1952.
- [9] 戴礼云. 北半球 MODIS 逐日无云积雪产品(2000—2016)[DS/OL]. 国家青藏高原科学数据中心(2021-04-19)[2024-10-10]. <http://data.tpdc.ac.cn/doi/10.11888/Geogra.tpdc.270560>.  
DAI L Y. Northern hemisphere MODIS daily cloud-free snow cover products (2000—2016) [DS/OL]. National Tibetan Plateau/Third Pole Environment Data Center (2021-04-19) [2024-10-10]. <http://data.tpdc.ac.cn/doi/10.11888/Geogra.tpdc.270560>.
- [10] HUANG X D, HAO X H, FENG Q S, et al. A new MODIS daily cloud free snow cover mapping algorithm on the Tibetan Plateau[J]. *Sciences in Cold and Arid Regions*, 2014, 6(2): 116-123.
- [11] WANG Y L, HUANG X D, LIANG H, et al. Tracking snow variations in the Northern Hemisphere using multi-source remote sensing data (2000—2015)[J]. *Remote Sensing*, 2018, 10(1): 0-0.
- [12] 唐志光, 邓刚. 亚洲高山区逐日无云 MODIS 积雪指数(NDSI)与积雪物候数据集(2000—2021)[DS/OL]. 国家青藏高原科学数据中心(2022-09-29)[2024-10-10]. <https://poles.tpdc.ac.cn/doi/10.11888/Cryos.tpdc.272836>.
- TANG Z G, DENG G. Daily cloud-free MODIS NDSI and snow phenology dataset over High Mountain Asia (2000—2021) [DS/OL]. National Tibetan Plateau/Third Pole Environment Data Center (2022-09-29) [2024-10-10]. <https://poles.tpdc.ac.cn/doi/10.11888/Cryos.tpdc.272836>.
- [13] TANG Z G, DENG G, HU G J, et al. Satellite observed spatiotemporal variability of snow cover and snow phenology over high mountain Asia from 2002 to 2021 [J]. *Journal of Hydrology*, 2022, 613: 128438.
- [14] 黄婷, 师庆三, 师庆东, 等. 利用高分辨率影像验证低分辨率遥感数据的分类精度研究[J]. *新疆大学学报(自然科学版)*, 2013, 30(2): 238-242.  
HUANG T, SHI Q S, SHI Q D, et al. Validate classification precision of low spatial resolution remote sensing data by using high spatial resolution data[J]. *Journal of Xinjiang University (Natural Science Edition)*, 2013, 30(2): 238-242.
- [15] 梁天刚, 高新华, 黄晓东, 等. 新疆北部 MODIS 积雪制图算法的分类精度[J]. *干旱区研究*, 2007, 24(4): 446-452.  
LIANG T G, GAO X H, HUANG X D, et al. Study on the accuracy of MODIS snow cover mapping algorithm in northern Xinjiang [J]. *Arid Zone Research*, 2007, 24(4): 446-452.
- [16] 张学通, 黄晓东, 梁天刚, 等. 新疆北部地区 MODIS 积雪遥感数据 MOD10A1 的精度分析[J]. *草业学报*, 2008, 17(2): 110-117.  
ZHANG X T, HUANG X D, LIANG T G, et al. Accuracy analysis for MODIS snow data of MOD10A1 in a pastoral area in Northern Xinjiang[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2008, 17(2): 110-117.
- [17] 钟鼎杰, 孙梦鑫, 张岳, 等. 2001—2020 年川西高原积雪时空变化及影响因素分析研究[J]. *干旱区资源与环境*, 2021, 35(11): 111-118.  
ZHONG D J, SUN M X, ZHANG Y, et al. Spatio-temporal variation and influencing factors of snow cover in West Sichuan plateau from 2001 to 2020[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2021, 35(11): 111-118.
- [18] 拉巴卓玛, 邱玉宝, 次旦巴桑, 等. 青藏高原 MODIS 每日积雪产品去云算法过程对比验证研究[J]. *冰川冻土*, 2016, 38(1): 159-169.  
LABA Zhuoma, QIU Y B, CIDAN Basang, et al. The validation of MODIS daily snow-cover products after cloud removal in Xizang Autonomous Region [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2016, 38(1): 159-169.
- [19] KLEIN A G, BARNETT A C. Validation of daily MODIS snow cover maps of the Upper Rio Grande River Basin for the 2000—2001 snow year [J]. *Remote Sensing*

- of Environment, 2003, 86(2): 162-176.
- [20] 李诺, 韩其飞, 马英, 等. 青藏高原 MODIS 逐日无云积雪范围产品精度验证[J]. 冰川冻土, 2022, 44(6): 1740-1747.  
LI N, HAN Q F, MA Y, et al. Accuracy verification of MODIS daily cloud-free snow cover products over the Tibetan Plateau[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2022, 44(6): 1740-1747.
- [21] HALL D K, RIGGS G A, SALOMONSON V V, et al. MODIS snow-cover products[J]. Remote Sensing of Environment, 2002, 83(1/2): 181-194.
- [22] 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.
- [23] 许少辉. 2003—2018 年喀喇昆仑-西昆仑地区积雪时空变化及影响因素分析[D]. 西安: 西北大学, 2021.  
XU S H. Spatial-temporal variations of snow cover and influencing factors in the Karakoram-West Kunlun area from 2003 to 2018[D]. Xi'an: Northwest University, 2021.  
(责任编辑 张爱丽)
- 
- (上接第 83 页)
- [22] 李敏稚, 尹亚森, 林子. 商业街区外部空间步行适宜性评价研究——以广州北京路为例[J]. 南方建筑, 2024(7): 36-47.  
LI M Z, YIN Y S, LIN Z. Research on pedestrian suitability evaluation of exterior spaces of commercial blocks: a case study based on Beijing Road in Guangzhou[J]. South Architecture, 2024(7): 36-47.
- [23] 陈峰. 历史文化遗产周边环境保护范围的界定方法初探——以郑州商城文化区商城遗址保护为例[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2009.  
CHEN F. A preliminary study on the definition method of environmental protection scope around historical and cultural heritage[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2009.
- [24] 许嘉巍, 刘惠清. 长春市城市建设用地适宜性评价[J]. 经济地理, 1999, 19(6): 101-104.  
XU J W, LIU H Q. Evaluation on the suitability of land used for construction in Changchun city[J]. Economic Geography, 1999, 19(6): 101-104.
- [25] 何丹, 金凤君, 周璟. 资源型城市建设用地适宜性评价研究——以济宁市大运河生态经济区为例[J]. 地理研究, 2011, 30(4): 655-666.  
HE D, JIN F J, ZHOU J. Urban construction land suitability evaluation in resource-based cities: taking the Grand Canal Ecologic and Economic Area as an example[J]. Geographical Research, 2011, 30(4): 655-666.
- [26] 陈明. MATLAB 神经网络原理与实例精解[M]. 北京: 清华大学出版社, 2013.  
CHEN M. Principle of MATLAB neural network and exact solution of examples[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2013.
- [27] 王艳辉, 黄雅坤, 李曼. 基于组合赋权方法的城轨线路运营安全评价[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2013, 41(8): 1243-1248.  
WANG Y H, HUANG Y K, LI M. Operational safety evaluation of urban rail transit line operational safety based on combination weighting method[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2013, 41(8): 1243-1248.
- [28] 张志成, 刘徐璋, 刘伟. 基于 AHP—熵值法的高椅古村品质提升综合评价[J]. 家具与室内装饰, 2023, 30(9): 124-131.  
ZHANG Z C, LIU X Z, LIU W. Comprehensive evaluation of the quality improvement of Gaoyi ancient village based on AHP-entropy method[J]. Furniture & Interior Design, 2023, 30(9): 124-131.
- [29] 何超, 李萌, 李婷婷, 等. 多目标综合评价中四种确定权重方法的比较与分析[J]. 湖北大学学报(自然科学版), 2016, 38(2): 172-178.  
HE C, LI M, LI T T, et al. Comparison and analysis of the four weight determination methods in multi-objective comprehensive evaluation[J]. Journal of Hubei University (Natural Science), 2016, 38(2): 172-178.  
(责任编辑 张爱丽)