

DOI:10.13232/j.cnki.jnju.2015.05.001

## 新疆天山玛纳斯河流域高分辨率积雪遥感研究进展

肖鹏峰<sup>1,2,3</sup>, 冯学智<sup>1,2,3\*</sup>, 谢顺平<sup>1,2,3</sup>, 都金康<sup>1,2,3</sup>

(1. 江苏省地理信息技术重点实验室, 南京大学, 南京, 210023; 2. 卫星测绘技术与应用国家测绘地理信息局重点实验室, 南京大学, 南京, 210023; 3. 南京大学地理信息科学系, 南京, 210023)

**摘要:**新疆天山北麓玛纳斯河流域冬、春季积雪覆盖, 高山冰川发育, 是我国西北干旱区的典型流域, 其冰雪融水对北疆工农业生产和生态环境具有重要意义。近五年来, 在流域开展 5 次科学考察、积雪常规观测和星地同步观测, 利用 GF-1 PMS(Panchromatic and Multi-Spectral) 和 WFV(Wide Field of View)、HJ-1 CCD(Charge-Coupled Device) 和 IRS(Infrared Scanner) 等国产高分光学遥感数据和 C 波段 RADARSAT-2、ENVISAT ASAR 等合成孔径雷达数据, 探索山区复杂地形条件下的综合辐射校正方法, 建立积雪识别模型获取积雪覆盖范围、积雪表面类型和积雪干湿状况, 建立积雪参数反演模型获取雪粒径、雪深和雪水当量, 分析流域积雪变化特征与雪盖衰退过程, 进行流域融雪径流模型的参数率定、模拟与预报, 为流域水资源合理利用与调配提供科学依据。

**关键词:** 积雪遥感, 积雪识别, 积雪参数反演, 融雪径流, 玛纳斯河流域, 天山

中图分类号: TP237

文献标识码: A

## Research progresses of high-resolution remote sensing of snow in Manasi River Basin in Tianshan Mountains, Xinjiang Province

Xiao Pengfeng<sup>1,2,3</sup>, Feng Xuezhi<sup>1,2,3\*</sup>, Xie Shunping<sup>1,2,3</sup>, Du Jinkang<sup>1,2,3</sup>

(1. Jiangsu Provincial Key Laboratory of Geographic Information Science and Technology, Nanjing University, Nanjing, 210023, China; 2. Key Laboratory for Satellite Mapping Technology and Applications of State Administration of Surveying, Mapping and Geoinformation of China, Nanjing University, Nanjing, 210023, China; 3. Department of Geographic Information Science, Nanjing University, Nanjing, 210023, China)

**Abstract:** Manasi River Basin is located in the north submontane of Tianshan Mountains, Xinjiang Province, China. As a typical basin of the arid zone in the northwest of China, there are many glaciers developed in the high altitude areas and snow covered in the basin from winter to the following spring. Thus, it has great significance of the snow and glacier melt runoff to the industry, agriculture, ecology, and environment of the basin. Over the last five years, we implemented scientific investigation, snow observation, and satellite-ground simultaneous observation in the basin. The high-resolution optical remote sensing data, i. e. GF-1 PMS(Panchromatic and Multi-Spectral)/WFV(Wide Field of

基金项目: 国家高分辨率对地观测系统重大专项(95-Y40B02-9001-13/15-04), 国家自然科学基金(41271353)

收稿日期: 2015-06-06

\* 通讯联系人, E-mail: xzf@nju.edu.cn

View) and HJ-1 CCD (Charge-Coupled Device)/IRS (Infrared Scanner), and synthetic aperture radar data with C band, i. e. RADARSAT-2 and ENVISAT ASAR were used in the study. The comprehensive radiation correction method was explored considering the rugged terrain of the mountainous areas. The snow recognition models were built to obtain snow cover extent, snow surface type, and snow situation of dry or wet. The snow retrieval models were built to obtain snow grain size, snow depth, and snow water equivalent. The snow change characteristics and snow cover recession processes were analyzed to realize the parameter optimization, simulation, and forecast of the snowmelt runoff model. The study fruits will provide scientific supports for the water resource utilization and management of the basin.

**Key words:** remote sensing of snow, snow recognition, snow parameter retrieval, snowmelt runoff, Manasi River Basin, Tianshan Mountains

积雪是冰冻圈的重要组成部分,也是地表最活跃的自然要素之一。积雪具有明显的季节性变化,而且是太阳辐射的高反射体,对于全球或局地气候具有正反馈作用,进而影响区域生态环境的协调发展<sup>[1]</sup>。在我国高寒山区及干旱、半干旱地区,积雪作为一笔可观的淡水资源储备,在国民经济建设与可持续发展中占有重要的地位,特别是季节性的冰雪融水作为春季河川径流的主要补给水源,直接影响这些地区的工农业生产<sup>[2]</sup>。遥感技术具有宏观、快速、多时相和多波段等优势,在气象资料不足、气候条件恶劣的山区,是唯一能够反映大范围积雪覆盖状况和变化的手段<sup>[3]</sup>。

自 20 世纪 60 年代在加拿大第一次用气象卫星观测积雪以来,利用遥感技术进行积雪监测已有 50 多年的历史,我国积雪遥感研究也取得了系列研究成果<sup>[4-10]</sup>。随着我国高分卫星 (GF-1, GF-2) 的成功发射和数据分发,越来越多的高空间分辨率遥感数据进入资源环境应用领域,空间分辨率的提高使得地形效应显著、地物类内差异增大,而且高分辨率遥感数据缺乏计算归一化差值积雪指数 (Normalized Difference Snow Index, NDSI) 所需的短波红外波段,因此山区复杂地形条件下的高分辨率积雪识别是亟待解决的科学难题。同时,高空间分辨率的雪粒径、雪密度、雪湿度、雪深和雪水当量等积雪参数的遥感反演仍处于实验研究阶段,被动微波遥感较低的空间分辨率不能满足流域

尺度的积雪反演需求,合成孔径雷达 (Synthetic Aperture Radar, SAR) 技术在山区复杂地形条件下的积雪反演问题有待深入探索。

近五年来,在国家高分辨率对地观测系统重大专项项目“新疆天山中部高分载荷雪冰监测评价”(95-Y40B02-9001-13/15-04) 和国家自然科学基金项目“SAR 与高分辨率光学遥感联合反演雪水当量”(41271353) 的支持下,为验证国产高分辨率卫星遥感数据对山区积雪探测的有效性,南京大学积雪遥感研究团队以新疆天山北麓玛纳斯河流域为研究区,开展了 5 次科学考察、积雪常规观测和星地同步观测,利用 GF-1 PMS (Panchromatic and Multi-Spectral) 和 WFV (Wide Field of View)、HJ-1 CCD (Charge-Coupled Device) 和 IRS (Infrared Scanner) 等国产高分光学遥感数据和 C 波段 RADARSAT-2、ENVISAT ASAR 等合成孔径雷达数据,探索山区复杂地形条件下的综合辐射校正方法,建立积雪识别模型获取积雪覆盖范围、积雪表面类型和积雪干湿状况,建立积雪参数反演模型获取雪粒径、雪深和雪水当量,分析流域积雪变化特征与雪盖衰退过程,实现了流域融雪径流模型的参数率定、模拟与预报。

本期“新疆天山玛纳斯河流域高分分辨率积雪遥感研究”专栏辑录了近年来玛纳斯河流域高分分辨率积雪遥感研究的部分成果,共 12 篇论文,其中野外积雪观测的论文 3 篇、积雪遥感识别的论文 5 篇、积雪参数遥感反演的论文 2 篇、

融雪径流模拟与预报的论文 2 篇. 另有近五年已发表的相关论文 28 篇, 以参考文献的形式在本文注出. 这些研究结果可为流域水资源合理利用与调配提供科学依据, 为新疆国民经济建设和生态环境保护提供科技支撑.

## 1 玛纳斯河流域概况

玛纳斯河流域位于新疆天山中段北麓, 准噶尔盆地西南边缘, 地理范围大致介于北纬  $43^{\circ}05' \sim 45^{\circ}55'N$ , 东经  $85^{\circ}00' \sim 87^{\circ}00'E$  之间 (图 1a). 玛纳斯河全长约 324 km, 河源位于伊连哈比尔尕山乌代肯尼河 43 号冰川, 源头海拔 5000~5500 m, 分布着大量现代冰川. 上游河道汇集呼斯台河、古仁河、清水河等多条支流, 河川径流丰富. 至肯斯瓦特水文站出峡谷, 进入山前阶地, 海拔降至 1000 m 左右. 至山前红山嘴水文站流出山口, 在冲积平原上被分流灌溉利用或引入水库, 最终流至玛纳斯湖, 海拔随之降至 600 m 以下. 红山嘴以上的玛纳斯河流域山区面积总计约 5156 km<sup>2</sup> (图 1b).

流域地形呈南高北低走势, 水汽来源主要

为西风环流, 并在一定程度上受到北冰洋干冷气流的影响, 具有明显的大陆性气候特征. 受水汽来源、地形和纬度等因素的影响, 流域垂直带性明显: (1) 海拔 3600 m 以上为高山带, 以古生代岩系为主, 受冰川和永久积雪的作用, 地表岩石裸露, 山势陡峭, 终年积雪, 年平均气温  $0^{\circ}C$  以下, 年降水量大于 500 mm, 为寒温带湿润气候; (2) 海拔 1500~3600 m 为中山带, 由中生代砂岩和砂砾岩组成, 受古冰川和河流径流的作用, 形成沟壑纵横的地貌, 冬季最低月平均气温  $-10^{\circ}C$ , 夏季最高月均气温  $15^{\circ}C$ , 年降水量 300~500 mm, 为寒温带半湿润气候, 植被覆盖较好, 垂直分布着亚高山草甸带和山地森林带; (3) 海拔 600~1500 m 为前山带, 山体多呈矮小浑圆状, 以卵砾石为主, 植被以草地为主, 覆盖度约为 50%, 年平均气温  $5^{\circ}C$ , 冬季最低月平均气温  $-15^{\circ}C$ , 夏季最高月平均气温  $20^{\circ}C$ , 年降水量 200~300 mm, 为温带半干旱气候; (4) 海拔 600 m 以下为平原区, 年平均气温  $6^{\circ}C$ , 年降水量 100~200 mm, 为温带干旱气候<sup>[11]</sup>.

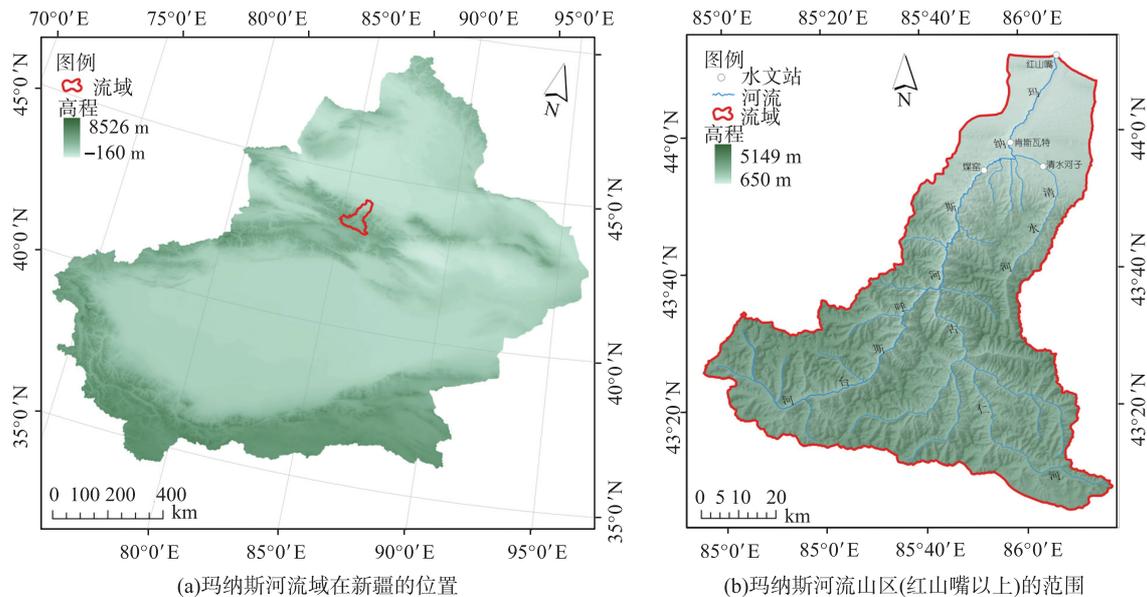


图 1 玛纳斯河流域位置和范围示意图  
Fig. 1 Location and extent of the Manasi River Basin

在大陆性气候条件作用下,天山山区积雪具有厚度薄、密度低、温度梯度大、深霜发育层厚等特点.根据积雪形成的气候条件和物理性质,天山山地积雪属于“干旱型”或“大陆型”积雪,具有明显的低密度特征,各类型积雪的平均密度均不超过  $0.30 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ,大部分在  $0.10\sim 0.28 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$  之间.每年从 11 月上旬开始,平均气温降至  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  以下,开始形成稳定积雪;随后深度逐渐增加,至次年 2 月中旬达到峰值,一般中山带雪深在 20 cm 以上,高山带雪深在 50 cm 以上;其后雪深迅速递减,3 月中旬气温回升至  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  以上;至 4 月中旬积雪消失,稳定积雪日数年均均在 140 d 以上<sup>[11-17]</sup>.

根据肯斯瓦特水文站的多年平均径流数据统计分析,玛纳斯河多年平均径流量  $1.28\times 10^9 \text{ m}^3$ ,最大径流量  $1.56\times 10^9 \text{ m}^3$ ,最小径流量  $1.08\times 10^8 \text{ m}^3$ .其中,来自冰川融水的径流量达  $4.42\times 10^8 \text{ m}^3$ ,占年总径流量的 34.60%.流量夏季大、冬季小,每年夏季随着气温升高,高山冰雪大量消融,同时高中山区又为多雨季节,使径流骤增,形成 6—8 月的洪水期,径流量占全年的 65%.枯水期长,春枯期和冬蓄期径流量占全年的 10.30%,最小月仅占 1.35%,主要依

靠冻土层以下的地下水补给.

## 2 积雪常规观测与星地同步观测

为开展积雪遥感识别和反演的真实性检验,2012—2015 年在玛纳斯河流域进行了 5 次科学考察、积雪常规观测和星地同步观测.其中同步观测于 2013 年 12 月 11—17 日、2014 年 3 月 16—22 日进行,分别获取了干雪和湿雪状态下与 GF-1 和 RADARSAT-2 卫星同步的积雪地面观测数据(图 2).在同步的遥感影像范围内近似均匀选取 32 个局部代表性强的观测点,使观测结果能代表研究区积雪的空间差异.同时,对相同观测点进行了重复观测,获取各观测点积雪状态的时间差异.利用地物光谱仪、雪特性分析仪、量雪筒、电子秤、数码显微镜、针式温度计、红外温度计等积雪观测仪器获取了积雪表面反射光谱、雪深、雪水当量、雪密度、雪湿度、雪粒径、雪面温度和雪层温度等积雪参数,利用风速仪、温湿计、温度记录仪等大气观测仪器获取了风速、空气湿度和空气温度等大气参数,利用定位仪、地质罗盘等地形观测仪器获取了经纬度、坡度和坡向等地形参数.同时,在观测区布设了若干自动温度记录仪,连续记录了



图 2 2013 年 12 月 13 日星地同步积雪观测照片

Fig. 2 Photos of satellite-ground simultaneous field observation for snow

地表温度的变化过程. 这些同步观测数据的获取, 奠定了积雪识别和积雪参数反演的基础<sup>[18]</sup>.

利用多次野外观测的积雪表面反射光谱数据, 分析不同类型积雪的反射光谱特征, 结果表明: 受污染物、雪层含水量、雪粒径、枯草等因素影响, 污化雪、陈雪、雪与枯草混合物的光谱曲线兼有积雪与非积雪地物的反射特性; 在可见光波段, 污化雪、陈雪的反射率有不同程度的下降, 但是依然高于非积雪地物的反射率; 在近红外波段, 新雪、污化雪、陈雪、风吹雪、雪与枯草混合物的光谱曲线在 1020 nm、1250 nm 处均出现积雪特有的吸收谷, 在 1080 nm、1320 nm、2246 nm 波段均出现积雪特有的反射峰. 另外, 污染物在降低积雪反射率的同时, 还使得污化雪在可见光波段的光谱曲线呈现上升趋势, 即呈现污染物自身的光谱曲线特征, 与其它类型的积雪形成明显对比, 这是区分污化雪与其它类型积雪的关键<sup>[19-20]</sup>.

利用 2014 年春季观测的积雪物理特性数据(雪深、雪密度、雪层含水量、雪层温度), 分析融雪期的积雪参数特征和垂直廓线特征, 结果表明: (1) 雪层温度在非稳定期随着深度的增加逐渐降低, 积雪保温作用明显, 保温层位于雪表层下约 10 cm 位置; (2) 低山带雪密度随着雪深的增加逐步减小, 高山带和亚高山带雪密度的垂直廓线呈现中部大、积雪表层和底部小的分布特征; (3) 低山带雪层含水量高于高山带和亚高山带, 垂直廓线呈单峰曲线, 峰值距雪表面约 12 cm; 高山带和亚高山带积雪以干雪为主, 雪层含水量存在层位变化<sup>[21]</sup>.

### 3 高分辨率遥感图像山区积雪识别

#### 3.1 山区复杂地形条件下的综合辐射校正

山区复杂地形对积雪识别的影响主要由阴影、高程差异、太阳光坡面入射角不同造成. 地形效应是影响山区积雪识别的主要因素, 使得处于山体阴影区的不同地物的图像响应特征十分相似, 给位于山体阴影处的积雪识别带来困难<sup>[22]</sup>. 计算处于坡面的像元接收的总辐照度,

结合数字高程模型(Digital Elevation Model, DEM)与大气辐射传输模型对遥感图像进行综合辐射校正, 可削弱地形与大气对积雪识别的影响. 使用综合辐射校正能够显著提高阴影区域的解像力, 分辨出阴影处的积雪与裸地, 提高积雪识别精度<sup>[23]</sup>.

此外, 处于不同坡度、坡向的雪面像元反射率差异较大, 具有明显的前向散射特性, 因此除地形效应外, 还应考虑雪面的方向反射特性<sup>[24-25]</sup>. 采用各向异性校正与地形校正相结合的方法, 将不同坡面方向的雪面反射率转换至平坦地表垂直观测方向上的雪面反射率, 以削弱地表方向反射特性对积雪识别的影响. 其中各向异性校正采用二向反射分布函数(Bidirectional Reflectance Distribution Function, BRDF)模型, 地形校正采用山地辐射传输模型. 利用同步观测的积雪反射光谱数据对校正结果进行验证, 表明此方法能够有效消除地形和大气的影(图 3), 计算的雪面反射率在阳坡与阴坡均与实测数据相一致, 为山区积雪遥感识别奠定了基础<sup>[26]</sup>.

#### 3.2 缺少短波红外波段情况下的高分积雪指数建立

由于目前高空间分辨率卫星传感器的波段设置缺少积雪光谱强吸收的短波红外波段, 导致 NDSI 不适用于高分辨率遥感图像的积雪识别. 基于我国 2013 年发射的 GF-1 卫星, 利用 2013 年 12 月 14 日 16 m 分辨率的 GF-1 WFV 图像、同步光谱测量数据, 利用可见光波段和近红外波段建立高分积雪指数(GF-1 Snow Index, GFSI). 通过对积雪与非积雪像元在各波段的类间可分性比较分析, 确定蓝波段是可见光波段中适合高分积雪识别的最佳波段. 最后通过双峰阈值法确定积雪识别的最佳阈值, 对 GF-1 WFV 图像使用 GFSI 进行积雪识别(图 3), 结果表明山体阴影处的积雪可以准确识别, 同时非阴影区积雪的识别结果也得到了改进, 积雪识别总体精度达到 93.2%; 以蓝波段和近红外波段建立的 GFSI 能够突出积雪与其他地物的反射率差异, 有效识别高分辨率遥感图像的积雪覆盖范围<sup>[26]</sup>.

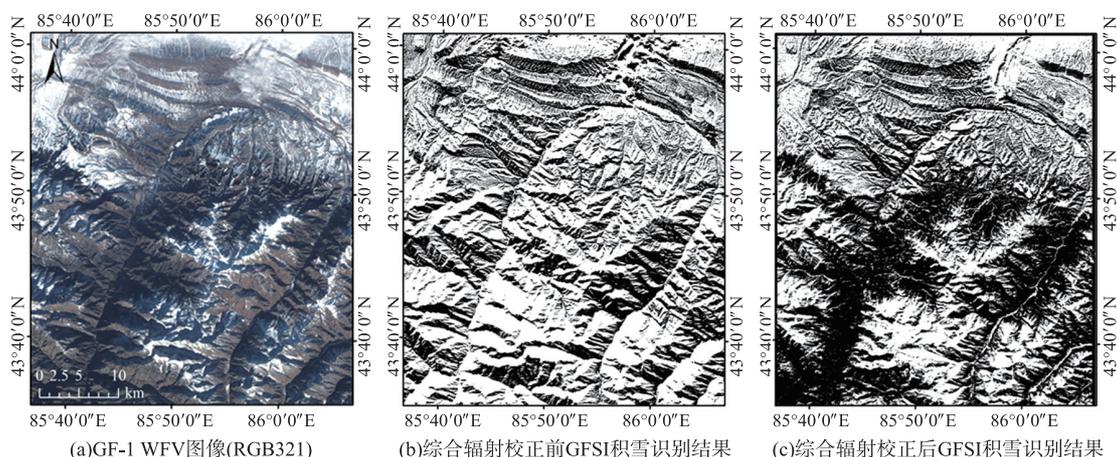


图 3 GF-1 WFV 图像积雪识别结果比较

Fig. 3 Comparison of snow cover recognition results based on GF-1 WFV image

### 3.3 基于协同训练的多时相遥感图像积雪识别

为了从多时相遥感图像中快速识别积雪,引入机器学习中的协同训练(co-training)多视图概念,以每一图像作为一个视图,构建多时相积雪的多视图.将协同训练从单一图像分类技术扩展到多时相分类技术,通过积雪多时相表征偏移实现协同训练.并根据多时相遥感图像协同训练的特点,提出未标记样本的选择方法.利用协同训练构建多时相积雪识别模型,通过积雪识别频次图和测试样本集评价 2013 年 10 月 7 日、15 日、19 日的 8 m 分辨率 GF-1 PMS 图像积雪识别结果,并分析多时相图像的时相组合与空间匹配误差对协同识别的影响.结果表明:通过协同训练构建的多时相积雪识别模型,相对于单一时相积雪识别算法在精度、稳定性、对样本的质量和数量敏感度上具有较大的优势,协同识别在无预处理、小样本的情况下能够实现多时相积雪的同时识别;时相组合对协同识别的效果具有重要影响,表现为协同训练前后识别结果差异大的图像组合具有较好的效果;多时相图像的空间匹配误差不会造成识别精度下降<sup>[27-28]</sup>.

### 3.4 基于 SAR 极化特征的全天候积雪识别

合成孔径雷达具有穿透云雾的全天候对地观测能力.为了对 2016 年即将发射的 GF-3 合成孔径雷达卫星应用开展预研究,以 2014 年 3 月

19 日的 C 波段 RADARSAT-2 全极化数据为替代数据,首先进行目标分解提取积雪极化特征,然后利用 J-M 距离进行特征选择,分析不同极化特征对积雪的可分性,最后利用最优特征集和支持向量机(Support Vector Machine, SVM)进行积雪识别.结果表明:Yamaguchi 分解和 Freeman 分解的体散射分量、相干矩阵特征值和香农熵四种极化特征对积雪有较强的识别能力,多种极化特征联合识别相对于单一特征识别积雪具有较大优势,基于四种极化特征的积雪识别精度达到 83.87%.利用 SAR 极化特征进行积雪识别能够弥补光学遥感难以识别云下积雪的不足<sup>[29]</sup>.

同时,采用马尔可夫随机场(Markov Random Field, MRF)模型分割方法对 2014 年 3 月 19 日的 C 波段 RADARSAT-2 全极化数据进行积雪识别.首先通过初始 *k*-means 分割算法估算出 MRF 参数,建立先验模型和概率密度函数,然后利用迭代条件模式(Iterated Conditional Mode, ICM)算法进行最大后验概率求解得到最优标记,从而识别出积雪,精度达 86.67%.结果表明:MRF 模型分割方法能有效识别积雪,降低相干斑噪声对 SAR 数据的影响;在地势较为平坦的地区,交叉极化 HV 方式下的后向散射系数与极化总功率 Span 的识别效果较好;在地形起伏较大的地区, HV 后向散射

系数的识别效果随着高程和坡度的增加而降低,极化总功率  $\text{Span}$  能综合三种极化特征,较好地克服地形影响,提高积雪的识别精度<sup>[30]</sup>。

**3.5 联合 SAR 与光学遥感数据的积雪表面类型和干湿状态识别** 光学遥感数据具有积雪识别精度高、可识别积雪表面类型等优点,并可通过综合辐射校正削弱地形对积雪识别的影响,但难以识别云覆盖区的积雪;SAR 具有穿透云雾识别积雪、获取积雪物理信息的能力,但在山区复杂地形条件下,其后向散射信号受地形影响严重,因此,利用 SAR 与光学遥感数据在山区积雪识别中的互补性,可进一步提高积雪识别的精度<sup>[31]</sup>。首先利用综合辐射校正后的 GF-1 WFV 数据,采用 SVM 分类方法,识别山区积雪表面类型(新雪和陈雪)。然后在 SAR 遥感图像表征分析基础上<sup>[32]</sup>,利用 2013 年 12 月 13 日和 2014 年 3 月 19 日的 C 波段 RADARSAT-2 相干系数图像,使用最优阈值法提取积雪,并在此基础上利用 Nagler 算法获取的干雪和湿雪样本以及极化特征分解方法获取的最优极化特征组合,建立了极化 SAR 识别湿雪的动态阈值方法,实现了干雪和湿雪的识别。最后在对 SAR 与光学遥感数据积雪识别精度、优劣势分析的基础上,构建了 SAR 与光学遥感数据联合识别积雪的模型,实现了积雪期和融雪期积雪表面类型和干湿状态的同时识别<sup>[33]</sup>。

## 4 山区复杂地形条件下的积雪参数反演

**4.1 基于渐近式辐射传输模型的雪表层粒径反演** 雪粒径是影响雪面能量收支和表征积雪状态的重要参数。利用野外实测的积雪反射光谱分析,确定对雪粒径大小敏感是 1030 nm 和 1250 nm 附近的波段<sup>[34-35]</sup>。基于球形和非球形雪粒形状假设,以渐近式辐射传输模型为基础建立雪粒径反演模型,利用 2011 年 12 月 12 日和 2012 年 4 月 12 日 HJ-1 卫星 30 m 分辨率 CCD 数据,得到玛纳斯河流域山区冬季积雪期和春季融雪期的雪表层粒径反演结果,并利用地面实测数据对反演结果进行验证。结果表明:基于渐近式辐射传输模型的雪粒径反演模型能

较好地描述雪粒径与遥感信号间的定量关系;雪粒形状对反演结果影响较大,当选择合适的雪粒形状时,雪粒径反演值与实测值较为吻合;海拔对雪粒径的分布影响较大<sup>[36-39]</sup>。

### 4.2 基于 SAR 干涉测量技术的雪深反演

C 波段雷达能够穿透干雪,并在雪-空气界面发生折射,导致传播路径变化。根据干涉合成孔径雷达(Interferometry SAR, InSAR)原理,干雪覆盖前后的 SAR 像对会形成由于干雪覆盖导致的干涉相位差。基于此,提出了基于重轨 InSAR 技术的积雪深度反演方法:首先结合野外观测、气象和水文数据,判断积雪状态,从 C 波段 ENVISAT ASAR 数据中选择无雪和干雪覆盖的最佳干涉像对(2008 年 7 月 12 日与 2009 年 1 月 3 日);然后优化干涉处理过程,利用差分原理,获得由于干雪覆盖导致的相位差;最后基于雪深与相位差的几何关系,反演积雪深度。结果表明:雪深反演结果在研究区大部分地区与野外观测结果相符;与同时期 HJ-1 图像比较,二者获得的积雪覆盖范围相吻合。同时指出,失相干和输入参数(入射角、雪密度)误差是反演的主要误差来源<sup>[40-41]</sup>。

**4.3 基于积雪热阻模型的雪水当量反演** 雪水当量是指当积雪完全融化后得到的水形成水层的垂直深度,等于积雪密度与积雪深度的乘积,是表征积雪水资源量的重要指标。基于 2013 年 10 月 2 日和 2013 年 12 月 13 日的 C 波段 RADARSAT-2 全极化数据、地面同步观测数据、DEM 数据和土地覆盖数据,研究了针对山区地形与下垫面条件的 EQ<sub>eau</sub> 模型参数优化方法,修订了模型系数,并反演获得了研究区的雪水当量分布信息。结果表明:(1)在山区复杂地形与下垫面条件下,增加地形、土地覆盖类型和局部入射角作为 EQ<sub>eau</sub> 模型的条件参数,可获得冬、秋季后向散射系数比与积雪热阻间较好的拟合关系,从而修订模型系数;(2)利用系数修订后的 EQ<sub>eau</sub> 模型和 RADARSAT-2 数据反演得到了研究区精度较高的雪水当量信息(图 4),表明利用 EQ<sub>eau</sub> 模型反演山区雪水当量是有效和可行的<sup>[42-43]</sup>。

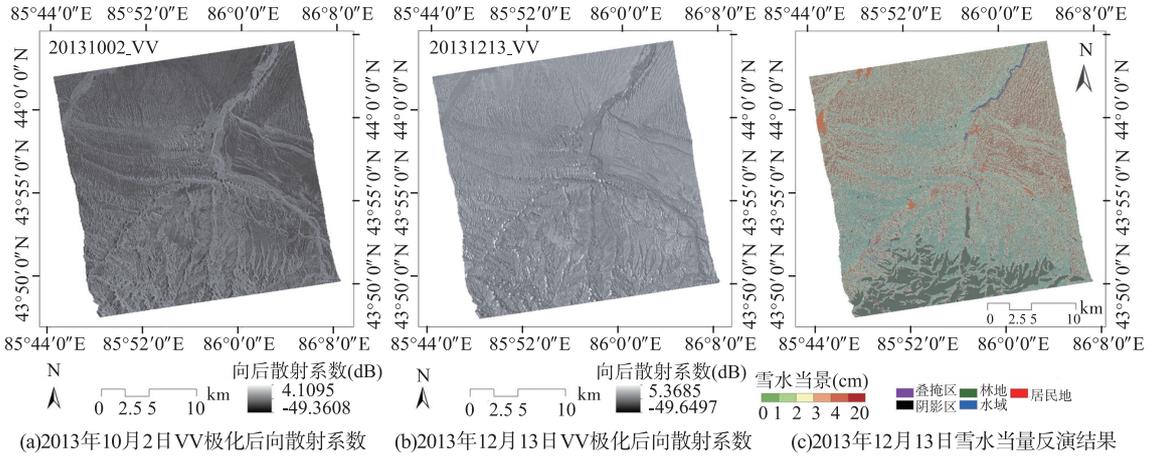


图 4 RADARSAT-2 影像雪水当量反演结果

Fig. 4 Retrieval results of snow water equivalent based on RADARSAT-2 images

### 5 融雪径流模型的模拟与预报

**5.1 流域雪盖衰退过程分析** 利用 2009 年 1 月 1 日至 2011 年 12 月 31 日的 HJ-1 CCD/IRS 数据, 获取流域多时相雪盖信息, 并将其与 DEM 数据叠加分析, 研究地形对雪盖衰退过程的影响。结果表明: (1) 雪盖开始衰退的时间、衰退持续的时间以及衰退的速率均随高程的变化而有明显差异; 雪盖衰退最早从低海拔地区开始, 在 1300 m 以下地区, 二月至三月期间雪盖开始消融, 五月份消融完毕, 随着高程上升, 雪盖衰退开始的时间总体上往后移; (2) 坡度对雪盖衰退的影响因高程带而异, 在 3800 m 以下地区, 雪盖衰退速率随坡度上升而降低; 在 3800 m 以上地区, 则影响不明显<sup>[44-45]</sup>。

通过叠加研究区的雪盖信息、DEM 数据、

利用 HJ-1 IRS 反演的地表温度数据, 建立了各月地表温度场和雪盖信息场。对地表温度场进行区域分析和剖面分析, 可获取任意区域和剖面的地表温度时空分布特征; 对雪盖信息场进行区域分析和剖面分析, 可获取任意区域和剖面的雪盖衰退曲线<sup>[46-47]</sup>。

**5.2 基于 SRM(Snowmelt Runoff Model) 的融雪径流模拟** 玛纳斯河流域水文气象台站分布稀少, 不具备描述精细物理过程的条件, 因此应用半经验的 SRM 对融雪径流进行模拟。基于多源卫星遥感影像, 获取流域多时相雪盖信息, 结合 DEM、气象水文数据, 制作不同高程带的雪盖衰退曲线, 根据地形和气温对雪盖衰退的影响, 分不同高程带利用 SRM 对肯斯瓦特水文站 2001—2012 年 3 月 10 日至 6 月 20 日逐日径流量分别进行模拟。结果表明, SRM 能够

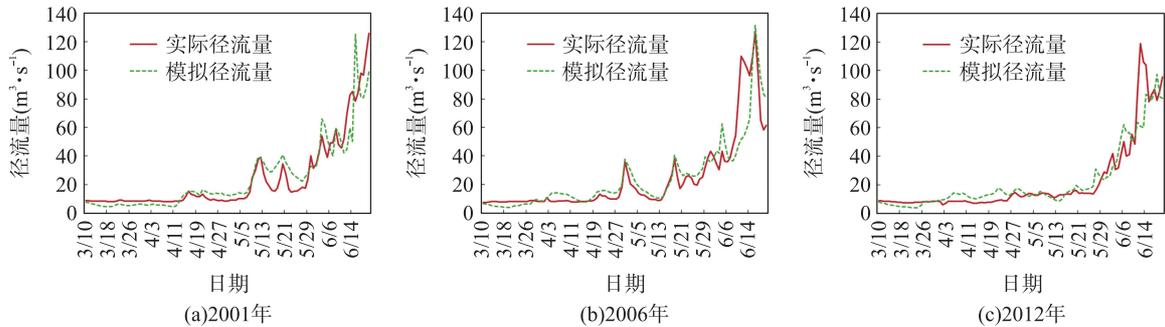


图 5 肯斯瓦特水文站逐日径流 SRM 模拟结果

Fig. 5 Simulation of daily runoff of the Kensiwate station based on SRM

较好地模拟研究区的融雪径流,日径流量模拟值基本反映了实际径流量的变化趋势(图5);模拟结果的精度较高,12个年份模拟结果的决定系数平均值为0.811,体积差平均值为5.97%。模拟误差产生的原因,一是由于未结合实际情况对径流滞时等参数进行优化,二是气象观测数据稀缺,无法获取足够的降水量数据<sup>[48]</sup>。

**5.3 SRM 参数离散化与优化率定** 基于模型参数对SRM模拟的影响,提出SRM参数的离散化和渐进式优化率定方法。首先通过对SRM结构的分析,确定融雪径流系数和降雨径流系数为两个待率定的敏感参数;为体现模型在融雪期内径流响应的时变特性,对模型敏感参数按时间片序列离散成月、半月、10天和5天等不同时段粒度的分量参数,并采用不同的单目标和多目标函数及优化方法分别对2001—2012共12年融雪期逐日融雪径流过程进行模拟率参;通过对模拟结果的分析,选择时段句和渐进式优化为最佳的参数离散方案和优化方法;最后以2001—2008年的融雪期作为率定期,以2009—2012年作为检验期分别面向三个目标对模型参数进行优化率定。结果显示,验证模拟的平均效率系数为0.87,最高达0.88,最低为0.86,表明提出的融雪径流模型参数离散化和优化率定方法是有效的<sup>[49]</sup>。在模型参数率定的基础上,结合雪盖预测数据和降水等相关数据,可实现融雪径流的短期和中长期预报<sup>[50]</sup>。目前,该融雪径流预报系统已在石河子水文水资源勘测局安装并投入使用,为玛纳斯河流域水资源管理与调配提供了科学支撑。

## 6 结论与展望

**6.1 研究结论** 为验证国产高分辨率遥感数据对山区积雪探测的有效性,在玛纳斯河流域开展了积雪野外观测,利用国产高分辨率光学遥感数据和SAR数据,建立积雪识别模型获取积雪覆盖范围、积雪表面类型和积雪干湿状况,建立积雪参数反演模型获取雪粒径、雪深和雪水当量,并进行融雪径流模型的参数率定、模拟

与预报。主要研究结论包括:

(1)国产GF-1卫星数据可有效识别山区积雪覆盖,构建的GFSI能够快速、准确地实现积雪的识别,提出的协同训练算法能够在小样本条件下识别多时相遥感图像中的积雪覆盖。

(2)基于大气辐射传输模型和数字地形模型的综合辐射校正,有利于削弱大气和地形对积雪识别的影响;基于BRDF的地表方向反射校正,有利于进一步提高积雪识别的精度。

(3)基于全极化SAR的极化特征,运用图像分类或图像分割技术,可实现全天候的积雪识别;联合全极化SAR与高分辨率光学遥感数据,可实现积雪表面类型与积雪干湿状态的同时识别。

(4)基于渐近式辐射传输模型的雪表层粒径反演算法,为多光谱和高光谱遥感数据反演雪粒径提供了实用途径,其中雪粒形状的合理假设和雪粒径的准确测量是影响反演精度的主要因素。

(5)基于重轨InSAR技术的雪深反演算法和基于积雪热阻模型的雪水当量反演算法的初步研究,表明SAR在山区积雪参数反演中具有较大的应用潜力。

(6)在气象水文站点稀缺的西部山区,基于雪盖衰退过程的SRM是进行融雪径流模拟的实用方法,利用模型参数离散化和优化率定方法可有效提高模拟和预报的精度。

**6.2 研究展望** 虽然玛纳斯河流域的积雪遥感研究已取得了阶段性进展,但是由于高寒山区地形条件的复杂性、高分辨率地形数据的缺乏、人迹罕至地区积雪地面观测数据的缺失、积雪及其下垫面后向散射的复杂性,目前流域的积雪遥感研究仍然受到许多限制,主要存在问题与继续深化方向包括:

(1)流域气象站点稀少,特别是上游高山地区人迹罕至,缺少气温、降水、雪深等常年观测数据,是流域积雪遥感研究的最大制约因素。目前已在流域布设了数十个地表温度传感器,但仍无法形成网络并实现对整个流域的有效覆盖。且地表温度与气温的差异显著存在,影响积

雪消融过程的最主要因素是气温而不是地表温度,所以还缺乏对气温的大范围长期观测.同时,还缺乏对降水、雪深等的传感器观测手段,亟需进一步探索和补充;

(2)流域缺乏与高分辨率遥感数据相匹配的高分辨率地形数据.目前在 SAR 与光学遥感数据的地形校正过程中仅采用公开获取的最高分辨率为 30 m 的美国 ASTER GDEM 数据,实际上在很大程度上影响了地形校正的精度.我国计划于 2018 年发射的 GF-7 立体测绘卫星,为解决该困境提供了可能的途径.

(3)SAR 与光学遥感数据联合识别积雪的瓶颈在于难以获取成像日期一致的数据.目前 GF-2 卫星已开始进入数据应用阶段,将与 GF-1 卫星联合对流域形成时间上的加密观测;计划于 2016 年发射的 GF-3 合成孔径雷达卫星有望与现有的卫星联合,提供时间上加密观测的 SAR 数据,与 GF-1、GF-2 等光学遥感数据进行联合识别.

(4)在山区复杂地形条件下,基于积雪和下垫面后向散射理论模型的雪密度、雪湿度、雪深、雪水当量等的 SAR 反演算法仍处于实验研究阶段,其实用化推广受到复杂的地形效应、复杂的地表粗糙度等因素的严重影响;同时 SAR 数据与地形数据的匹配误差、地面观测数据与 SAR 反演结果的尺度不一致性也较大地影响了积雪参数反演的精度,需要进一步研究.

(5)基于 InSAR 技术的雪深反演算法几何关系明确,但是对重复过境数据的轨道基线要求严格,且常因大气、积雪和下垫面特性的改变造成失相干现象,特别是在地形起伏较大的地区干涉效果较差,因此需要进一步从局部入射角改正、大气效应消除等方面对干涉测量过程进行优化.

(6)基于积雪热阻的雪水当量反演模型只需利用地面实测数据和秋、冬季两期 SAR 数据,既没有基于理论模型的反演算法对多频、重轨、多极化数据的需求,也没有干涉测量技术对两期 SAR 数据严格的轨道基线要求,更具实际应用价值.但雪密度在时间和空间上的不一致性会显著地影响积雪介电常数,进而影响两期

SAR 数据的后向散射系数比,它对雪水当量反演精度的影响需要进一步评估.

**致 谢** 感谢南京大学柯长青教授、佘江峰副教授、赵书河副教授,中国科学院寒区旱区环境与工程研究所王建研究员、李新研究员、车涛研究员、任贾文研究员、郝晓华副研究员、李弘毅副研究员,中国科学院新疆生态与地理研究所包安明研究员、李兰海研究员,乌鲁木齐气象卫星地面站张璞高工,中国科学院遥感与数字地球研究所鲁安新研究员,北京师范大学柏延臣教授,南京师范大学李硕教授,解放军理工大学关洪军教授等对玛纳斯河流域积雪遥感研究的帮助与支持.感谢“新疆天山玛纳斯河流域高分辨率积雪遥感研究”专栏的所有审稿专家对本期论文提出宝贵修改意见.

#### 参考文献

- [1] 施雅风,程国栋.冰冻圈与全球变化.中国科学院院刊,1991,(4):287-291.
- [2] 冯学智,李文君,史正涛等.卫星雪盖监测与玛纳斯河融雪径流模拟.遥感技术与应用,2000,15(1):18-21.
- [3] 曹梅盛,李新,陈贤章等.冰冻圈遥感.北京:科学出版社,2006,266.
- [4] 曹梅盛,冯学智,金德洪.积雪的若干光谱反射特征.科学通报,1982,(20):1259-1261.
- [5] 曹梅盛,冯学智,金德洪.积雪若干光谱反射特征的初步研究.冰川冻土,1984,6(3):15-26,99-102.
- [6] 冯学智.卫星雪盖制图及其应用研究概况.遥感技术与应用,1989,(1):25-28.
- [7] 冯学智.卫星雪盖制图中的一些技术问题.遥感技术与应用,1991,(4):10-15.
- [8] 王建.卫星遥感雪盖制图方法对比与分析.遥感技术与应用,1999,14(4):29-36.
- [9] 冯学智,李文君,柏延臣.雪盖卫星遥感信息的提取方法探讨.中国图象图形学报,2000,5A(10):836-839.
- [10] 冯学智,柏延臣,史正涛等.北疆地区积雪深度的克里格内插估计.冰川冻土,2000,(4):358-361.
- [11] 胡汝骥.中国天山自然地理.北京:中国环境科学

- 出版社,2004,443.
- [12] 林金堂,冯学智,肖鹏峰等.天山典型区卫星雪盖时空特征研究.冰川冻土,2011,33(5):971-978.
- [13] 林金堂,冯学智,肖鹏峰等.基于MODIS数据的玛纳斯河山区雪盖时空分布分析.遥感技术与应用,2011,26(4):469-475.
- [14] 林金堂,冯学智,肖鹏峰等.基于MODIS数据的玛纳斯河山区雪盖年际波动特征研究.干旱区地理,2011,(6):975-982.
- [15] 张文博,肖鹏峰,冯学智.基于地面观测数据的天山典型区积雪时间特征研究.沙漠与绿洲气象,2012,6(3):27-33.
- [16] 张文博.天山典型区积雪时段遥感研究.硕士学位论文,南京:南京大学,2012.
- [17] 袁敏,肖鹏峰,冯学智等.应用MODIS地表温度产品估计新疆典型区气温.遥感信息,2015,30(1):81-89.
- [18] 耶楠,冯学智,肖鹏峰等.玛纳斯河流域积雪遥感地面同步观测.南京大学学报(自然科学),2015,51(5):921-928.
- [19] 杨永可,冯学智,肖鹏峰等.玛纳斯河流域山区积雪反射光谱特征分析.南京大学学报(自然科学),2015,51(5):929-935.
- [20] 李云,赵书河,冯学智等.基于实测数据的新疆富蕴季节性积雪光谱分析.光谱学与光谱分析,2013,33(6):1593-1597.
- [21] 陈妮,冯学智,肖鹏峰等.玛纳斯河流域春季雪层参数特性分析.南京大学学报(自然科学),2015,51(5):936-943.
- [22] 汪凌霄,冯学智,肖鹏峰.新疆玛纳斯河流域卫星雪盖信息提取的影响因素分析.遥感信息,2011,26(5):27-33.
- [23] 汪凌霄.玛纳斯河流域山区积雪遥感识别研究.硕士学位论文,南京:南京大学,2012.
- [24] 汪凌霄,肖鹏峰,冯学智.天山典型林带积雪的多角度遥感识别.遥感学报,2012,16(5):1035-1053.
- [25] 蒋璐媛.玛纳斯河流域高分辨率遥感图像积雪识别.硕士学位论文,南京:南京大学,2015.
- [26] 蒋璐媛,肖鹏峰,冯学智等.山区复杂地形条件下GF-1卫星遥感雪面反射率计算.南京大学学报(自然科学),2015,51(5):944-954.
- [27] Zhu L, Xiao P, Feng X, *et al.* Support vector machine-based decision tree for snow cover extraction in mountain areas using high spatial resolution remote sensing image. Journal of Applied Remote Sensing,2014,8(1):084698.
- [28] 朱榴骏.多时相高分辨率遥感图像山区积雪协同识别.硕士学位论文,南京:南京大学,2015.
- [29] 郭金金,肖鹏峰,冯学智等.基于极化SAR图像的玛纳斯河流域典型区积雪识别.南京大学学报(自然科学),2015,51(5):966-975.
- [30] 周淑媛,肖鹏峰,冯学智等.基于马尔可夫随机场模型的SAR图像积雪识别.南京大学学报(自然科学),2015,51(5):976-986.
- [31] He G, Xiao P, Feng X, *et al.* Extracting snow cover in mountain areas based on SAR and optical data. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters,2015,12(5):1136-1140.
- [32] 贺广均,冯学智,肖鹏峰等.玛纳斯河流域山区积雪的C波段SAR图像表征.南京大学学报(自然科学),2015,51(5):955-965.
- [33] 贺广均.联合SAR与光学遥感数据的山区积雪识别研究.博士学位论文.南京:南京大学,2015.
- [34] 姜腾龙,赵书河,肖鹏峰等.基于实测数据的不同雪粒径光谱分析.冰川冻土,2009,31(2):227-232.
- [35] 姜腾龙.基于Hyperion高光谱影像的黑河流域上游典型区域雪粒径估算研究.硕士学位论文,南京:南京大学,2010.
- [36] 王剑庚,冯学智,肖鹏峰等.雪粒径对积雪双向反射率的影响.红外与毫米波学报,2013,32(3):283-288.
- [37] 王剑庚,冯学智,肖鹏峰等.雪粒径高光谱遥感估算模型研究.光谱学与光谱分析,2013,33(1):177-181.
- [38] 王剑庚.玛纳斯河流域山区积雪粒径的HJ-1卫星多光谱数据反演研究.博士学位论文.南京:南京大学,2013.
- [39] 王剑庚,冯学智,肖鹏峰等.玛纳斯河流域山区雪粒径HJ-1卫星反演.南京大学学报(自然科学),2015,51(5):987-995.
- [40] 李晖.新疆玛纳斯河流域积雪深度的InSAR反演研究.博士学位论文,南京:南京大学,2012.
- [41] 李晖,肖鹏峰,冯学智等.基于重轨InSAR的积雪深度反演方法.冰川冻土,2014,36(3):517-526.

- [42] 汪 左. 新疆玛纳斯河流域典型区雪水当量的 SAR 反演研究. 博士学位论文, 南京: 南京大学, 2014.
- [43] 汪 左, 冯学智, 肖鹏峰等. 基于合成孔径雷达图像的山区雪水当量反演. 南京大学学报(自然科学), 2015, 51(5): 996-1004.
- [44] 李海星, 冯学智, 肖鹏峰. 天山典型区卫星雪盖的年内变化特征分析. 遥感技术与应用, 2011, 26(3): 375-382.
- [45] 林金堂, 冯学智, 肖鹏峰等. 基于 MODIS 数据的玛纳斯河山区雪盖年内变化特征研究. 遥感信息, 2012, 27(2): 20-24.
- [46] Lin J, Feng X, Xiao P, *et al.* Comparison of snow indices in estimating snow cover fraction in a mountainous area in northwestern China. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2012, 9(4): 725-729.
- [47] 林金堂. 玛纳斯河流域山区卫星雪盖衰退过程研究. 博士学位论文. 南京: 南京大学, 2012.
- [48] 陈爱玲. 玛纳斯河流域雪盖衰退与融雪径流模拟. 硕士学位论文. 南京: 南京大学, 2014.
- [49] 谢顺平, 都金康, 冯学智等. 融雪径流模型参数渐进式优化率定方法. 南京大学学报(自然科学), 2015, 51(5): 1005-1013.
- [50] 郑文龙, 都金康. 基于 BP 神经网络的玛纳斯河流域雪盖率预测. 南京大学学报(自然科学), 2015, 51(5): 1014-1021.