

SRM 模型在玛纳斯河流域春季 洪水预警中的应用研究

张 璞^{1,2}, 王 建¹, 刘 艳², 李 杨²

(1. 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 甘肃 兰州 730000;

2. 中国气象局乌鲁木齐沙漠气象研究所, 新疆 乌鲁木齐 830002)

摘要:在玛纳斯河流域应用 SRM 模型进行日径流量的预报, 进一步完成对该流域春季融雪性洪水的监测和预警, 为防洪、抗旱、提高水资源利用提供技术支撑。引入中国气象局 T213 数值产品来进行流域分带温度和降水的预报, 为融雪径流预报开辟了新的数据方法。通过利用自主开发的融雪径流模拟预报软件 1.0 版对玛纳斯河流域肯斯瓦特水文站 2004 年春季融雪期进行径流量预报, 从 SRM 模型的两个精度评价指标看来, 预报结果比较满意。

关 键 词:SRM 模型; 融雪径流; 玛纳斯河; T213

中图分类号:TP 79 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-0323(2009)04-0456-06

1 引 言

洪水灾害是人类面临的主要自然灾害之一, 随着人类社会经济的不断发展, 洪水灾害所造成的经济损失与日俱增, 防洪风险越来越高, 防洪减灾的压力越来越大。新疆深居内陆, 是我国较为典型的高纬度干旱、半干旱地区, 天山北坡羽状排列着以高山冰雪融水和山区降水为主要补给来源的 40 余条大小河流。由于北疆地区冬季严寒、漫长, 积雪较多, 春季如遇快速升温天气, 导致山前平原以及中低山积雪消融, 极易引发融雪性洪水, 对当地农牧业生产和人民生命财产造成较大的损失。模拟、预报融雪径流量作为一个具有现实意义的课题而受到有关学者的极大重视, 我国学者在这方面进行了很多研究工作。曾群柱^[1]等应用 NOAA 气象卫星监测山区积雪面积随时间的变化, 为河西走廊黑河流域水管部门及刘家峡水库提供黑河春季融雪水量及水库入库流量预报(3 月下旬至 6 月上旬); 冯学智^[2]等运用改进后的 SRM 模型, 实现了对玛纳斯河肯斯瓦特水文站春季逐日流量的数值模拟; 李宏毅^[3]等应用 SRM 模型对黑河上游径流量进行了模拟。

目前, 融雪径流模拟模型种类繁多, 其中具有代表性且被广泛应用的模型是 SRM(Snowmelt Run-off Model)模型, 其目标是模拟及预报以融雪为主要河流补给源的山区流域逐日径流。这一模型自 1975 年由瑞士科学家 Martinec 首次推出后, 在世界各地进行了成功的模拟并成为国际气象组织唯一推荐的融雪径流模拟模型^[4]。SRM 模型的变量获取相对容易, 适合进行洪水预警的业务运行。本文通过引入流域雪盖数据的外推计算和天气模式预报的温度、降水数据, 能够利用 SRM 模型进行短期的日径流量预报, 从而为洪水预警提供依据。

2 研究区概况

玛纳斯河流域位于新疆准噶尔盆地南缘, 发源于天山北坡, 位于 43°20'~45°55'N, 85°00'~87°00'E, 全长约 400 km, 流域面积 5 156 km², 是准噶尔盆地最长的内陆河^[2]。该流域地形呈南高北低走势, 源头海拔 5 000~5 500 m, 有现代冰川分布, 面积达 608.25 km²。在天山山地中山区和前山区汇合了众多支流, 至前山的肯斯瓦特水文站流出山区进入山前平原, 海拔高度也随之降到 500 m 左右, 山地垂直地带性特征

收稿日期: 2009-03-06; 修订日期: 2009-05-05

基金项目: 中国气象局气象新技术推广项目(CMATG2006M19)、中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金项目(IDM200704)、863 项目(2008AA12Z201)和 973 项目(2006CB701305)共同资助。

作者简介: 张璞(1972—), 男, 副研究员, 主要从事遥感、计算机应用方面的研究。E-mail: zhangpu@idm.cn。

十分明显。由于垂直气候带的作用,该流域的降水分布也极不均匀,垂直自然景观带对其径流的影响也各不相同。分析结果表明,河源区的年降水量可达 600~700 mm,而在山前平原区则降至 100~200 mm 之间。山区降水成为玛纳斯河的主要径流补给。在 $12.80\times 10^8\text{ m}^3$ 的年总径流量中(肯斯瓦特水文站),

冰川融水补给的比重将占 34.6%。同时,季节性积雪及融雪径流也对玛纳斯河的春季径流量起着重要的调节作用。尽管融雪补给仅占年总径流量的 1.3% 左右,但由于冰雪融水对玛纳斯河春季径流的重要贡献,已成为天山北坡绿洲灌溉的宝贵水源,使玛纳斯河流域成为我国的第四大灌区。

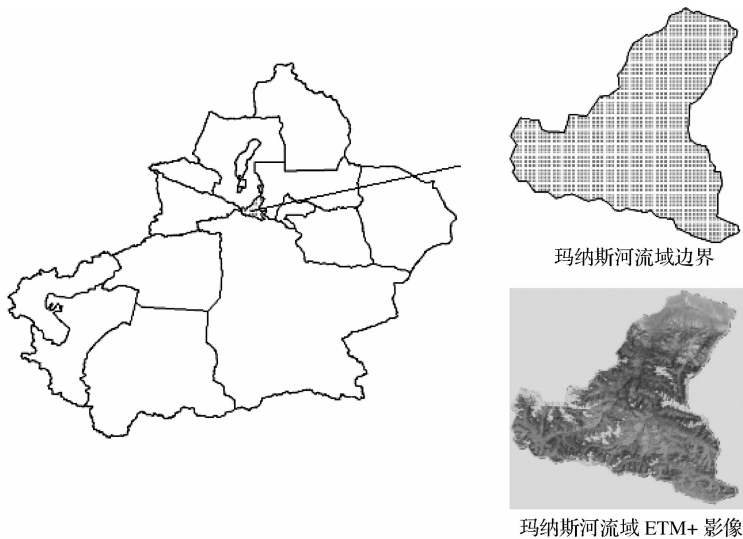


图 1 玛纳斯河流域位置示意图

Fig. 1 Geographical location of Manasi river basin

3 SRM 融雪径流模型简介

SRM 融雪径流模型是一种用来模拟和预报山区流域径流的水文模型。根据世界气象组织报告中所提出并且使用的分类方法,SRM 被归类为确定性、概念性、分布式和基于物理原理的一类水文模型,也是为数不多的采用遥感数据作为模型输入变量的水文模型。SRM 能够应用于不同的地理和气候条件,从湿润到半干旱地区;从 $0.76\sim 12\,000\text{ km}^2$ 的流域;从 $305\sim 7\,690\text{ m}$ 的海拔高程范围都有成功的应用^[3-6]。

SRM 模型共有 3 个输入变量:日气温、日降水和流域分带积雪覆盖率,气温、降水数据由常规气象观测获得,积雪覆盖率可从遥感数据反演得到。模型还有若干输入参数,包括径流系数、度日因子、退水系数等,这些基本上可由流域本身的特点确定。因此,SRM 是一种简单易用,适于进行日常业务的水文模型。

4 数据处理

4.1 资料来源

气象数据包括玛纳斯河流域周边的 10 个地面

气象观测站(乌兰乌苏、石河子、玛纳斯、沙湾、莫索湾、小渠子、乌鲁木齐牧试站、天山大西沟)2001~2004 年 1~12 月日均气温、日最高气温、日最低气温及日均降水数据。

水文数据由石河子水文水资源勘测局提供,包括 2001~2004 年玛纳斯河流域肯斯瓦特水文站的日径流量、降水和平均温度资料。

遥感数据从 NASA 下载 MODIS8 日合成积雪覆盖产品(MOD10A2),选用 2001~2004 年 1~12 月玛纳斯河流域所涉及的 157 景 MODIS 影像数据。通过 MODIS 产品处理软件 MRT(MODIS Reprojection Tool)对 MODIS 积雪覆盖合成数据产品进行镶嵌、地理几何校正与重采样等处理。

预报温度降水数据采用中国气象局 T213 数值预报产品。

4.2 基于 DEM 的玛纳斯河流域信息提取

流域信息是进行水文模拟的必要信息,也是进行水文模拟及其它相关研究的前提。由于流域信息种类多、数据量大,利用现代测量技术、计算机技术及相关方法进行流域信息自动提取具有十分重要的意义。近年来,随着地理信息系统(GIS)的应用及精确详细的数字高程模型(Digital Elevation Mod-

el,DEM)数据的方便获取,利用 DEM 提取流域信息已经开展了广泛的研究。

应用 ESRI ArcMap 软件中的水文分析(Arc Hydro Tools)、空间分析(Spatial Analyst)模块在 83 m×83 m 精度的 DEM 数据上提取河网及相关流域信息。具体包括以下操作过程:DEM 的预处理(洼地标定、抬升及小平地起伏);流向确定的各种方法(单流向法和多流向法);集水面积的确定和河流栅格点的生成;流域水系提取方法;子流域提取及划分等。

4.3 流域各分带积雪覆盖率的计算

理论上,积雪覆盖率可以通过每天的遥感影像经积雪制图来获得,但由于传感器、云、地形等因素影响,需对每天的积雪覆盖图进行最大合成处理后才能获得比较真实的地表积雪覆盖图。试验所用积雪覆盖图由 MODIS8 日合成积雪覆盖产品 MOD10A2 计算获得,这样最大程度地降低了云层的影响。

由于玛纳斯河流域内地形与下垫面的差异,积雪分布和热量分布随高程不同具有很大的差异。因此,按照高程分带提取积雪覆盖率可以提高融雪径

流模拟和预测精度。根据天山地区自然地理分带情况,将玛纳斯河流域按高程分为 4 个高程区,如表 1 所示,流域海拔 3 600 m 以上为高山终年积雪区,为带 4;海拔 1 500~3 600 m 为中山区,山峦叠嶂,沟壑纵横,其中海拔 2 700~3 600 m 地表植被发育较好,为高山高寒草甸,为带 3;1 500~2 700 m 之间多天山云杉、灌木,是降雨径流主要形成区,为带 2;1 500 m 以下至 600 m 为低山丘陵区,为带 1。

积雪覆盖产品是一种栅格数据,使用 DEM 与遥感图像配准后进行一系列的图像逻辑和代数运算,可以达到提取流域和分高程带雪盖面积的目地,图 2 为积雪分类图与高程分带图的叠加。遥感数据和地形数据进行复合分析最为重要的是数据类型和格式的转换与几何配准。由于地形数据来源不同,比例尺和投影也有差异,所以在信息复合进行空间分析之前需将数据转换到一个统一的坐标体系当中去,本文采用的是双标准纬线等积圆锥投影(ALBERS 投影)。MODIS 遥感数据在几何校正过程中均按这一投影方式进行变换。

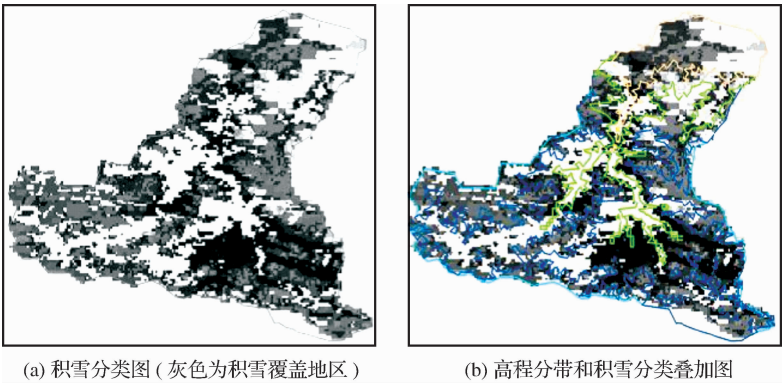


图 2 积雪分类图,高程分带和积雪分类叠加图

Fig. 2 Left for snow classification and snow coverage in grey ,right for elevation zonal division and snow classes overlapping

表 1 玛纳斯河流域高程分带表

Table 1 Elevation zonal division of Manasi river basin

分带名	积雪特征	海拔高度(m)	面积(m ²)	平均海拔高度(m)	植被类型
1	瞬时斑状不连续积雪带	877~1 800	661.15	1 258	低山荒漠草原
2	片状不连续积雪带	1 800~2 700	647.48	2 255	云杉林带
3	片状不连续积雪带	2 700~3 600	2 691.91	3 205	高山高寒草甸
4	冰川及永久性积雪	3 600~4 922	1 437.27	4 346	冰雪带

4.4 积雪覆盖衰减曲线

玛纳斯河流域积雪消融期的 3~6 月积雪覆盖衰减曲线由 2001~2004 年该流域 MOD10A2 资料计算获得。积雪衰减曲线的制作过程具体如下,首

先将流域分带矢量图与流域积雪图叠加得到每幅遥感影像在各个分带的积雪图。其次,对每个分带内积雪面积和无积雪面积作统计,用积雪面积比上分带总面积得到分带积雪覆盖率。然后,按照时间序

列绘制这些积雪覆盖率,剔除消融期出现的偶然降雪(此种降雪维持时间不长,保持几天左右)等异常点后,利用 Origion 插值模块对保留下来的积雪覆盖率数据进行插值后得到流域每个分带积雪覆盖率衰减曲线。图 3 为玛纳斯河流域分为 4 个带时,每个带的积雪覆盖率平均衰减曲线。从图中可以看出,各高程带积雪覆盖率在 3 月后达到最大值,带 1 内积雪在 3 月底融化完毕,带 2 内积雪在 5 月上旬融化完毕,海拔较高的带 3、4 到 6 月积雪消融才停止并保持稳定。

4.5 雪盖百分比数据预测

在融雪径流预测预报中,积雪覆盖率是一个重

要的输入变量,但是受积雪覆盖率获取周期及现时性限制,本文尝试利用流域历史平均积雪覆盖率衰减曲线进行积雪覆盖率的预测分析,预测周期为 3 d。在积雪衰减曲线的制作过程中,分析 2001~2004 年历年各带积雪覆盖曲线,发现其趋势较为相似,故取其平均值进行积雪覆盖率的短时预测具有一定的可行性。具体实现如下,首先计算预测期前 5 d 遥感制图获取的各带积雪覆盖率数据与玛纳斯河流域由 2001~2004 年积雪制图获取的平均积雪覆盖率衰减曲线进行比较分析,取其差值后,再将其后 3 d 历史积雪覆盖率与这一差值做计算,结果作为预测积雪覆盖率数据,输入到 SRM 预测模型中。

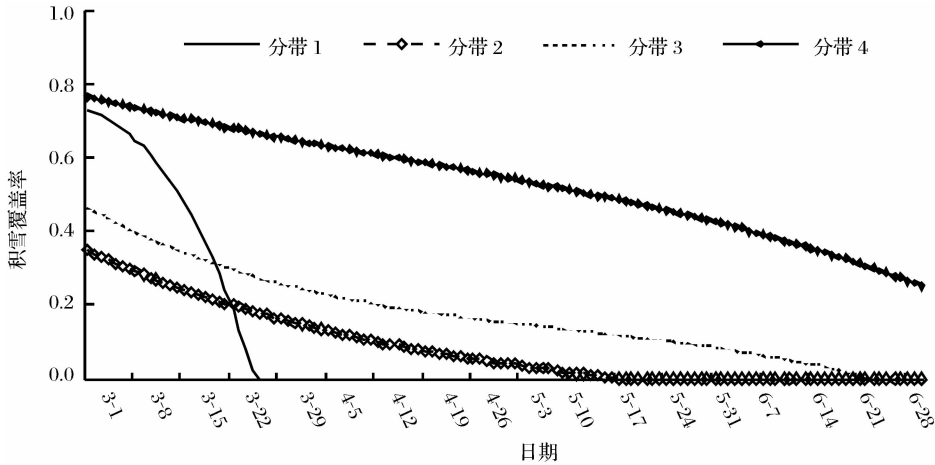


图 3 2001~2004 年玛纳斯河流域春季平均积雪衰减曲线
Fig. 3 Spring mean snow decay curve of Manasi river basin from 2001 to 2004

4.6 温度、降水数据预测

气象信息综合分析处理系统(MICAPS)是对气象业务预报员日常工作提供全程支持的自动化系统。它以 WINDOWS 系统作为操作平台,数据组织层次清晰、检索方便、图形操作和编辑便捷、可利用数据资源丰富,并提供了多种数据检索方式和较强的数据预处理和系统处理功能^[7]。T213 数值预报产品通过 9210 通讯系统下发,温度预报未来 7 d 的温度格点场,有两个预报时次:20 时和 08 时,从 1 000 hpa到 100 hpa 共 11 层,为全球格点资料,1×1 网格;降水预报未来 5 d 的降水格点场,有两个预报时次:20 时和 08 时,为中国格点资料,1×1 网格。

从上述数值预报产品中通过插值计算可以得到流域各分带未来 3 d 的日平均温度和日降水量。

5 运行结果与分析

5.1 日径流量模拟

为便于径流预报的业务化运行,我们根据 Win-

SRM 1.10 版本用户手册开发了“融雪径流模拟预报软件 1.0 版”(SRSFS 1.0),在部分算法上进行了优化改进。图 4 为分别运用这两个软件对玛纳斯河肯斯瓦特水文站 2004 年 3~6 月日径流量进行模拟的结果。图中柱状图为实测的日径流量,实线为 SRSFS 1.0 模拟的结果,虚线为 WinSRM 1.10 模拟的结果。两种软件模拟结果基本吻合。通过模拟和实测的流量过程线的比较,可以比较直观地检验和评价模拟结果的效果。SRM 模型采用两个常用的精度分析指标来评价模拟结果。即,无量纲的拟合优度确定系数 Nash-Sutcliffe 系数 R^2 和体积差 $D_v[\%]$ (Martinec and Rango, 1989):

$$R^2=1-\frac{\sum_{i=1}^n(Q_i-Q'_i)^2}{\sum_{i=1}^n(Q_i-\bar{Q}_i)^2}$$

(1)

其中: Q_i 为实测的日径流量; Q'_i 为模拟得到的日径流量。

$$D_v[\%]=\frac{V_R-V'_R}{V_R}\cdot 100$$

(2)

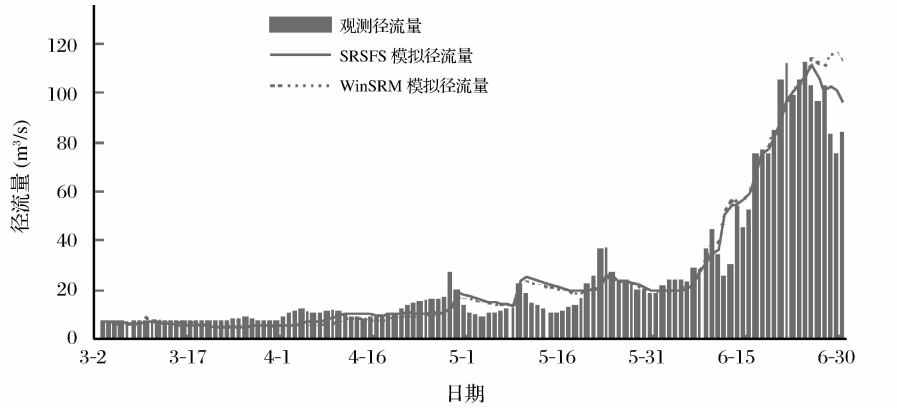


图 4 2004 年春季肯斯瓦特水文站日径流量模拟

Fig. 4 Daily runoff modeling for the Kensiwater hydrological station in spring, 2004

其中: V_R 为实测的模拟融雪期的径流体积; V'_R 为模拟得到的相应融雪期的径流体积。

R^2 的数值范围是 0 到 1, 值越大表示模拟精度越高。 D_v 可以是任何数值, D_v 的绝对值越小表明模拟的结果越好。根据世界气象组织对主要融雪模型的评价结果, SRM 在融雪季节模拟中 R^2 平均值为 0.811, D_v 的平均值为 5.97%^[4]。本次模拟结果的精度指标 $R^2=0.94$ 和 $D_v=-1.4\%$ (见表 2), 达到了比较好的模拟效果。

表 2 2004 年肯斯瓦特水文站日径流量模拟预报评价指标

Table 2 Precision indexes of daily runoff modeling in the Kensiwater hydrological station in spring, 2004

评价指标	模拟	预报 1 d	预报 2 d	预报 3 d
R^2	0.94	0.93	0.90	0.87
D_v	-1.4%	-1.6%	-3.3%	-4.9%

5.2 日径流量预报

对日径流量的预报在软件中实际上是按照模拟的方法来实现的。不同之处在于模拟的时候, 所有模型输入变量都是已知或实测数据; 而预报的时候, 在预报期中的变量是未知的, 需要通过其它方法预测出来, 然后输入模型进行模拟。这样, 在预报期模拟出的日径流量就是预报的径流量数据。在日常业务运行中, 程序根据未来 3 天的温度、降水和流域分带雪盖百分比预测, 结合前期的变量数据, 模拟出未来 3 天的日径流量。这样, 当一个融雪季(3 月 1 日到 6 月 30 日)结束时, 就得到了 3 条日径流量预报曲线。

本文利用对未来 3 天的温度、降水和流域分带雪盖百分比预测值循环代入 2004 年 3 月~6 月融雪期, 对未来 3 天的肯斯瓦特日径流量进行预报, 结果如图 5 所示。从 SRM 模型的两个精度评价指标可以看出, 预报结果还是比较满意的。

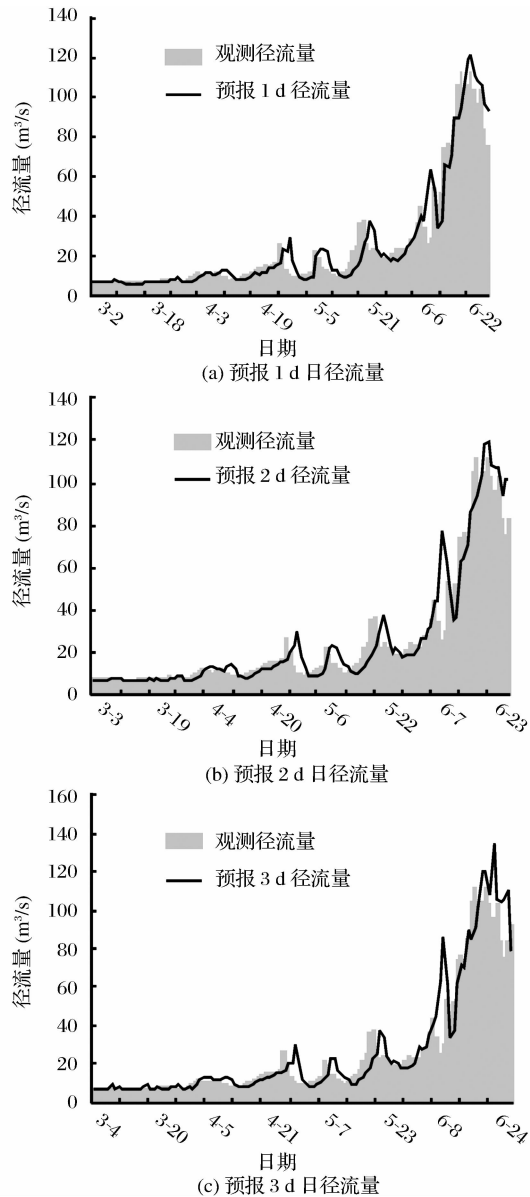


图 5 2004 年春季肯斯瓦特水文站日径流量未来 3 d 预报

Fig. 5 The next three-day daily runoff forecast in the Kensiwater hydrological station in spring, 2004

6 结 语

SRM 模型作为世界气象组织唯一推荐的融雪径流模拟模型,在世界各地很多流域进行了成功的模拟,具有简单易用、精度较高的特点。利用 SRM 模型进行径流量预报的关键是如何对模型所需输入变量进行预报,预报量准确了,则模型的输出结果就可以尽可能的逼近真实值。目前在温度、降水的预报方面,有很多数值预报产品,本文尝试使用中国气象局 T213 数值产品来进行流域分带温度和降水的预报,是为了更好地与业务系统相衔接。通过在玛纳斯河肯斯瓦特水文站应用 SRM 模型对日径流量进行预报,取得了较为满意的结果。从对出山口径流量的监测,到进一步完成对流域春季融雪性洪水的监测和预警,为防洪、抗旱、提高水资源利用、指导农牧业生产提供有力的技术支撑。

参考文献:

[1] Zeng Qunzhu. Application of Meteorological Satellite Data for Forecasting Snowmelt Runoff and Detection of Snow-ice[J]. Remote Sensing Information, 1990, 3: 29-29. [曾群柱. 气象卫星资料在冰雪监测、融雪径流预报等方面的应用[J]. 遥感信息, 1990, 3: 29-29.]

[2] Feng Xuezhi, Li Wenjun, Shi Zhengtao, *et al.* Satellite Snow-cover Monitoring and Snowmelt Runoff Simulation of Manas

River in Tianshan Region[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2000, 15(1): 18-21. [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[J]. 遥感技术与应用, 2000, 15(1): 18-21.]

[3] Li Hongyi, Wang Jian. The Snowmelt Runoff Model Applied in the Upper Heihe River Basin[J]. Journal of Glaciology and Geocrylogy, 2008, 30(5): 769-775. [李弘毅, 王建. SRM 融雪径流模型在黑河流域上游的模拟研究[J]. 冰川冻土, 2008, 30(5): 769-775.]

[4] Martinec J, Rango A, Roberts R. Snowmelt Runoff Model (SRM) User's Manual. Updated Edition 2005, WinSRM1. 10 [S]. USDA Jornada Experimental Range, New Mexico State University, Las Cruces, U. S. A.

[5] Wang Jian, Ma Mingguo, Paolo Federicis. Simulating Snowmelt Runoff Using GIS and in Mountainous Watershed of Italy Remote Sensing Data[J]. Journal of Glaciology and Geocrylogy, 2001, 23(4): 436-441. [王建, 马明国, Paolo Federicis. 基于遥感与地理信息系统的 SRM 融雪径流模型在 Alps 山区流域的应用[J]. 冰川冻土, 2001, 23(4): 436-441.]

[6] Ma Hong, Cheng Guodong. Snowmelt Runoff Simulation in Gongnaisi River Basin by the Using of SRM[J]. Chinese Science Bulletin, 2003, 48(19): 2088-2093. [马虹, 程国栋. SRM 融雪径流模型在西天山巩乃斯河流域的应用试验[J]. 科学通报, 2003, 48(19): 2088-2093.]

[7] China Huayun Technology Development Company. Meteorological Information Comprehensive Analysis And Process System MICAPS2.0 User's Manual[S]. [中国华云技术开发公司. 气象信息综合分析处理系统 Micaps2.0 帮助手册[S].]

Application of SRM to Flood Forecast and Forwarning
of Manasi River Basin in Spring

ZHANG Pu^{1,2}, WANG Jian¹, LIU Yan², LI Yang²

(1. Cold and Arid Regions Environment and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China; 2. Institute of Desert Meteorological China Meteorological Administration, Urumqi 830002, China)

Abstract: SRM is used for daily runoff forecast of Manasi river basin. Snow-melting flood of the basin in spring is monitored and warned technically for the purpose of flood control, drought resistance, and water resources utilisation. Innovatively, using CMA T213 metereological data to forecast zonal temperature and precipication of the basin is regarded as a data eploratory analysis of snow-melting runoff. With our self-developed version 1.0 software of snow-melting runoff simulation and forecast, pariticularly we make a forecast of snow-melting runoff in the Kensiwate hydrological station of Manasi river basin in spring, 2004. Two precision indexes of the forecast model SRM has shown the reliability of the forecast results.

Key words: SRM; Snow-melting runoff; Manasi river; T213