

基于遥感的径流丰枯与高山区积雪关系分析 ——以天山玛纳斯河流域为例^{*}

刘 艳, 张 璞

(中国气象局 乌鲁木齐沙漠气象研究所, 乌鲁木齐 830002)

摘 要:山区降水和高山冰雪融水是玛纳斯河流域径流的重要补给来源。利用 MODIS 陆表遥感数据 MOD10A2 提取 2001 - 2007 年 1 - 12 月流域积雪覆盖数据。用肯斯瓦特水文站 1957 - 2007 年径流资料为样本分析年径流丰枯演变规律。选择径流丰水年和枯水年,重点分析融雪期 4 - 7 月径流量与 1 - 5 月流域积雪面积和高山区气温 - 降雨的关系。结果表明: 流域内积雪分布年内变化特征显著:8 月中旬至次年 1 月上旬为积雪增长期;1 月中旬至 8 月上旬为积雪衰减期; 流域流量 20 世纪 90 年代以来持续增加,但 2002 年、2003 年出现丰水和枯水现象; 在春季,流域水资源主要以融雪径流方式为主,春季随着气温的升高,积雪面积逐渐变小,流量逐渐增加; 冬季山区积雪面积越大,以固态形式存储的水量亦越大,春夏季随着气温的升高,积雪消融速率越大,河流来水量就越丰富。

关键词:冰雪融水; 玛纳斯河; MOD10A2; 积雪覆盖; 径流丰枯

中图分类号: P332; TP79

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2010)03-0044-05

Analysis on the Correlation between Abundant or Low Runoff and Alpine Snow Cover Based on Remote Sensing Data ——A Case Study of Manasi River Basin in Tianshan Mountain

LIU Yan, ZHANG Pu

(Institute of Desert Meteorological, China Meteorological Administration, Urumqi 830002, China)

Abstract: Alpine precipitation and snowmelt are the main source to the runoff of Manasi river. Based on MOD10A2, land remote sensing inspecting data from MODIS, monthly snow cover area data from 2001 to 2007 in the study basin are made. By using all-year runoff data from 1957 to 2007 in Kensiwate hydrological station, the character of abundant or low runoff in the study period is analyzed. This paper emphatically analyzes the correlation between runoff in snowmelt period, from April to July, and alpine snow cover and temperature from January to May in different zones classified by the elevation in the basin. The results are as follows: There is notable character in the monthly change of snow cover area in the study basin. In the period from the middle ten days of January to the first ten days of August, snow cover area gradually reduces. And it gradually increases in the other period. The runoff amount in the basin has been increasing since 1990s and became abundant in 2002 and low in 2003. In spring, snowmelt is the main supplies to the water resource of the basin. As the result of the gradually rising temperature, snow cover area reduces and runoff increases from day to day. The more alpine snow cover area accumulated in winter, the more solid-state water stored. As temperature rises more quickly in the spring, the rate of snowmelt is more rapidly and runoff in the river channel becomes more abundant.

Key words: snowmelt; Manasi river; MOD10A2; snow cover; abundant or low runoff

^{*} 收稿日期: 2009-10-09

基金项目: 科技部公益行业(气象)科研专项(GYH Y200706008); 中央级公益性科研院所基本科研业务项目(IDM200808)

作者简介: 刘艳(1978-), 女, 助理研究员, 主要从事遥感和积雪、植被变化监测等方面的研究。E-mail: lyliuyan2003@163.com

以往研究表明,作为冰雪融水性河流,玛纳斯河(以下简称“玛河”)径流变化与气候变化关系密切^[1-6]。流域内高山冰川区气象、水文站网稀少,直接获得高山区气温、降雨和积雪等气象观测资料非常困难。因此,这些研究主要分析了径流量与气温、降水的关系。气象要素影响下高山区冰雪如何变化及如何补给径流?径流丰枯演变与高山区积雪变化的关系如何?这都依赖于更全面地收集资料和进一步提高监测手段。近年出现的MODIS数据可为大尺度资源调查提供更好的数据源^[7-8],在积雪动态监测方面具有比较明显的优势。与传统卫星影像相比,MODIS是当前世界上新一代“图谱合一”的中分辨率光学遥感仪器,具有高效的数据存储格式(HDF)、信息丰富、数据获取快和覆盖范围广等特点,每日两次获取全球36个光谱波段的地球综合信息观测数据^[9-11],有利于捕捉地面积雪、植被覆盖等的动态变化信息。

以玛纳斯河为研究对象,利用2001-2007年MODIS 8日合成全球雪盖数据(MOD10A2)、1957-2007年玛纳斯河流域出山口肯斯瓦特水文站年径流量以及2001-2007年水文站逐日平均径流量、气温和降雨等数据,重点分析流域积雪分布特征和近57a来流域径流的丰枯演变规律及气象要素作用下对积雪覆盖对径流丰枯的影响作用。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

玛河流域位于准噶尔盆地南缘,南起依连哈比尔尕山,北接古尔班通古特沙漠,东起塔西河,西至巴音沟河,汇集十多条支流,河流贯穿山地-绿洲-荒漠系统,地表过程复杂,是北疆地区的一个典型流域。玛河流域冬季寒冷漫长,冬季降水(11月-翌年3月)以积雪形式储蓄在天山北坡的中低山一带,到了夏季(6-8月)主要融水进入河槽,该流域的河流具有明显的夏汛特点。

1.2 研究材料

主要利用以下数据:(1)遥感数据。NASA Earth Observing System Data Gateway 数据中心定制的2000-2008年1-12月769景MODIS 8日全球雪盖产品MOD10A2,8日合成MOD10A2最大程度地降低了云层的影响。MOD10A2主要利用积雪在不同波段的光谱反射特征来计算,空间分辨率为500 m×500 m,时间分辨率为8 d。MOD10A2

以ISIN(Integerized Sinusoidal)一种全球投影格式存放,它把全球影像数据划分为36列×18行的方格网,每一格表示一个文件产品的存放区域,以0开始记录文件的位置行列号,如文件名中的h23v04表示第24行第5列所在位置。新疆覆盖h23v04、h23v05、h24v04、h24v05、h25v04、h25v05共6个区域。玛河流域覆盖了h23v04、h24v04。(2)气象数据:肯斯瓦特水文站1957-2007年逐日径流数据;1995-2008年逐日平均气温、降雨数据。(3)辅助数据:天山山区DEM数据,空间分辨率83 m×83 m。北疆地区地、州、市和县级行政分区、河流、湖泊和水库、道路数据。

1.3 研究方法

1.3.1 玛河流域提取及流域分带 利用ArcMap hydrology Modeling 模块对天山山区DEM数据进行流向分析、流水累积量计算、提取河流网络及矢量数据,根据指定流域面积大小进行流域分析,提取玛河流域,生成流域边界矢量数据。然后,根据DEM分类指标(表1),利用ERDAS Modeler 模块对流域DEM数据进行分类运算,经栅格-矢量转换后获取流域各分带矢量边界数据并进行投影转换,采用WGS84坐标系双标准纬线阿尔勃斯等面积圆锥投影(Albers conical equal area projection)。

1.3.2 流域积雪面积计算 利用MRT(MODIS Reprojection Tool)对MOD10A2数据进行地理几何校正与重采样批处理,进行双标准纬线阿尔勃斯等面积圆锥投影,提取积雪覆盖数据。然后,利用流域边界矢量数据进行MASK掩模处理,获取玛河流域积雪覆盖数据。根据MOD10A2数据key信息,判读并统计积雪覆盖(snow=200)及云覆盖(cloud=50)像元数目,最后,计算出流域积雪覆盖及云覆盖面积。

1.3.3 流域分带气温栅格数据生成 流域内气象、水文资料很少,只在流域出山口肯斯瓦特设有水文站,提供水文和气象要素数据,流域上游地区没有实测资料。因此,只能采取递推方法获取高山区气温数据。一般来说山区降水和气温的垂直地带性明显,通常降水量总体上随着高程的上升而增加,气温的分布与降水相反,高度增加气温降低。

$$Tem_{high} = (H_{low} - H_{high}) / 100 \times 0.06 + Tem_{low} \quad (1)$$

式中:Tem——温度; H_{low} 、 H_{high} ——为各分带的平均海拔高度,low表示海拔低的带,high为海拔高的带。

1.3.4 流域分带平均气温和积雪面积计算 利用各分带边界数据对插值气温栅格数据、积雪覆盖数据进行 MASK 掩模处理,获取各带气温栅格数据和各带 8 日合成积雪分布影像数据,然后计算影像平均值即得各带平均气温和 8 日合成积雪覆盖数据。最后,利用 Originpro 插值模块对 8 日序列积雪面积数据进行插值运算,最终获取流域各分带逐日积雪面积。

1.3.5 数据分析 利用计算机技术,采用统计分析方法,建立相关模型。

表 1 玛河流域垂直分布带及积雪-植被分布特征

分带	积雪特征	海拔/m	面积/km ²	平均海拔/m	植被类型
a	瞬时斑状不连续积雪	877~1800	661.15	1258	低山荒漠草原
b	片状不连续积雪	1800~2700	647.48	2255	云杉林带
c	片状不连续积雪	2700~3600	2691.91	3205	高山高寒草甸
d	冰川及永久性积雪	3600~4922	1437.27	4346	冰雪带

2.2 流域内积雪分布季节变化

四季更替,积雪随之发生变化,主要表现在积雪覆盖面积和积雪深度两个方面。本文利用 MOD10A2 积雪面积数据制作了积雪覆盖面积的变化曲线,用以描述积雪面积在积累和消融期间逐渐变化的过程。2000 - 2008 年平均积雪覆盖面积的年际变化显示,流域积雪面积变化可以分为两个阶段,见图 1。

段(8月中旬-次年1月上旬):增长期。积雪覆盖面积逐旬增长,并达到最大值。

$y = 0.2397x^3 - 8.182x^2 - 82.438x + 4197.5$

(相关系数 $R = 0.93$) (2)

段(1月中旬-8月上旬):衰减期。积雪覆盖面积逐渐减少,积雪逐渐消融。

$y = -2.4161x^3 + 79.728x^2 - 446.36x + 1452.9$

(相关系数 $R = 0.96$) (3)

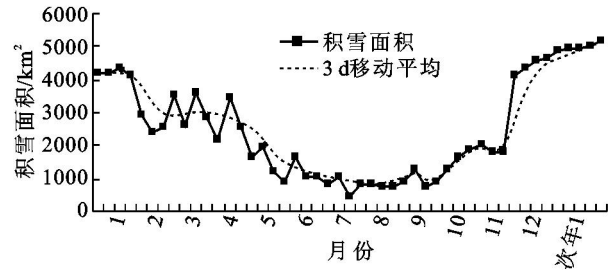


图 1 流域积雪覆盖面积变化曲线图

2.3 径流丰枯特征分析

《水文情报预报规范》对径流丰枯情况的划分标准规定为,按距平百分率 P 。

$$P = \frac{\text{某年流量} - \text{多年均值}}{\text{多年均值}} \times 100\% \quad (4)$$

2 结果分析

2.1 流域分带地貌特征

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十分明显。流域内冰川面积占天山北坡冰川面积的 32%,除冰川覆盖外,流域内另有少量森林和高山草甸。

$P > 20\%$ 为丰水; $10\% < P \leq 20\%$ 为偏丰; $-10\% < P \leq 10\%$ 为平水; $-20\% < P \leq -10\%$ 为偏枯; $P < -20\%$ 为枯水。以肯斯瓦特水文站 51 年(1957 - 2007)径流资料为样本分析玛河流域年径流丰枯水演变规律(图 2)。结果显示,玛河流量在 20 世纪 90 年代以来持续增加,但在 2002 年、2003 年出现历史上罕见的丰水和枯水现象(表 2)。

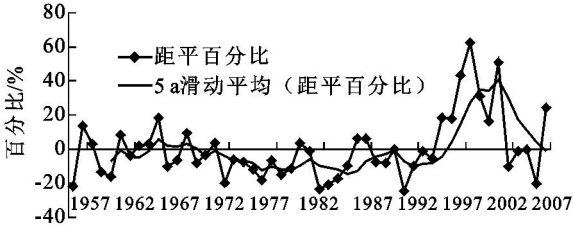


图 2 1957 - 2007 年肯斯瓦特水文站年平均径流量变化

2.4 径流丰枯演变与积雪覆盖关系

玛河径流丰枯演变规律表明,2000 - 2007 年间,2002 年径流量最大,2003 年、2006 年两年流量相当,低于历年平均。本文以 2002 年、2003 年数据为例找寻径流丰枯突变的原因。

2.4.1 冬季积雪量估计 积雪量的估计是流域水量平衡的重要组成组分。在没有达到融化条件时,积雪以固态形式储存在流域内,形成一个特定的蓄水体,这个蓄水体对流域水文过程起一定的调蓄作用。由表 3 可见,2003 年,径流偏枯,冬季最大积雪覆盖面积为 3 655.62 km²,占总流域的 68%,5 月山区积雪覆盖率占 31%;2002 年,径流丰水,冬季最大积雪覆盖面积高达 80%,5 月山区积雪覆盖率为 47%。可见,冬季积雪面积越大,为春夏季河道来水储备的水源也越丰富。

表 2 肯斯瓦特水文站 2000 - 2007 年年径流量及丰枯特性								
项目	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	均值 (1957 - 2007)
年径流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	16741.04	21663.16	12903.31	14205.59	14362.91	11483.3	17894.40	14375.69
P/ %	16.45	50.69	- 10.24	- 1.18	- 0.09	- 20.12	24.48	-
丰枯	偏丰	丰水	偏枯	平水	平水	偏枯	丰水	-
4 月流量	9.67	9.04	8.35	12.50	10.40	10.36	9.57	9.50
5 月流量	20.20	32.90	16.80	17.70	18.10	20.57	26.60	22.47
6 月流量	79.00	139.00	68.90	65.00	63.50	76.12	67.30	73.17
7 月流量	119.00	202.00	103.00	145.00	128.00	137.65	176.00	135.78

表 3 1 - 5 月流域积雪覆盖最大面积 km^2					
年份	1 月	2 月	3 月	4 月	5 月
2002	3939.13	4293.77	3918.00	2687.92	2508.98
2003	3298.42	3655.62	2654.26	2578.50	1683.91

2.4.2 气温 - 降雨要素分析 肯斯瓦特水文站降雨观测数据统计结果显示(表 4),2002 年、2003 年 3 - 6 月出现降雨天数分别为 40 d 和 39 d,降水基本

相当。由此可见,降雨不是引起 2003 年径流偏低的主要原因。计算 3 - 6 月流域不同高度带 0 平均气温的累积积温(图 3)。结果显示,低山荒漠草原带(a),2002 年、2003 年累积积温大小相当;云杉林带(b),2002 年出现正积温提前 2003 年月 30 d;高山区的高山高寒草甸(c)和冰雪带(d),2002 年积温明显低于 2003 年。

表 4 2002 和 2003 年肯斯瓦特水文站日平均降雨比较												
年份	3 月			4 月			5 月			6 月		
	降雨 时间/ d	最大降 雨量/ mm	总降 雨量/ mm	降雨 时间/ d	最大降 雨量	总降雨 量/ mm	降雨 时间/ d	最大降 雨量	总降雨 量/ mm	降雨 时间/ d	最大降 雨量	总降雨 量/ mm
2002	6	9.9	2.18	14	17.7	5.29	9	10.3	2.79	11	10	7.08
2003	6	11.5	1.63	12	3.3	2.48	11	10.9	4.29	10	8.4	2.43

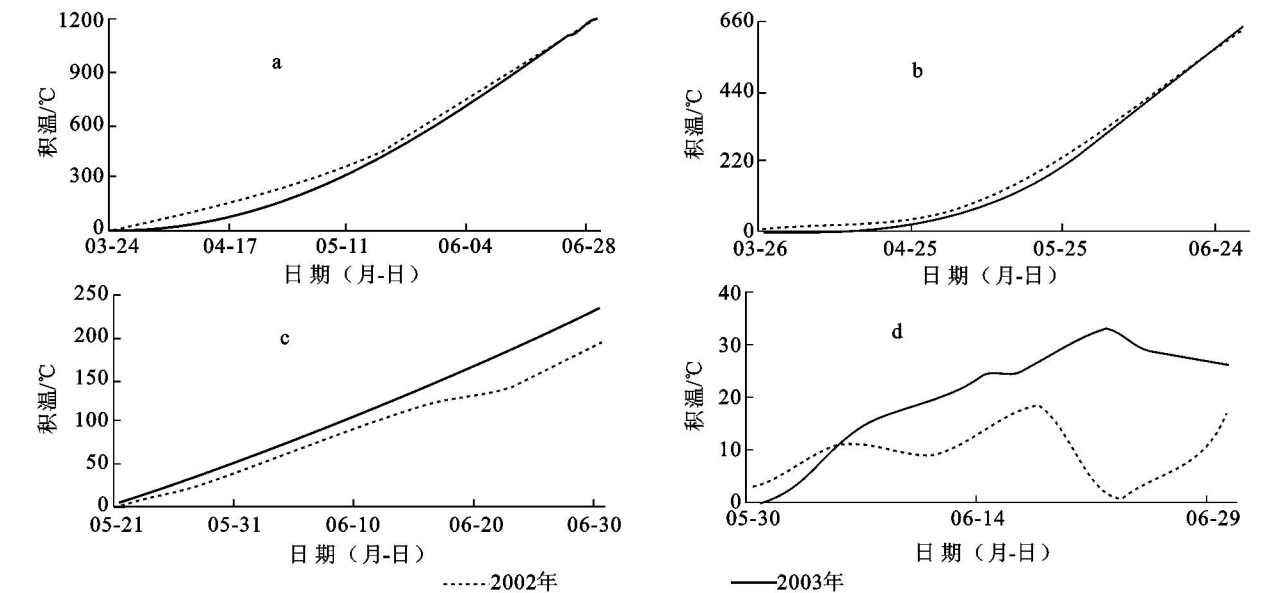


图 3 流域各分带 3 - 6 月 0 积温化曲线(图 4)。

低山荒漠草原带。2002 年和 2003 年最大积雪面积相当。2002 年积雪较 2003 年积雪先消融完结,且该年积雪消融速率大于 2003 年的。原因在于,该带 2002 年 3 - 6 月累积正积温大于 2003 年积温(图 4a);

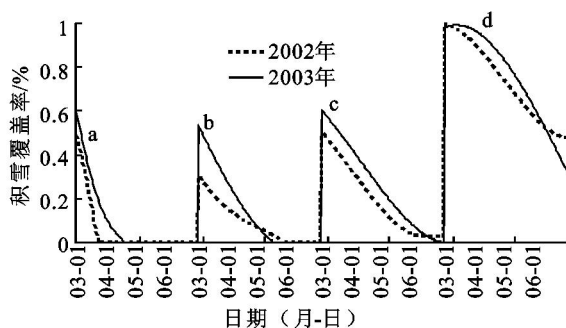


图 4 2002 年和 2003 年流域分带积雪融化速率比较

云杉林带。该带最大积雪面积 2002 年低于 2003 年,但其消融速率明显高于 2003 年的。原因在于,2002 年出现正积温日期提前 2003 年约 1 个月,且 2002 年积雪面积显著小于 2003 年积雪面积(图 4b);

高山高寒草甸。该带最大积雪面积 2002 年略低于 2003 年,积雪消融速率两年相当,6 月后,2002 年消融速率下降,积雪缓慢消融。原因在于,6 月前,2002 年累积正积温与 2003 年累积正积温大小相当,之后降低(图 4c);

冰雪带。2002 年和 2003 年最大积雪面积相当。2002 年积雪消融速率明显低于 2003 年的,后期有所增大。原因在于,2002 年累积正积温明显低于 2003 年累积正积温(图 4d)。6 月中旬后,2002 年温度增加趋势和幅度显著,造成后期积雪消融速率出现增加趋势。

综上所述,春季随气温上升,浅山区和中高山区的薄雪区、中厚雪区和厚雪区的积雪会大部或部分融化,表现为积雪面积缩小,积雪融化汇入河道流出山区。

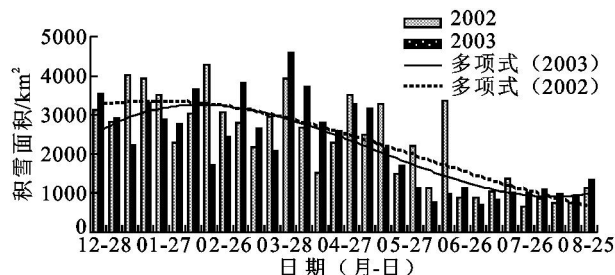


图 5 2002 年和 2003 年流域积雪融化速率比较

全流域(图 5)。在整个融雪期(1 月中旬至 8 月上旬),2002 年,随气温升高,流域积雪迅速消融,积雪消融强度和速率较强(公式 5)。2003 年,4 月末前积雪消融强度缓和,5 月末期出现较大幅度的消融强度,6 月末期强度下降,至 7 月莫出现新的降雪(公式 6)。2003 年玛纳斯河产流区的高山带冰川和积雪不能大量消融导致在 2003 年出现了历史上罕见的汛期枯水现象。

2002 年积雪消融速率:

$$y = 0.1525x^3 - 9.9227x^2 + 83.753x + 3157.3, \\ R = 0.81 \quad (5)$$

2003 年积雪消融速率:

$$y = 0.4229x^3 - 23.572x^2 + 280.23x + 2302.7, \\ R = 0.80 \quad (6)$$

3 结语

本文首次对玛纳斯河流域积雪分布、高山区气温特征进行分析,并且讨论了流域春季融雪性径流丰枯特征与流域冬季积雪累积量及春季升温后积雪消融强度的关系。玛纳斯河流域水资源在春季主要以融雪径流方式为主,春季随着气温的升高,积雪面积逐渐变小,流量也逐渐增加。流域冬季积雪的累积量和春季积雪的消融速率和强度将决定流域春季径流的多少。降雨条件相当的水文年中,冬季山区形成的积雪越厚,以固态形式存储的水量越大,春夏季随着气温的升高,河流来水量就越丰富。

参考文献:

- [1] 刘占静. 2003 年玛纳斯河汛期水情特征及其成因[J]. 水土保持研究, 2004, 11(4): 198-199.
- [2] 唐湘玲, 龙海丽, 邢建. 玛纳斯河流域降水与径流变化及其人类活动的影响[J]. 新疆师范大学学报: 自然科学版, 2005, 24(3): 145-152.
- [3] 徐素宁, 杨景春, 李有利. 近 50 a 来玛纳斯河流量变化及对气候变化的响应[J]. 地理与地理信息科学, 2004, 20(6): 65-68.
- [4] 曾霞, 吕建辉, 施文军. 玛纳斯河流域的径流与洪水特征分析[J]. 石河子大学学报: 自然科学版, 2006, 24(3): 343-349.
- [5] 党新成, 李新贤, 高建. 玛纳斯河流域水文与环境特征分析[J]. 水文, 2006, 26(5): 89-90.
- [6] 南峰, 李有利, 史兴民. 新疆玛纳斯河水量波动与气候变化之间的关系[J]. 水土保持研究, 2003, 10(3): 59-61.
- [7] 刘爱霞, 王静, 吕春艳. 基于 MODIS 数据的北京西北部地区土地覆盖分类研究[J]. 地理科学进展, 2006, 25(2): 96-101.
- [8] 刘爱霞, 王长耀, 王静, 等. 基于 MODIS 和 NOAA/AVHRR 的荒漠化遥感监测方法[J]. 农业工程学报, 2007, 23(10): 145-150.
- [9] 李谢辉, 塔西甫拉提·特依拜. 绿洲荒漠过渡带生态环境变化预警线提取与分析研究: 以新疆和田绿洲为例[J]. 中国沙漠, 2008, 28(1): 77-82.
- [10] 刘闯, 葛成辉. 美国对地观测系统(EOS)中分辨率成像光谱仪(MODIS)遥感数据的特点与应用[J]. 遥感信息, 2000(3): 45-48.
- [11] 袁雷, 李春娥, 储少林, 等. 冷季深入对 AMSR-E 监测内蒙古积雪的影响[J]. 草业科学, 2008, 25(8): 26-30.