

博斯腾湖流域积雪变化及影响因素*

白淑英¹, 王 莉¹, 赵巧华¹, 巴雅尔², 徐永明¹, 孙德勇¹

(1: 南京信息工程大学遥感学院, 南京 210044)

(2: 新疆巴音郭楞蒙古自治州博斯腾湖研究所, 库尔勒 841000)

摘要: 积雪是西北干旱地区河流的主要补给源, 是绿洲的生命线. 积雪的时空变化是全球变化的区域响应敏感因子之一, 同时也是影响西北干旱地区地表水资源变化的主要因子之一. 本研究利用 MODIS 雪盖产品、地表温度、SSM/I 雪深、DEM 等数据, 通过 GIS 空间分析及地统计分析功能, 系统分析了博斯腾湖流域雪盖、雪深的时空变化规律及其与影响因素之间的关系. 研究表明, 研究区雪深和雪盖多年月平均值从 8 月份到 1 月份达到最大值, 到 7 月份降到最低值. 但月最大雪深却出现在 3 月份. 雪盖、雪深与地温相关系数分别达到 -0.878 、 -0.853 , 与分布高程均值相关系数分别达到 -0.626 和 -0.791 . 雪深最大值受海拔影响有明显的陡坎效应. 从 12 月到 8 月份随着时间的推移雪的深度在降低, 陡坎向高海拔方向移动. 9-11 月份雪深在加深, 陡坎向低海拔方向移动. 同一高程段雪深的变幅反应坡向对雪深的影响, 变幅越宽坡向影响越大. 并且变幅也有先从低海拔到高海拔移动, 然后再回到低海拔的特点. 本研究对了解该研究区积雪特性的研究有很大作用, 可为在该地区开展融雪径流模拟等研究提供重要的参考信息.

关键词: 博斯腾湖流域; 积雪; 雪盖; 雪深

Influence factors of snow change in Lake Bosten Basin

BAI Shuying¹, WANG Li¹, ZHAO Qiaohua¹, BA Yaer², XU Yongming¹ & SUN Deyong¹

(1: *School of Remote Sensing, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, P. R. China*)

(2: *Bosten Lake Science Research Institute of Bayangol Mongol Autonomous Prefecture, Kuerle 841000, P. R. China*)

Abstract: Snow is the major water source of rivers in the arid areas in the northwest. Its temporal and spatial variation is one of the sensitive factors responses to global change in the lake. This paper, using MODIS Snow Cover, Surface Temperature, SSM/I Snow Depth, DEM and other data with the help of spatial and statistics analysis function of GIS, analyzes the temporal and spatial variation regularity of snow cover and snow depth of Lake Bosten Basin, and studies their relationships with the influencing factors. The results show that monthly average of snow cover and snow depth start to rise from August, reach a maximum until January, and then decline to a minimum in July, while the maximum snow depth appears in March. The correlation coefficients of snow cover, snow depth and surface temperature, are -0.878 and -0.853 , respectively, while the coefficients are -0.626 and -0.791 between snow cover, snow depth and elevation. The maximum snow depth is significantly affected by the altitude with a steep step effect. From December to August, the snow depth is reducing with time, and the steep step is moving towards the high altitude, while the situation is totally opposite from September to November. The snow depth amplitude of one segment elevation response to the impact of aspect on snow depth, and the influence is greater while the amplitude is wider. Simultaneously, the amplitude, as a characteristic, moves from low altitude to high and then to low again. This study plays an important role in understanding characteristics of snow in Lake Bosten Basin. It will also provide important references for other studies, such as the simulation of snowmelt runoff.

Keywords: Lake Bosten Basin; snow; snow cover; snow depth

地表水资源极为匮乏的西北干旱地区, 季节积雪水资源较为丰富^[1-2], 积雪融水成为该地区河流的主要

* 国家环保公益性行业科研专项项目(200909048)和国家水体污染控制与治理科技重大专项项目(2009ZX07106-004)联合资助. 2011-07-06 收稿; 2011-10-09 收修改稿. 白淑英, 女, 1973 年生, 博士, 副教授; E-mail: baishuying@163.com.

补给源. 积雪是全球气候变化最敏感的区域气候变化响应因子之一, 全球变化必然引起积雪数量、面积和持续时间的变化, 从而导致积雪地区水资源数量与河川径流季节分配的变化^[3,4]. 因此由于水量和水盐平衡关系改变而产生许多生态环境问题.

以往对积雪的影响因素研究主要集中在降水、气温和地表温度等对积雪变化的影响^[5-10]. 事实上气候因子对积雪变化的影响是作用在地形因子影响基础上的, 气候因子和地形因子综合作用的研究更有意义.

位于西北干旱区的博斯腾湖曾是我国内陆干旱区最大的淡水湖泊, 由于气候变化及人类活动的影响, 近年来出现了水体咸化和水位下降加速的现象, 现已成为微咸水湖^[11]. 流入博斯腾湖水量最大的河流开都河发源于西部积雪的高山(天山中部), 由冰雪融水补给. 全球变化引起的积雪变化将直接影响到开都河径流量和博斯腾湖水量, 进而影响到该区的生态环境. 因此对该区积雪变化及其影响因素进行研究对于揭示干旱区积雪对气候变化的响应以及干旱区地表水资源变化的机理具有重要意义.

1 数据源及其处理

1.1 数据源

雪盖数据为 2000 年 3 月—2011 年 2 月 MODIS 8 d 合成 10A2 雪盖产品数据, 分辨率为 500 m; 地表温度数据为 2002 年 7 月—2009 年 6 月 MODIS 地表温度产品. MODIS 产品均由美国地质调查局 USGS 的 LP DAAC 提供; 雪深数据为来自中国西部环境与生态科学数据中心的 2000 年 3 月—2008 年 6 月雪深数据, 是利用被动微波遥感 SSM/I(1987—2008 年)亮度温度资料反演得到, 空间分辨率为 25 km; DEM 数据是由 CGIAR ICT-ICT 免费发布的 SRTM3 数据, 空间分辨率为 90 m.

1.2 数据预处理

对 MODIS 数据进行几何校正处理, 数据统一转换为 Albers 投影. 利用 ArcGIS 基于博斯腾湖流域界线对所有数据进行裁切. 然后在 ENVI 软件中利用博斯腾湖流域界线的矢量数据进行掩膜运算, 得到了博斯腾湖流域的雪深、雪盖、地表温度、DEM 等数据.

利用 MODIS 8 d 合成雪盖产品数据, 将其转换为月合成数据进行分析. 首先将 8 d 合成值扩展到全年 365 d(366 d), 将该数据每一个 8 d 合成周期内的 8 d 像元值除以 8 得到平均每天雪盖情况, 然后以月为周期计算每月的平均值作为合成值, 进而得到月平均和年平均雪盖数据, 最后对雪盖数据分为有雪覆盖区为 1, 无雪覆盖区为 0 两级.

原始雪深数据是日数据, 在 ArcGIS 中利用最大合成法得到月最大雪深数据, 对多年月数据进行平均得到最大雪深月平均数据.

利用 DEM 数据分别生成高程、坡向数据(图 1、图 2), 并将坡向数据分为 9 级, 0 为平地, 1 为 $0^{\circ} \sim 45^{\circ}$ 坡向, 2 为 $45^{\circ} \sim 90^{\circ}$ 坡向, 依次类推.

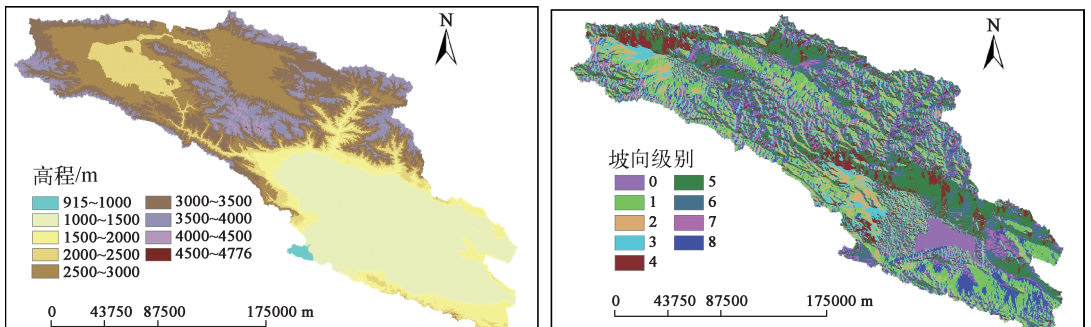


图 1 博斯腾湖流域高程和坡向分布

Fig. 1 Elevation and aspect distribution in Lake Bosten Basin

雪盖数据分辨率为 500 m, 对雪深数据和 DEM 数据经过三次卷积重采样转为 500 m 分辨率, 进行分辨率统一.

进一步生成平均雪深和最大雪深数据,其中平均雪深代表研究区年(月)的雪深平均值,最大雪深代表研究区年(月)雪深出现的最大值.最大雪深的最大值即为年内各年(月)的最大雪深的最大值;最大雪深的平均值为年内各年(月)的最大雪深的平均值.

2 积雪时空变化分析

积雪存在着显著的季节变化和年际变化,积雪覆盖和积雪深度是表征积雪信息的两个重要量,因此从这两方面可以了解积雪的时空变化情况.

2.1 积雪年际变化

2001—2007年平均雪盖和雪深的变化趋势基本一致,但年最大雪深变化波动比较大(图2).年均雪盖面积维持在 $1.12 \times 10^4 \sim 1.31 \times 10^4 \text{ km}^2$ 之间,其中2004年最大,2007年最小.年均雪深维持在1.24~1.75 cm之间,最大值和最小值分别出现在2006年和2007年.最大合成法得到的雪深年均最大值出现在2001年,为16.18 cm(图2);雪深月均最大值出现在2006年2月,为30.74 cm.

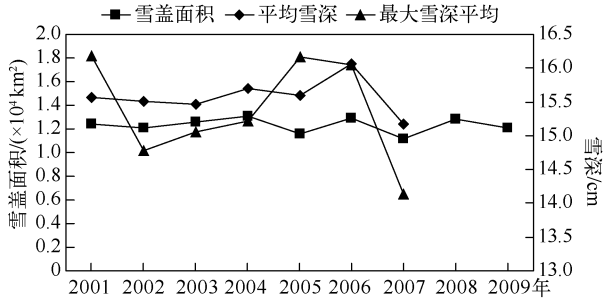


图2 2000—2007年年平均雪盖雪深变化

Fig.2 Changes of annual average snow cover and snow depth (2000—2007)

2.2 积雪年内变化

从平均雪深和雪盖面积年内变化看,平均值都是从8月份开始逐渐增加到1月份达到最大值,然后逐渐下降到7月份到达最低值.月最大雪深出现在3月份,因为新疆山区在该月份冰雪并没开始融化,且可能存在降雪现象(图3).

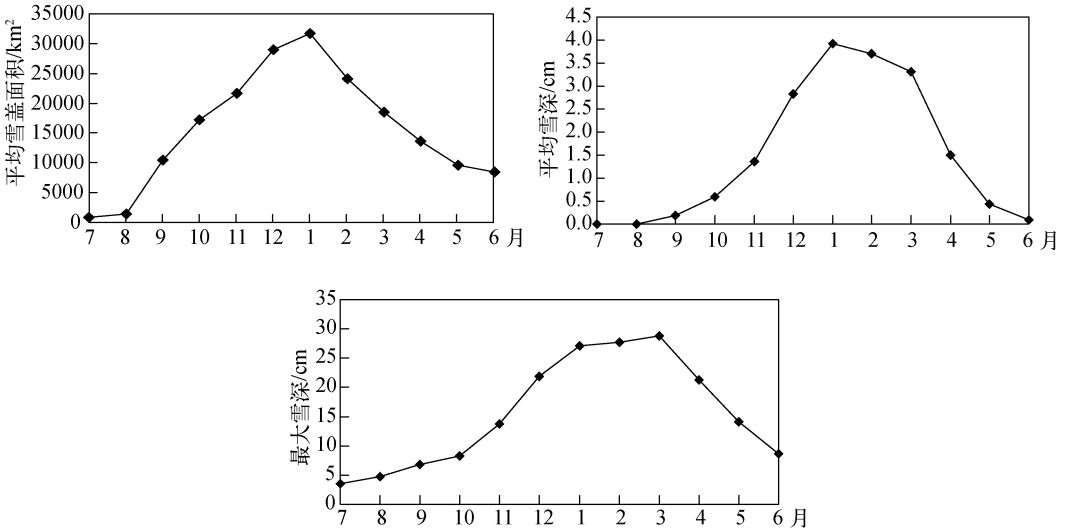


图3 多年月平均雪盖面积、平均雪深和最大雪深

Fig.3 Monthly average snow cover area, snow depth and maximum snow depth for years

2000—2007年多年1—12月平均积雪覆盖率分别为73.2%、55.6%、42.8%、31.4%、22.2%、19.6%、2.1%、3.2%、24.1%、39.6%、49.9%、67.1%.春季积雪覆盖率在40%左右,夏季在20%以下,秋季3个月份变化明显,从9月份的35.9%迅速增到了11月份的68.9%,冬季达到80%以上.

从月最大雪深年内变化情况可以看出,1、2、3月份最大雪深平均在27 cm以上,4、12月份雪深在21 cm

左右,5、11月份在14 cm左右,其余月份最大雪深均值小于9 cm(表1)。

表1 2000—2008年雪深最大值(cm)
Tab. 1 Maximum snow depth from 2000 to 2008

月份	2000年	2001年	2002年	2003年	2004年	2005年	2006年	2007年	2008年
1月	27.65	29.54	26.32	25.78	26.70	26.79	28.13	25.75	27.06
2月	27.33	30.56	25.76	26.83	27.62	29.16	30.74	23.22	26.66
3月	31.41	29.38	28.42	27.73	27.28	28.84	32.73	24.16	23.83
4月	24.69	21.10	21.64	20.77	20.25	19.40	26.36	15.79	17.09
5月	14.61	13.69	17.26	16.11	14.80	12.06	12.42	11.41	10.69
6月	9.26	9.95	12.86	3.97	8.56	6.98	9.67	7.84	6.86
7月	4.17	6.36	0.00	4.34	3.98	6.52	1.29	1.80	
8月	4.46	3.76	0.00	4.59	6.71	6.81	5.00	7.00	
9月	7.46	7.23	5.64	6.29	6.60	8.56	6.38	6.58	
10月	7.69	9.12	7.83	8.27	7.93	8.77	6.76	10.15	
11月	16.78	14.91	10.57	13.02	11.77	15.82	12.21	14.91	
12月	25.19	18.60	21.05	23.01	20.43	24.27	20.96	21.13	

3 积雪变化影响因素分析

雪盖面积和雪深主要受温度、降水等影响,同时还受到海拔高程和坡度坡向的影响。

3.1 地表温度变化与积雪的关系

通过GIS的分类统计功能,对有雪盖和无雪盖地区地表温度分别从有雪盖和无雪盖的平均温度、最高温度和最低温度进行统计分析。结果显示,同一时间内有雪盖区域的平均温度要比无雪地区平均温度低近10℃。在7—9月份有雪最高温度要比无雪最高温度低10℃以上,其他月份区别不大。而最低温度在这三个月份差异不大,但在其他月份有雪最低温度比无雪最低温度低10℃左右。由此可见,温度与雪盖分布的范围密切相关(图4a)。

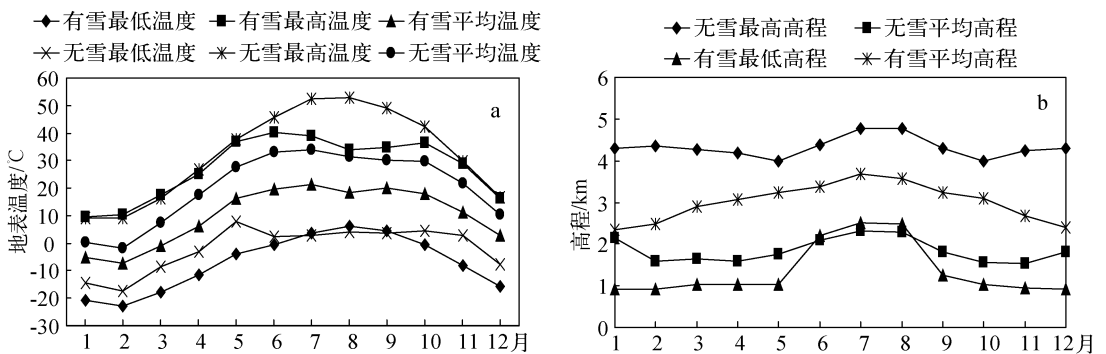


图4 雪盖分布与地温(a)、高程(b)关系图

Fig. 4 Relationships between snow cover distribution and surface temperature (a), elevation (b)

随着地表温度的升高积雪会融化,致使雪盖面积减少,雪深降低。雪盖面积、雪深平均值与地温均值均显著相关,相关系数分别达到-0.878、-0.853。

3.2 地形因素对积雪变化的影响

3.2.1 高程对雪盖时空分布的影响 随着海拔升高,气温逐渐降低,积雪融化变缓,从而影响雪盖的分布范

围. 从9月份到次年5月份, 雪盖的最低分布海拔高度没有明显的区别, 但在6—8月份雪盖的最低分布海拔高度在2 km以上. 除了1、12月份, 有雪地区的平均海拔要比无雪平均海拔高出1 km以上(图4b). 对2000年3月至2009年12月雪盖面积与分布高程均值进行相关分析, 相关系数为 -0.626 . 对2000年3月至2008年6月雪深与分布高程均值进行相关分析, 其相关系数为 -0.791 , 说明雪盖分布受高程影响显著.

3.2.2 高程对雪深时空分布的影响 对雪深数据与高程进行空间分析发现, 雪深受海拔影响明显(图5), 雪深最大值受海拔影响有明显的陡坎效应, 且这种陡坎效应在不同的月份有所区别. 其中1、2、3、12月份分布规律基本相似, 雪深最大值分布分为四段, 分别为海拔915~1045、1045~2352、2352~4238、4238~4776 m. 尤其在2352 m附近有个陡坎, 在此海拔以上雪深突然增大. 1月份海拔915~1045 m雪深最大值平均约为3.70 cm, 海拔1045~2352 m雪深最大值平均为8.40 cm左右. 海拔2352~4238 m雪深最大值平均为23.80 cm左右, 海拔4238~4776 m雪深最大值平均为16.80 cm左右. 2、3月份雪深最大值在海拔915~2352 m部分比1月份低, 但在海拔2352 m以上比1月份高, 也证实了雪深最大值出现在3月份这一现象. 12月份分布规律跟1月份相似, 但每个阶段都比1月份低一些. 4月和11月份分布规律相似, 陡坎有向高海拔偏移的迹象, 并且陡坎变得平缓, 各个段的雪深都有所降低. 5、9、10月份分布规律相近, 陡坎基本消失, 取代的是缓坡. 6月份也存在陡坎现象, 但陡坎的高度明显比1月份的低, 并且陡坎出现的海拔比1月份高出200 m以上. 7、8月份的分布规律相近, 陡坎完全消失, 坡度也不是很明显, 雪深变幅很宽, 即同一海拔高度雪深的差异较大.

在海拔915~1045 m处3—10月份基本没有雪, 1045~2352 m处5—10月份基本没有雪, 2352~4238 m在7、8月份基本没有雪, 4328 m以上7月份雪很少(图6). 这说明随着高程的升高、月份的推移雪线向高位变化明显, 是雪深受高程和温度影响的一种体现.

3.2.3 坡向对积雪时空分布的影响 地形因素除了高程对雪深雪盖影响以外, 坡度、坡向也会影响. 对于雪深和雪盖来讲, 阳坡的融化速度会比阴坡快, 因此很多地区同一海拔高度, 阴面有雪, 但阳面没有雪.

雪盖和雪深数据与坡向数据进行空间分析, 不同高程段的雪深变幅的宽窄体现了坡向对雪深的影响. 分析结果表明, 在1、2、3、12月份在海拔1045~2352 m雪深的空间分布受坡向影响较大, 同一高度上雪深变化明显. 而2352 m以上基本不受坡向影响, 雪深差异不明显. 到了4、5、6、11月份海拔2352~2800 m雪深受坡向影响显著. 7、8月份2500 m以上均受坡向的影响. 9、10月份从1300 m以上都受到坡向的影响, 导致同一高程阴坡和阳坡的雪深差异明显.

4 讨论与结论

通过对博斯腾湖流域2000年3月—2011年2月积雪时空分布规律和影响因素研究, 得出以下结论:

1) 研究区平均雪盖和雪深的年际变化趋势基本一致, 最小值均出现在2007年, 但月最大雪深变化波动比较大. 雪深和雪盖面积多年月平均值都是从8月份到1月份达到最大值, 到7月份降到最低值. 但月最大雪深的最大值却出现在3月份, 主要是因为在新疆山区3月份积雪还没开始融化, 且有可能还存在降雪现象.

2) 雪盖面积、雪深平均值与地温均值相关性显著, 相关系数分别达到 -0.878 、 -0.853 . 同一时间内有雪盖区域的地表温度要比无雪地区地表温度低近 10°C .

3) 雪盖面积、雪深与分布高程均值相关系数分别达到 -0.626 和 -0.791 . 雪深最大值受海拔影响有明显的陡坎效应. 从12月份到次年8月份随着时间的推移陡坎向高海拔移动, 雪深降低. 9—11月份陡坎和雪深的变化情况与前一阶段相反.

4) 同一高程段雪深的变幅反映坡向对雪深的影响, 变幅越宽坡向影响越大. 并且变幅也有从低海拔到高海拔然后再到低海拔移动的特点.

地形因素中坡向因素对雪盖、雪深分布应该有很大的影响, 正常情况下, 阳坡的积雪融化速度会比阴坡快, 因此很多地区同一海拔高度, 阴面有雪, 但阳面没有雪, 这个问题需要更高空间分辨率的DEM数据与雪盖数据进行空间分析, 才能得出更精确的结论.

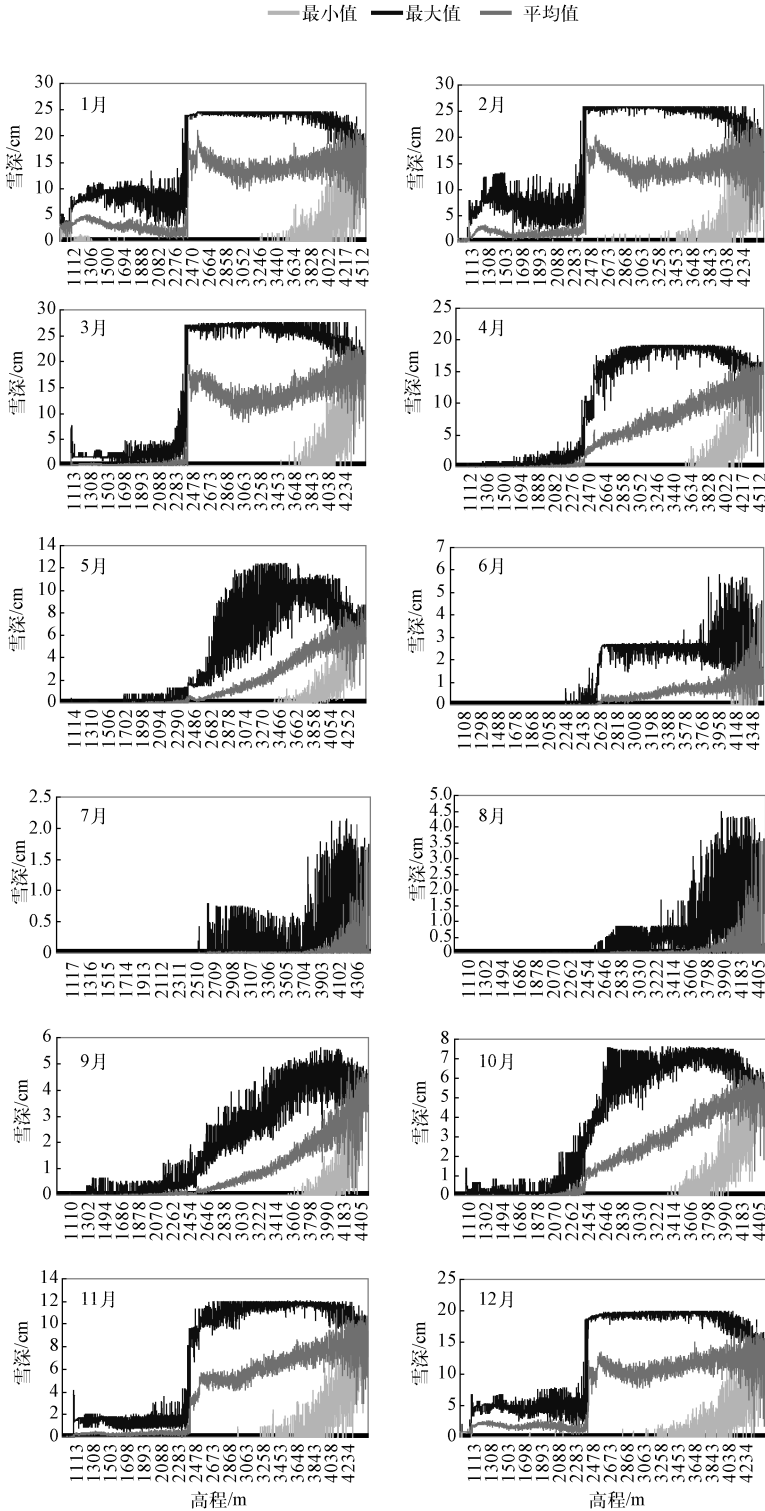


图 5 多年月平均雪深与高程关系图

Fig. 5 Relationships between monthly average snow depth and elevation

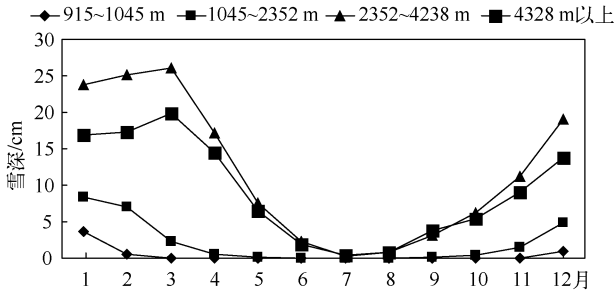


图6 多年月平均雪深在不同高程带分布图

Fig. 6 Distribution of monthly average snow depth for years in different elevation zones

5 参考文献

- [1] 施雅风, 张祥松. 气候变化对西北干旱区地表水资源的影响和未来趋势. 中国科学: B 辑, 1995, **25**(9): 968-977.
- [2] 李培基. 中国积雪分布. 冰川冻土, 1983, **5**(4): 9-18.
- [3] IPCC. Climate change 2007, mitigation of climate change. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.
- [4] 李培基. 1951-1997 年中国西北地区积雪水资源的变化. 中国科学: D 辑, 1999, **29**(增刊): 163-169.
- [5] 刘艳, 李杨, 张璞水. 玛纳斯河流域融雪径流与积雪——气象因子分析. 水土保持研究, 2010, **17**(2): 145-149.
- [6] 张旭, 唐宏, 赵祥. 基于 MODIS 与 HJ-1-B 数据的雪盖率反演及其相关因子分析. 长江流域资源与环境, 2010, **19**(5): 566-570.
- [7] 谢玉琴, 赵求东, 王芳. 积雪变化特征及与气候之间的关系——以乌鲁木齐地区为例. 干旱区资源与环境, 2007, **21**(9): 51-55.
- [8] 柯长青, 李培基, 王采平. 青藏高原积雪变化趋势及其与气温和降水的关系. 冰川冻土, 1997, **19**(4): 289-294.
- [9] 张丽旭, 魏文寿. 天山西部中山带积雪变化趋势与气温和降水的关系——以巩乃斯河谷为例. 地理科学, 2002, **22**(1): 67-71.
- [10] 黄慰军, 黄镇, 崔彩霞. 新疆雪密度时空分布及其影响特征研究. 冰川冻土, 2007, **29**(1): 66-71.
- [11] 周成虎, 罗格平, 李策等. 博斯腾湖环境变化及其与焉耆盆地绿洲开发关系研究. 地理研究, 2001, **20**(1): 14-23.