



论文

基于 MODIS 数据的川西积雪时空变化分析

杨存建^{①②*}, 赵梓健^②, 倪静^①, 任小兰^①, 王琴^①

① 四川师范大学西南土地资源评价与监测教育部重点实验室遥感与 GIS 中心, 成都 610068;

② 电子科技大学地表空间信息技术研究所, 成都 610054

* E-mail: yangcj2008@126.com

收稿日期: 2010-11-29; 接受日期: 2011-06-08

国家高技术研究发展计划(编号: 2009AA12Z140)、国家重点基础研究发展计划(编号: 2009CB421105, 2007CB714401)、国家自然科学基金项目(批准号: 40771144)和四川省青年基金项目(编号: 08ZQ026-47)

摘要 本文探索出了利用多时相 MODIS 数据分析积雪时空变化的技术方法, 揭示出了川西 2002~2008 年间积雪变化的时空特征. 首先, 建立了积雪提取模型. 然后, 用其从 2002~2008 年的多期 MODIS 影像中提取出川西多期积雪数据. 其次, 利用 GIS 技术对 2002~2008 年的川西积雪时空变化进行了分析, 包括 2002 年积雪日数变化分析、月变化分析、2002~2008 年年间变化分析以及雪线变化分析. 研究表明: 1) 川西终年无积雪区占 60.4%, 主要分布在凉山州和攀枝花市; 积雪区主要出现在甘孜州和阿坝州; 终年积雪区占 0.3%. 2) 2002 年年内月积雪面积与月均气温和月降雨量之间在 0.05 的水平上存在着显著的负相关关系. 3) 2002~2008 年间, 就 3 月积雪而言, 最大积雪年份为 2006 年, 最小积雪年份为 2007 年. 年内积雪消失面积最大出现在 2006 年, 最小出现在 2007 年. 4) 2002~2008 年间, 雪线总体上呈波浪状的上升趋势. 该研究成果对四川省的气候研究、积雪资源利用、生态服务功能潜力挖掘、旱涝减灾和生态建设等均具有重要意义.

关键词
MODIS
川西
积雪提取
动态变化

积雪是气候系统中比较活跃的因子, 既是最活跃的环境影响因素, 也是最敏感的环境变化响应因子^[1]. 积雪时空变化与大气环流、降水量以及淡水资源有密切的关系^[2,3], 而且对当地农林牧、交通、电力、通讯、土壤、下游水流量大小以及生态环境都有影响, 适量积雪有利于生态环境良性发展, 有利于生物多样性保护, 但是过多积雪就是弊多利少、造成灾害^[4~8]. 川西地区属于青藏高原东缘延伸部分, 是长江上游流域, 也是成都平原生命之水——岷江流域的发源地, 川西地区积雪时空变化将影响到长江流域春夏季节的水流量, 沿途水力发电站、水库的蓄水

量, 也会对成都平原饮水、农业灌溉用水有影响. 目前已有对青藏高原、天山和祁连山等区域的积雪开展了时空变化研究^[9~17], 但是四川省川西高原地区积雪覆盖时空变化研究仍是空白. 已有研究表明不同区域不同时段积雪变化趋势不同, 有的区域积雪变化呈平缓增加趋势, 有的变化趋势不明显, 总体上都有随年际波动变化的现象.

目前用于积雪提取的数据主要是 MODIS 积雪产品数据以及基于反射特性的归一化差分积雪指数 (NDSI). 侯慧姝和杨宏业^[18]研究显示 MODIS 积雪产品在有森林覆盖的地区误差值达到 15%, 而利用

NDSI 指数对积雪监测有效. 季泉等^[19]提出的归一化差分积雪指数(NDSI)算法具有普遍的实际操作性意义, 精度高, 分类合理, 是提取积雪信息的最佳技术手段. 黄晓东等^[20]分析表明积雪产品在无云的情况下识别率为 87.5%, 而 Klein 等^[21]经验证认为, NDSI 指数在无云天气, 雪盖图的精度可以达到 95% 以上.

川西积雪是四川省及其周边的重要天然水塔, 其积雪变化关系到相关河流水的补给, 并影响到水电、农业、工业等相关产业以及生态环境. 为此, 本文利用遥感与 GIS 技术, 利用 2002~2008 年间多时相 MODIS 数据对川西积雪时空变化进行研究, 以期揭示出川西积雪的时空变化特征, 以便为生态安全和相关产业安全服务.

1 研究区及数据

1.1 研究区概况

研究区为四川的西部地区, 简称川西, 包括甘孜藏族自治州、阿坝藏族羌族自治州、凉山彝族自治州、

攀枝花市三州一市, 面积 $30.54 \times 10^4 \text{ km}^2$, 占全省面积 63%, 该区分为川西南山地区和川西高原区. 为了分析温度、降雨与积雪的关系, 收集了该区各气象站点的温度和降雨数据, 气象站点分布见位置图 1. 川西高原包括甘孜、阿坝以及凉山西部, 属于青藏高原向东南延伸部分, 地势处于青藏高原与四川盆地之间, 由第一台阶向第二台阶的过渡地带, 为青藏高原东南缘和横断山脉的一部分, 地面海拔 4000~4500 m, 川西高原上群山争雄、江河奔流, 长江的源头及主要支流——岷江在这里孕育. 这一地带地形地貌变化明显, 有极高山峰、低海拔冰川、深切峡谷、湍急河流、高寒草原、溪沟清泉. 气候为大陆季风性高原型气候, 冬季主要受冷青藏高原高压影响, 天气晴朗, 日照丰富. 如果有较强的暖湿气流到过则可以形成降雨(降雪). 否则, 多以晴天为主. 川西南地区包括凉山彝族自治州南部和攀枝花市, 属云贵高原向北伸之一隅, 绝大部分是山地, 其山地面积占全区面积的 94%, 有著名的安宁河谷和邛海内陆湖泊. 该地区气候干燥、炎热, 四季不分明, 只有雨季和旱季之分. 每年 6~10 月为雨季, 11 月至第二年 5 月为旱季. 四川

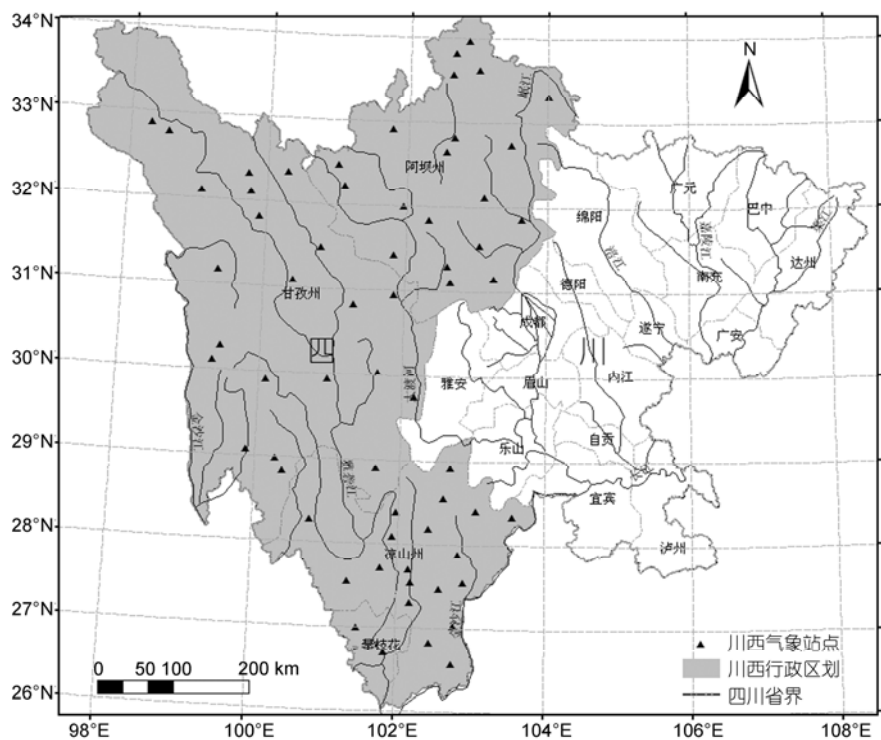


图 1 川西地理位置图及气象站点分布图

省积雪主要分布在甘孜州和阿坝州.

1.2 数据概况

本文所用数据有川西 MODIS 遥感数据、DEM 数据、温度数据和降雨数据. 遥感数据为 MODIS 数据标准产品中的 3 级产品, 产品类型 MOD09 A1. 该数据已经过定标定位、大气和气溶胶校正, 以及边缘畸变校正等处理. 其波段 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 分别用 B1, B2, B3, B4, B5, B6 和 B7 表示. 波段 1 和 2 的空间分辨率为 250 M, 波段 3~7 的分辨率为 500 M, 经重采样后, 所有波段的像元大小均为 500 M. 本文共选用了 2002~2008 年间每隔 8 天一次的数据.

DEM 数据是从国际科学数据镜像网站上下载得到的, 其分辨率为 90 m. 温度和降雨数据来自于四川省气象局统计年鉴.

2 研究方法

2.1 坐标及投影变换

本文所用遥感数据是以地球为参照系, 采用正弦曲线投影(SIN), 水平和垂直编号分别是 h26v05, h26v06, h27v05 和 h27v06. 采用 MRT(MODIS Reprojection Tool)工具对遥感数据进行镶嵌处理. 在镶嵌过程中, 将 MODIS 遥感数据的坐标系统转换为地理坐标 WGS84 系统, 将投影转换为 Albers 投影, 并设置其第一条标准纬线为 25°N, 第二条标准纬线为 47°N, 中央经线为 105°E.

2.2 多时相 MODIS 数据的归一化处理

由于成像时间和天气等因素, 使得同一地物在不同时相遥感影像上的亮度值可能存在差异. 在基于多时相遥感数据的变化分析中, 需要减少或消除这种差异. 其常用方法有: 图像回归法、伪不变特征法、暗集-亮集法、未变化集辐射归一法与直方图匹配法、小波变换方法等^[22-25]. 本文采用伪不变特征法来减少或消除这种差异. 首先, 确定一期质量好的影像为参考影像. 其次, 在参考影像和待校正影像中选取不变地物(水体、建筑物、裸岩及终年积雪)的纯净像元作为样本, 并获取其光谱. 再次, 利用样本数据和回归分析建立归一化处理模型. 最后, 利用归一化处理模型对遥感数据进行归一化处理.

2.3 去云处理

在(1~4)波段, 雪和云的光谱特征非常的相似, 为有效消除云的干扰, 更好的从遥感影像上提取积雪信息, 首先需要进行云的检测与去除. 本文采用归一化差值积雪指数(NDSI)来去除积雪的影响^[26], 利用 NDSI 小于 0.4 来选取需要作云检测处理的区域. 利用某期影像与其前后期影像的光谱值变化率进行云检测, 当与前期和后期的变化率均大于 20%时, 认为该像元为云像元. 利用其前后期无云影像对应位置的像元值来内插, 并以内插值作为该像元值, 从而实现去云处理^[27].

2.4 积雪提取建模

用 NDSI 模型对积雪进行提取实验, 通过目视判读分析发现, 其提取效果在此不够理想, 为此, 探讨建立新的提取模型. 采用目视解译, 分别在 MODIS 遥感影像上对植被、水体、居民地、云和积雪等地物进行采样, 获取其各个波段的亮度值, 并以各地物各波段的样点均值作为其波段特征值. 其结果如图 2 所示.

从图 2 中可以看出, B1+B3+B4 可以增强积雪和云与其他地物的差异, (B4-B6)/B6 可以增强积雪与云, 以及积雪与其他地物之间的差异. 同时, 也可以看, (B4-B6)/B6 比 (B4-B6)/(B4+B6) 更能增强积雪与其他地物, 特别是与云之间的差异, 因而不需归一化差值积雪指数来建模, 而是构建如下积雪提取模型: 如果 $B1+B3+B4 > T1$, 且 $(B4-B6)/B6 > T2$, 那么, 该像元为积雪像元, 以 1 表示; 否则, 为非积雪像元, 以 0 表示.

经过反复试验, 当 $T1$ 取值为 4500, $T2$ 取值为 1.85 时, 能有效地将积雪提取出来.

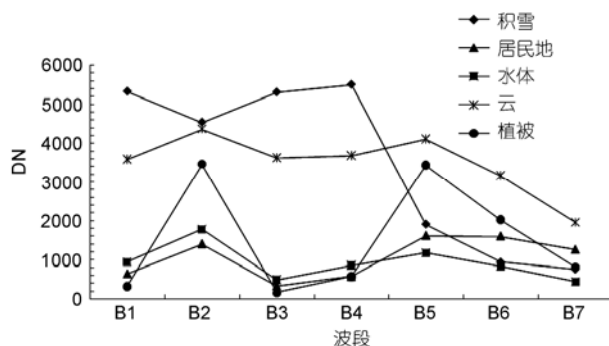


图 2 主要地物波谱

2.5 积雪提取效果分析

利用积雪提取模型对多期 MODIS 遥感影像进行积雪提取. 选用基于 2002 年 4 月 6 日(编号为 097)MODIS 遥感影像提取的积雪进行提取结果分析. 利用目视判读, 对积雪提取效果进行精度分析. 通过判读分析发现: 所提取的积雪像元实际均为积雪覆盖, 因此, 提取正确率为 100%, 误提率为 0; 有少量实际为积雪的区域未被提取出来, 在随机选取的 120 个实际为积雪的样点中, 只有 7 个未被提取为积雪, 因此, 积雪漏提率为 6%, 提取精度为 94%. 被部分积雪覆盖的像元未被提取.

3 川西 2002~2008 年积雪时空变化分析

3.1 川西 2002 年积雪日数变化分析

在 2002 年 MODIS 数据中, 从 1 月 1 日开始, 每隔 24 天选取 1 次数据, 共选取了 16 期数据, 利用积雪提取模型, 分别提取出各期积雪信息, 并形成各期积雪栅格数据图层, 将 16 期积雪栅格数据相加得到年内积雪栅格数据, 其栅格取值范围为 0~16. 对其进行分等定级分区: 0 值定为 0 级、其值为 1~4 的定为 1 级、其值为 5~8 的定为 2 级、其值为 9~12 的定为 3 级、其值为 13~15 的定为 4 级、其值为 16 的定为 5 级. 0 级表示一年内 16 期影像中 đều 无积雪覆盖区域, 即为终年无雪区, 积雪日数为 0 天; 1 级表示只有 1~4 期有积雪覆盖, 为短日数积雪区, 积雪日数在 100 天以下; 2 级为中日数积雪区, 积雪日数在 100~195 天; 3 级为中长日数积雪区, 积雪日数在 195~285 天; 4 级为长日数积雪区, 积雪日数在 285~341 天; 5 级为终年积雪区, 积雪日数接近 365 天. 2002 年川西积雪日数分区分布如图 3 所示, 其各区面积统计如表 1 所示.

从表 1 和图 3 可以看出, 在整个川西, 终年无雪区占 60.4%, 主要分布在川西南的凉山州和攀枝花市; 短日数积雪区占 22.1%; 中日数积雪区占 13.0%; 中长日数积雪区占 2.9%; 长日数积雪区占 1.3%; 终年积雪区占 0.3%. 积雪区主要出现在甘孜州和阿坝州. 在攀枝花, 接近 100% 的区域为终年无雪区. 在凉山州, 积雪区只有 3.4%, 且主要分别在其北部. 在阿坝州, 积雪区可达 49.1%, 积雪日数在 100 天以上的区

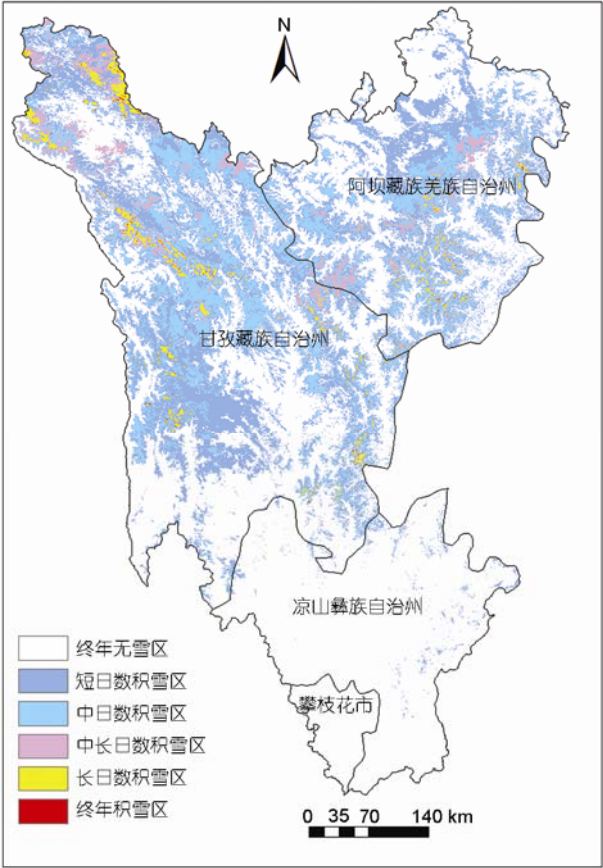


图 3 2002 年川西积雪分布

表 1 2002 年川西积雪统计表

积雪日数分区	积雪日数	川西地区		阿坝州		甘孜州		凉山州		攀枝花	
		面积 (km ²)	百分 比(%)	面积 (km ²)	百分 比(%)	面积 (km ²)	百分 比(%)	面积 (km ²)	百分 比(%)	面积 (km ²)	百分 比(%)
终年无雪区	0	181592	60.4	42864	50.9	72635	49	58393	96.6	7699	100.0
短日数积雪区	1~100	66431	22.1	22308	26.5	42609	28.7	1513	2.5	1	0.0
中日数积雪区	100~195	38890	13.0	14687	17.4	23690	16	513	0.9	0	0.0
中长日数积雪区	195~285	8750	2.9	3032	3.6	5714	3.9	4	0	0	0.0
长日数积雪区	285~341	3939	1.3	702	0.8	3237	2.2	1	0	0	0.0
终年积雪区	341~365	934	0.3	678	0.8	256	0.2	0	0	0	0.0

域可达 22.6%. 在甘孜州, 积雪区可达 51%, 积雪日数在 100 天以上的区域可达 22.3%.

3.2 2002 年川西积雪月变化分析

利用积雪提取模型从 2002 年每隔 8 天一期的影像上提取川西多期积雪信息, 并统计其积雪面积. 每月有近 4 期信息, 以每月内 4 期积雪面积的平均值作为该月积雪面积. 由于积雪主要分布在甘孜州和阿坝州, 为了发现积雪与温度和降雨的关系, 在川西各气象站点数据的基础上, 计算出各站点的各月月均气温和月降雨量, 进一步分别计算出甘孜和阿坝两州各月月均气温和月降雨量, 并求两州的平均值作为该区月均气温和月降雨量, 用于探索其与积雪的相关性. 2002 年川西各月积雪面积、月均气温和月降雨量如表 2 所示, 其散点图和拟合曲线如图 4 和 5 所示.

从表 2 可以看出, 川西积雪面积最大出现在 3 月, 为 92093 km²; 积雪面积最少出现在 8 月, 为 933 km².

表 2 2002 年川西各月积雪面积、月均气温和月降雨量

月份	月均积雪面积 (km ²)	月均气温 (°C)	月降雨量 (mm)
1	19183	-4.5	5.5
2	57322	-1.4	9.0
3	87100	-2.4	17.4
4	55600	2.9	27.8
5	4564	9.2	85.4
6	3846	12.0	135.9
7	1081	14.5	124.0
8	933	12.3	101.4
9	1154	10.6	105.0
10	6196	6.0	52.3
11	12600	-0.8	7.4
12	26600	-4.7	2.2

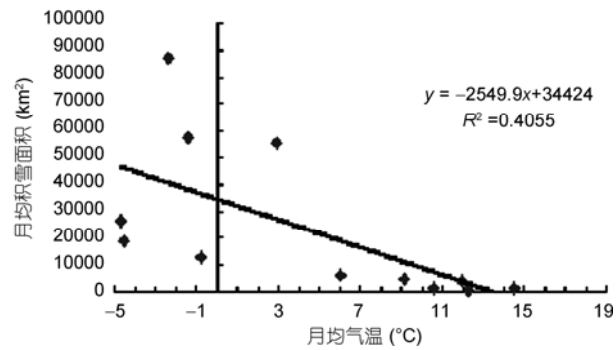


图 4 月均积雪面积与月均气温的散点图及拟合线

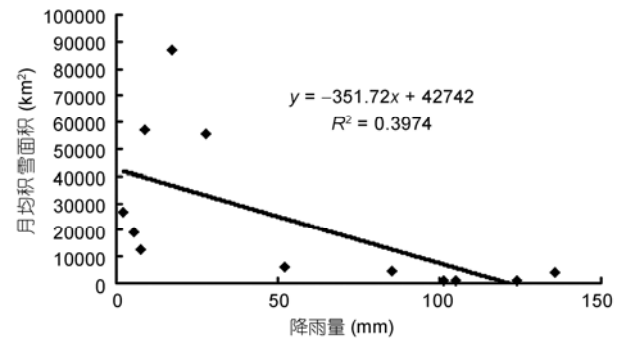


图 5 月均积雪面积与月降雨量的散点图及拟合线

1~3 月积雪面积增长最快; 3~5 月积雪面积减少最快; 5~8 月, 积雪面积减少缓慢. 8~9 月, 积雪增长最慢, 积雪开始进入累积期; 9~11 月, 积雪面积增长缓慢; 11~12 月积雪面积增长较快. 利用 2002 年川西各月积雪面积分别与其月均气温和月降雨量进行相关性分析, 通过分析发现, 2002 年积雪面积与月均气温之间在 0.05 的水平上存在着显著的负相关关系, 其相关系数为-0.637; 与月降雨量之间在 0.05 的水平上也存在着显著的负相关关系, 其相关系数为-0.630. 在 2002 年, 积雪面积表现出随温度的降低、降雨量的减少而呈增加的趋势.

3.3 川西积雪 2002~2008 年年间变化分析

利用积雪提取模型分别提取 2002~2008 年的 3 月和 8 月各期积雪信息, 并计算其面积. 选出 3 月内最大积雪面积作为其年内最大积雪面积, 8 月内最小积雪面积作为其年内最小积雪面积. 年内最大积雪面积与最小积雪面积之差, 即为该年的积雪消失面积. 其结果如表 3 所示.

从表 3 可以看出, 2002~2008 年间, 就 3 月积雪而言, 最大积雪年份为 2006 年, 其面积为 110282 km²; 其次为 2008 年, 其面积为 107682 km²; 最小积雪年份为 2007 年, 其面积为 78796 km². 就 8 月积雪而言, 最小积雪年份为 2006 年, 其面积为 776 km²; 最大积雪年份为 2002 年, 其面积为 968 km². 年内积雪消失面积最大出现在 2006 年, 为 109506 km²; 其次在 2008 年, 为 106821 km²; 年内积雪消失面积最小出现在 2007 年, 为 78003 km². 2002~2008 年间年际最大积雪变化表现为 2006~2007 年间的年际积雪变化.

通过相关性分析发现, 在 2002~2008 年间, 3 月的最大积雪面积与其月均温和降雨量均在 0.05 的水

表 3 2002~2008 年各年最大、最小积雪面积和积雪消失面积

年份	3 月			8 月			
	月均温 (°C)	平均降雨量 (mm)	最大积雪面积(km ²)	月均温(°C)	平均降雨量(mm)	最小积雪面积(km ²)	积雪消失面积 (km ²)
2002	1.1	17.9	92093	12.4	99.9	968	91125
2003	1.2	18.8	84710	13.1	100.3	886	83824
2004	0.8	17.5	98583	12.8	106.5	946	97637
2005	1.3	16.1	94781	12.7	98.7	880	93901
2006	1.3	16.9	110282	13.1	100.4	776	109506
2007	1.5	16.2	78796	13.2	100.1	793	78003
2008	1.1	17.8	107681	12.7	100.8	860	106821

平上相关性不显著. 8 月的最小积雪面积与其月均温在 0.05 的水平上呈显著的负相关关系, 其相关系数为-0.767, 其散点图和拟合线如图 6; 与其降雨量在 0.05 的水平上相关性不显著.

将 2006 年和 2007 年的最大积雪覆盖进行空间叠加, 形成四种类型区: 无积雪区, 2007 年积雪区, 2006 年积雪区, 共有积雪区. 在此基础上, 制作 2006~2007 年的积雪年际变化图, 如图 7 所示.

3.4 川西 2002~2008 年积雪雪线变化分析

将川西 DEM 数据与 2002 年各月积雪分布数据进行叠加, 以及与 2002~2008 年间各年的最小积雪分布数据进行叠加, 并分别按海拔进行统计. 从低海拔开始, 对积雪面积进行向高海拔累积, 当累积积雪面积达到总积雪面积的 1%时, 将此处的海拔高程作为积雪雪线, 以此作为积雪分布的最低海拔线. 2002 年各月积雪雪线如表 4 所示; 2002~2008 年间各年的终年积雪雪线如表 5 和图 8 所示.

从表 4 可以看出, 在 2002 年, 从 1~3 月, 雪线海拔呈下降趋势, 并在 3 月达到年内最低, 为 3465 m,

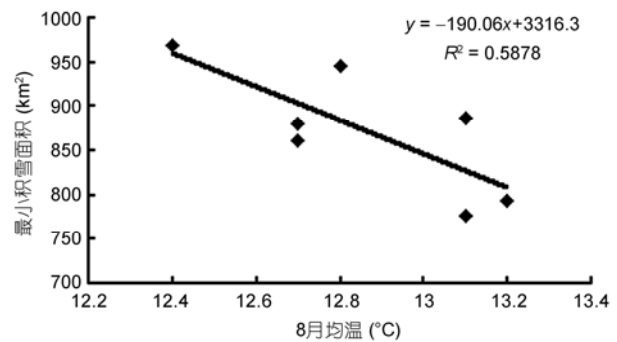


图 6 川西 2002~2008 年间 8 月的最小积雪面积与其月均温的散点图及拟合线

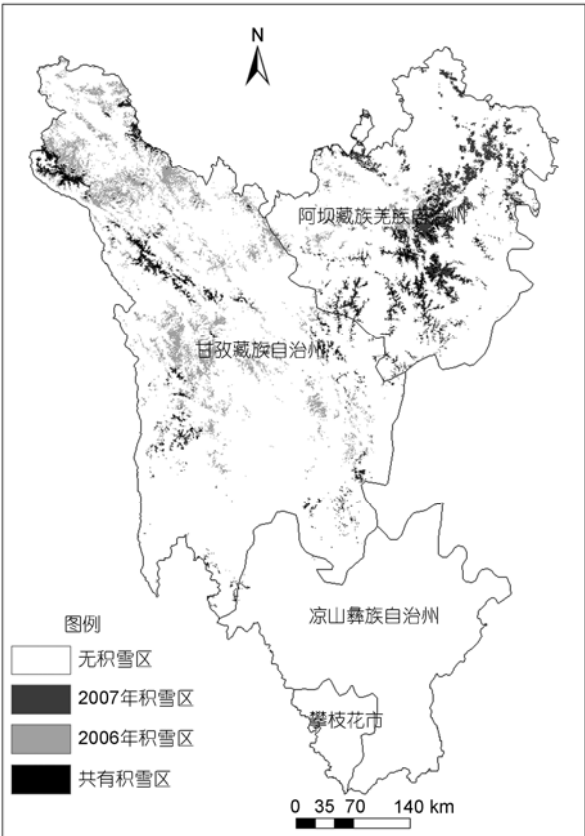


图 7 川西 2006~2007 年的积雪年际变化图

从 3~8 月, 雪线海拔呈上升趋势, 并在 8 月达到年内最高, 为 4998 m. 年间雪线海拔相差最大为 1533 m. 从 8~12 月, 雪线海拔又开始呈下降趋势.

从表 5 可以分析得出, 终年积雪雪线最低年份为 2002 年, 在海拔 4998 m 处, 最高年份为 2006 年, 在海拔 5058 m 处. 2002~2008 年间, 终年积雪雪线的变动范围为 60 m. 2002~2003 年以及 2004~2006 年, 雪线呈上升趋势; 2003~2004 年以及 2006 年~2008 年, 雪线呈下降趋势. 2002~2008 年, 雪线总体上呈波浪

表 4 2002 年各月积雪雪线表

月份	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
雪线(m)	4096	3896	3465	3629	4537	4659	4922	4998	4893	4365	4225	3923

表 5 2002~2008 年终年积雪雪线表

年份	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008
终年积雪雪线(m)	4998	5025	5011	5031	5058	5042	5038

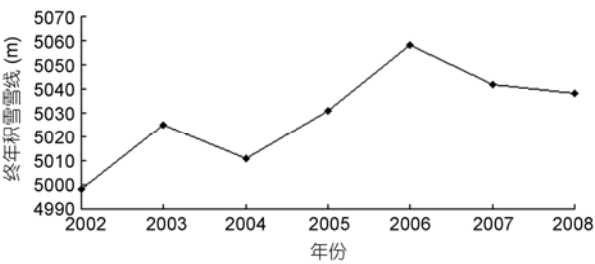


图 8 2002~2008 年各年终年积雪雪线

状的上升趋势. 通过相关性分析, 发现终年积雪雪线与 8 月月均温之间的相关系数为 0.695.

4 结果与讨论

通过本研究, 得出如下主要结论.

(1) 在川西, 终年无雪区占 60.4%, 主要分布在川西南的凉山州和攀枝花市; 积雪日数在 100 天以上的区域占 17.5%, 积雪日数在 195 天以上的区域占 4.5%. 终年积雪区占 0.3%. 积雪区主要出现在甘孜州和阿坝州. 在攀枝花, 接近 100% 的区域为终年无雪区. 在凉山州, 积雪区只有 3.4%, 且主要分别在其北部. 在阿坝州, 积雪区可达 49.1%, 积雪日数在 100 天以上的区域可达 22.6%. 在甘孜州, 积雪区可达 51%, 积雪日数在 100 天以上的区域可达 22.3%. 在阿坝州和甘孜州的农牧生产中应高度重视积雪的影响.

(2) 2002 年川西积雪面积最大出现在 3 月, 为 92093 km², 最少出现在 8 月, 为 933 km². 1~3 月积雪面积增长最快; 3~8 月积雪面积呈减少趋势, 其中 3~5

月, 减少最快. 8~12 月, 积雪面积增长由慢变快. 在 2002 年月积雪面积与月均气温和月降雨量之间在 0.05 的水平上存在着显著的负相关关系, 其相关系数分别为 -0.637 和 -0.630. 这表明, 在 2002 年, 积雪面积随温度的降低、降雨量的减少而增加.

(3) 2002~2008 年间, 8 月的最小积雪面积与其月均温在 0.05 的水平上呈显著的负相关关系, 其相关系数为 -0.767; 就 3 月积雪而言, 最大积雪年份为 2006 年, 最小积雪年份为 2007 年; 就 8 月积雪而言, 最小积雪年份为 2006 年, 最大积雪年份为 2002 年; 年内积雪消失面积最大出现在 2006 年, 为 109506 km², 年内积雪消失面积最小出现在 2007 年, 为 78003 km². 由于该区是众多河流的发源地, 年内积雪消失面积的减少会导致减少对这些河流水的补给, 并对其农牧工业生产和人民生活造成影响.

(4) 2002~2008 年间, 终年积雪雪线海拔最低年份为 2002 年, 在海拔 4998 m 处, 最高年份为 2006 年, 在海拔 5058 m 处. 终年积雪雪线的最大变动范围为 60 m. 雪线总体上呈波浪状的上升趋势. 终年积雪雪线与 8 月月均温之间呈正相关关系.

总之, 本文探索出了利用多时相 MODIS 数据分析积雪时空变化的技术方法. 并利用该方法揭示出了川西 2002~2008 年间积雪变化的时空特征. 与已有研究相比, 该研究提出了一种相对更为有效的积雪提取模型, 并填补了川西地区 2002~2008 年积雪时空变化分析的空白. 该研究成果对四川省的气候研究、积雪资源利用、生态服务功能潜力挖掘、生态安全保障、相关产业安全保障、生态建设等均具有重要意义. 对减少洪涝和旱灾等损失也具有重要意义.

致谢 该项研究得到中国科学院地理科学与资源研究所刘纪远研究员、邵全琴研究员、陶福祿研究员和徐兴良副研究员等的支持, 得到了电子科技大学地表所李世华博士、许文波博士和何彬彬博士等的支持, 审稿专家提供了宝贵的意见, 在此表示感谢.

参考文献

- 1 Lopez P, Sirguey P, Arnaud Y, et al. Snow Cover monitoring in the northern Patagonia ice field using MODIS satellite images (2000–2006). *Glob Planet Change*, 2008, 61: 103–116
- 2 Vikhamar D, Solberg R. Snow-cover mapping in forests by constrained linear spectral unmixing of MODIS data. *Remote Sens Environ*, 2003, 88: 309–323
- 3 徐国昌, 李珊, 洪波. 青藏高原雪盖异常对我国环流和降水的影响. *应用气象学报*, 1994, 5: 61–67
- 4 李晓燕, 黄玮, 欧国华. 2008 年低温雨雪冰冻灾害对昭通农林牧业的影响. *中国农业气象*, 2009, 30(增刊): 159–163
- 5 刘琪璟, 徐倩倩, 张国春. 高山带雪斑对牛皮杜鹃群落生产力的影响. *生态学报*, 2009, 29: 4035–4045
- 6 魏丹, 陈晓飞. 不同积雪覆盖条件下土壤冻结状况及水分的迁移规律. *安徽农业科学*, 2007, 35: 3570–3572
- 7 吴豪, 虞孝感. 长江河源地区及通天河流域水文特征. *水文*, 2002, 22: 52–53
- 8 穆振侠, 姜卉芳, 彭亮. 冰川积雪融水补给为主河流水库蓄水期起始时间的判定. *自然资源学报*, 2010, 25: 200–206
- 9 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: 地球科学*, 1999, 29: 63–69
- 10 车涛, 李新. 1993~2002 年中国积雪水资源时空分布与变化特征. *冰川冻土*, 2005, 27: 63–66
- 11 李培基. 青藏高原积雪对全球变暖的响应. *地理学报*, 1996, 51: 260–265
- 12 王叶堂, 何勇, 侯书贵, 等. 2002~2005 年青藏高原积雪时空变化分析. *冰川冻土*, 2007, 6: 855–861
- 13 窦燕, 陈曦, 包安明, 等. 2000~2006 年中国天山山区积雪时空分布特征研究. *冰川冻土*, 2010, 32: 28–34
- 14 蔡迪花, 郭铤, 王兴, 等. 基于 MODIS 的祁连山区积雪时空变化特征. *冰川冻土*, 2009, 31: 1029–1036
- 15 Maurer E P, Rhoads J D, Duhayah R, et al. Evaluation of the snow-covered area data product from MODIS. *Hydrol Process*, 2003, 17: 59–71
- 16 王澄海, 王芝兰, 崔洋. 40 余年来中国地区季节性积雪的空间分布及年际变化特征. *冰川冻土*, 2009, 31: 301–310
- 17 杨建平, 丁永建, 刘俊峰. 长江黄河源区积雪空间分布与年代际变化. *冰川冻土*, 2006, 28: 648–656
- 18 侯慧姝, 杨宏业. MODIS 积雪产品及研究应用概述. *遥感技术与应用*, 2009, 4: 252–256
- 19 季泉, 孙龙祥, 王勇, 等. 基于 MODIS 数据的积雪监测. *遥感信息*, 2006, 3: 57–58, 68
- 20 黄晓东, 张学通, 李霞, 等. 北疆牧区 MODIS 积雪产品 MOD0A1 和 MOD10A2 的精度分析与评价. *冰川冻土*, 2007, 29: 722–729
- 21 Klein A G, Hall D K, Riggs G A. Improving snow-cover mapping in forests through the use of a Canopy Reflectance Model. *Hydrol Process*, 1998, 12: 1723–1744
- 22 丁丽霞, 周斌, 王人潮. 遥感监测中 5 种相对辐射校正方法研究. *浙江大学学报(农业与生命科学版)*, 2005, 31: 269–276
- 23 邓书斌, 武红敢, 江涛. 遥感动态监测中的相对辐射校正方法研究. *遥感信息*, 2008, 4: 71–75
- 24 张鹏强, 余旭初, 刘智. 多时相遥感图像相对辐射校正. *遥感学报*, 2006, 10: 339–343
- 25 钟家强, 王润生. 一种稳健的多时相遥感图像相对辐射校正方法. *遥感技术与应用*, 2005, 20: 611–615
- 26 黄勇杰, 王树国, 刘俊义. 遥感图像去云算法研究. *仪器仪表学报*, 2003, 8: 490–491
- 27 杨金红, 顾松山, 程明虎. 插值法在去除 MODIS 遥感影像条带噪声中的应用. *气象科学*, 2007, 27: 604–609