

利用 MODIS 产品分析东北地区积雪覆盖状况及冬季气候特征

韩庆红^{1,2}, 王普才³, 王玉昆^{1,2}, 王建凯³, 陈渭民², 高洁¹

(1 吉林市气象局, 吉林 吉林 132013; 2 南京信息工程大学 遥感学院, 江苏 南京 210044;

3 中国科学院 大气物理研究所 中层大气遥感与探测开放实验室, 北京 100029)

摘要: 利用 Terra 卫星 MODIS 产品提取了东北地区 2000—2005 年积雪覆盖率信息, 给出了近 5 a 积雪覆盖率的时空变化和可信度信息, 可以作为流域融雪径流预报模型的输入参数使用, 也可以作为区域性积雪对气候反馈的研究依据。依照积雪覆盖的时间序列图及分布图分析了各年份冬季冷空气强度及变化和次年春季融雪状况。

关键词: 东北地区; 雪盖; MODIS 产品; 气候特征

中图分类号: P405 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-2022(2007) 03-0396-06

Characters of Winter Snow-Cover and Climate in Northeast China Revealed by MODIS Products

HAN Qing-hong^{1,2}, WANG Pu-cai³, WANG Yu-kun^{1,2},

WANG Jian-kai³, CHEN Wei-min², GAO Jie¹

(1 Jilin Meteorological Bureau, Jilin 132013, China; 2 School of Remote Sensing, NUIST, Nanjing 210044, China;

3 LAGEO, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Science, Beijing 100029, China)

Abstract The snow cover data with the confidence information in Northeast China during 2000—2005 winters are extracted from the Terra MODIS products in this paper. The results can be used as the input in some hydrological models and can be also used to study the feedback of regional snow-cover to climate. The intensity of cold air activities in winter and the snow-melting status in the next spring in 2000—2005 over Northeast China are analyzed using the snow-cover data set obtained in this paper.

Key words Northeast China; snow-cover; MODIS products; climatic character

0 引言

积雪作为一种重要的淡水资源, 对地表的辐射平衡和能量循环特别是水循环起着非常重要的作用^[1], 是影响区域性和全球气候变化的一个重要因素。对区域性积雪变化信息的掌握有利于短期气候预测^[2-3], 积雪信息可以作为水文模式的初始输入参数, 可以验证气候模式; 另外, 积雪的监测有利于农业生产规划和防灾减灾。

常规积雪可以通过地面观测得到, 对于大面积的无人区积雪只能通过星载光学遥感仪器和被动微波遥感仪器等遥感方式得到。美国国家海洋和大气局 (NOAA) 从 1966 年就开始利用极轨卫星资料通过人工绘制 190 km 分辨率的北半球周积雪覆盖

图, 1997 年后开始制作 25 km 分辨率的逐日北半球积雪图^[4]; NOAA 相继发射的系列卫星搭载的不同的探测器, 为国内外学者提供了更多的大气和地表研究资料, 包括近年来用于积雪和植被监测的 AVHRR 数据^[5]; 1968 年前苏联发射了 Cosmos-243 卫星, 最早开始利用星载微波辐射计进行地球物理观测; 1978 年 NASA 的 Nimbus 卫星的扫描式多通道微波辐射计 (SMMR) 提供的多通道多极化方式的观测资料促进了国内外积雪参数的遥感研究^[5]。Hall 等^[6]对 Terra 卫星的 MODIS 雪盖产品进行了较为详尽的介绍, 并利用 2000 年 3 月飞机试验结果和同年 12 月的 Landsat-7 ETM+ 数据, 在美国新罕布什尔州的基涅附近对 MOD10A1 数据即 MODIS 的 500 m 积雪数据进行了验证; 李培基^[7]根据地面积

雪和降雪观测资料, 计算了我国年平均降雪补给量和冬季平均积雪贮量, 分析了我国季节雪资源的地理分布、季节分配及特点。20 世纪 70 年代末, 中国科学院兰州冰川冻土研究所^[8]开始利用 NOAA 影像资料进行东北和华北积雪研究, 并相继进行了更进一步的研究工作; 高峰等^[9]利用被动微波遥感的方式反演了我国青藏高原积雪状况, 实际应用价值较高, 但对于不同的地区还应在遥感算法上改进; 陈爱军等^[10]应用 AMSU 3 个通道资料提出了我国五大区域的雪盖范围判别方法, 检测结果有比较高的准确性; 郭铤等^[11]利用 AVHRR 5 个通道资料分析了我国祁连山区 10 a 的植被和积雪状况, 但分辨率相对还比较低。由于雪具有较高反照率, 与云以外的其他大多数自然地物有明显的不同, 利用卫星遥感监测积雪是合适的。MODIS(中分辨率成像光谱仪)作为是美国 NASA 1999 年 12 月发射的 Terra 卫星和 2002 年 5 月相继发射的 Aqua 卫星的主要探测器^[12], 具有 36 个光谱通道, 分布在 0.4~14 μm 的电磁波范围内。仪器空间分辨率分别为 250 m、500 m 和 1 000 m, 视幅宽度为 2 330 km, 每日可获得两次来自大气、海洋和陆地表面信息的全球观测数据, 这对于开展自然灾害与生态环境和气候变化研究有着非常重要的意义。

东北地区作为我国冬季的主要积雪区之一^[13], 平均积雪深度 5 cm 左右, 为稳定性积雪区。积雪作为东北地区重要的淡水资源, 可以为春季农业灌溉提供一定的保证, 对东北地区积雪的监测有利于土地干旱和湿地变化的监测。本文利用 Terra 卫星 MODIS 资料提取了东北地区 2000—2005 年冬季的积雪覆盖信息, 得到了近 5 a 的积雪覆盖状况和变化特征, 可以作为流域融雪径流的预报模型的输入参数使用, 并分析了这 5 a 冬季的气候特征和春季融雪情况, 旨在为东北地区农业、防灾减灾、国防和水文等领域提供更科学的依据。

1 原理和技术

MODIS 的冰雪监测算法是根据冰雪的波谱特性, 即其在可见光强的反射和近红外吸收的特性, 选定归一化差分积雪指数 (NDSI I_{NDS}) 和近红外的反射率为判别标准。NDSI 主要用来鉴别冰雪, 并区分大量积雪, 是根据 MODIS 的 4 6 通道即可见光波段 (波长 545~564 nm)、近红外波段 (波长 1 638~1 652 nm) 反射率采用以下公式计算:

$$I_{\text{NDS}} = (\alpha_4 - \alpha_6) / (\alpha_4 + \alpha_6)。$$

利用 NDSI 可以有效地分辨积雪和其他地表, 也能很好地监测阳光和阴影下的积雪。地表水体也可能出现 NDSI 值较高的情况, MODIS 利用近红外 2 通道的反射率来区分水体和冰雪。

云和积雪在可见光波段具有类似的特征, MODIS 云雪判识技术是建立在云和冰雪的反射率和辐射率之差的基础上的。云在可见光和近红外部分都具有很高的反射率, 积雪在可见光波段具有较高的反射率, 而在近红外波段反射率明显降低, MODIS 正是利用这一特性区分云雪。另外, MODIS 的第 26 通道对卷云非常敏感, 具有区分积雪和卷云的能力, 可以消除薄卷云带来的影响。与其他遥感方式获得的资料相比 MODIS 有着明显的优势。

MODIS 积雪产品是在云检测的基础上^[14], 利用植被指数 (NDVI I_{NDV}) 判断地表植被状况, NDVI 是根据 MODIS 的 1、2 通道即红波段 (波长 620~670 nm)、近红外波段 (波长 841~876 nm) 采用以下公式计算:

$$I_{\text{NDV}} = (R_1 - R_2) / (R_1 + R_2)。$$

对于森林或稠密植被区域通过归一化差分积雪指数 (NDSI)、植被指数 (NDVI)、通道 2 反射率、通道 4 反射率和 MODIS 地表温度判定森林区是否为积雪。使用多边形法, 利用 NDSI 和 NDVI 确定森林积雪区域, 对于闭合区域中的像素点, 该点通道 2 反射率大于 0.11, 通道 4 反射率大于 0.10, 地表温度低于 283 K, 3 个条件同时满足时, 判定该点为有积雪。对于没有植被覆盖或植被很薄的区域用归一化积雪指数 (NDSI)、通道 2、通道 4 反射率和地表温度判定是否为积雪。若 NDSI 大于 0.4, 通道 2 反射率大于 0.11, 通道 4 反射率大于 0.10, 地表温度低于 283 K 时, 3 个条件同时满足时, 判定该点为有积雪。

2 资料及处理方法

东北地区包含辽宁、吉林、黑龙江三省和内蒙古的部分地区, 位于 118.5~135.5°E, 38.5~54°N, 地处欧亚大陆东缘, 属北温带季风气候区, 大陆性气候明显, 冬季寒冷漫长, 积雪覆盖大部分地区属于稳定性积雪区, 海拔高度变化较大, 有森林覆盖的长白山和大兴安岭及小兴安岭, 也有三江平原和呼伦贝尔草原及丘陵地带。

本文利用 Terra 卫星的 MODIS 8 d 全球雪盖产品 (在所选的时间段内按时间先后顺序每 8 d 作为一个时间序列), 通过 Matlab 程序剪切获得了研究

区域内 (118~ 135°E, 38~ 54°N) 2000—2005 年各年冬季 (10 月 1 日—次年 5 月 31 日) 5 km 格点雪盖资料, 并应用程序进行了数据分析和处理, 确定了区域内积雪覆盖率并分析了其确定性, 给出了可信度信息。

5 km 格点资料的计算基于 MODIS MOD02 500 m 分辨率 4 个通道 (1, 2, 4, 6 通道) 反射率资料、MOD03 定位信息资料和 MOD35 云检测资料。使用 MOD35 的云检测结果来确定该点是否有云遮挡; MOD03 1 000 m 分辨率的水陆标志资料, 确定该点是否为海洋水面; 若 MODIS L1B 资料中无数据或数据不可用, 则确定为资料缺测。利用积雪判别方法确定的 500 m 分辨率的 MOD10A1 数据 (二进制算法), 每个像元值通过二进制算法得到即 0 或 1, 0 代表无雪, 1 代表有雪, 像元值按相应的格点写入 0.05°经纬度网格, 每个格点对应 500 m 分辨率

的像元共 120 个, 格点数据提取了它所对应的所有像元信息, 包含雪和云在观测值中的百分数、可信度等。MODIS 逐日积雪产品根据积雪监测算法自动合成, 8 d 合成的积雪产品是有积雪覆盖条件下由连续几天的积雪产品合成的, 得出的是 8 d 周期的最大积雪范围。如果某一像元在这一时期任一轨道上有积雪, 那么即使这 8 d 内其他所有轨道上没有积雪, 也要将这一像元作为有积雪加以判别。

当有云存在时, 由于云的遮挡, 使得积雪覆盖率存在误差, 本文提取了 MODIS 积雪产品的可信度信息, 给出了积雪覆盖率 8 d 可信度变化图。

3 监测结果分析

研究区域内 2000—2005 年冬季 8 d 的积雪覆盖率时间序列如图 1 所示, 与其相对应的可信度信息如图 2 所示。

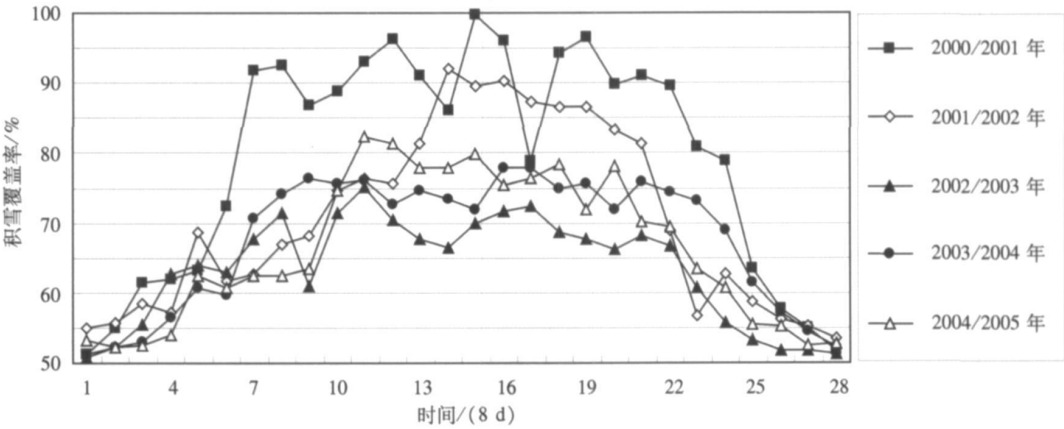


图 1 2000—2005 年冬季 8 d 积雪覆盖率时间序列
Fig 1 8-d snow-cover percentage for the winters (1st October—31th May) 2000—2005

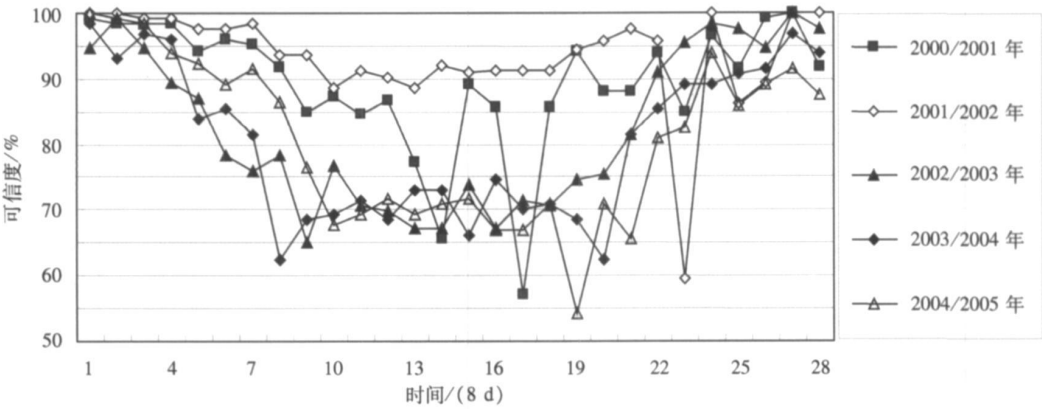


图 2 2000—2005 年冬季积雪可信度变化
Fig 2 Confidence percentages of 8-d snow-cover for the winters 2000—2005

本文选择有代表性的雪季初期 10 月 17—24 日、中期 12 月 27—31 日和末期次年 3 月 31 日—4 月 7 日,并给出了研究区域内的积雪分布。2000—2005 年冬季初期、中期和末期的雪盖分布如图 3~7 所示。图中采用地理投影方式的 $0.05^{\circ} \times 0.05^{\circ}$ 经纬度网格,无效值用 -1 表示,有效区域格点值从 0 ~ 1 的浮点数表示格点的积雪覆盖率,值为 0 和 1 时分别表示无积雪和积雪全部覆盖。

在北方地区,春季气温回升,河流上游由于冰雪融化流下的雪水称为“桃花水”。在《辞海》里,有关于“桃花水”的解释:“二月三月,桃花始开,冰泮雨积,川流猥集,波澜盛长,谓之桃花水”。对春季干旱较为严重的地区,可以采取适当的方式拦截“桃花水”以缓解春季的旱情,利用水库拦蓄桃花水是利用“桃花水”的较好方式,可以调节春季农业灌溉或水利发电。通过雪盖信息,可以得到积雪融化的主要时间段和主要地区,融雪时间越集中“桃花水”越丰厚。对雪盖的分析可以确定“桃花水”出现的主要时间和地域,有利于干旱地区对桃花水的拦截和治理,对农业灌溉有重要意义。

从雪盖时间变化和雪盖分布可以看出,2000 年冬季(图 3)冷空气势力始终很强,是这 5 a 里最寒

冷的冬季,11 月 20 日以后稳定性积雪出现,且全区大于 40 % 地区被积雪覆盖,大范围积雪维持直到 2001 年 3 月下旬,全区大面积积雪维持时间超过 140 d;2001 年 3 月末、4 月初稳定性积雪开始融化,4 月末全区已经基本无积雪。可见,2001 年春季回暖较晚,春季融雪易形成径流,桃花水颇丰,冬季降雪较多缓解了春旱。

2001 年秋季暖空气势力较弱,初冬冷空气活动较早,11 月初就有稳定性积雪出现,12 月中旬以后出现全区大于或等于 40 % 地区积雪覆盖,大范围积雪维持直到 2002 年 3 月上旬,冷空气势力比较强,全区大面积积雪维持时间超过 90 d;2002 年春季暖空气势力不强,弱冷空气活动频繁,3 月中旬稳定性积雪开始融化,4 月末全区已经基本无积雪。可见,2002 年春季回暖较早,“桃花水”较多且出现在 3 月中下旬(图 4)。

2002 年(图 5)是这 5 a 里很温暖的冬季,降雪出现时间比较早,10 月下旬就开始出现稳定性积雪,但整个冬季只有不足 10 d 的大范围积雪维持,2003 年 3 月中旬稳定性积雪开始融化,4 月中旬全区已经基本无积雪。可见,2003 年春季回暖较早,“桃花水”很少,春旱严重。

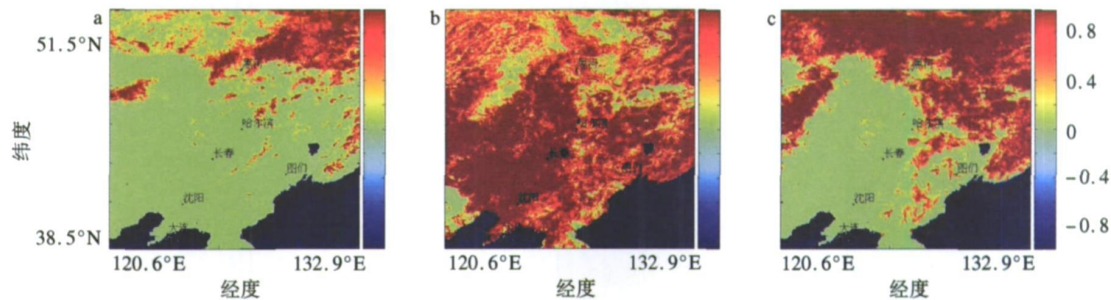


图 3 东北地区 2000/2001 年冬季初期 (a)、中期 (b) 和末期 (c) 积雪覆盖率
Fig 3 Snow-cover percentages in 2000/2001 (a) early, (b) middle and (c) late winter over Northeast China

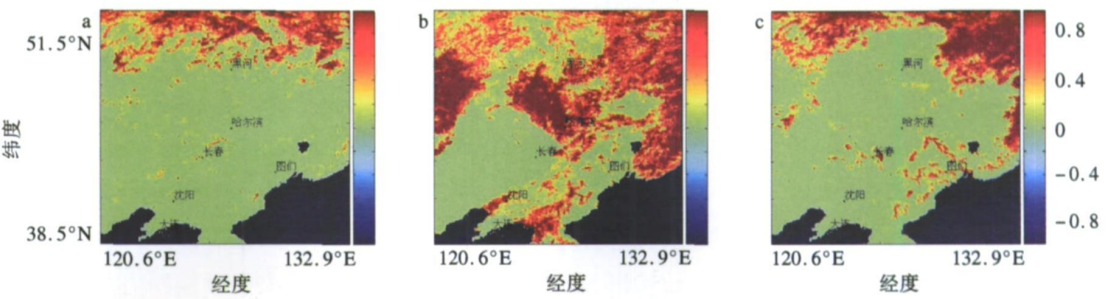


图 4 东北地区 2001/2002 年冬季初期 (a)、中期 (b) 和末期 (c) 积雪覆盖率
Fig 4 Snow-cover percentages in 2001/2002 (a) early, (b) middle and (c) late winter over Northeast China

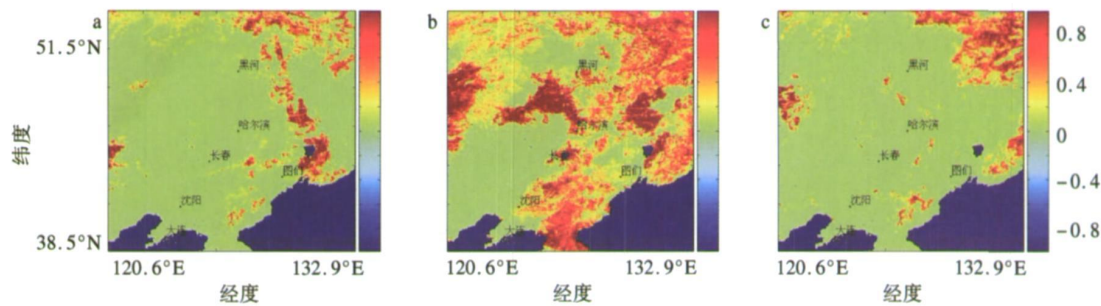


图 5 东北地区 2002/2003 年冬季初期 (a)、中期 (b) 和末期 (c) 积雪覆盖率

Fig 5 Snow-cover percentages in 2002/2003 (a) early, (b) middle and (c) late winter over Northeast China

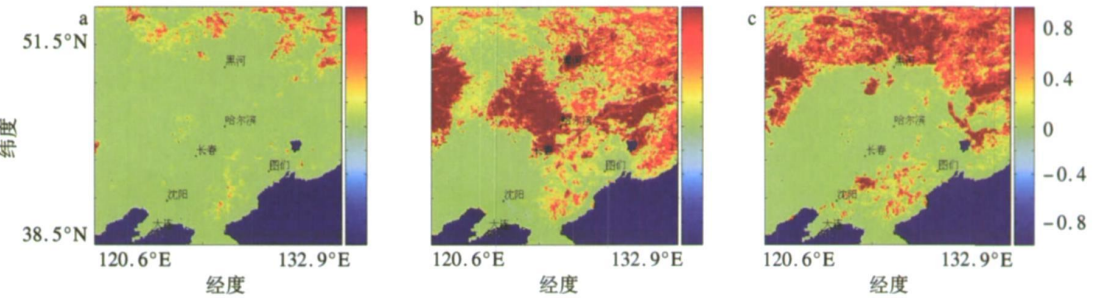


图 6 东北地区 2003/2004 年冬季初期 (a)、中期 (b) 和末期 (c) 积雪覆盖率

Fig 6 Snow-cover percentages in 2003/2004 (a) early, (b) middle and (c) late winter over Northeast China

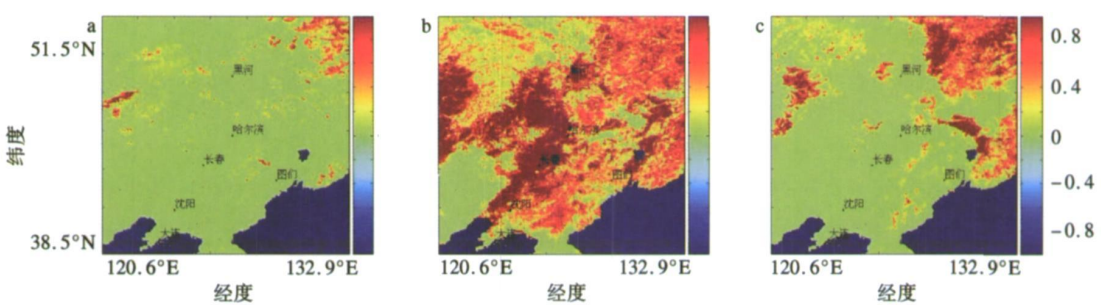


图 7 东北地区 2004/2005 年冬季初期 (a)、中期 (b) 和末期 (c) 积雪覆盖率

Fig 7 Snow-cover percentages in 2004 (a) early, (b) middle and (c) late winter over Northeast China

2003 年 (图 6) 是这 5 a 里比较温暖的冬季, 10 月下旬有一次冷空气活动, 11 月下旬出现稳定性积雪, 直到 12 月初才开始大范围积雪覆盖, 整个冬季大范围积雪维持时间超过 80 d 冷空气势力不强。2004 年 3 月下旬稳定性积雪开始融化, 4 月中旬后全区已经基本无积雪。可见, 2004 年春季回暖较早, “桃花水”较少, 春旱比较严重。

2004 年 (图 7) 冬季冷空气缓慢入侵势力较强, 11 月上旬就开始出现稳定性积雪, 12 月中旬后出现大范围积雪, 整个冬季大范围积雪维持时间 80 d 左右; 2005 年 3 月初稳定性积雪开始缓慢融化, 4 月中旬后全区已经基本无积雪。可见, 2005 年春季回暖缓慢, “桃花水”不多, 春旱比较严重。

从可信度变化 (图 2) 来看, 在雪季初期和末期 MODIS 产品可信度都很高, 在雪季中期有不同程度的下降, 整个冬季平均可信度 2000—2004 年分别为 88.1 %、93.4 %、82.3 %、80.4 % 和 80.5 %。

4 结论和讨论

本文通过提取 MODIS 积雪产品, 给出了东北地区近 5 a 来的积雪覆盖信息, 可以作为流域融雪径流的预报模型的输入参数使用, 也可以作为研究区域性积雪对气候反馈的重要依据加以分析。通过 8 d 雪盖时间序列和积雪分布分析了冬季的冷空气强度及冷暖空气变化, 判断了各年份春季桃花水出现的时间和丰枯情况: 2000/2001 年和 2001/2002

年冬季冷空气势力强且活动非常频繁, 导致积雪覆盖范围广、时间长, 次年春天融雪缓解了春旱; 2002/2003 和 2003/2004 年冬季的冷空气活动相对较少, 大范围积雪维持时间较短, 次年春天的融雪少春旱比较严重; 2004/2005 年冬季冷空气较强, 积雪覆盖范围广维持时间较长, 但次年春天暖空气势力弱融雪缓慢, 无法缓解春旱。MODIS 以其较高的分辨率和较高的可信度, 弥补了其他积雪遥感产品的不足, 即使在雪季初期可信度仍然较高。相对而言, 被动微波遥感的数据在雪季初期对湿雪就容易发生误判。

在雪季中期各年份的雪盖信息可信度都出现了不同程度的下降, 这很大程度上是由于雪季中期冷暖空气活动频繁, 云覆盖与雪季初期和末期相比都有很大程度的增加, 使得 MODIS 探测出现误差。比如, 2001 年冬季冷空气势力始终很强, 暖空气势力较弱, 冷暖交替不明显, 晴朗且较冷的日数较多, MODIS 的探测受云的覆盖影响较小, 这一年的可信度比其他年份都高。后期由于暖空气势力逐渐增强, MODIS 的探测受云的覆盖影响也有所增大, 可信度也有所下降, 可见可信度信息反映了云覆盖的信息, 也可以利用可信度信息分析冷暖空气的活动和强弱情况。

由于 MOD10C2 产品只有积雪覆盖率和可信度等信息, 对于积雪深度的研究可以利用 MODIS 丰富的通道信息进一步来做, 借鉴雪深的反演算法结合地面雪深观测资料进行验证^[15], 或者加入被动遥感的微波辐射数据共同分析, 还可以进一步利用雪深来计算雪水当量及地表融雪径流等。

Terra 卫星资料有限, 本文对近 5 a 的信息进行了分析, 对更长期的积雪信息还应结合其他遥感数据比如 AVHRR 等一并进行研究。

参考文献:

- [1] 王绍武. 冰雪覆盖与气候变化 [J]. 地理研究, 1983, 2(3): 73-86
- [2] 杨修群, 张琳娜. 1988—1998 年北半球积雪时空变化特征分析 [J]. 大气科学, 2001, 25(6): 757-766
- [3] Robinson D A. Snow cover-atmospheric interactions [C] // Large-scale Effects of Seasonal Snow cover. IAHS Publ. 1987. 160
- [4] Ramsay B. H. The interactive multisensor snow and ice mapping system [J]. Hydrological Processes, 1998, 12: 1537-1546
- [5] 周咏梅, 贾生海, 刘萍. 利用 NOAA-AVHRR 资料估算积雪参量 [J]. 气象科学, 2001, 21(1): 117-121
- [6] Hall D K, Riggs G A, Salomonson V V, et al. MODIS snow-cover products [J]. Remote Sensing of Environment, 2002, 83: 181-194.
- [7] 李培基. 中国季节积雪资源的初步评价 [J]. 地理学报, 1988, 43(2): 108-119
- [8] 曾群柱. 我国冰雪遥感回顾与展望 [J]. 冰川冻土, 1988, 10(3): 352-355
- [9] 高峰, 李新, Armstrong R L, 等. 被动微波遥感在青藏高原积雪业务监测中的初步应用 [J]. 遥感技术与应用, 2003, 18(6): 360-363
- [10] 陈爱军, 刘玉洁, 杜秉玉. AMSU 资料监测新疆雪盖范围的初步应用 [J]. 南京气象学院学报, 2003, 26(6): 759-767.
- [11] 郭铤, 杨兰芳, 李民轩. 利用气象卫星资料研究祁连山区植被和积雪变化 [J]. 应用气象学报, 2003, 14(6): 700-707.
- [12] 刘玉洁, 杨忠东等. MODIS 遥感信息处理原理与算法 [M]. 北京: 科学出版社, 2001
- [13] 徐文铎. 中国东北主要植被类型的分布与气候的关系 [J]. 植物生态学与地植物学学报, 1986(4): 254-262
- [14] Hall D K, Foster J L, Vebryla D L, et al. Assessment of snow-cover mapping accuracy in a variety of vegetation-cover densities in central Alaska [J]. Remote Sensing of Environment, 1998, 66(2): 129-137
- [15] 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 [J]. 冰川冻土, 2000, 22(4): 358-361.