

积雪混合像元光谱特征观测及解混方法比较

郝晓华¹, 王杰^{1,4}, 王建¹, 黄晓东², 李弘毅¹, 刘艳³

1. 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 甘肃 兰州 730000
2. 草地农业生态系统国家重点实验室, 兰州大学草地农业科技学院, 甘肃 兰州 730020
3. 中国气象局沙漠气象研究所, 新疆 乌鲁木齐 830002
4. 中国科学院研究生院, 北京 100049

摘要 积雪混合像元分解方法研究及积雪比例产品的发展是积雪遥感的重要研究方向。在我国北疆地区利用 SVC HR-1024 野外便携式光谱仪观测了已知积雪比例的混合像元光谱特征并进行系统分析, 同时, 采用四种混合像元分解模型对实测光谱进行解混及精度评价。结果表明反射率随积雪比例均匀下降并不呈均匀的线性变化, 在不同波段呈非线性变化特征, 积雪像元解混精度与观测尺度的不同有一定的联系, 尺度越小, 解混精度越低; 进一步对实测光谱的解混结果表明, 线性回归法精度较低, 特别是对于积雪比例小于 50% 的解混结果不准确, 稀疏回归解混法和非负矩阵解混法略高于线性混合像元分解法, 但线性混合像元分解法运算效率最高, 稀疏回归解混法运算效率最低, 当对遥感图像进行解混时, 要综合考虑四种方法的计算效率。通过将推动积雪混合像元分解定量遥感研究, 并为遥感影像准确提取积雪比例提供理论依据。

关键词 积雪比例; 光谱特征; 解混算法

中图分类号: TP751.1 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2012)10-2753-06

引言

我国西部山区有丰富的积雪资源, 是许多大江大河的发源地, 特别北疆和青藏高原积雪区属于西部山区积雪, 是我国的两大重要季节性积雪区, 准确估计这些地区的积雪有重要的意义^[1]。目前, 水文学家已经发展了许多分布式积雪模型用来预测积雪变化和融雪情况^[2-6]。准确的积雪覆盖面积是这些分布式水文模型的重要输入参数。遥感技术的发展为积雪面积的获取提供了便利条件, 最早利用遥感监测雪盖变化到现在, 已经有 40 多年的历史。目前在我国使用较多的是 MODIS、FY-2C 雪盖产品^[7, 8], 这些产品已经应用于水文预报^[9, 10]。传统遥感获取的积雪面积是二值图, 即每个像元被识别为雪和非雪像元。然而, 实际的每个像元的积雪面积并不是简单的有雪或无雪, 特别是在地形复杂地区和下垫面为灌木、森林地区, 一个像元同时包含积雪、岩石、植被或土壤, 其光谱特征受地表覆盖类型、地形、积雪属性的共同作用, 是多种信息的混合体。随着水文模型精度的提高, 二值积雪图输入将被更为准确的积雪比例图所代替, 因此各种信

息如何分离, 更好的提取积雪覆盖比例是当前积雪遥感的重要研究方向之一。

本文探讨不同积雪比例及不同组分对混合像元光谱的影响, 同时比较不同积雪像元分解方法的优劣性。通过本研究将进一步了解积雪混合像元分解中存在的问题, 并为遥感影像准确提取积雪比例提供理论依据。

1 试验方案

笔者设计了积雪混合像元光谱特征观测的试验, 该试验是积雪遥感协同观测系列试验 cooperative observation series for snow 的第一次试验, 简称为 COSS1, 该试验将结合相应的积雪参数分析不同积雪覆盖度的光谱特征变化, 利用目前较为广泛使用的四种混合像元解算法进行积雪组分提取, 并对四种方法进行检验及精度评价。

1.1 观测仪器及研究区介绍

试验利用美国 Spectra Vista 公司生产的 SVC HR-1024 便携式野外光谱仪测量了已知积雪覆盖比例的积雪光谱特征, 该光谱仪可测量光谱范围从 350~2 500 nm, 光谱分辨

收稿日期: 2012-05-21, 修订日期: 2012-08-10

基金项目: 国家(973 计划)重点基础研究发展项目(2010CB951403), 国家自然科学基金项目(41001197, 41101337, 41071227, 41101345)和西部博士项目(29Y128861)资助

作者简介: 郝晓华, 1979 年生, 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所助理研究员 e-mail: haoxh@lzb.ac.cn

率可达 1 nm。

研究区一个位于阜康荒漠生态系统国家野外科学观测研究站(简称阜康站),另一个位于富蕴县气象局,两个区域都位于北疆,是我国重要的季节性积雪区。新疆阜康站位于阜康县的三工河流域(44.29°N, 87.93°E, 海拔 470 m),属于中国生态系统研究网络(CERN)。本站所处地区属温带大陆性荒漠气候,夏季炎热而冬季寒冷,冬季积雪最大为 29 cm^[11]。富蕴县地处新疆最北部的阿勒泰地区东部,位于 45°00′—48°03′N, 88°10′—90°31′E 范围之间,海拔梯度 430~3 863 m,地处欧亚大陆腹地,远离海洋,纬度较高,属大陆性温带寒冷气候区,年降水量 186.4 mm^[12]。试验期主要根据两地气象站实测雪深资料分析选取,阜康站积雪期从每年的 12 月初到次年 3 月中旬左右,富蕴地区积雪期从每年的 12 月初到次年 3 月初。选择阜康站观测日期为 2010 年 12 月 6 日,富蕴县观测日期为 2010 年 12 月 13 日,均属于积雪积累期,气温较低,降雪多为新雪、雪湿度不大。

1.2 光谱采集方案

在试验中我们利用人工方法获取不同积雪比例,并测量不同积雪比例的光谱特征光谱及积雪属性特征。我们设计了如下观测方案:将光谱仪光纤探头固定并垂直于积雪场,根据探头高度 h 和探头视场角 θ 计算其测量足迹(圆形)的半径 r ,参见式(1),

$$r = h \times \tan(\theta/2) \quad (1)$$

其中光谱仪探头视场角为 25°,为了保证观测的准确性,观测的积雪场要大于测量足迹。以光谱仪观测方向与积雪场的垂心为测量足迹的圆心,逐渐等比例的减少积雪面积,我们将圆形划分为 8 份,利用光谱仪分别测量从 1, 7/8, ..., 1/8, 最后一直到 0 的光谱特征。图 1 是这种已知积雪比例的光谱测量方案示意图。对于薄雪,通过将积雪逐渐减少的方式获取已知积雪比例的光谱特征,在阜康站,雪深 2.5 cm,采用这种方式;对于较厚的积雪获取已知积雪覆盖一方面比较耗时,另一方面容易由积雪遮挡造成阴影,使下垫面更复杂,不利于光谱分析,因此通过遮挡的方式来获取不同积雪比例,在富蕴站雪深 30 cm,采用了这种方法。图 2 是阜康站和富蕴站已知积雪比例的光谱特征实测照片。在试验中,为

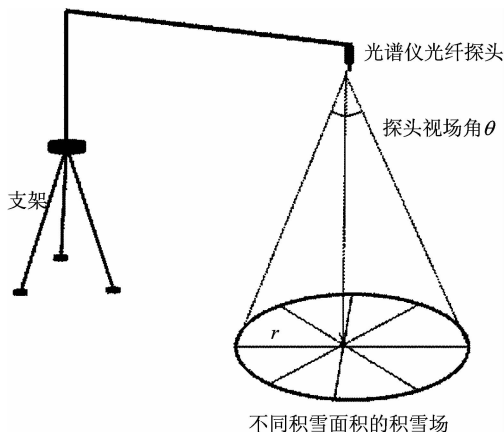


Fig. 1 The sketch of spectral reflectance measurement from different fractional snow cover



Fig. 2 The in situ measurement of spectral reflectance of different fractional snow cover

(a): Fukang; (b): Fuyun

为了使观测数据具有可比性,所有光谱观测要尽快完成。此外,同时我们也测量了影响积雪光谱特征的相关积雪参数。

2 实测光谱特征分析

阜康站光谱测量时间为北京时间 15 点 34 分到 16 点 05 分,积雪深度为 2.5 cm,积雪密度为 $0.10 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$,体积液态水含量为 0.01%,积雪属于干雪,雪粒径呈球形。富蕴县观测时间为北京时间 13 点 25 分到 13 点 42 分,积雪深度为 33 cm,积雪密度为 $0.14 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$,体积液态水含量为 1.01%,积雪属于干雪,多次降雪积累使积雪场分层比较明显,此外由于融化和再冻结以及积压过程,使得积雪粒径产生了形变,呈不规则形状,包含积雪簇。

图 3 是测量的不同积雪比例的光谱特征,(a)为阜康观测,(b)为富蕴观测。从 350 nm 处最上边曲线是纯雪像元的光谱,下面是纯下垫面的光谱,其他曲线是积雪比例从 7/8 逐渐降低到 1/8 的光谱。在波段 1 800 nm 以后测量的光谱噪声较大,因此选择 350~1 800 nm 的光谱进行分析。阜康站下垫面为水泥,可以看到从 580 nm 以上,水泥地光谱较为平缓,无显著的变化。从整个光谱来说,在 350~600 nm 范围内,反射率随着积雪比例降低逐渐减低;而在 600~1 400 nm 范围内,反射率变化呈不规律性,纯雪、7/8 和 6/8 积雪比例的光谱特征相似,甚至积雪比例较低的反射率反而较高,5/8 和 4/8 在该波段范围内光谱特征相似;在 1 400~1 800 nm 范围内,光谱随着积雪比例降低显著升高,呈线性变化特征。富蕴下垫面为纸板,可以看到,其不同于水泥地,在 500~1 000 nm,表面反射率从 0.15 升高到 0.5 左右,之后趋于平缓,在 1 500 nm 附件有一个波谷;在 350~1 200 nm 范围内,反射率随着积雪比例降低而降低,但这种变化

也呈不规则性, 纯雪和 7/8, 7/8 与 6/8 以及 4/8 与 3/8 雪比例反射率变化幅度较大, 而 6/8, 5/8 和 4/8 雪比例光谱平缓降低, 3/8, 2/8 和 1/8 雪比例反射率变化幅度较小。在 1 200 ~ 1 800 nm 范围内, 也呈现相同规律, 不同的是雪比例与反射率成反比。

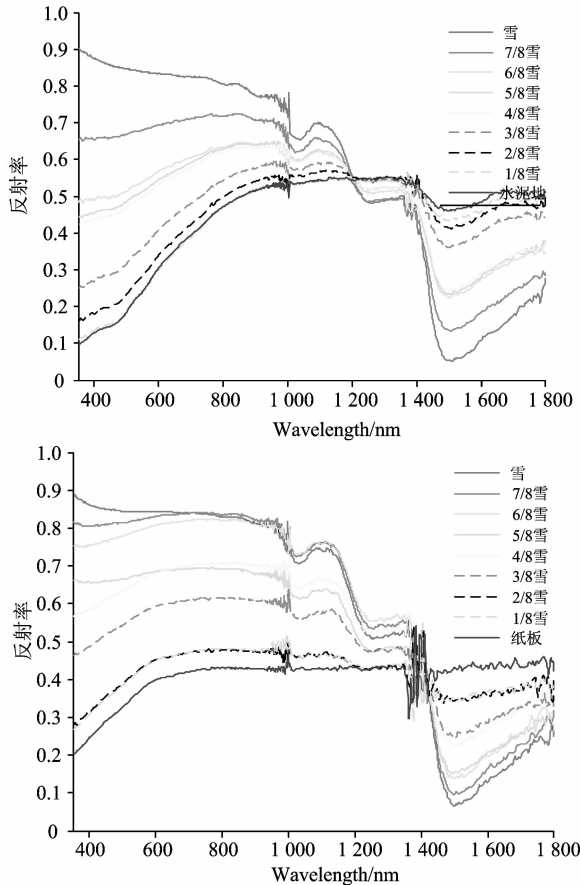


Fig. 3 The in situ spectral reflectance of different fractional snow cover in north Xinjiang

(a): Fukang; (b): Fuyun

从光谱曲线可以看到, 所有光谱曲线在 1 000 和 1 400 nm 波段附近有一些波动。1 000 nm 数据波动是由于该波段处于光谱仪探测器的交接波段, 不同探测器之间有重复造成的; 1 400 nm 波段附近是由于大气和积雪中水汽影响造成的。在混合像元分解时, 如果用的波段较少, 要避免这些波段, 而在用到整个波段进行像元解混时, 由于整个波段数量是 1 451 个(350~1 800 nm), 算法是在高维空间上进行, 因此这几个波段的波动对混合像元分解结果不会造成影响。从图 3 可以看到在组分相同时, 积雪比例在不同的波段反射率呈现不同的变化特征, 不同积雪比例反射率呈不规则变化趋势; 就两种不同的组分来看, 不同组分对于积雪比例有不同的影响。在不考虑仪器及测量误差的情况下, 造成这种光谱特征的原因一方面来自于各组分在不同波段的反射率光谱特征变化趋势不一致引起的, 另一方面, 各组分之间由于辐射特性不同, 相互间有辐射特性的影响, 这种影响是复杂的, 不同的组分比例所造成的影响不同, 我们将采用不同的混合

像元分解模型来探讨这种影响。

3 实测光谱的混合像元分解方法及精度评价

3.1 线性回归法

线性回归方法认为归一化积雪指数(NDSI)与积雪比例(FSC)存在着线性关系, 通过建立 NDSI 于 FSC 之间的线性回归方程, 直接从 NDSI 推算 FSC。该方法最早由 Salomonson^[13] 提出, 他利用 30 m 空间分辨率的 TM 影像提取的二值积雪面积图作为真值, 通过与 500 m 空间分辨率的 MODIS 的 NDSI 图进行叠合分析, 建立的 NDSI 与 FSC 之间的回归方程

$$FSC = aNDSI + b \quad (2)$$

式中 a 和 b 分别表示回归系数, 值分别为 1.21 和 0.06。该方法简单迅捷, 具有很强操作性, 在最新发布的 MODIS 积雪面积比例产品中采用了这种算法。为了计算观测场的积雪比例, 首先我们从反射率光谱中获取 NDSI, NDSI 计算公式如下

$$NDSI = \frac{VIS - NIR}{VIS + NIR} \quad (3)$$

式中 VIS 是可见光波段, NIR 是近红外波段, NDSI 主要是利用雪在可见光波段具有较高的反射率, 而在近红外波段具有很强的吸收特性。在本研究中 VIS 波段选择 550 nm, NIR 选择 1 500 nm, 利用式(3)计算 NDSI, 然后利用公式(2)获取积雪比例。

3.2 线性混合像元分解法

线性混合像元分解模型是解混算法中较常用的方法, 该模型认为像元在某一光谱波段的反射率是由各组成段元反射率与像元组分为权重系数的线性组合。本文采用光谱波段全约束性混合像元分解, 约束条件包括, 组分和为一, 且非负, 满足如下公式

$$P(L) = \sum_{i=1}^N c_i e_i + n = E\mathbf{c} + n \quad (4)$$

$$\sum_{i=1}^N c_i = 1 \quad (5)$$

$$0 \leq c_i \leq 1 \quad (6)$$

式中 N 为端元数, \mathbf{P} 为影像中任意 L 维光谱向量(L 为影像波段数) $\mathbf{E} = [e_1, e_2, \dots, e_N]$, 为 $L \times N$ 矩阵, 其中的每列均为端元向量。 $\mathbf{c} = (c_1, c_2, \dots, c_N)^T$ 为系数向量, c_i 表示像元 \mathbf{P} 中端元 e_i 所占的比例, n 为误差项。具体采用 Chang 等的 FCLS 算法实现解混^[14], 本文不详述。

3.3 稀疏回归解混法

稀疏回归理论来自于信号处理, 其代表性理论为基追踪与正交基追踪算法, 经过数年的发展, 逐渐运用到遥感的混合像元问题之中, 出现了不少的稀疏回归理论, 其中最为著名的为 SUnSAL^[15] 与 CSUnSAL^[16] 理论, 其中 SUnSAL 算法主要解决如下优化问题, 是一种通过迭代的限制性光谱解混算法

$$\min \frac{1}{2} \mathbf{S}f - R^2 + \lambda f_1 \text{ subject to } f \geq 0 \quad (7)$$

CSunSAL 算法是在 SunSAL 算法的基础上, 通过引进参数 λ 迫使解混的丰度和为 1, 其中 f 为要求解的丰度, S 为端元矩阵, R 为测量的混合光谱信号。本研究使用了 CSunSAL 光谱解混算法。

3.4 非负矩阵解混法

非负矩阵分解理论源自于 Lee 与 Seung 的理论^[17], 其主要理论是通过迭代地将一个正矩阵分解为一个基矩阵与一个系数矩阵, 如下形式

$$V = WH \quad (8)$$

迭代公式分别为

$$\begin{aligned} W_{ia} &\leftarrow W_{ia} \frac{(VH^T)_{ia}}{(WHH^T)_{ia}} \\ H_{qt} &\leftarrow H_{qt} \frac{(W^T V)_{qt}}{(W^T W H)_{qt}} \end{aligned} \quad (9)$$

最初的迭代算法采用乘性迭代, 最近几年基于稀疏的约束迭代^[18], 梯度下降迭代算法也被用于实现特定目的^[19]。本文采用乘性迭代算法, 迭代次数为 8 000, 设定初始的 W 矩阵为端元矩阵, 固定 W 矩阵, 每次迭代之后, 进行和为 1 的归一化。

3.5 分析及精度评价

我们采用以上四种方法对两个观测场测量的不同比例积雪反射率光谱进行解混, 并利用已知积雪比例对解混结果进行验证及精度评价。评价时采用两个指标, 一个是相对误差, 公式如下

$$\text{相对误差} = \frac{|X_i - \bar{X}|}{\bar{X}} \times 100\% \quad (10)$$

式中 X_i 是测量值, \bar{X} 是真值, 利用式(10)我们计算了所有方法不同积雪比例各个测量值的相对误差; 另一个是均方根误差(RMSE), 公式如下

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n}} \quad (11)$$

式中 X_i 是测量值, \bar{X} 是真值, n 是每组数据的总样本数, 利用式(11)分别计算两个观测场不同方法测量值的 RMSE。

表 1 是分别是利用线性回归法、线性混合像元分解法、稀疏回归解混法和非负矩阵解混法获取的两个观测场积雪比例与实测值的比较, 为了便于分析, 统计了每种方法在每个研究区的 RMSE。通过表 1 可以发现, 在阜康观测场通过四种方法得到的雪比例与实测雪比例统计得到的 RMSE 分别为 0.067, 0.059, 0.062 和 0.062, 在富蕴观测场通过四种方法得到的雪比例与实测雪比例统计得到的 RMSE 分别为 0.320, 0.155, 0.149 和 0.149。可以发现四种方法都在阜康观测场精度较高, 而在富蕴观测场精度较低, 造成这种情况的原因主要是阜康观测场观测足迹较大, 富蕴观测场观测足迹较小, 一方面, 在观测光谱特征时, 观测足迹较小的区域人工观测产生的误差较大; 另一方面, 在探头逐渐接近雪场时, 除捕捉到积雪反射能量外, 由于积雪内部体散射以及组分间的相互散射, 使得探头接收的能量较为复杂, 同样的方法针对不同的覆盖范围, 不同的观测尺度使得解混精度并不相同, 这也是目前混合像元分解中亟待解决的难题; 此外,

水泥地和纸板具有明显的光谱差异, 这种不同的下垫面也可能是引起两个观测场解混精度不同的原因。我们进一步对四种方法进行比较, 在两个观测场四种方法平均 RMSE 分别为 0.194, 0.107, 0.106 和 0.106, 线性回归法精度最低, 其他三种方法精度都较高, 稀疏回归解混法和非负矩阵解混法精度略高于线性混合像元分解法, 稀疏回归解混法和非负矩阵解混法精度基本一致, 一直到小数点第四位才出现差异, 这说明单纯从信号处理和计算角度考虑, 后两种解混方法已经很完善。图 4 是两个观测场光谱数据分别采用四种不同方法获取的雪比例数据与实测雪比例的相对误差比较图, 可以看到, 当积雪比例高于 50% 时, 四种方法解混精度都较高, 相对误差都较低, 而当积雪覆盖比例低于 50% 时, 线性回归法精度较低, 甚至会出现负值, 解混精度不高。从图 4 来看, 线性混合像元分解法、稀疏回归解混法和非负矩阵解混法得到的相对误差随不同比例变化趋势一致, 特别是在富蕴观测场, 三者存在较小的变化。这说明后三种方法反演精度差异不大, 从三者运算效率来看, 线性混合像元分解法最高, 非负矩阵解混法其次, 稀疏回归解混法最慢, 在具体到遥感图像解混时需根据计算效率综合选择三种方法。

Table 1 The comparison of fractional snow cover between in situ measurement and the results from four spectral unmixed model from two study area/%

积雪面积 实测比例	线性 回归法		线性混合 像元分解法		稀疏 回归解混法		非负矩阵 解混法	
	阜康	富蕴	阜康	富蕴	阜康	富蕴	阜康	富蕴
87.50	79.08	74.67	83.89	74.53	89.33	76.37	89.33	76.37
75.00	70.23	43.33	75.93	51.05	78.97	52.22	78.97	52.22
62.50	62.55	38.94	69.41	47.33	72.30	48.10	72.30	48.10
50.00	49.01	34.87	58.63	44.93	54.39	45.80	54.39	45.80
37.50	39.66	-6.52	41.37	20.52	44.40	20.43	44.40	20.43
25.00	10.72	-28.94	15.72	8.11	16.38	8.12	16.38	8.12
12.50	9.93	-6.52	15.57	1.63	16.21	1.66	16.21	1.66
RMSE	0.067	0.320	0.059	0.155	0.062	0.149	0.062	0.149

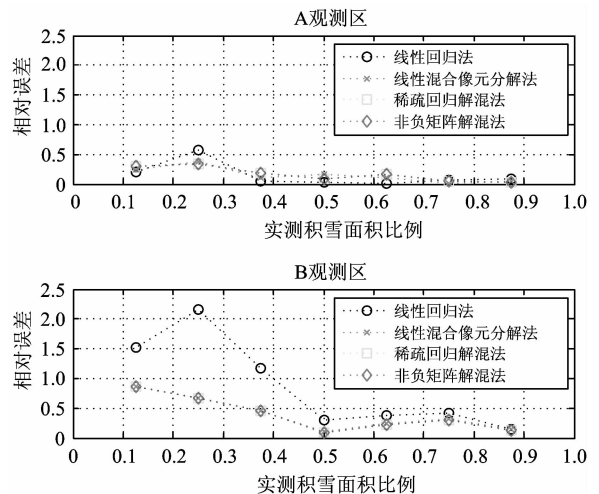


Fig. 4 The comparison of fractional snow cover between in situ measurement and the results from four spectral unmixed model from two study area

4 结 论

(1)与理想的情况不一致,实测光谱特征并不随积雪比例均匀下降呈均匀的线性变化,随着波长不同,呈现出一种非线性的变化;

(2)对于不同测量足迹,实测光谱特征随积雪比例降低呈现出不同的变化特征,结果表明,积雪像元解混精度与观测尺度的不同有一定的联系,尺度越小,解混精度越低;

(3)当积雪比例大于 50%时,线性回归法、线性混合像

元分解法、稀疏回归解混法和非负矩阵解混法解混精度都较高,当积雪比例小于 50%时,线性回归法解混精度较低,甚至出现错误的负值;

(4)线性混合像元分解法、稀疏回归解混法和非负矩阵解混法解混精度都较高,稀疏回归解混法和非负矩阵解混法略高于线性混合像元分解法,线性混合像元分解法运算效率最高,稀疏回归解混法运算效率最低,当对遥感图像进行解混时,要综合考虑三种方法的计算效率来选择解混方法。

致谢:感谢 COSS1 试验的其他成员张璞,车涛,梁继,李红星,毕健,林金堂,李晖的大力支持和帮助。

References

- [1] QIN Da-he, DING Yi-hui, SU Ji-lan(秦大河, 丁一汇, 苏纪兰). *Climate and Environment Change of China(中国气候与环境演变·上卷)*. Beijing: Science Press(北京: 科学出版社), 2005.
- [2] Cline D W, Bales R C, Dozier J. *Water Resources Research*, 1998, 34(5): 1275.
- [3] Colee M T, Painter T H, Rosenthal W, et al. *Proceedings of the Western Snow Conference*, 2000, 68: 99.
- [4] Kirnbauer R, Blöchl G, Gutknecht D. *Nordic Hydrology*, 1994, 25(1-2): 1.
- [5] Luce C H, Tarboton D G, Cooley K R. *Hydrological Processes*, 1998, 12(10-11): 1671.
- [6] Luce C H, Tarboton D G, Cooley K R. *Hydrological Processes*, 1999, 13(12-13): 1921.
- [7] Hall D K, Riggs G A, Salomonson V V, et al. *Remote Sensing of Environment*, 2002, 83: 181.
- [8] LI San-mei, YAN Hua, LIU Cheng(李三妹, 闫 华, 刘 诚). *Journal of Remote Sensing(遥感学报)*, 2007, 11(3): 406.
- [9] LI Hong-yi, WANG Jian(李弘毅, 王 建). *Journal of Glaciology and Geocryology(冰川冻土)*, 2008, 30(5): 769.
- [10] LI Hong-yi, WANG Jian(李弘毅, 王 建). *Hydrology and Earth System Sciences*, 2011, 15(7): 2195.
- [11] LI Hui, JIANG Zhong-cheng, ZHOU Hong-fei, et al(李 晖, 蒋忠诚, 周宏飞, 等). *Research of Soil and Water Conservation(水土保持研究)*, 2008, 15(5): 105.
- [12] WANG Xue-mei, ZHANG Chun, CHAI Zhong-ping, et al(王雪梅, 张 春, 柴仲平, 等). *Soil and Water Conservation in China(中国水土保持研究)*, 2011, 9: 25.
- [13] V V, Appel I. *Remote Sensing of Environment*, 2004, 89: 351.
- [14] Heinz D C, Chang C I. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2001, 39: 529.
- [15] Bioucas-Dias J, Figueiredo M. *Hyperspectral Image and processing: Evolution in Remote Sensing (WHISPERS)*, 2010 2nd workshop on. 14-16 June 2010.
- [16] Marian-Daniel Iordache, Jos'e M Bioucas Dias, Antonio Plaza. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2011, 49(6): 2014.
- [17] Lee D D, Seung H S. *Nature*, 1999, 401(6755): 788.
- [18] Patrik O Hoyer. *Journal of Machine Learning Research*, 2004, 5: 1457.
- [19] Chih-Jen Lin. *Neural Computation*, 2007, 19(10): 2756.

Observations of Snow Mixed Pixel Spectral Characteristics Using a Ground-Based Spectral Radiometer and Comparing with Unmixing Algorithms

HAO Xiao-hua¹, WANG Jie^{1,4}, WANG Jian¹, HUANG Xiao-dong², LI Hong-yi¹, LIU Yan³

1. Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China
2. Key Laboratory of Grassland Agro-ecology System, Ministry of Agriculture, College of Pastoral Agriculture Science and Technology, Lanzhou University, Lanzhou 730020, China
3. Institute of Desert Meteorology, China Meteorological Administration, Urumqi 830002, China
4. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract The unmixing algorithms of mixed snow pixels and the fractional snow cover products are an important research direc-

tion for snow remote sensing. In the present study, we first designed the mixed snow pixels of different snow fraction/proportion in Northern Xinjiang, China as ground truth. Then, a SVC HR-1024 ground-based spectral radiometer was used for measuring the spectral property of this designed pixel for different snow fractions and different underlying surfaces. Finally, using the measured spectral data, the four mixed-pixel decomposition models were validated and evaluated for their performance in terms of accuracy and computational efficiency. The results showed that the reflectivity does not decline linearly with the reduction of snow ratio in the pixel, and that the unmixing accuracy inversely depends on the scales of the observation. Further, the comparison of the above mentioned unmixing algorithms showed that the linear regression method has the worst accuracy, especially when the snow proportion is less than 50%; the accuracy of sparse regression algorithm and non-negative matrix factorization were slightly higher than the full constrained linear mixed-pixel decomposition; however, full constrained linear mixed-pixel decomposition method had higher computational efficiency than the other two methods; the sparse regression algorithm has lowest computational efficiency. With unmixing remote sensing images, due to the large data volumes, we must consider the algorithms' computational efficiency. This study would promote quantitative researches on snow mixed pixel decomposition, and provide a theoretical basis for accurately extracting the snow coverage of interest area using remote sensing images.

Keywords Fractional snow cover; Spectral reflectance; Unmixing algorithms

(Received May 21, 2012; accepted Aug. 10, 2012)

《色谱》2013 年征订启事

国内统一连续出版物号 CN 21-1185/O6
国际标准连续出版物号 ISSN 1000-8713
国外发行代号 DK21010

邮发代号 8-43
广告经营许可证号 2012003
CODEN 编码 SEPUER

《色谱》是中国唯一的色谱专业期刊，主要报道色谱学科的基础性研究成果，色谱及其交叉学科的重要应用科研成果及最新研究进展。适于科研院所及分析测试领域等从事色谱基础和应用技术研究的科研人员、色谱及其相关学科的硕士及博士研究生、色谱器件及仪器的开发人员阅读。

《色谱》已被美国《医学索引》(Medline)、美国《化学文摘》(CA)、美国《剑桥科学文摘》(CSA)、俄罗斯《文摘杂志》(AJ)、波兰《哥白尼索引》(IC)、《日本科学技术文献数据库》(JICST)和英国皇家化学学会系列数据库中的《分析化学文摘》(AA)、《工业化学灾害》(CHI)、《质谱学通报(增补)》(MSB-S)等收录。连续多年入选 CA 千刊表。《色谱》在国内也具有较高的影响力。入选百种中国杰出学术期刊，是中国科学院优秀期刊、中国科协优秀期刊、中国科技核心期刊、中国科技精品期刊、中文核心期刊、中国科协精品科技期刊工程项目入选期刊。

《色谱》近几年在中国科学技术信息研究所的影响因子等评价指标一直名列化学学科期刊前茅。2011 年公布的影响因子为 1.926，名列全国 35 种化学类核心期刊第一名，在全国 1998 种科技核心期刊中名列第九。

《色谱》每月 28 日出版。单价 15 元，全年 180 元。请在全国各地邮局订阅，邮发代号 8-43；也可直接与《色谱》编辑部联系订购，联系人：卫晓鸾。

网址：www.chrom-China.com；地址：大连市中山路 457 号；电话：(0411)84379021；E-mail：sepu@dicp.ac.cn