

doi: 10.6046/gtzyyg.2018.01.09

引用格式: 庞海洋,孔祥生,汪丽丽,等. ENDSI 增强型雪指数提取积雪研究[J]. 国土资源遥感,2018,30(1):63-71. (Pang H Y, Kong X S, Wang L L, et al. A study of the extraction of snow cover using nonlinear ENDSI model[J]. Remote Sensing for Land and Resources, 2018, 30(1):63-71.)

ENDSI 增强型雪指数提取积雪研究

庞海洋¹, 孔祥生¹, 汪丽丽¹, 钱永刚²

(1. 鲁东大学资源与环境工程学院, 烟台 264025; 2. 中国科学院光电研究院定量遥感信息技术重点实验室, 北京 100094)

摘要: 快速、准确、客观地提取积雪覆盖信息, 获得积雪覆盖时空分布资料, 是资源生态环境变化研究中的基本问题, 卫星遥感技术为有效解决这个问题提供了技术支持。归一化差值雪指数(normalized difference snow index, NDSI)法利用积雪在绿光波段(0.53~0.59 μm)高反射和短波红外波段(1.57~1.65 μm)强吸收特征, 可实现遥感自动提取积雪区。以 Landsat8 OLI 影像为数据源根据积雪的光谱特征, 在加入波段 B1(0.433~0.453 μm)和 B2(0.450~0.515 μm)特征的基础上, 运用提出的增强型雪指数(enhanced normalized difference snow index, ENDSI), 从 OLI 影像上进行积雪自动提取。研究表明, 对积雪厚度变化 ENDSI 敏感度强于 NDSI; 在裸土、薄雪及厚雪区, 随着积雪厚度的增加, ENDSI 值变化幅度强于 NDSI, 能有效增大雪与非雪的差异; 当 ENDSI 阈值取 0.3 时, 可以有效区分雪与非雪, 提高积雪提取精度。

关键词: ENDSI; NDSI; 积雪; Landsat8 OLI

中图法分类号: TP 79 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-070X(2018)01-0063-09

0 引言

降雪是人类生活环境中常见的自然现象。冬季北半球积雪和冰盖面积超过 40%; 在南、北半球的高纬度和高海拔地区, 大范围的地表常年被积雪覆盖^[1]。积雪是影响全球热量平衡的关键气候因子, 其变化会对区域气候产生重要影响^[2], 是气候系统的一个重要组成部分。积雪也是一种重要的淡水资源^[3], 在世界上很多地区都在依靠冰、雪融水来维持基本生活和农业生产^[4]。在我国干旱半干旱地区, 积雪融水是重要的淡水补充形式, 对当地的自然环境和人类生活意义深远。在全球变暖背景下, 积雪、冻土对气候变化具有高度敏感性和重要反馈作用, 已成为全球变化研究的核心内容和热点之一^[5]。积雪覆盖的时空特征研究在气象学和水文学中也发挥着重要作用, 对积雪的研究有重要现实意义^[6]。

传统利用气象站或者野外调查来监测积雪的方法难度大、时效性差, 存在许多弊端, 遥感技术以其

大范围、多时相等特点逐渐成为积雪观测的主要手段^[7-8]。利用遥感技术提取积雪信息的方法可归纳成 4 种: 阈值法像元统计、监督和非监督分类、归一化差值雪指数(normalized difference snow index, NDSI)和混合像元分解法^[9]。其中, NDSI 法是基于雪对可见光与短波红外波段的反射特性和反射差的相对大小的一种测量方法^[10], 是目前最常用、精度较高的积雪提取方法之一, 最初是 Hall 等在 1995 年提出的“SNOMAP”方法^[11], 随后国内外学者对 NDSI 进行了不同程度的研究。赵军等^[12]以玛纳斯上游地区为例对雪盖指数提取范围的不确定性进行了研究; 陈文倩等^[13]基于 NDSI-NDVI 特征对积雪面积进行了反演; Satir^[14]利用 NDSI 等雪指数对意大利 Cilo 山的冰雪进行了连续性监测分析。然而, NDSI 只利用可见光中的绿光波段(0.53~0.59 μm)和短波红外波段(1.57~1.65 μm), 在薄雪区敏感度较低, 不能精确地区分雪与非雪^[15]。2013 年 2 月 12 日发射成功的 Landsat8 卫星搭载了陆地成像仪(operational land imager, OLI)增加了 B1 波段(0.433~0.453 μm), 雪对该波段和蓝光波段(0.45~

收稿日期: 2016-08-27; 修订日期: 2016-11-23

基金项目: 国家自然科学基金项目“高分热像数据和光谱数据的植被气孔导度反演机理研究”(编号: 41271342)和山东省高等学校科技计划项目“‘土法炼焦’等多种高温污染源遥感自动提取方法及应用”(编号: J12LH01)共同资助。

第一作者: 庞海洋(1991-), 男, 硕士研究生, 主要从事遥感科学与技术的科研工作。Email: fuyunmeili@163.com。

通信作者: 钱永刚(1969-), 男, 博士, 副教授, 主要从事遥感科学与技术的科研工作。Email: emails305@163.com。

0.5 μm)也相当敏感,加之其较高的空间分辨率及时间分辨率,为小尺度积雪监测又增添了新数据^[16]。故以 Landsat8 OLI 为数据源,基于积雪光谱特征,提出增强型雪指数 (enhanced normalized difference snow index, ENDSI) 方法,试图为精确提取积雪与雪厚遥感定量反演提供技术支持。

1 数据源及研究区概况

1.1 数据源

Landsat8 携带 OLI 和热红外传感器 (thermal infrared sensor, TIRS)2 个传感器,成像幅宽为 185 km。其中 OLI 陆地成像仪数据有 9 个波段,多光谱波段空间分辨率为 30 m,全色波段空间分辨率达到 15 m。与传统的 TM 和 ETM+ 不同,Landsat8 在原蓝光波段之外新增了 B1(0.433 ~0.453 μm)^[17],主要用于对海岸线变化的监测,而积雪在该波段敏感度也较高。故本文以无云的 Landsat8 OLI 影像为数据

源,构建 ENDSI,提高积雪提取精度。

1.2 研究区概况

NDSI 与雪厚呈正相关关系,在厚雪区 NDSI 数值较大,在薄雪区其敏感度降低,受混合像元中其他地物类型的影响,NDSI 数值较小,利用阈值法区分雪与非雪有一定难度。为探究在不同地理环境下 ENDSI 的适用性及其对积雪厚度的敏感程度,提高遥感监测积雪的精度,根据经纬度分布和海拔高低差异状况选择我国北方 5 个区域作为研究区(表 1、图 1)。

表 1 研究区遥感数据源

Tab.1 Remote sensing data sources of research areas

研究区编号	行列号	获取日期	成像时间	所属地区
1	119/34	2016 年 2 月 2 日	2: 29: 38	山东半岛
2	122/30	2015 年 12 月 5 日	2: 46: 40	内蒙古赤峰地区
3	134/33	2013 年 12 月 3 日	4: 03: 31	甘肃张掖地区
4	135/38	2015 年 11 月 30 日	4: 10: 13	西藏昌都地区
5	125/32	2015 年 2 月 25 日	3: 05: 40	山西大同地区

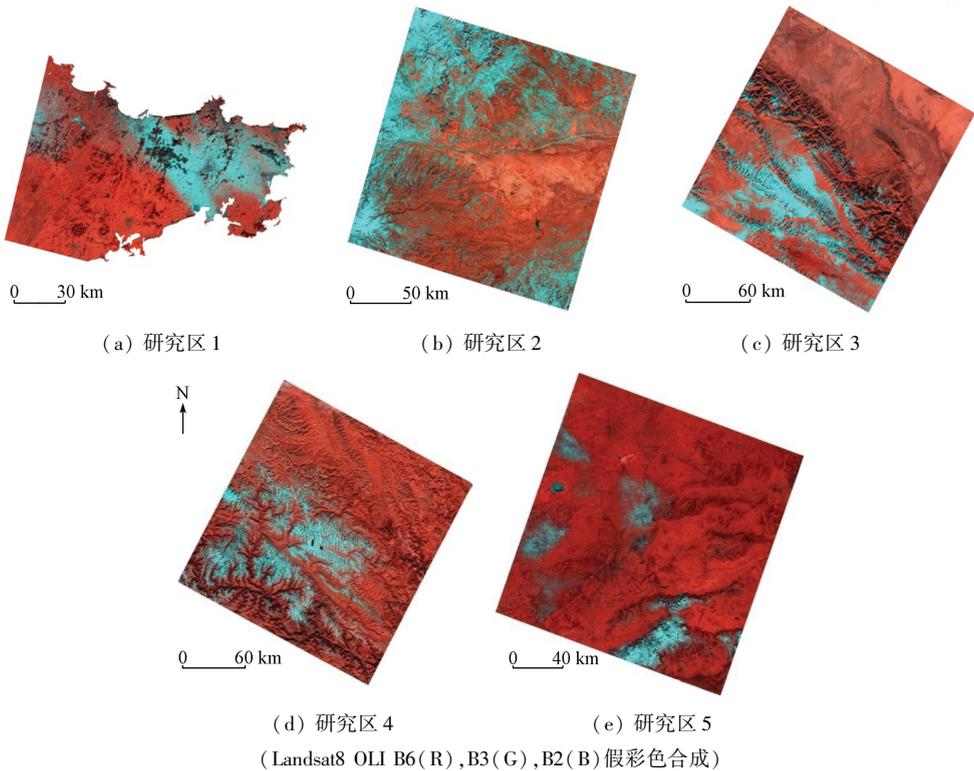


图 1 研究区位置

Fig.1 Locations of research areas

图 1 中偏蓝色区域为积雪,偏红色区域为土壤,其中图 1(a)为山东半岛地区,位于我国东部,平均海拔在 500 m 以下,属于温带季风气候,降雪量丰富;图 1(b)和(c)分别为内蒙古自治区赤峰地区和甘肃张掖地区,位于我国第二阶梯,平均海拔在 1 000 ~2 000 m 之间,属温带大陆性气候,纬度较高,冬季积雪较厚;图 1(d)为西藏自治区昌都地

区,属于第一阶梯,平均海拔在 4 000 m 以上;而图 1(e)作为验证区,地处山西省、内蒙古自治区和河北省的交界地区,从东西方向来看,位于我国中部第二、三阶梯的交界地带,平均海拔为 1 343 m,相对西部地区而言海拔较低,较东部地区海拔较高,属于半干旱地区,大陆性气候显著,冬季受西伯利亚高压影响,具有典型的积雪特征;同时,该地区是我国煤炭

的重要产地,污染严重,生态环境脆弱,环境变化一直备受关注。

2 研究方法

积雪在可见光波段(0.38~0.76 μm)有较高的反射率,而且与雪厚有着较好的相关性,当积雪厚度小于20 cm时,积雪的反射率随着雪厚的增加而增加,但在短红外波段,不如可见光波段明显^[18]。为了便于描述积雪的特性,根据积雪在绿光波段的反射率大小,将积雪分为3种类型^[19]:反射率在[0.45,1]范围为厚雪(混合像元中积雪占50%以上),有明显的积雪光谱特征;反射率在[0.22,0.45]范围内为薄雪(混合像元中积雪占25%~50%),主要受积雪、土壤综合影响;反射率在[0.1,0.22]为超薄雪区,积雪的反射特征较弱,以土壤的光谱特征为主(混合像元中积雪所占比例小于25%),故将超薄雪与土壤合称非雪区。利用4个具有不同地理特征的研究区1—4分析区分雪与非雪的合理阈值,并以研究区5为验证区,利用目视解译和混淆矩阵方法进行精度验证。

2.1 积雪的光谱特征

与其他地物相比,积雪的光谱特征明显(图2)。

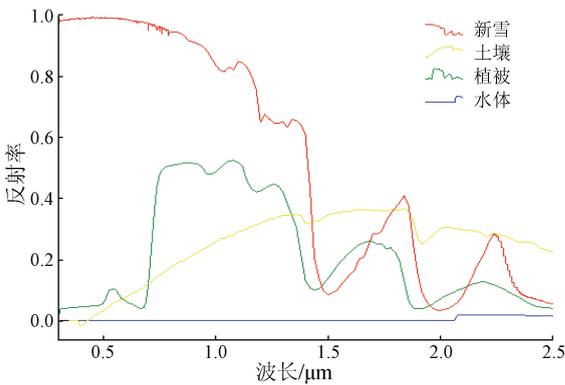


图2 研究区主要地物光谱曲线

Fig. 2 Spectral curves of the main objects in the study area

图2中,新雪具有独特的光谱特征:在可见光范围内有0.8以上的高反射率,0.6 μm左右形成一个高反射峰;在近红外波段(0.845~0.885 μm)反射率开始减小;在短波红外波段1.6 μm和2.0 μm左右分别形成2个吸收谷,反射率在0.15以下,而在1.8 μm和2.3 μm处形成2个反射峰,反射率在0.4以下;2.5 μm以后反射率逐渐接近于0。老雪和融化的积雪变化趋势与新雪相似,但反射峰出现在0.3~1.3 μm,1.7~1.8 μm和2.2~2.3 μm处,强度比新雪有不同程度的下降,其中压实冻结的冰雪反射率最低。土壤、植被和水体的反射率在可

见光波段反射率较低,大都在0.15以下,而在短波红外波段植被和水体的反射率较低,土壤的反射率在0.3以上,大于新雪的反射率。

2.2 增强型雪指数(ENDSI)

NDSI利用了积雪在绿光波段反射率较高,在短波红外波段反射率较低的独特变化特征,当 $NDSI \geq 0.4$, $\rho_{green} \geq 0.1$ 且 $\rho_{nir} \geq 0.11$ 时,判定为积雪^[11],计算公式为

$$\begin{cases} \rho_{green} - \rho_{swir} > 0 \\ NDSI = \frac{\rho_{green} - \rho_{swir}}{\rho_{green} + \rho_{swir}} \end{cases}, \quad (1)$$

式中 ρ_{green} 、 ρ_{swir} 和 ρ_{nir} 分别为积雪在绿光波段、短波红外波段和近红外波段的反射率。

NDSI的值取决于积雪在绿光波段和短波红外波段反射率差值的大小,当 $\rho_{green} - \rho_{swir}$ 接近 ρ_{green} 时,精度较高;当 $\rho_{green} - \rho_{swir}$ 非常小或者 $NDSI < 0.4$ 时,则可能存在较大误差。此外由于遥感卫星空间分辨率和地表环境复杂度影响,在设定阈值提取积雪时,混合像元区易产生误差。

为提高混合像元积雪的识别精度,可通过某种变换手段或积雪指数方法增大雪区与非雪区的差异,进而提高积雪提取精度。AvaField-3光谱仪实测和OLI影像采集得到的积雪光谱都表明,积雪光谱满足

$$\begin{cases} \rho_{blue\ violet} - \rho_{swir} > 0 \\ \rho_{blue} - \rho_{swir} > 0 \\ \rho_{green} - \rho_{swir} > 0 \end{cases}, \quad (2)$$

式中 $\rho_{blue\ violet}$ 和 ρ_{blue} 分别是OLI数据在蓝紫光和蓝光波段的反射率。对式(2)中的3个判别标准进行累加处理,得

$$\rho_{blue\ violet} + \rho_{blue} + \rho_{green} - 3\rho_{swir} > 0。 \quad (3)$$

NDSI能够实现积雪的提取,但在所提取的积雪区内部对雪厚的划分不够敏感,只能将像元辨认为雪或非雪,满足不了高精度的流域制图及雪盖提取要求^[15]。而式(3)增大了雪与非雪的差异,一定程度上也增大了雪间差异,在式(3)基础上,提出ENDSI为

$$ENDSI = \frac{\rho_{blue\ violet} + \rho_{blue} + \rho_{green} - a\rho_{swir}}{\rho_{blue\ violet} + \rho_{blue} + \rho_{green} + \rho_{swir}}。 \quad (4)$$

式中 a 为调节系数。当 $ENDSI \geq 0.3$, $\rho_{green} \geq 0.11$ 且 $\rho_{nir} \geq 0.11$ 时判定为积雪。

为使积雪指数对混合像元中薄雪敏感,适当调节式(4)中 a ,当 $0 < a \leq 1$ 时,在非雪区 $ENDSI \geq 0$;

1 < a < 3 时, ENDSI 在超薄雪区最为敏感, 但在超薄雪区混合像元中积雪低于 25% 时, 提取难度大, 本文将其划分为非雪区; 3 ≤ a ≤ 3.7 时, ENDSI 随 a 增大敏感度上升; a > 3.7 时, 部分雪区 ENDSI < 0。在大量实验和仿真模拟的基础上得出, 当 a = 3.7 时最佳, 得到优化后的 ENDSI, 即

$$ENDSI = \frac{\rho_{blue\ violet} + \rho_{blue} + \rho_{green} - 3.7\rho_{swir}}{\rho_{blue\ violet} + \rho_{blue} + \rho_{green} + \rho_{swir}} \quad (5)$$

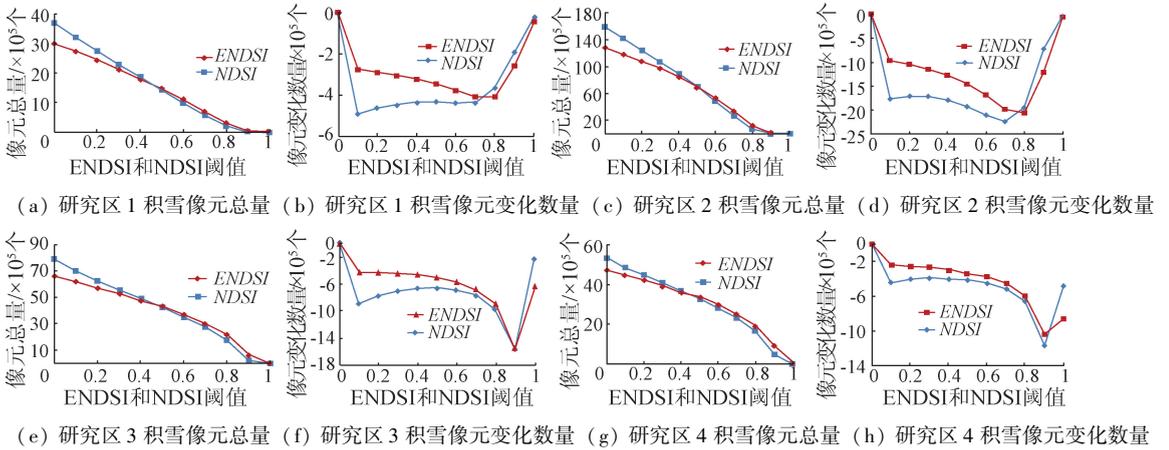


图 3 ENDSI 和 NDSI 提取积雪像元总量及变化数量

Fig. 3 Numbers and variation of extracted snow pixels by ENDSI and NDSI methods

从像元总量上来看, ENDSI 和 NDSI 提取的积雪像元总量均随着阈值的增大而减小, 在阈值 [0, 0.45] 区间内, ENDSI 提取积雪像元数小于 NDSI 提取结果, 总量差距随阈值增大逐渐减小; 当阈值在 0.45 左右时, 两者提取积雪像元数相当; 在 (0.45, 1) 区间内, ENDSI 提取雪像元量逐渐大于 NDSI 提取结果; 当阈值为 1 时, 两者提取积雪像元数相等。从像元变化数量来看, 随着阈值的增大, ENDSI 和 NDSI 提取积雪像元变化量减小幅度不同, 阈值在 [0, 0.7] 区间 ENDSI 提取积雪像元减小量小于 NDSI 提取结果; 在 (0.7, 1] 区间两者变化趋于相同, 在 [0.6, 1] 区间积雪反射率较高, 但积雪纯度及厚度不同反射率仍有差异, NDSI 和 ENDSI 在阈值为 0.8 左右时, 常出现积雪像元数量急剧减少的现象, 说明积雪主要集中在 [0.6, 0.8], 在 [0.8, 1] 区间积雪像元量较少。NDSI 在 [0, 0.6] 区间像元变化量相对平稳, 变化不大, 不利于选取阈值区分雪与非雪。冬季北方降雪地区地物类型主要以雪和土壤为主, 积雪像元数量随阈值的变化, 正是提取类型由土壤向雪过渡的体现: 在 [0, 0.3] 区间主要为非雪或超薄雪, 光谱特征相似, 像元变化量较平稳; 在 [0.3, 0.6] 之间地物类型由土壤向积雪区过渡, 地物光谱差异开始增大, 逐渐突破非雪的界限, 积雪像元减小量逐渐增加; 在 [0.6, 1] 区间地物主要为积雪, 光谱特征相似, 积雪像元数量变化趋于平稳, 但

3 结果分析与验证

3.1 阈值分析

对 5 景影像进行辐射定标、FLAASH 大气校正和裁剪等预处理后, 分别计算 NDSI 和 ENDSI, 在 [0, 1] 之间每隔 0.1 选取一个阈值, 提取积雪的像元数量变化, 并对 4 个研究区进行综合分析 (图 3)。

在 [0.8, 1] 区间时常出现积雪像元减小量剧增或骤减现象, 这是由积雪像元过渡集中而阈值间隔过大造成的。由非雪向雪区过渡的转折点 0.3 成为 ENDSI 判定雪与非雪的分割点, 地理特征不同的 4 个研究区变化特征相似, 说明 0.3 作为阈值分割点有一定的稳定性、普适性。

3.2 ENDSI 变化曲线

在研究区 5 的 Landsat8 OLI 遥感影像中选取裸土和积雪各 5 条光谱曲线 (图 4), 在蓝紫光—绿光波段, 裸土反射率在 0.15 以下, 积雪反射率在 0.2 以上; 短波红外波段, 裸土反射率在 0.15 ~ 0.3 之间, 积雪反射率在 0.2 以下。

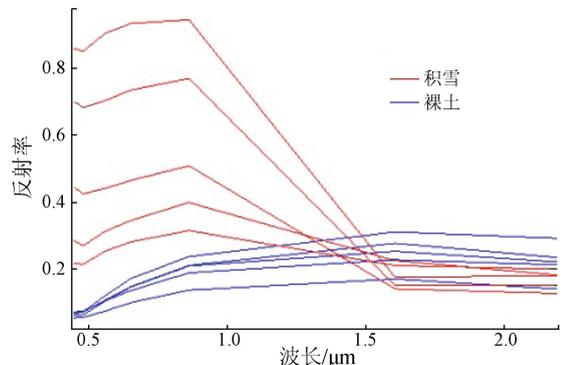


图 4 研究区 5 中积雪和裸土光谱曲线

Fig. 4 Spectral curves of the snow and soil in study area 5

郝晓华等^[19]测量已知积雪覆盖比例下的积雪

光谱特征,也发现积雪在 0.35 ~ 0.8 μm 范围内反射率随积雪纯度的增加而减小,1.4 ~ 1.8 μm 范围内反射率与积雪纯度成反比,虽然积雪下垫面性质不同反射率会有所差异,但以上变化规律不变。通过调节式(4)中系数 a ,调控可见光与短波红外波段差异的大小,可以调节积雪指数曲面,实现对薄雪敏感。

根据式(6)分别计算裸土和积雪在短波红外波段反射率 ρ_{soilswir} 和 ρ_{snowswir} ^[21],即

$$\rho = \frac{\int_0^{\infty} \rho(\lambda) \Gamma(\lambda) d\lambda}{\int_0^{\infty} \Gamma(\lambda) d\lambda}, \quad (6)$$

式中: $\Gamma(\lambda)$ 是传感器的固有参数,各个波段的响应函数曲线; $\rho(\lambda)$ 是光谱仪测试的目标反射率数据。

在该地区雪区选取 5 个样本点(113°8'49.22"E, 40°9'30"N; 113°3'7.69"E, 39°6'23.42"N; 112°4'9.32"E, 40°4'58.33"N; 112°4'1.66"E, 40°7'32.22"N; 112°2'28.22"E, 39°1'13.64"N)发现雪区 OLI 前 3 个波段反射率之和相当于 3 倍绿光波段反射率减去 0.1 的值;在裸土区选取 5 个样本点(112°1'54.18"E, 39°9'54.87"N; 113°0'56.11"E, 40°7'48.27"N; 113°3'29.98"E, 40°9'29.04"N; 114°3'35.25"E, 40°0'40.52"N; 113°0'23.11"E, 39°9'14.67"N)发现裸土区 OLI 前 3 个波段反射率之和相当于 3 倍绿光波段反射率减去 0.06 的值。以绿光反射率为横坐标,裸土和积雪的 ENDSI 和 NDSI 值为纵坐标,根据表 2 中公式(7)~(14)模拟出 NDSI 与 ENDSI 变化曲线(图 5)。

表 2 ENDSI 线性模拟公式

Tab. 2 ENDSI linear simulation formula

描述	公式	编号
积雪在短波红外波段反射率	$\rho_{\text{snowswir}} = \frac{\int_{1.57}^{1.65} \rho(\lambda) \Gamma(\lambda) d\lambda}{\int_{1.57}^{1.65} \Gamma(\lambda) d\lambda} = 0.15$	(7)
裸土在短波红外波段反射率	$\rho_{\text{soilswir}} = \frac{\int_{1.57}^{1.65} \rho(\lambda) \Gamma(\lambda) d\lambda}{\int_{1.57}^{1.65} \Gamma(\lambda) d\lambda} = 0.25$	(8)
积雪在可见光波段反射率	$\rho_{\text{snow}} = \rho_{\text{blue violet}} + \rho_{\text{blue}} + \rho_{\text{green}} = 3\rho_{\text{green}} - 0.1$	(9)
裸土在可见光波段反射率	$\rho_{\text{soil}} = \rho_{\text{blue violet}} + \rho_{\text{blue}} + \rho_{\text{green}} = 3\rho_{\text{green}} - 0.06$	(10)
积雪原始 NDSI	$\text{NDSI}_{\text{snow}} = \frac{\rho_{\text{green}} - 0.15}{\rho_{\text{green}} + 0.15} \quad (0.1 \leq \rho_{\text{green}} \leq 1)$ ^①	(11)
裸土原始 NDSI	$\text{NDSI}_{\text{soil}} = \frac{\rho_{\text{green}} - 0.25}{\rho_{\text{green}} + 0.25} \quad (0 \leq \rho_{\text{green}} \leq 0.15)$	(12)
积雪变换后的 ENDSI	$\text{ENDSI}_{\text{snow}} = \frac{3\rho_{\text{green}} - 0.1 - 3.7 \times 0.15}{3\rho_{\text{green}} - 0.1 + 0.15} \quad (0.1 \leq \rho_{\text{green}} \leq 1)$	(13)
裸土变换后的 ENDSI	$\text{ENDSI}_{\text{soil}} = \frac{3\rho_{\text{green}} - 0.06 - 3.7 \times 0.25}{3\rho_{\text{green}} - 0.14 + 0.25} \quad (0 \leq \rho_{\text{green}} \leq 0.15)$	(14)

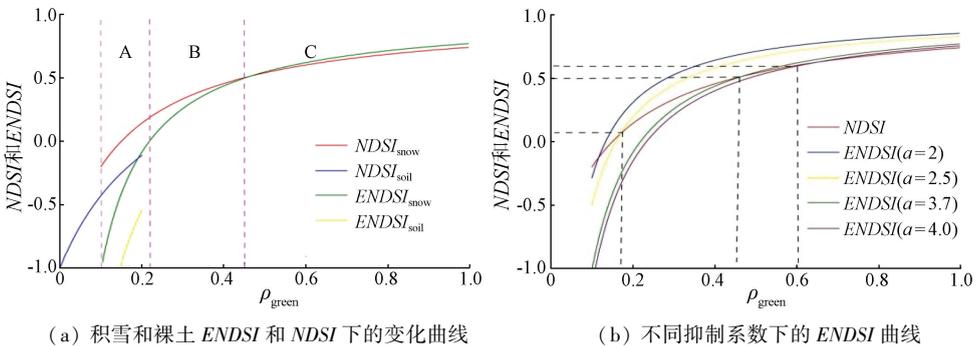


图 5 NDSI 和 ENDSI 在绿光波段反射率的变化趋势(由特定值画出)

Fig. 5 Variable trend graph of NDSI and ENDSI in green band (draw from a specific value)

图 5(a)中 A 为超薄雪区, B 为薄雪区, C 为厚雪区,积雪在绿光波段反射率越高代表雪层越厚,积雪光谱特征越明显,反射率越低则雪层越稀薄,积雪光谱特征越不明显,ENDSI 和 NDSI 随绿光波段反射率的增大而增大。与 NDSI 相比,ENDSI 在厚雪区增大,在薄雪和超薄雪区减小,超薄雪区减小幅度大于薄雪区,且随着反射率的增加增大越明显,但

总体增加幅度有限。薄雪区在 NDSI 中主要位于 [0.2, 0.5], 在 ENDSI 中位于 [0, 0.5], 相同的反射率范围下阈值区间扩大,显示 ENDSI 在薄雪区更加敏感;在超薄雪区 ENDSI 全部抑制在 0 以下;裸土在 ENDSI 中较 NDSI 大幅度减小,被抑制在 -0.2 以下。ENDSI 有效增大雪与非雪的差异,对薄雪具敏感性,为进一步精细化提取积雪和雪厚,以及遥感定

量反演打下了基础。从图 5(b)可见,ENDSI 对雪厚敏感度总体上强于 NDSI,ENDSI 随抑制系数 a 的增大,在薄雪区敏感度逐渐增强。当 $a=2$ 和 $a=2.5$ 时,ENDSI 在超薄雪区敏感度高于薄雪区和厚雪区;当 $a=3.7$ 和 $a=4$ 时,ENDSI 在超薄雪区为负值,对雪厚敏感度在薄雪区强于厚雪区,但当 $a=4$ 时,薄

雪区部分 ENSDI 值也为负值。超薄雪区雪含量较低,雪指数在厚雪区敏感度较低,对薄雪区精细化提取时, $a=3.7$ 较为合理。

3.3 积雪提取结果

验证区不同方法的积雪提取结果如图 6 所示,积雪表现为偏蓝色特征。

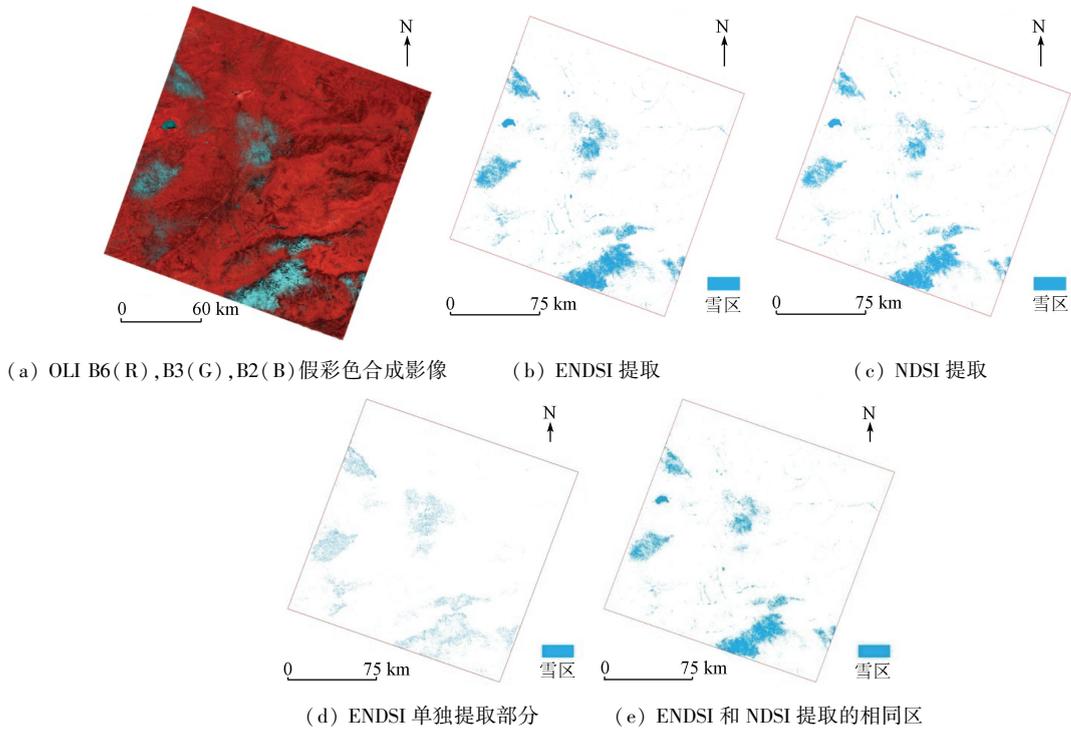


图 6 验证区 ENSDI 和 NDSI 积雪提取结果

Fig. 6 Snow cover maps extracted by ENSDI and NDSI in study area 5

总体上看,ENDSI 和 NDSI 都基本能够满足积雪提取要求,积雪面积较小不足全影像的 1/10,主要集中在验证区的 5 个区域,分布较零散。其中西部有一湖泊,结冰后被积雪覆盖,反映积雪的光谱特征;此外,在河流、山体阴影和林地中也有积雪零星分布。在积雪较厚的区域颜色明显偏蓝,在积雪较薄的地区颜色偏暗,积雪特征并不明显,提取积雪时很容易误分为裸土。从细节上看,NDSI 提取的积雪(图 6(c))与 ENSDI(图 6(b))提取的积雪相比,显得较松散稀疏,许多零散分布的积雪不能提取,中部雪区差别尤为明显。ENDSI 和 NDSI 提取的积雪重合度较高(图 6(e)),主要集中在厚雪区,而在薄雪区,差异较大。

ENDSI 提取为积雪而 NDSI 提取为非积雪部分,NDSI - ENSDI 表示 NDSI 提取为积雪而 ENSDI 提取为非积雪部分。

表 3 ENSDI 和 NDSI 提取积雪像元统计
Tab. 3 Statistics of extracted snow pixels by NDSI and ENSDI

方法	阈值	雪像元数/个	总像元/个	比例/%
ENDSI	0.3	2 602 267	41 564 191	6.260 8
NDSI	0.4	2 048 197	41 564 191	4.927 8
ENDSI - NDSI	—	554 217	41 564 191	1.333 4
NDSI - ENSDI	—	147	41 564 191	0.000 4

3.4 精度分析

利用混淆矩阵和目视解译 2 种方法对 ENSDI 提取精度进行比较分析。对 Landsat8 OLI 影像监督分类,分为雪和非雪 2 类,将分类结果作为真实积雪分布,分别与 ENSDI 和 NDSI 提取的雪区与非雪区做混淆矩阵进行对比分析,同时分析其总体精度(表 4—5)。其中 NDSI 一般设定 0.4 为雪与非雪的有效阈值分割点^[11],吴晓晨等^[22]证明 $NDSI > 0.4$ 可以用来提取冰雪覆盖。当 NDSI 降低阈值时可以

经过统计,研究区总面积约为 37 407.8 km²,NDSI 阈值为 0.4 时提取的积雪面积为 1 843.377 km²,占总面积的 4.927 8%;利用 ENSDI 提取的积雪面积为 2 342.04 km²,占总面积的 6.260 8%(表 3)。图 6(d)中 ENSDI 判断为积雪而 NDSI 判断为非积雪的面积有 498.795 3 km²,占总面积的 1.333 4%。表 3 中所有数据都经过掩模处理,ENDSI - NDSI 表示

增加雪提取面积,由于 NDSI 对雪厚敏感度较低,降低阈值容易造成阈值减小过量。

表 4 验证区监督分类与 NDSI 分类结果混淆矩阵

Tab. 4 Confusion matrix between validation area supervised classification and NDSI classification result

类别	雪	非雪
雪	191 466(0.49%)	1 856 800(70.13%)
非雪	38 725 070(99.51%)	790 823(29.87%)
总体精度: 97.636 7%		Kappa = 0.778 5

表 5 验证区监督分类与 ENDSI 分类结果混淆矩阵

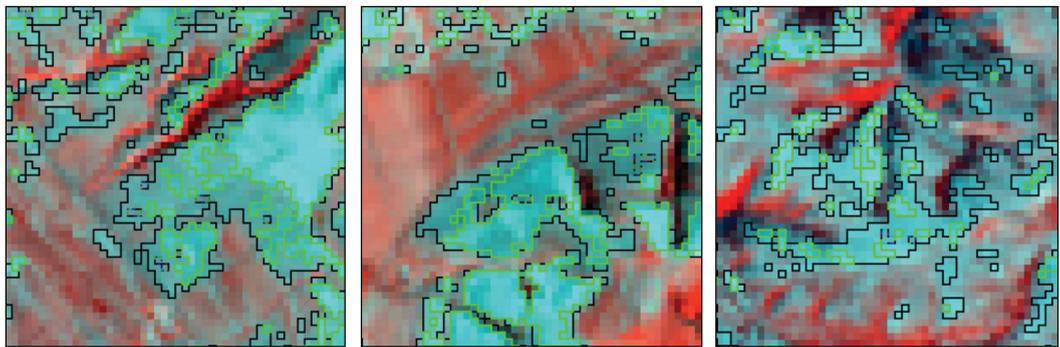
Tab. 5 Confusion matrix between validation area supervised classification and ENDSI classification result

类别	雪	非雪
雪	406 070(1.04%)	2 196 266(82.95%)
非雪	38 510 466(98.96%)	451 357(17.05%)
总体精度: 97.937 1%		Kappa = 0.825 7

利用 NDSI 和 ENDSI 提取积雪的分类总体精度

分别为 97.636 7% 和 97.937 1%,Kappa 相关系数分别为 0.778 5 和 0.825 7,与 NDSI 相比,ENDSI 总体分类精度提高了 0.3%,Kappa 系数提高了 0.05。

为了进一步检验 ENDSI 对厚雪和薄雪的敏感性,在研究区 5 遥感影像上分别选取同时存在土壤、薄雪和厚雪的 3 个子区域 a,b 和 c,以目视解译的方法分析 ENDSI 和 NDSI 提取积雪的分布情况。图 7 由 B6(R),B3(G),B2(B) 假彩色合成,积雪在可见光具有高反射率,在短波红外强吸收的光谱特征^[23],在遥感影像上表现为偏蓝色,由于厚雪在 B2 和 B3 波段反射率远大于薄雪,在影像中亮度较高,呈现亮蓝色,薄雪区亮度较低,呈现暗蓝色,裸土呈现偏红色的特征。在 a,b 和 c 3 个子区中,裸土和积雪作为标志性地物类型,分布特征实现了由裸土到薄雪再到厚雪的过渡,其中厚雪一般为团聚状,薄雪以厚雪为中心向四周扩展,扩展距离不等。



(a) 子验证区 a

(b) 子验证区 b

(c) 子验证区 c

图 7 目视解译验证实例

Fig. 7 Accuracy verification example diagrams

图 7 中黑色方框区域是 ENDSI 判定为雪而 NDSI 判定为非雪部分,绿色方框区域为 ENDSI 和 NDSI 同时提取的积雪区。图中绿色方框部分主要集中在亮蓝色的厚雪区,可见 ENDSI 和 NDSI 都能够实现对厚雪的提取,两者差异较小;而 ENDSI 除与 NDSI 共同提取的厚雪(绿色方框部分)部分外,在薄雪区(黑色方框部分)同样判定为雪,在图 7(a),(b) 和 (c) 中薄雪区分别占总面积的 19.73%,11.84% 和 15.48%,经目视解译这些区域与土壤有明显差异,应判定为雪,可以得出 ENDSI 对薄雪更加敏感,能够有效提取薄雪,且提取精度有所提高。在图 7(a) 和 (b) 中提取的厚雪和薄雪成团聚状分布,而图 7(c) 中厚雪和薄雪离散分布,总体特征来看薄雪仍以厚雪为中心向四周扩展,扩展距离不等,提取结果与目视解译一致。

4 结论

本文在传统 NDSI 利用可见光范围内单一绿光

波段和短波红外波段提取积雪基础上,基于 Landsat8 OLI 数据源,对蓝紫光、蓝光、绿光和短波红外波段综合考虑,探究 ENDSI 提取积雪的可能性,结论如下:

1) 依据积雪在绿光波段的反射率将雪分为厚雪区、薄雪区和超薄雪区,ENDSI 对雪厚更加敏感,ENDSI 值变化幅度强于 NDSI。与 NDSI 相比,ENDSI 值在厚雪区增大,超薄雪区和裸土区减小,有效增大雪与非雪的差异,有利于对积雪与雪厚的精确提取和遥感定量反演。

2) 通过对 4 个不同经纬度和海拔高度特征的地区提取雪像元数量变化分析,发现 0.3 为 ENDSI 区分雪与非雪的有效分割点,稳定性较高。

3) 以验证区监督分类得到积雪分布为真值分别与 ENDSI 和 NDSI 提取积雪结果做混淆矩阵,发现 ENDSI 比 NDSI 总体精度增加了 0.3%,2 组 Kappa 系数均在 0.77 以上,分类结果有较高的可信度。

利用 ENDSI 提取积雪精度有所提高,特别是在

薄雪区尤为敏感。今后可以进一步探究积雪厚度与 ENDSI 的相关性,研究利用遥感技术定量反演雪厚的方法;海冰与雪光谱特征相似,可以继续探究 ENDSI 在海冰提取方面的应用。

参考文献 (References):

- [1] Jones H G, Pomeroy J W, Walker D A, et al. Snow Ecology: An Interdisciplinary Examination of Snow - covered Ecosystems [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2001.
- [2] 白淑英, 吴奇, 史建桥, 等. 青藏高原积雪深度时空分布与地形的关系[J]. 国土资源遥感, 2015, 27(4): 171 - 178. doi:10.6046/gtzyyg. 2015. 04. 26.
Bai S Y, Wu Q, Shi J Q, et al. Relationship between the spatial and temporal distribution of snow depth and the terrain over the Tibetan Plateau[J]. Remote Sensing for Land and Resources, 2015, 27(4): 171 - 178. doi:10.6046/gtzyyg. 2015. 04. 26.
- [3] 郝晓华, 王建, 李弘毅. MODIS 雪盖制图中 NDSI 阈值的检验——以祁连山中部山区为例[J]. 冰川冻土, 2008, 30(1): 132 - 138.
Hao X H, Wang J, Li H Y. Evaluation of the NDSI threshold value in mapping snow cover of MODIS: A case study of snow in the Middle Qilian Mountains[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2008, 30(1): 132 - 138.
- [4] Xiao X M, Shen Z X, Qin X G. Assessing the potential of VEGETATION sensor data for mapping snow and ice cover: A normalized difference snow and ice index[J]. International Journal of Remote Sensing, 2001, 22(13): 2479 - 2487.
- [5] 王国亚, 毛伟峰, 贺斌, 等. 新疆阿勒泰地区积雪变化特征及其对冻土的影响[J]. 冰川冻土, 2012, 34(6): 1293 - 1300.
Wang G Y, Mao W Y, He B, et al. Changes in snow covers during 1961—2011 and its effects on frozen ground in Altay Region, Xinjiang[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2012, 34(6): 1293 - 1300.
- [6] Kour R, Patel N, Krishna A P. Assessment of relationship between snow cover characteristics(SGI and SCI) and snow cover indices (NDSI and S3)[J]. Earth Science Informatics, 2015, 8(2): 317 - 326.
- [7] 于泓峰, 张显峰. 光学与微波遥感的新疆积雪覆盖变化分析[J]. 地球信息科学学报, 2015, 17(2): 244 - 252.
Yu H F, Zhang X F. Retrieval and analysis of snow - covered days in Xinjiang based on optical and microwave remote sensing data [J]. Journal of Geo - Information Science, 2015, 17(2): 244 - 252.
- [8] 纪鹏, 郭华东, 张露. 近 20 年西昆仑地区冰川动态变化遥感研究[J]. 国土资源遥感, 2013, 25(1): 93 - 98. doi:10.6046/gtzyyg. 2013. 01. 17.
Ji P, Guo H D, Zhang L. Remote sensing study of glacier dynamic change in West Kunlun Mountains in the past 20 years[J]. Remote Sensing for Land and Resources, 2013, 25(1): 93 - 98. doi:10.6046/gtzyyg. 2013. 01. 17.
- [9] 彦立利, 王建. 基于遥感的冰川信息提取方法研究进展[J]. 冰川冻土, 2013, 35(1): 110 - 118.
Yan L L, Wang J. Study of extracting glacier information from remote sensing[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2013, 35(1): 110 - 118.
- [10] 惠凤鸣, 田庆久, 李英成, 等. 基于 MODIS 数据的雪情分析研究[J]. 遥感信息, 2004, 19(4): 35 - 38.
Hui F M, Tian Q J, Li Y C, et al. Research on snow condition analysis based on MODIS data[J]. Remote Sensing Information, 2004, 19(4): 35 - 38.
- [11] Hall D K, Riggs G A, Salomonson V V. Development of methods for mapping global snow cover using moderate resolution imaging spectroradiometer data[J]. Remote Sensing of Environment, 1995, 54(2): 127 - 140.
- [12] 赵军, 付杰文, 付鹏. 雪盖指数法提取积雪范围信息的不确定性研究——以玛纳斯上游地区为例[J]. 遥感技术与应用, 2014, 29(2): 293 - 299.
Zhao J, Fu J W, Fu P. Accuracy and uncertainty of snow information based on NDSI: A case study of upstream region of Manas River[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2014, 29(2): 293 - 299.
- [13] 陈文倩, 丁建丽, 孙永猛, 等. 基于 NDSI - NDVI 特征空间的积雪面积反演研究[J]. 冰川冻土, 2015, 37(4): 1059 - 1066.
Chen W Q, Ding J L, Sun Y M, et al. Retrieval of snow cover area based on NDSI - NDVI feature space[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2015, 37(4): 1059 - 1066.
- [14] Satir O. Comparing the satellite image transformation techniques for detecting and monitoring the continuous snow cover and glacier in Cilo Mountain chain Turkey[J]. Ecological Indicators, 2016, 69: 261 - 268.
- [15] 裴欢, 房世峰, 覃志豪, 等. 基于遥感的新疆北疆积雪盖度及雪深监测[J]. 自然灾害学报, 2008, 17(5): 52 - 57.
Pei H, Fang S F, Qin Z H, et al. Remote sensing - based monitoring of coverage and depth of snow in northern Xinjiang[J]. Journal of Natural Disasters, 2008, 17(5): 52 - 57.
- [16] 赵军, 陈恺悦, 师银芳. 提高森林覆盖区积雪提取精度的方法研究——以玛纳斯河流域为例[J]. 遥感技术与应用, 2015, 30(6): 1051 - 1058.
Zhao J, Chen K Y, Shi Y F. Methods research to improve the extraction accuracy of snow under forest cover: A case study of Manas River basin [J]. Remote Sensing Technology and Application, 2015, 30(6): 1051 - 1058.
- [17] 徐涵秋, 唐菲. 新一代 Landsat 系列卫星: Landsat8 遥感影像新增特征及其生态环境意义[J]. 生态学报, 2013, 33(11): 3249 - 3257.
Xu H Q, Tang F. Analysis of new characteristics of the first Landsat8 image and their eco - environmental significance [J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(11): 3249 - 3257.
- [18] 魏玥. 北疆区域积雪深度变化的遥感监测研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆师范大学, 2010.
Wei Y. Remote Sensing Monitoring of Snow Depth Change in North Part of Xinjiang[D]. Urumqi: Xinjiang Normal University, 2010.
- [19] 郝晓华, 王杰, 王建, 等. 积雪混合像元光谱特征观测及解混方法比较[J]. 光谱学与光谱分析, 2012, 32(10): 2753 - 2758.
Hao X H, Wang J, Wang J, et al. Observations of snow mixed pixel spectral characteristics using a ground - based spectral radiometer and comparing with unmixing algorithms [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2012, 32(10): 2753 - 2758.

- [20] 闪旭,刘志辉,张波. 新疆军塘湖流域融雪期不同积雪及雪被地物光谱反射率特征分析[J]. 安徽农业科学,2014,42(3): 853-855,887.
Shan X, Liu Z H, Zhang B. Study of spectrum reflectance characteristics of snow and snow-covered land surface objects in the melting-snow period[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2014, 42(3): 853-855, 887.
- [21] 程熙,沈占锋,骆剑承,等. 利用地物波谱学习的遥感影像波段模拟方法[J]. 红外与毫米波学报,2010,29(1):45-48,62.
Cheng X, Shen Z F, Luo J C, et al. Method on simulating remote sensing image band by using ground-object spectral features study[J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2010, 29(1): 45-48, 62.
- [22] 吴晓晨,孟令奎,张东映,等. 冰雪遥感监测方法综述[J]. 水利信息化,2013(1):35-39.
Wu X C, Meng L K, Zhang D Y, et al. Overview on methods of snow and ice remote sensing monitoring[J]. Water Resources Informatization, 2013(1): 35-39.
- [23] 刘玉洁,郑照军,王丽波. 我国西部地区冬季雪盖遥感和变化分析[J]. 气候与环境研究,2003,8(1):114-123.
Liu Y J, Zheng Z J, Wang L B. Remote sensing on snow cover and variation analyzing in west of China[J]. Climatic and Environmental Research, 2003, 8(1): 114-123.

A study of the extraction of snow cover using nonlinear ENDSI model

PANG Haiyang¹, KONG Xiangsheng¹, WANG Lili¹, QIAN Yonggang²

(1. College of Resources and Environmental Engineering, Ludong University, YanTai 264025, China; 2. Key Laboratory of Quantitative Remote Sensing Information Technology, Academy of Opto-Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China)

Abstract: Detecting snow cover information and snow space-time distribution quickly and accurately is a basic problem of ecological environment changes in the resources. Remote sensing technology effectively provides technical support for solving this problem. Normalized difference snow index (NDSI) is an important method for automatic extracting snow cover information using spectral features of snow, which have high reflection in the green band (0.53 ~ 0.59 μm) and strong absorption characteristics in short wave infrared band (1.57 ~ 1.65 μm). By using Landsat8 OLI images as the data source and according to the spectral characteristics of snow, the authors propose the enhanced normalized difference snow index (ENDSI) based on adding emissivity characteristics of snow in first band B1 (0.433 ~ 0.453 μm) and second band B2 (0.450 ~ 0.515 μm), and the utilization of this index to extract snow from OLI images. Simulation and case study results show the following characteristics: the sensitivity of ENDSI is stronger than that of NDSI for the snow thickness; with the increase of the thickness of snow, the change of ENDSI value is stronger than that of NDSI; ENDSI can effectively increase the difference between snow and non-snow; it is easy to extract snow from the image with 0.3 as ENDSI threshold and, in this way, snow extraction accuracy is improved.

Keywords: ENDSI; NDSI; snow; Landsat8 OLI

(责任编辑:陈理)