

多光谱遥感的地温反演及岛状冻土区分割方法研究

王春娇¹, 单墨楠², 胡照广¹, 单 炜^{1*}

(1. 东北林业大学 寒区科学与工程研究院, 黑龙江 哈尔滨 150040;

2. 北京林业大学 林学院, 北京 100083)

摘要: 受全球气候变化影响, 国内东北高纬度冻土地区多年冻土退化显著, 冻土融化过程中水分相态变化对土体的力学指标产生严重影响, 导致多条高速公路路域滑坡、路基不均匀沉陷等地质灾害频发。为了研究岛状冻土区域分布规律, 以北安至黑河高速公路 K153-K183 路域为研究区, 分别选择覆盖范围 2009 年 3、5、9 月 3 景 Landsat 7 ETM+ 影像数据, 运用辐射传输方程法对研究区进行红外地表温度反演, 得到研究区对应日期时刻地表温度图, 分析了地温与 NDVI、DEM 的相关性。对反演的结果采用自然间断点分级法进行图层分类, 通过对研究区地表温变分析和人工解译, 获得对应时刻区域内的低温区分布图, 对低温区进行相交运算, 得到研究区 2009 年冻土分布图, 经与北安至黑河高速公路冻土勘察结果比对, 具有较好的一致性。

关键词: 多年冻土; 冻土分布; 红外地温反演; 小兴安岭; 多光谱遥感

中图分类号: V19 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)04-1390-07

Multi-spectral remote sensing based land surface temperature retrieval and isolated permafrost zone segmentation

Wang Chunjiao¹, Shan Monan², Hu Zhaoguang¹, Shan Wei^{1*}

(1. Institute of Cold Regions Science and Engineering, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China;

2. Forestry Department of Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: Affected by global climate change, the permafrost in northeast high latitude permafrost area of our country was degraded significantly, and the water phase change seriously affected the mechanical indexes of soil during the thawing process of frozen soil. Due to the permafrost melting of high latitude permafrost regions in China in recent years, a plurality of freeway roadbed has landslide, and uneven subsidence and other geological disasters had repeated in the northern part of Heilongjiang Province. In order to study the island permafrost distribution, choosing the K153-K183 Road area from Bei'an to Heihe expressway as the study area, the 3 Landsat 7 ETM+ image data converging the study area was choosen respectively on March, May, September in 2009. The surface temperature map of the corresponding date was obtained and the relationship between ground temperature and NDVI, DEM was analyzed through the retrieval of the infrared surface temperature in the study area using the radiation

收稿日期: 2014-08-05; 修订日期: 2014-09-10

基金项目: 黑龙江省科技攻关项目(GZ07 C401); 交通运输部科技项目(2011 318 223 630)

作者简介: 王春娇(1983-), 女, 博士生, 主要从事寒冷地区地质灾害遥感监测方面的研究工作。Email: zlj_832008@126.com

* 通讯作者: 单 炜(1965-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事冻土物理学与冻土力学、寒冷地区地质灾害与减灾方面的研究工作。

Email: shanwei456@163.com

transfer equation method. Then the map layer of the inversion results was classified using natural breakpoint classification. The distribution map of the low temperature area of the corresponding moment was obtained through the analysis and the artificial interpretation of the surface temperature change of the study area. Frozen soil distribution map was obtained in the study area in 2009 on the intersection operation of the low temperature zone. It had a good consistency comparing with the expressway permafrost investigation results from Bei'an to Heihe.

Key words: permafrost; permafrost distribution; infrared LST; lesser Khingan mountains; multispectral RS

0 引言

气候变暖导致中国东北冻土赋存条件更加脆弱,冻土退化进程加快,主要表现为冻土分布的南界北移、面积缩小、厚度减薄和地温升高^[1]。位于小兴安岭西北部的北黑公路在1997~2000年建设期间,由于地基冻土融化产生的滑坡导致连续3 km左右的路基整体失稳,这段路基后改线至地质条件相对稳定的山脊。此外,北黑公路还出现了多段岛状冻土融化引起的路基融沉现象,严重威胁路基稳定与运营安全^[2]。

在多年冻土不连续分布的岛状冻土区,准确获取冻土分布是冻土研究的难点,同时制约着道路工程建设。大尺度的冻土分布研究主要基于气温、地温等气象数据^[3-5]。但是基于气象观测获取的数据多来自于气象台站,具有很强的局地性,由于开展的地温观测台站有限,只能采用地温的空间插值获得地面的温度空间分布^[6],并且难以得到不连续冻土分布结果。随着探测技术的发展,冻土分布的研究也有了新的手段。McClymont, AF等人利用电阻率、探地雷达成像和热传导模型分析了加拿大西北部研究区冻土形态和退化机理^[7]。Otto, JC等人利用地面激光扫描、探地雷达、电阻率成像技术和地表温度数据分析了奥地利阿尔卑斯山脉地表特征对冻土分布的影响^[8]。De Pascale等人结合电容、电阻率探测(CCR)和探地雷达技术(GPR)对加拿大北极西部的Mackenzie Delta地区的冻土分布进行研究,探测并绘制了大规模的地下冰、富冰沉积物、冰楔、热喀斯特及基本的地层关系^[9]。Wu, TH等人利用50MHz探地雷达获取青藏高原西大滩地区零星冻土分布及冻土北界,与1975年冻土研究对比后,得出了区域冻

土覆盖减少12%,山区冻土最低下限抬升25 m的结论^[10]。所有这些手段,都是基于地面监测的冻土分布研究,对于没有监测点的区域,仍需要采用适当的模型进行估计。在人们无法到达的区域和局地,仍然难以获得冻土分布情报。

土壤层中冰的存在改变了土壤的物理性质,间接影响了土壤向上的热通量输送^[11]。文中应用辐射传输方程法(RTE)进行地表温度反演,得到研究区地表温度分布图,并依据冻土岛与非冻土区地表温度的差异,获取不同季节的地温低温区域,对反演的结果采用自然间断点分级法进行图层分类,通过对研究区地表温变分析和人工解译,获得对应时刻区域内的低温区分布图,对低温区进行相交运算,得到研究区2009年的冻土分布图,经与北安至黑河高速公路冻土勘察结果比对,具有较好的一致性。

1 研究区概况及数据预处理

1.1 研究区

文中以北安至黑河高速公路与小兴安岭西北段相交路段路域为研究区,地理位置介于东经127°04'38"~127°56'15"和北纬49°19'48"~49°45'04"之间。研究区属低山丘陵地貌,地形起伏较大。地面坡度一般在10°~20°之间,在坡体中上部地面坡度较陡,为25°~30°,局部可达40°,进一步可划分为沟谷滩地、低山丘陵。全区海拔高程在210~330 m之间。

研究区位于中温带北部与寒温带过渡地带。受内陆及海上高低气压与季风交替影响,总体表现为冬季漫长而干寒、夏季短促而湿热,呈大陆性季风气候。

该区年平均气温为-2~1℃,年极端最高气温38.6℃,年极端最低气温-48.1℃;年平均风速2.7~4.0 m/s;区内年平均降水量为530~552 mm,最多年份

800mm,降雨多集中于夏季7~9月,约占全年总降水量的61%~67%,初雪一般在10月中旬,终雪多在翌年3月下旬至4月上旬;年最大蒸发量在1000mm以上,最小年份为850mm;年平均日照2500h,最高年份2800h,最少年份为2200h。年总辐射量平均1148kcal/cm²,最多可达1229kcal/cm²;最少1039kcal/cm²。

该区地处国内高纬度多年冻土区南部边缘地带,具有典型冰缘地貌。该区的岛状多年冻土属于古代冰川沉积残留物,目前正处于退化阶段。

1.2 数据源及预处理

1.2.1 数据来源

文中采用118,26轨道的Landsat 7卫星数据进行地表温度研究,影像获得时间分别为2009年3月3日,2009年5月22日和2009年9月11日。Landsat 7卫星携带加强型红外绘图仪(ETM+),可以获得单波段的红外数据,相对于Landsat 4和Landsat 5影像,红外波段的分辨率提高了一倍,数据可以通过美国地质调查局提供的资源(<http://glovis.usgs.gov/>)免费下载,表1整理了Landsat卫星红外波段主要技术参数。

1.2.2 数据预处理

文中采用Landsat7 L1标准地形校正数据。在使

表 1 Landsat 卫星红外波段主要技术参数

Tab.1 Main technology parameters of Landsat satellite infrared band

Satellites	Work period	Revisited cycle/days	TIR sensor	Band	Wavelength range/ μm	TIR resolution
Landsat 1	1972.7.23-1978	18				
Landsat 2	1975.1.22-1982	18			Without TIR sensor	
Landsat 3	1978.3.5-1983	18				
Landsat 4	1982.7.16-2001	16	TM	6	10.4-12.5	120
Landsat 5	1984.3.1-2011	16	TM	6	10.4-12.5	120
Landsat 6	1993.10.5-	16	ETM+		Failed	
Landsat 7	1999.4.15-	16	ETM+	6	10.4-12.5	60
				10	10.6-11.2	100
Landsat 8	2013.2.11-	16	TIRS	11	11.5-12.5	100

用前,先对数据进行几何校正、辐射定标、大气校正、裁剪研究区、计算大气参数等预处理。经过校正后,利用公式(1)将影像的灰度(DN)值转化为传感器接收到的辐射强度信息。

对于ETM+数据,接收到的辐射强度值与DN值的换算关系有^[12]:

$$L_{\lambda} = \frac{(LMAX_{\lambda} - LMIN_{\lambda})}{(QCALMAX - QCALMIN)} * (QCAL - QCALMIN) + LMIN_{\lambda} \quad (1)$$

式中: L_{λ} 为传感器接收到的辐射强度,单位是 $W/(m^2 \cdot sr \cdot \mu\text{m})$ 。QCAL是DN值, $LMIN_{\lambda}$ 是DN值的最小值对应的辐射强度, $LMAX_{\lambda}$ 为DN值的最大值对应的辐射强度。QCALMIN为DN值的最小值,对于2004年4月4日之后的影像取值1,QCALMAX与 $LMAX_{\lambda}$ 对应的DN最大值取值255。Landsat7 Band6接收到的辐射强度值的换算公式为:

$$L_{\lambda} = ((17.04 - 0)/(255 - 1)) * (QCAL - 1) + 0 \quad (2)$$

辐射定标后对影像进行大气校正,文中利用MODTRAN5辐射传输模型,对影像做FLAASH大

气校正。

图1选用信息量最为丰富的5、4、3波段组合生成假彩色合成图象,能充分显示各种地物影像特征的差别,根据假彩色影像对地物进行分类。

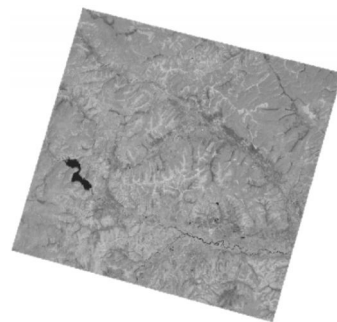


图 1 研究区的假彩色合成图像

Fig.1 False color composite image in study area

根据气象网(<http://www.wunderground.com/>)获取的卫星接近卫星过境时刻的气温、气压、湿度数据及卫星过境时刻及区域经纬度信息,通过NASA网站(<http://atmcorr.gsfc.nasa.gov/>)计算内插后的大气

剖面数据,获得估计的大气透过率、大气上行辐射和大气下行辐射值。根据气象网站资料,孙吴县2009年3月3日2时的气温为 -13° ,气压为1017 hPa,相对湿度56%,计算得到的大气透过率值为0.97,大气上行辐射为 $0.11 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr} \cdot \mu\text{m})$,大气下行辐射为 $0.20 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr} \cdot \mu\text{m})$ 。2009年5月22日2时的气温为 0° ,气压为1011 hPa,相对湿度77%,计算得到的大气透过率为0.92,大气上/下行辐射分别为 $0.44 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr} \cdot \mu\text{m})$ 和 $0.77 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr} \cdot \mu\text{m})$ 。2009年9月11日2时的气温为 10° ,气压为1007 hPa,相对湿度89%,计算得到的大气透过率为0.84,大气上行辐射为 $1.05 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr} \cdot \mu\text{m})$,大气下行辐射为 $1.75 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr} \cdot \mu\text{m})$ 。

2 基于多光谱遥感的地温反演方法

2.1 大气校正法反演地表温度

大气校正法又称辐射传输方程法(RTE),它是一种传统算法。使用这一方法的思路是在卫星遥感器所观测到的热辐射总量中减去大气对地表的热辐射量,得到地表的热辐射强度,并应用普朗克公式的反函数将其转化为与之对应的地表温度。大气校正法的表达式为:

$$L_{\lambda} = [\varepsilon \cdot B(T_s) + (1 - \varepsilon)L \downarrow] \cdot \tau + L \uparrow \quad (3)$$

式中: L_{λ} 为热辐射强度,可以根据红外波段(6波段)的DN值进行计算; ε 为地表比辐射率; $B(T_s)$ 为用Planck函数表示的黑体热辐射强度,其中 T_s 是地表温度LST(K); τ 为大气透过率; $L \uparrow$ 和 $L \downarrow$ 分别是大气上行辐射和大气下行热辐射强度。则温度 T_s 的黑体在红外波段的辐射亮度。

$$B(T_s) = [L_{\lambda} - L \uparrow - \tau \cdot (1 - \varepsilon)L \downarrow] / \tau \varepsilon \quad (4)$$

根据普朗克公式的反函数,地表的真实温度可以根据下式近似求得:

$$T_s = K_2 / \ln(K_1 / B(T_s) + 1) \quad (5)$$

式中: K_2 为定标参数2, K_1 为定标参数1。其中Landsat 7 ETM+数据的计算参数 K_1 和 K_2 根据下表赋值^[12]。

表2 ETM+的红外波段定标常数

Tab.2 Calibration constants of ETM+infrared band

Satellite	$K_1/\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \mu\text{m}^{-1})$	K_2/K
LANDSAT 7	666.09	1 282.71

2.2 关键参数地表比辐射率的计算

对于Landsat 7,NDVI值可以通过地表近红外波段与红外波段的反射率进行计算,分别代表第4波段和第3波段,NDVI可表示为^[13]:

$$\text{NDVI} = (B4 - B3) / (B4 + B3) \quad (6)$$

NDVI值越大,地表越接近于完全的植被叶冠覆盖;NDVI值越小,越接近于完全裸土;而NDVI介于植被与裸土之间时,则表明有一定比例的植被叶冠覆盖和一定比例的裸土。研究区大部分区域为自然表面,采用像元二分模型,一个像元的NDVI值可以表达为由绿色植被部分所贡献的信息 NDVI_v 与无植被覆盖(裸土)部分所贡献的信息 NDVI_s ,植被覆盖度可以表达为:

$$P_v = (\text{NDVI} - \text{NDVI}_s) / (\text{NDVI}_v - \text{NDVI}_s) \quad (7)$$

关于 NDVI_s 和 NDVI_v 的取值, NDVI_s 对于大多数类型的裸地表面,理论上应该接近零,但由于受众多因素影响, NDVI_s 的变化范围一般在 $-0.1 \sim -0.2$ 之间。计算植被覆盖度时,即使同一景影像,对于 NDVI_s 、 NDVI_v 值不能取固定值。覃志豪提出如果图像范围内有明显的茂密植被区,则取该区的平均NDVI作为 NDVI_v , NDVI_s 同理^[13]。李苗苗提出当植被覆盖度的最大值和最小值不能近似取100%和0%时,应该经过实测数据的检验,在没有实测数据的情况下,取 NDVI_v 与 NDVI_s 为图像中给定置信度的置信区间内的最大值与最小值^[22]。此研究由于没有实测数据,根据NDVI频数累计值,取频数为5%的NDVII作为 NDVI_s ,取频数为95%的NDVI作为 NDVI_v 。

根据覃志豪2004年提出的以下方法^[14],分两类计算地表比辐射率值,其中自然表面的计算公式为:

$$\varepsilon_{\text{surface}} = P_v R_v \varepsilon_v + (1 - P_v) R_s \varepsilon_s + d\varepsilon \quad (8)$$

建筑表面的计算公式如公式(9):

$$\varepsilon_{\text{building}} = P_v R_v \varepsilon_v + (1 - P_v) R_m \varepsilon_m + d\varepsilon \quad (9)$$

式中: R_v 为植被温度比率; R_m 为建筑表面温度比率; R_s 为裸土的温度比率; $\varepsilon_{\text{surface}}$ 为自然表面的地表比辐射率; $\varepsilon_{\text{building}}$ 为建筑表面的比辐射率; $d\varepsilon$ 为地表几何分布和内部散射效应。代入典型地物温度比率估计值,裸土的温度比率估计值 $R_s = 0.9902 + 0.1068 P_v$,植被的温度比率估计值 $R_v = 0.9332 + 0.0585 P_v$,建筑物的温度比率估计值 $R_m = 0.9886 + 0.1287 P_v$,代入典型地物比

辐射率为 $\epsilon_m=0.995, \epsilon_v=0.986, \epsilon_s=0.995$ 。得到比辐射率分类计算公式:

$$\epsilon_{\text{surface}}=0.9626+0.0613P_v-0.0461P_v^2+d\epsilon \quad (10)$$

$$\epsilon_{\text{building}}=0.9589+0.0860P_v-0.0671P_v^2+d\epsilon \quad (11)$$

$d\epsilon$ 对于水平地表可以忽略,但对于非均质和粗糙地表,该项必须考虑。对于该研究区,该项不可以忽略。当 $P_v \leq 0.5$ 时, $d\epsilon=0.0038P_v$, 当 $P_v > 0.5$ 时, $d\epsilon=0.0038(1-P_v)$ 。

3 基于地温反演的冻土岛分割方法

3.1 冻土岛的判定准则

土壤热属性是决定同一区域不同土壤温度的重要因素。冻土不同于其它土壤的热属性,冻土土壤中冰的存在改变了土壤的物理性质,间接影响土壤向上的热通量的输送^[11],冻土地区的地表升温较慢,故冻土区地表温度应低于无冻土区的地表温度。

通过自然分隔法(自然分隔方法计算各种分类的方差和,取值最小的分类作为分类结果,对各个类之间的差异最大化的相似值分组)将研究区地表温度数据分为 n 类。分类后的地温图可以表达为: $T_{i,n}=\{t_{i,1}, t_{i,2}, \dots, t_{i,n}\}$, i 表示月份,这里 $i=3, 5, 9$ 。选取 $1 \sim m$ 个温度区作为较低地温区,其中 $m \leq n$,低温区的表达式为: $T_{i,n-m}=\{t_{i,n-1} \cup t_{i,n-2} \cup \dots \cup t_{i,n-m}\}$ 。对各地温图的低温区进行相交运算,得到冻土分布范围,即: $T_p=\{T_{3,n-m} \cap T_{5,n-m} \cap T_{9,n-m}\}$ 。

对 3 月和 9 月的数据,取 $n=9$,5 月的数据通过人工目视解译确定 n 值,为未知数。对 3 月数据 m 值取 3,对 5 月和 9 月的数据, m 值取 5。

3.2 研究区冻土分布图

根据研究区冻土判定准则和分隔方法,3 月 3 日地温图低温区,表达式为: $T_{3,9-3}=\{t_{3,9-1} \cup t_{3,9-2} \cup t_{3,9-3}\}$ 。5 月 22 日地温图的低温区表达式为: $T_{5,n-5}=\{t_{5,n-1} \cup t_{5,n-2} \cup t_{5,n-3} \cup t_{5,n-4} \cup t_{5,n-5}\}$ 。9 月 11 日的表达式为: $T_{9,9-5}=\{t_{9,9-1} \cup t_{9,9-2} \cup t_{9,9-3} \cup t_{9,9-4} \cup t_{9,9-5}\}$ 。对三组低温区进行相交运算,得到研究区内冻土分布范围 T_p ,表达式为: $T_p=\{T_{3,9-3} \cap T_{5,n-5} \cap T_{9,9-5}\}$ 。辅助人工目视解译,最终确定了 2009 年 5 月 22 日分类值 $n=8$ 。

4 实验结果与讨论

根据中国气象数据共享服务网孙吴气象站资料得到 2009 年日地温最大最小值,2009 年 3 月 3 日地表温度变化区间为 $-5.3 \sim -8.8^\circ\text{C}$,5 月 22 日地温变化区间 $-1 \sim 51^\circ\text{C}$,9 月 11 日温度变化区间为 $4.9 \sim 33.7^\circ\text{C}$ 。对应时刻反演的研究区地表温度均值分别为 -6.4°C , 35.3°C 和 8.1°C 。2009 年 5 月 22 日,土壤热通量接近最大值。由于当日天气晴朗,日照时数达到 14.9 个小时,气象站和计算得到的地表平均温度都较高。可见反演地表温度与相应时间的气象站监测数据比较吻合,验证了数据的可靠性。根据如图 2 所示的研究区基于地温反演的冻土分割方法得到研究区冻土分布土图,认为图 3 代表了研究区岛状冻土上限范围的冻土分布图,底图为 2002 年 9 月 Landsat 7 单波段影像。

计算 2009 年 5 月 22 日不同地类的地表温度,建筑和裸土的平均温度为 35.7°C ,森林的平均温度为 30.7°C ,农田的平均温度为 38.6°C ,水体的平均温度为 17.2°C 。对分类后的反演地表温度 T 与 NDVI、

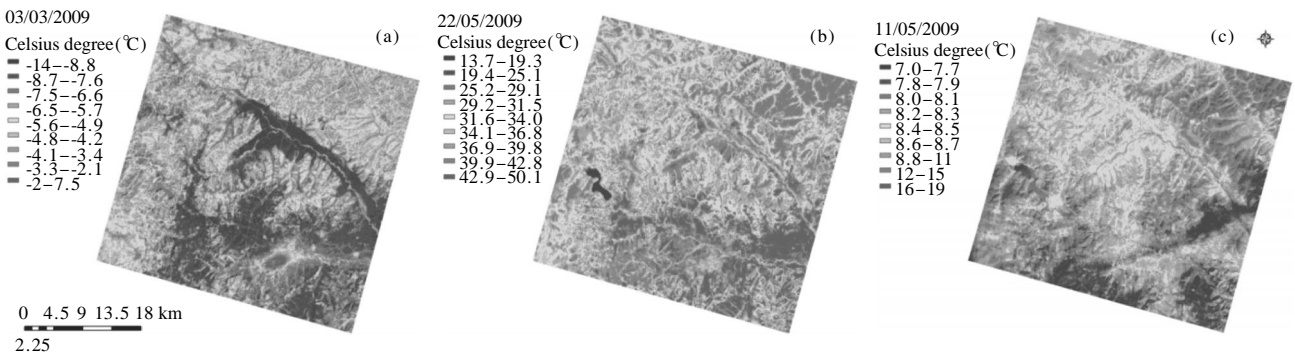


图 2 图(a)为 2009 年 3 月 3 日,图(b)为 2009 年 5 月 22 日,图(c)为 2009 年 9 月 11 日的地温反演结果
Fig.2 LST retrieval results in Fig(a)–(c) respectively 3/3/2009, 22/5/2009, 11/9/2009

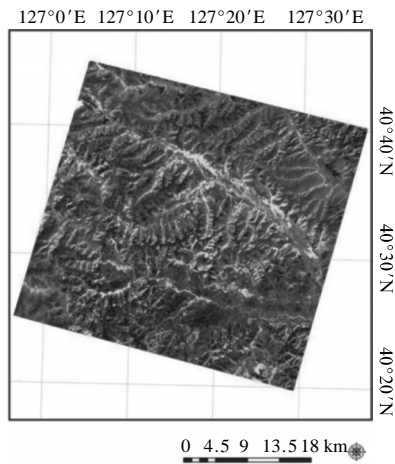


图 3 研究区岛状冻土分布图

Fig.3 Isolated permafrost distribution map in study area

DEM 和坡向分别进行相关性分析,计算农田地表温度 T 与 NDVI 的 Pearson 相关系数为 -0.748 , 检验 P 值为 0 , 说明农田地表温度与归一化植被指数存在显著负相关。计算 T 与 DEM 的 Pearson 相关系数为 -0.337 , 检验 P 值为 0 , 说明地表温度与 DEM 之间存在低度负相关。计算森林地表温度 T 与 NDVI 的 Pearson 相关系数为 -0.729 , 检验 P 值为 0 , 说明林区地表温度与归一化植被指数存在显著负相关, 但较农田相关度稍低, 见表 3。计算林区 T 与 DEM 的 Pearson 相关系数为 -0.019 , 检验 P 值为 0 , 说明研究区内森林地表温度与 DEM 之间几乎不相关。

表 3 相关系数

Tab.3 Correlation coefficient

Region	Percentage	Average LST / $^{\circ}\text{C}$	Pearson correlation coefficient	
			NDVI	DEM
Farm	52.8%	38.6	-0.748	-0.337
Forest	37.1%	30.7	-0.729	-0.019

将分析得到的冻土分布结果叠加到 2010 年 9 月 12 日 GOOGLE EARTH 影, 像得到图 4。左图 A 处位于北黑公路 K161+440~K161+450 岛状多年冻土路段, 图 A1 显示 2009 年 7 月 A 处钻探得到的冻土土样。受原有二级公路路基填筑及气候条件变化的影响, 原有多年冻土已经发生大范围的退化, 致使地基与路基整体下沉, 路面破损严重, 破损情况如图 A2 所示。图中 B、C 位置位于公路 K178+510~K178+550 和 K177+480~K177+580 路段。在公路 B、C 位置

有滑坡发生并持续发展, 地下有冻土分布。图 B1 为 B 位置路域滑坡俯瞰图, B2 为滑坡前缘俯瞰图。C 处滑坡如图 C 所示, 随着冻土的不断退化的影响, 在原有滑坡体上产生了新的滑坡。图 D 是 D 处由于冻土融化引发的路面横向裂缝图, 严重威胁了公路运营安全。路域冻土调查和工程勘察所发现的冻土路段与文中冻土分布图分布结果吻合, 验证了冻土分布图的正确性。

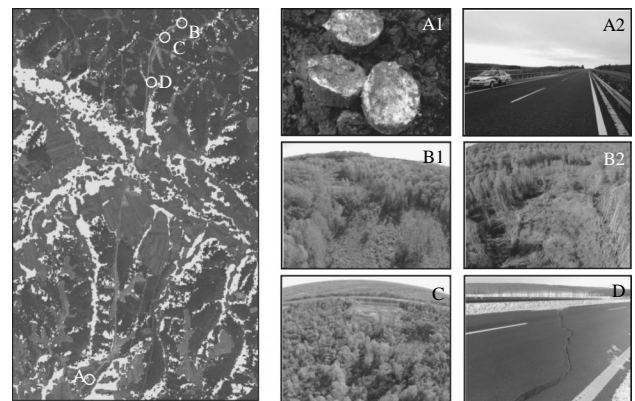


图 4 冻土分布对照图

Fig.4 Permafrost distribution comparison map

5 结束语

以 Landsat 7 ETM+ 遥感影像为数据源, 通过 NDVI 值获得地表比辐射率信息, 并利用 NASA 提供的网站获取大气校正参数, 应用辐射传输方程法反演研究区地表温度。时间上选取 2009 年冻土消融末期, 冻结末期和冻土达到最大冻结深度时间范围内的 3 景影像, 排除了季节性因素和季节性冻土对低温区的影响。根据研究区岛状冻土分布特征及对研究区地表温变分析, 制定了研究区冻土分布判定准则。依据冻土岛判定准则, 辅助人工解译的方法, 绘制了研究区域 2009 年岛状冻土分布图, 分析了地表温度和 NDVI 及 DEM 的相关性。对研究区冻土分布结果进行了验证, 结果表明, 采用文中方法进行的冻土岛分割结果具有较高的准确性。

参考文献:

[1] Jin Huijun, Yu Shaopeng, Lv Lanzhi, et al. Preliminary evaluation of permafrost degradation and its trend in Greater Khingan Range [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2006, 28(4): 467-474. (in Chinese)

- 金会军, 于少鹏, 吕兰芝, 等. 大兴安岭多年冻土退化及其趋势初步评估[J]. 冰川冻土, 2006, 28(4): 467-474.
- [2] San Wei, Guo Ying, Wang Fawu, et al. Environmental science and engineering: landslides in cold regions in the context of climate change [D]. Switzerland: Springer International Publishing, 2013.
- [3] Xin Kuide, Ren Qijia. Permafrost distribution in Northeast China[J]. *Geological Knowledge*, 1956, 1(10): 15-18. (in Chinese)
辛奎德, 任其甲. 中国东北地区多年冻土的分布 [J]. 地质知识, 1956, 1(10): 15-18.
- [4] Zhou Youwu, Wang Yinxue. Permafrost temperature, distribution and global warming in China [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1996, 18 (special issue): 139-147. (in Chinese)
周幼吾, 王银学. 我国东北部冻土温度和分布与气候变暖 [J]. 冰川冻土, 1996, 18(special issue): 139-147.
- [5] Wei Zhi, Jin Huijun. Prediction of permafrost change in northeast area under conditions of climate changing [J]. *China Science*, 2011, 41(1): 74-84. (in Chinese)
魏智, 金会军. 气候变化条件下东北地区多年冻土变化预测[J]. 中国科学, 2011, 41(1): 74-84.
- [6] Zhou Qing, Zhao Fengsheng, Gao Wenhua. NCEP/NCAR hourly analysis and measured surface temperature and ground temperature contrast analysis in China[J]. *Meteorology*, 2008, 34(2): 83-91. (in Chinese)
周青, 赵凤生, 高文华. NCEP/NCAR 逐时分析与中国实测地表温度和地面气温对比分析[J]. 气象, 2008, 34(2): 83-91.
- [7] McClymont, Alastair F, Hayashi Masaki, et al. Geophysical imaging and thermal modeling of subsurface morphology and thaw evolution of discontinuous permafrost [J]. *Journal of Geophysical Research-earth Surface*, 2013, 118 (3): 1826-1837.
- [8] Otto J C, Keuschnig M, Gotz J, et al. Detection of mountain permafrost by combining high resolution surface and subsurface information—an example from the glatzbach catchment, austrian alps.[J]. *Geografiska Annaler Series A-Physical Geography*, 2012, 94A(1): 43-57.
- [9] De Pascale, Gregory P, Pollard, et al. Geophysical mapping of ground ice using a combination of capacitive coupled resistivity and ground -penetrating radar, northwest Territories, Canada [J]. *Journal of Geophysical Research - Earth Surface*, 2008, 113(F2): 1-15.
- [10] Wu T H, Li S X, Cheng G D, et al. Using ground -penetrating radar to detect permafrost degradation in the northern limit of permafrost on the Tibetan Plateau [J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2005, 41(3): 211-219.
- [11] Shi Rui. Simulation of land surface process characteristics in cold region[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2007. (in Chinese)
师锐. 寒区陆面过程特征的模拟研究 [D]. 兰州: 兰州大学, 2007.
- [12] Landsat 7 Science Data Users Handbook. National Aeronautics and Space Administration [J/OL]. [2006-02-14]. <http://landsathandbook.gsfc.nasa.gov/>.
- [13] Qin Zhihao, Li Wenjuan, Xu Bin, et al. Land surface emissivity estimate of Landsat TM6 band range [J]. *Land Resources Remote Sensing*, 2004(3): 28-41. (in Chinese)
覃志豪, 李文娟, 徐斌, 等. 陆地卫星 TM6 波段范围内地表比辐射率的估计[J]. 国土资源遥感, 2004(3): 28-41.
- [14] Li Miaomiao, Wu Bingfang. Vegetation coverage estimate of Miyun Reservoir upstream by remote sensing [J]. *Recourses Science*, 2004, 26(4): 153-159. (in Chinese)
李苗苗, 吴炳方. 密云水库上游植被覆盖度的遥感估计 [J]. 资源科学, 2004, 26(4): 153-159.