

DOI: 10.5846/stxb201907151489

王志伟, 岳广阳, 吴晓东. 青藏高原多年冻土区不同高寒草地类型地表形变特征. 生态学报, 2021, 41(6): 2398-2407.

Wang Z W, Yue G Y, Wu X D. Ground surface deformation characteristics of different alpine-grassland types in the permafrost zones of Qinghai-Tibet Plateau. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(6): 2398-2407.

青藏高原多年冻土区不同高寒草地类型地表形变特征

王志伟^{1,2,3}, 岳广阳^{2,*}, 吴晓东²

1 贵州省农业科学院草业研究所, 贵阳 550006

2 中国科学院西北生态环境资源研究院 冰冻圈科学国家重点实验室 青藏高原冰冻圈观测研究站, 兰州 730020

3 美国德克萨斯州大学圣安东尼奥分校地质学系, 美国圣安东尼奥 78249

摘要: 作为气候变化“指示器”的青藏高原多年冻土, 近几十年来受到越来越多学者关注。但是已有冻土区地表形变的研究, 多单纯针对地表抬升和沉降量进行分析, 鲜有针对不同高寒草地类型进行深入挖掘的。在位于青藏高原多年冻土区腹地的五道梁地区, 利用 ASAR 数据和 SBAS-InSAR 方法反演了区域内 2005 年 4 月到 2010 年 7 月的地表形变状况。结果显示研究区地表形变速率基本位于 ± 8 mm/a 之间。其中, 变形率为正、地表呈现抬升的区域占 57.70%, 地表形变为负、地表沉降的区域占 42.30%。此外, 高寒草地整体表现地表下沉的现象, 而且高寒草原的地表沉降现象明显强于高寒草甸地区。计算获得 3 种生态遥感指数后, 分析地表形变与生态遥感指数的相关性, 发现针对不同草地类型, 其地表形变的主导因子存在差异。高寒草甸的地表形变有可能更多的受限于温度变化, 而高寒草原的地表形变则可能更多的由水分条件所影响。以上研究说明青藏高原多年冻土区植被类型条件越好, 地表沉降量越小。因此今后的相关研究需要对植被类型条件差的区域增加更多的关注, 因为这些地区易发生地表沉降, 导致其生态系统稳定性较差。

关键词: 活动层; 气候变化; SBAS-InSAR; ASAR

Ground surface deformation characteristics of different alpine-grassland types in the permafrost zones of Qinghai-Tibet Plateau

WANG Zhiwei^{1,2,3}, YUE Guangyang^{2,*}, WU Xiaodong²

1 Guizhou Institute of Prataculture, Guizhou Academy of Agricultural Sciences, Guiyang 550006, China

2 Cryosphere Research Station on Qinghai-Xizang Plateau, State Key Laboratory of Cryospheric Science, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730020, China

3 Department of Geological Sciences, University of Texas at San Antonio, San Antonio 78249, USA

Abstract: Global warming has received great attention from different research community, especially the warming changes of permafrost in Qinghai-Tibet Plateau (QTP) is one of the core study topics of global terrestrial ecosystems in recent decades. Because shifts of permafrost affect water circulation, biological diversity, geophysical process and carbon storage in this fragile plateau region. Permafrost, which has remained two or more years at or below the freezing point, has been considered as an indicator of climate changes. Existing studies lack detailed description of the response of permafrost change to different vegetation types, just focus on the analysis uplift and subsidence of ground surface. In this paper, ground surface deformation of permafrost in different type of alpine grasslands will be explored. The study area is located in Wudaoliang, which is one hinterland zone of QTP permafrost zone. The ground surface deformation of this region is inverted by advanced synthetic aperture radar (ASAR) data and the small baseline synthetic aperture radar interferometry (SBAS-

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41571075, 41701077, 41861016)

收稿日期: 2019-07-15; 网络出版日期: 2021-01-15

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: yuegy@lzb.ac.cn

InSAR) method. There were 24 ENVISAT ASAR images acquired from April 7th, 2005 to July 15th, 2010. They were employed to calculate the ground surface deformation, and the results showed that deformation rates of ground surface are primarily between ± 8 mm/a. The area of positive deformation rate accounts for 57.70%. In this region, ground surface is uplifted. Conversely, area of negative surface deformation occupies 42.30%, where is subsidence region. The results were demonstrated that SBAS-InSAR technique can provide a useful tool to monitoring the surface deformation of different alpine vegetation types in permafrost regions. Furthermore, the ground surface of alpine grassland is subsidence mainly. And the surface subsidence is large in alpine grassland, compared with alpine meadow. In this study, there were 3 types of remote sensing based ecological indexes (RSEI), including normalized differential green index (NDGI), normalized differential wet index (NDWI) and normalized differential land surface temperature index (NDLI) to research the relationship between ground surface deformation and environmental factors. It is concluded that in QTP the deformation limited factors of alpine grasslands with different vegetation types were different. The surface deformation of alpine meadow might be limited by temperature change, while deformation of alpine grassland might be affected by water conditions. It indicates that region with abundant vegetation is not vulnerable to the ground surface subsidence, in permafrost areas of the QTP. Therefore, future studies should focus on the areas with scarce vegetation. Because there will be taken place land subsidence in these areas, and then the ecological stability in this area will be fragile.

Key Words: active layer; climate change; SBAS-InSAR; ASAR

青藏高原作为“世界第三极”,不仅在亚洲季风系统中发挥着重要作用,对全球气候变化也异常敏感^[1-2]。它不仅是我国气候系统的重要组成因子,还影响到全球尺度的气候变化^[3-4]。被称为“气候变化指示器”的多年冻土^[5]广泛分布于青藏高原^[6],面积约为 $1.06 \times 10^6 \text{ km}^2$ ^[7]。多年冻土指温度能够维持在零摄氏度以下状态两年及两年以上的近地表土壤或岩石层,活动层是多年冻土区位于多年冻土之上,夏季融化、冬季冻结的地表部分。伴随全球气候变暖^[8],多年冻土在逐年退化^[9],活动层厚度相应增加^[10],影响到土壤特别是近地表的水、热循环过程和生态环境^[11]。多年冻土的热融效应增长会使大团聚体破碎成小团聚体,释放大量的有机碳、硝态氮等物质,进而造成地表植被发生改变,影响到地表的一系列特征,如反照率、降水的渗透速度、土壤中的蒸腾和蒸散、以及土壤侵蚀等,从而打乱水文和气候系统的循环速率,造成高寒地区的生态环境恶化。

青藏高原多年冻土区蕴含世界上海拔最高、类型最为独特的高寒草地生态系统^[12],其分布面积分别占青藏高原多年冻土区和全国草地总面积的 80%^[13]和 38%^[14],具有防风固沙、涵养水源、固氮储碳、调节碳循环及气候变化、维护生物多样性等诸多生态服务功能^[15-16],是国家生态安全的重要屏障^[14]。已有研究表明,高纬度和高海拔地区的生态系统对气候变暖的响应更加敏感^[17]。而青藏高原的高寒草地作为高原气候和冻土环境双重属性的生态系统,其对全球气候变化的响应更迅速、更超前^[18],其生态系统的稳定性也更脆弱^[19]。综上所述,对青藏高原多年冻土区高寒草地生态系统地表环境变化的特征分析极为重要,可以为揭示高寒草地生态系统在全球变化中的生态价值和贡献提供重要的理论基础和科学依据^[12]。

随着星载合成孔径雷达干涉测量技术(Interferometric Synthetic Aperture Radar, InSAR)的发展^[20],可以实现对多年冻土区近地表冻融循环变化特征的大范围、高精度和高分辨率监测^[21],为寒区生态环境的安全、平稳和可持续发展提供了十分有效的监测工具和技术手段^[22]。近些年利用 InSAR 技术分析多年冻土区的相关研究日益成熟^[23-24],Liu 等^[25]在阿拉斯加多年冻土区利用 ERS 1/2 SAR 数据成功探测到厘米级的地表沉降量,之后^[26]进一步反演该区域的活动层厚度。Chen 等^[21]使用 ALOS PALSAR 和 Envisat ASAR 数据,获得青藏高原北麓河的地表形变量,结果显示部分区域每年的变化量甚至为 ± 2 cm。Zhao 等利用 Envisat ASAR 数据^[24]对青藏高原当雄至羊八井的冻土区地表形变进行研究,发现自然地表的形变量在 3.6—5.0 cm,而铁路和公路的形变量则在 2.8—3.7 cm。上述研究多只是单纯针对地表形变(Ground surface deformation, GSD)和活动层厚度进行探讨^[26],而发掘不同高寒草地生态环境条件下地表形变特征变化的研究还较为薄弱^[27]。鉴

于此,本研究以青藏高原多年冻土区五道梁区域的不同类型高寒草地为研究对象,通过分析其地表形变量和遥感生态指数(Remote Sensing Based Ecological Index, RSEI)的关系(本研究中的生态指数包括绿度、湿度和热度三项^[28]),试图揭示:(1)不同高寒草地类型条件下的地表形变量变化特征如何?(2)地表形变量变化与绿度、湿度和热度指标存在何种关系?旨在对不同高寒草地类型地表形变特征进行挖掘,以探讨青藏高原多年冻土区不同高寒草地生态系统对气候变化的响应机制。

1 研究区概况

研究区位于青藏高原腹地、青海省的西部,大片连续多年冻土区(图1),地处北纬 34.4°—35.9°,东经 92.4°—93.9°之间,平均海拔(4600±190) m,属高原山地气候,夏季降水多,冬季降水少^[29]。2005—2010 年期间,年均植被指数为 0.085±0.037(-),属于植被稀疏区,主要以高寒草地植被类型为主,包括高寒草甸和高寒草原两种。

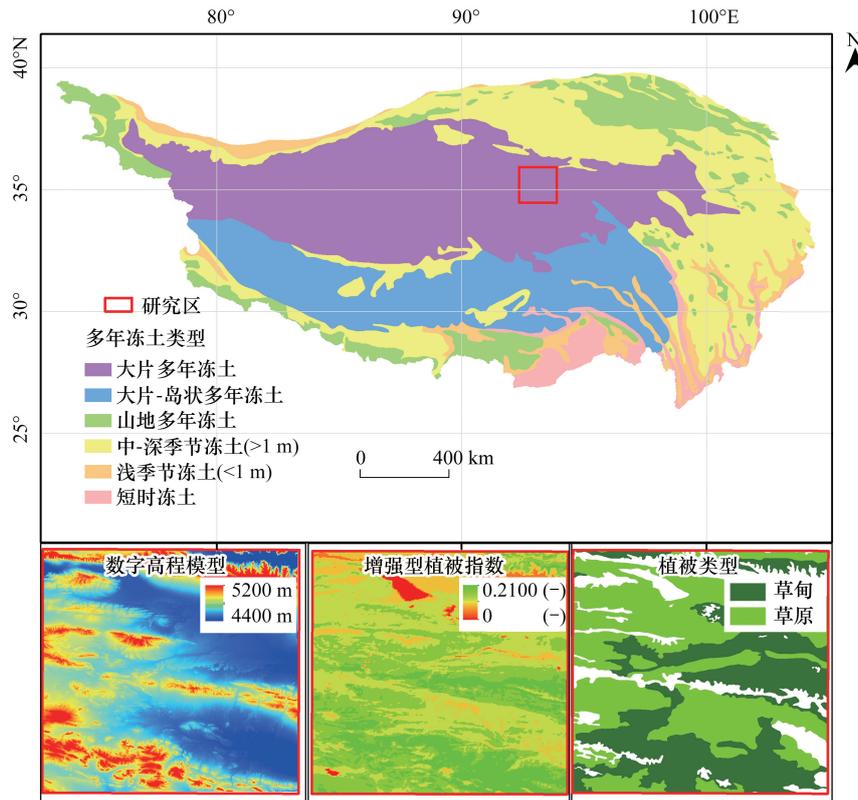


图1 青藏高原多年冻土分布及研究区位置

Fig.1 Permafrost distribution of Qinghai-Tibet Plateau and location of study area

2 数据来源与研究方法

2.1 数据来源及预处理

本研究中涉及的 ASAR (Advanced Synthetic Aperture Radar, ASAR) 数据有 28 景。因基线和多普勒质心差的原因,其中 4 景影像没有参与配对,剩余 24 景参与运算的影像获取年月日 (YYYY-MM-DD) 分别为:2005-4-7、2005-9-29、2006-4-27、2006-10-19、2007-5-17、2007-10-4、2008-5-1、2008-10-23、2009-1-1、2009-2-5、2009-3-12、2009-4-16、2009-5-21、2009-6-25、2009-7-30、2009-9-3、2009-10-8、2009-12-17、2010-1-21、2010-2-25、2010-4-1、2010-5-6、2010-6-10 和 2010-7-15。该 ENVISAT ASAR 数据集属于单视复数影像 (Single Look Complex,

SLC),为 C 波段、IS2 模式遥感数据,入射角 23°。研究数据获取方式为降轨,数据来源于欧空局(European Space Agency, ESA)。方位向分辨率和距离向分辨率分别为 22.6 m 和 4.05 m。

DEM 资料为 STRM V4 版本数据,该数据在赤道的分辨率约为 90 m^[24]。

本文使用的 MODIS 产品有 09A1、11A2 和 13A1 三类,每类产品选取 Terra(MOD 产品)卫星结果。09A1 产品为 500 米 8 天合成数据集,选取其 1、2、3、4、6 和 7 六个波段的数值(表 1)计算生态指数。地表温度(Land Surface Temperature, LST)11A2 和增强型植被指数(Enhanced Vegetation Index, EVI)13A1 产品分别为 1 km 8 天和 500 m 16 天合成数据集,运算过程中对 LST 数据执行降尺度处理至 500 m。植被类型数据结果从全国植被类型图中提取^[30],重采样至 500 m。

此外,文中所有地图投影方式都为 WGS84 坐标系。

表 1 MODIS 09A1 与 TM 各波段波长

Table 1 Band wavelengths of MODIS 09A1 and TM

MODIS 09A1	波长 Wavelength/nm	TM	波长 Wavelength/nm
band-1	620—670	band-3	630—690
band-2	841—876	band-4	760—900
band-3	459—479	band-1	450—520
band-4	545—565	band-2	520—600
band-5	1230—1250	band-6	1040—1250
band-6	1628—1652	band-5	1550—1750
band-7	2105—2155	band-7	2080—2350

2.2 地表形变反演方法

地表形变反演,采用短基线集合成孔径雷达干涉测量技术(Small Baseline Subset Interferometric Synthetic Aperture Radar, SBAS-InSAR)。该技术使用的微波数据,不受或少受云、雪和稀疏植被的影响,不需要光照条件,可全天候、全天时地获取。SBAS-InSAR 技术能够获取长时间序列的地表形变特征,成熟应用于青藏高原多年冻土区^[21, 24]。其原理是通过构建具有较短时-空基线的影像数据对,计算获得干涉图,然后应用奇异值分解(Singular Value Decomposition, SVD)方法生成形变时间序列和平均形变速率结果。SBAS-InSAR 干涉时序分析方法计算获取影像形变结果基本计算模型如下式所示:

$$\varphi_{\text{int}} = \varphi_{\text{def}} + \varphi_{\text{flat}} + \varphi_{\text{topo}} + \varphi_{\text{atmo}} + \varphi_{\text{noise}} \quad (1)$$

式中, φ_{int} 指干涉相位, φ_{def} 指地表形变相位, φ_{flat} 指平地相位, φ_{topo} 指地形相位, φ_{atmo} 指大气延迟相位; φ_{noise} 指噪声引起的相位。差分干涉测量主要关注的是地表形变相位,该结果并非借助高程数据(高程信息会作为辅助数据参与运算)反演的高程差,而是相对于第一景影像的形变差(因此第一景影像的形变值为 0)。

具体来讲,在研究区内参与运算的影像共有 $N+1$ 景,获取时间按照顺序排列,依次为 t_0 、 t_1 、 \dots 、 t_N 。以其中任意一幅影像为例,该影像会与其他影像进行匹配,生成至少一幅差分干涉图。假设第 k 幅差分干涉图由 t_i 和 t_j 时刻获取的影像生成,则其计算过程如下式所示:

$$\delta\varphi_k(x, r) = \varphi_j(x, r) - \varphi_i(x, r) \approx \frac{4\pi}{\lambda} [d(t_j, x, r) - d(t_i, x, r)] + \Delta\varphi_{\text{flat}}^k(x, r) + \Delta\varphi_{\text{topo}}^k(x, r) + \Delta\varphi_{\text{atmo}}^k(x, r) + \Delta\varphi_{\text{noise}}^k(x, r) \quad (2)$$

式中, λ 是信号中心波长, x 和 r 指影像像元的方位向和距离向, $d(t_j, x, r)$ 和 $d(t_i, x, r)$ 是 t_j 和 t_i 时刻卫星视线方向(Line of Sight, LOS)相对 $d(t_0, x, r)$ 时刻的累积形变量。此外 $\Delta\varphi_{\text{flat}}^k(x, r)$ 和 $\Delta\varphi_{\text{topo}}^k(x, r)$ 表示平地相位和地形相位,通过高程数据(DEM)来消除; $\Delta\varphi_{\text{atmo}}^k(x, r)$ 表示其大气效应产生的相位; $\Delta\varphi_{\text{noise}}^k(x, r)$ 则是系统热噪声或者量子噪声引起的相位。因此,SBAS-InSAR 技术获取的地表形变结果并非利用 DEM 计算的高程差,而是相对 t_0 影像利用相位信息获得的形变差。

获取具有物理意义的形变时间序列结果,其计算过程如下:

假设 v_k 是 i 到 j 时刻的平均相位速度,则其相位和时间关系满足如下公式:

$$v_k \times (t_j - t_i) = \Delta(\varphi_j - \varphi_i) \quad (3)$$

式中, φ 指相位信息。

考虑到不同的时间分段, T_0 到 T_k 时刻的第 k 幅干涉图的相位信息可以通过如下公式计算得到:

$$\Delta\varphi_k = \sum_{k=0}^k (T_k - T_0)(v_k - v_0) \quad (4)$$

式中, $\Delta\varphi_k$ 是影响不同时间间隔的相位速度积分信息,改写成矩阵表达式为

$$Av = \Delta\varphi \quad (5)$$

式中, A 是系数矩阵;速度 v 是速度矢量,可以通过系数矩阵 A 计算获取。因为在 SBAS-InSAR 处理过程中会有多个主影像,这就有可能导致系数矩阵 A 秩亏。通常利用 SVD 方法来处理,首先会生成一个逆矩阵,然后获得速度矢量的最小范数解,最终通过各个时间段内的速度积分获得各个时间段的形变量。

2.3 生态指标计算方法

已有研究^[28]指出,遥感生态指数包括绿度、湿度、热度和干度 4 个指标,分别可以用植被指数 NDVI、湿度分量 Wet、地表温度 LST 和土壤指数 NBSI 来代表。

考虑到青藏高原多年冻土区植被稀疏的特点^[31],本研究中使用 MODIS 13A1 的 EVI 产品替代 NDVI 作为绿度指标。

湿度指标利用 TM 近似波段的 MODIS 09A1 产品计算获得,其计算公式如下:

$$\text{Wet}(\text{MODIS}) = 0.0315b_3 + 0.2021b_4 + 0.3102b_1 + 0.1594b_2 - 0.6806b_6 - 0.6109b_7 \quad (6)$$

式中, b_3 、 b_4 、 b_1 、 b_2 、 b_6 和 b_7 分别为 MODIS 09A1 的第 3、4、1、2、6 和 7 波段的反射率,分别对应 TM 数据的第 1、2、3、4、5 和 7 波段数据,如表 1 所示。

热度指标在此直接利用 MODIS 11A2 LST 产品。

因研究对象为青藏高原多年冻土区的高寒草地,在此有植被区域不适合用裸土指数。同时,研究区内较少有建筑存在,故在本研究中也不考虑土壤指数。因此本研究中未对干度指标进行计算和分析。

最后,为了后续的统计分析,除了干度指标不做考虑外,其他 3 个指数都实行归一化 (Normalized Differential) 操作,具体计算公式如下:

$$\text{NDRSEI} = (\text{RSEI}_x - \text{RSEI}_{\min}) / (\text{RSEI}_{\max} - \text{RSEI}_{\min}) \quad (7)$$

式中, NDRSEI 、 RSEI_x 、 RSEI_{\min} 和 RSEI_{\max} 分别对应绿度、湿度和热度 3 个指标的归一化值、当前值、最小值和最大值,计算后的结果包括归一化绿度 (Normalized differential green index, NDGI)、归一化湿度 (Normalized differential wet index, NDWI) 和归一化热度 (Normalized differential land surface temperature index, NDLI)。

3 结果与分析

3.1 研究区地表形变时间序列反演结果

地表形变的长时间序列数据结果主要覆盖 2005—2010 年时间段,如图 2 所示。利用 SBAS-InSAR 方法反演研究区 24 个时间段(共采集 28 景影像,4 景没有参与配对的影像无结果)的形变结果。其中,于 2005 年 4 月 7 日获取的第一景运算影像被设置为参考影像(即 t_0 时刻影像),该影像所有数值皆为 0,故未在图 2 中展示。此外,图 2 中红色区域代表地表存在抬升现象;绿色则相反,代表地面的沉降现象。

3.2 研究区地表形变率结果

研究区在 2005 年至 2010 年间的的海表形变率如图 3 所示,所有位置的形变率位于 15 mm/a 之内。图中无数据区域是形变率为 0 mm/a 和数据质量较差的像元,其余区域地表形变率绝大部分都在 ± 8 mm/a 内。如图 4 所示,其中形变率在 ± 4 mm/a 以内的像元占有形变像元的 89.24%,变形率为正的区域占 57.70%,地表形

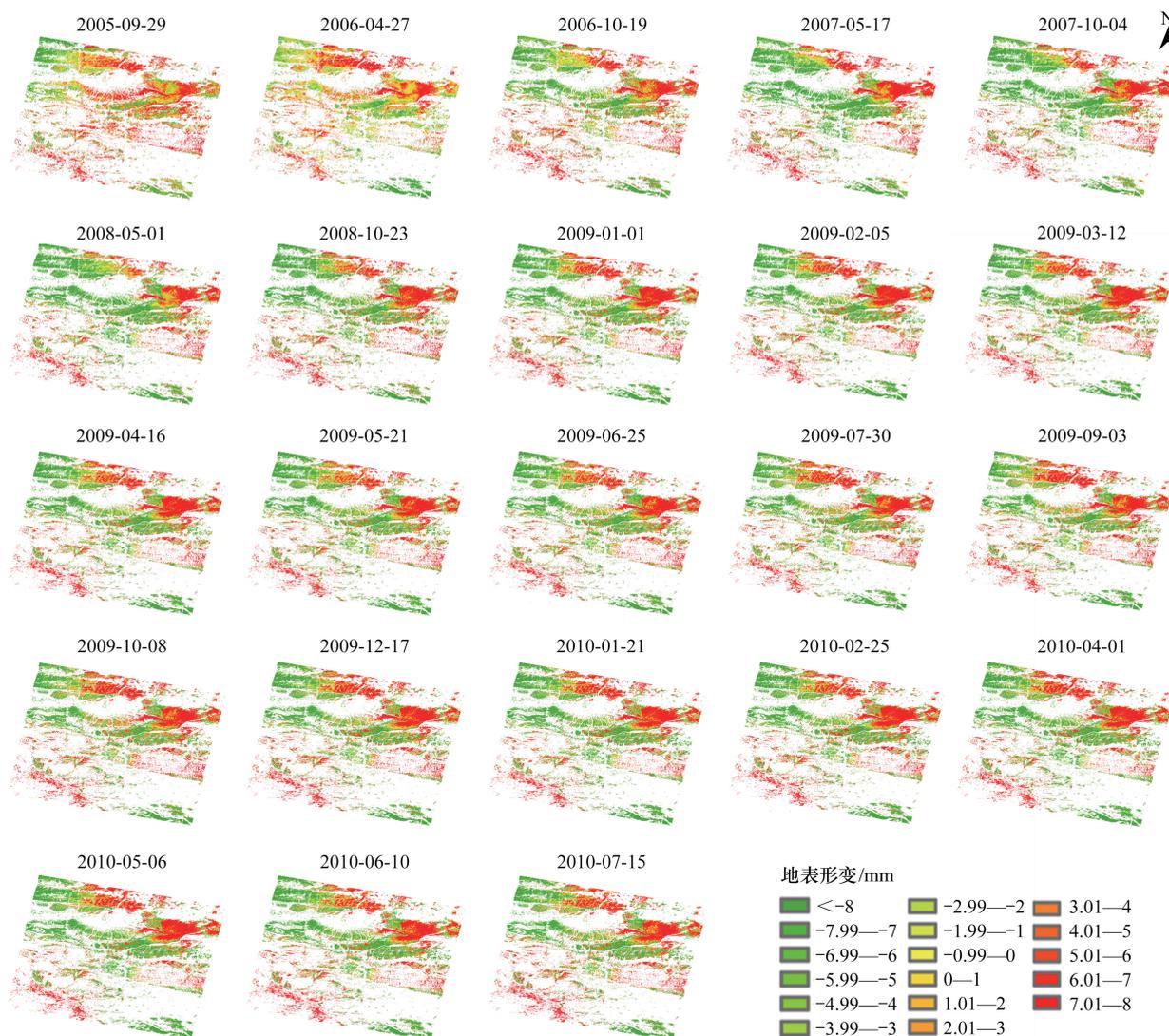


图2 研究区地表形变时间序列结果

Fig.2 Time-series deformation results of ground surface in study area

红色为抬升区域,绿色为沉降区域

变为负的区域占 42.30%。

3.3 不同植被类型条件下地表形变结果

研究区 24 个时间点在不同植被类型条件下的地表形变结果如图 5 所示,高寒草地整体表现地表下沉的现象,同全球变暖冻土退化进而导致冰融化为水造成土层体积减少的规律一致。

3.4 不同植被类型条件下生态指数结果

利用公式 7 中的方法,计算归一化生态指数(Remote sensing based ecological indexes, NDRSEI)获取结果如图 6 所示。图中归一化热度(Normalized differential land surface temperature index, NDLI)体现高寒草甸类的 NDLI 值大于高寒草原类,但是利用 LST 计算获取的 NDLI 结果中并没有当即体现出 2008 年极端气温低年,而是在 2009 年 3 月后开始出现一次极端低地温现象。归一化绿度(Normalized differential green index, NDGI)显示高寒草甸类的 NDGI 值要大于高寒草原类,特别是在 2008 年下半年时,存在 NDGI 显著变小的现象。归一化湿度(Normalized differential wet index, NDWI)不仅较好的体现出湿度季节性变化的特点,而且曲线在 2005 年 4 月至 2010 年 7 月期间呈现一种湿度稳定增长的状态。

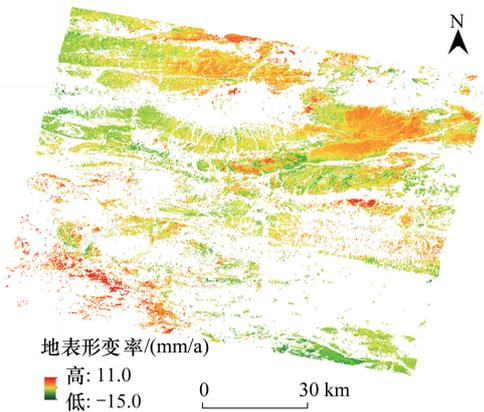


图3 研究区 2005 年到 2010 年地表形变率图

Fig.3 Deformation rate of ground surface in the study area from 2005 to 2010

红色为抬升区域,绿色为沉降区域

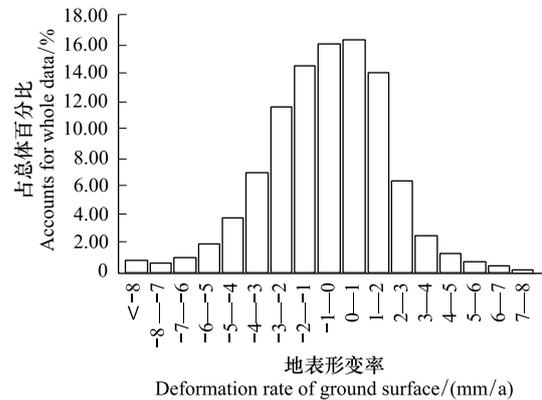


图4 研究区地表形变率频率分布直方图

Fig.4 Frequency distribution histogram of ground deformation rate in study areas

3.5 地表形变与生态指数的相关性

为分析研究区 2005 年 4 月至 2010 年 7 月 3 种生态指数对地表形变的贡献与作用,本文利用研究区地表形变(Ground surface deformation, GSD)和 3 种归一化生态指数,包括 NDLI(热度)、NDGI(绿色度)和 NDWI(湿度)结果,计算获得图 7 所示的相关图。

4 讨论

4.1 SBAS-InSAR 技术的优势及局限性

InSAR 技术提供了一种大范围地表形变估算方法,特别是 SBAS-InSAR 技术尤为适用于青藏高原多年冻土区,同时多种 SAR 影像传感器的在轨运行,也为长时间序列的地表形变研究提供了必要的数据库[26]。同时借助现有的植被类型图,甚至可以在青藏高原多年冻土区腹地开展不同植被类型条件下的地表形变特征研究。而高原冻土区腹地一般而言多位于海拔高、人类生存环境恶劣的区域。因此,本文尝试利用现有的 SAR 影像和植被类型分类结果,利用 SBAS-InSAR 技术在五道梁地区(青藏高原多年冻土区腹地)开展对不同高寒草地地表形变特征的分析,并得到一些初步结果。

虽然本研究成功的利用 InSAR 技术、植被类型图集和生态遥感植被对青藏高原多年冻土区进行了地表形变技术特征分析,并得到一些初步的结论,但仍存在以下几方面需要继续加强和改进。

(1)SAR 数据过于零散。特别是在图 6NDGI 曲线中,2007 年下半年的点甚至未表现出植被季节性变化的特点。在以后的研究中,需要增加每一年的数据获取量,以此来更准确的反映地表形变的客观规律。

(2)冻土区的研究数据存在时间滞后现象。如图 6NDLI 曲线中,LST 产品对 2008 年极端低气温年的滞后表现。时间滞后性的研究,在多年冻土区的重要性日益凸显,在下一步的研究中,将会利用合理、有效的模型、算法来挖掘这种规律。

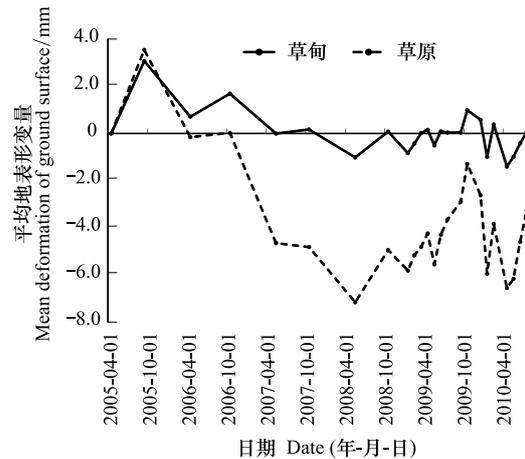


图5 2005 年到 2010 年间研究区不同高寒草地类型地表形变

Fig.5 Ground deformation of different alpine grassland types from 2005 to 2010

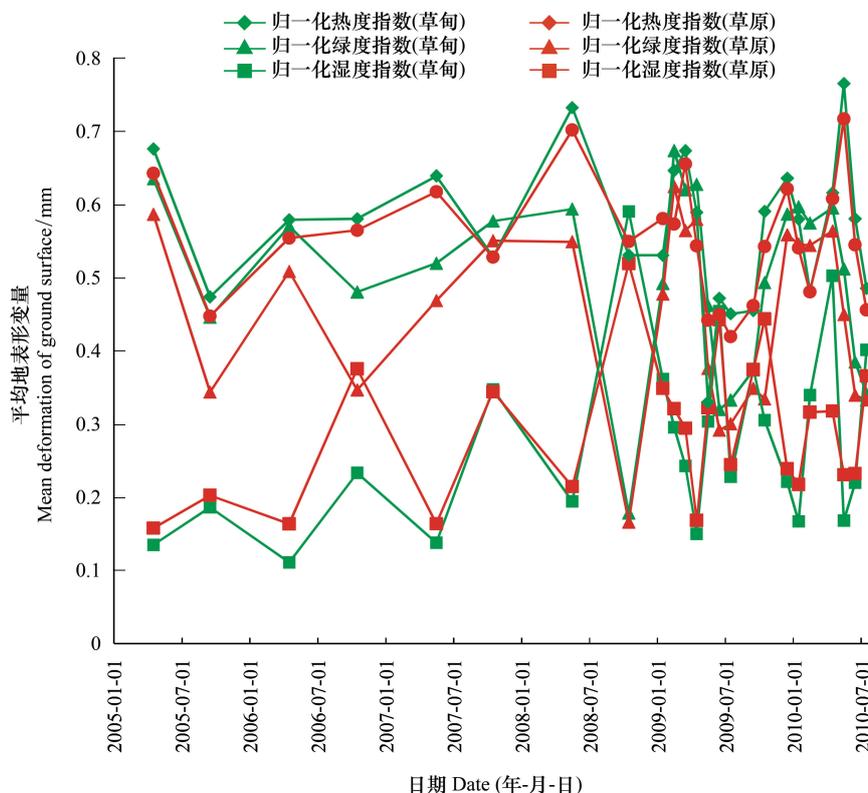


图6 2005—2010年间不同高寒草地类型生态指数

Fig.6 Ecological indexes of different alpine grassland types from 2005 to 2010

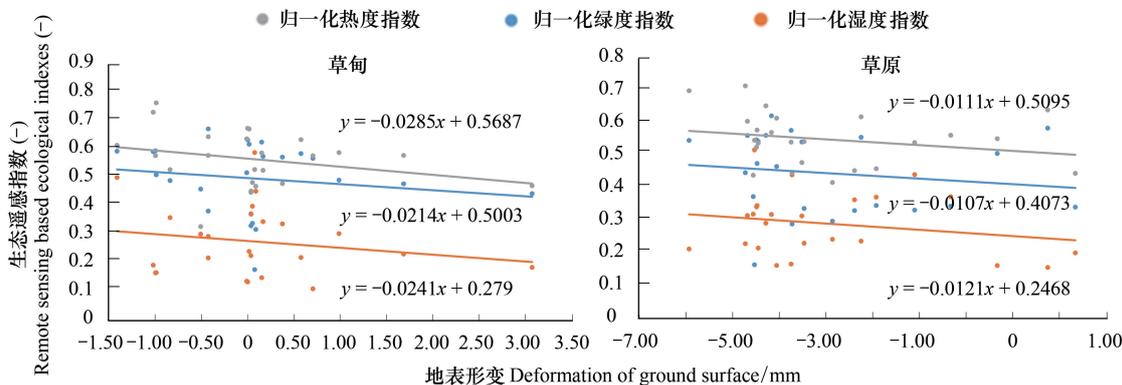


图7 高寒草甸和高寒草原条件下地表形变与3种生态遥感参数的相关性

Fig.7 Correlations between ground surface deformation and different remote sensing based ecological index in alpine meadow and steppe

4.2 生态遥感指数对不同高寒草地类型地表形变的影响分析

如图2所示,呈现大规模抬升的区域主要位于研究区东北部,该区域包括3个湖泊,从西至东依次为库塞湖、海丁诺尔湖和盐湖。研究区东北部的大范围抬升可能受区域内湖泊影响,而湖泊区域外,大部分区域表现地面沉降的特点,该结果同当雄至羊八井段的地表形变特征一致^[10]。此外,通过图5可知,在2008年附近,地表形变存在短期抬升的现象,可能同2008年我国的极端低温事件发生有关。同时,图5中也展示出高寒草原的地表沉降现象明显强于高寒草甸地区,符合植被条件较好的区域,冻土更加稳定,地下冰融化慢的规律。在图7中,对于高寒草甸而言,地表形变量和3种生态指数的负相关性略大于高寒草原。其中在高寒草甸条

件下地表形变与 NDLI 的负相关性最大,数值为 -0.0285 ,与 NDWI 和 NDGI 的负相关性数值依次为 -0.0241 和 -0.0214 。而在高寒草原条件下,地表形变量则与 NDWI 的负相关性最大为 -0.0121 ,然后为 NDLI 和 NDGI,负相关性数值分别为 -0.0111 和 -0.0107 。以上研究结果表明,针对不同草地类型,其主导因子存在差异。高寒草甸的地表形变有可能更多的受限于温度变化(NDLI 热度指标,由地表温度 LST 产品计算获得),而高寒草原的地表形变则可能更多的由水分条件所影响(NDWI 湿度指标,在遥感生态指数中为表征湿度的分量)。

5 结论

以上研究利用成熟的 SBAS-InSAR 技术,对青藏高原多年冻土区的五道梁研究区进行了地表形变特征分析,准确的反演出研究区高分辨率的地表形变信息。同时借助生态遥感指标对研究区高寒草甸和高寒草原两种不同的植被类型进行分析,发现高寒草原的地表沉降状况要严重于高寒草甸。以上结果反映出在青藏高原多年冻土区,植被生长越差的区域,其生态系统的脆弱性更为强烈。

参考文献 (References):

- [1] Qin Y, Yi S H, Ding Y J, Qin Y, Zhang W, Sun Y, Hou X M, Yu H Y, Meng B P, Zhang H F, Chen J J, Wang Z W. Effects of plateau pikas' foraging and burrowing activities on vegetation biomass and soil organic carbon of alpine grasslands. *Plant and Soil*, 2020; s11104-020-04489-1.
- [2] Wu Q B, Zhang T J, Liu Y Z. Permafrost temperatures and thickness on the Qinghai-Tibet Plateau. *Global and Planetary Change*, 2010, 72(1-2): 32-38.
- [3] Hu G J, Zhao L, Li R, Wu X D, Wu T H, Xie C W, Zhu X F, Su Y Q. Variations in soil temperature from 1980 to 2015 in permafrost regions on the Qinghai-Tibetan Plateau based on observed and reanalysis products. *Geoderma*, 2019, 337: 893-905.
- [4] Hu G J, Zhao L, Li R, Wu X D, Wu T H, Zhu X F, Pang Q Q, Liu G Y, Du E J, Zou D F, Hao J M, Li W P. Simulation of land surface heat fluxes in permafrost regions on the Qinghai-Tibetan Plateau using CMIP5 models. *Atmospheric Research*, 2019, 220: 155-168.
- [5] Wu X D, Zhao L, Chen M J, Fang H B, Yue G, Chen J, Pang Q, Wang Z W, Ding Y J. Soil Organic carbon and its relationship to vegetation communities and soil properties in permafrost areas of the central western Qinghai-Tibet Plateau, China. *Permafrost and Periglacial Processes*, 2012, 23(2): 162-169.
- [6] Wu X D, Zhao L, Fang H B, Chen J, Pang Q Q, Wang Z W, Chen M J, Ding Y J. Soil enzyme activities in permafrost regions of the western Qinghai-Tibetan Plateau. *Soil Science Society of America Journal*, 2012, 76(4): 1280-1290.
- [7] Zou D F, Zhao L, Sheng Y, Chen J, Hu G J, Wu T H, Jichun W, Xie C W, Wu X D, Pang Q Q, Wang W, Erji D, Li W P, Liu G Y, Li J, Qin Y H, Qiao Y P, Wang Z W, Shi J Z, Cheng G D. A new map of permafrost distribution on the Tibetan Plateau. *The Cryosphere*, 2017, 11: 2527-2542.
- [8] Chen Y Y, Yang K, He J, Qin J, Shi J C, Du J Y, He Q. Improving land surface temperature modeling for dry land of China. *Journal of Geophysical Research*, 2011, 116(D20): 2011JD015921.
- [9] Zhao L, Wu X D, Wang Z W, Sheng Y, Fang H B, Zhao Y H, Hu G J, Li W P, Pang Q Q, Shi J Z, Mo B T, Wang Q, Ruan X R, Li X D, Ding Y J. Soil organic carbon and total nitrogen pools in permafrost zones of the Qinghai-Tibetan Plateau. *Scientific Reports*, 2018, 8(1): 3656.
- [10] Wu Q B, Zhang T J. Recent permafrost warming on the Qinghai-Tibetan Plateau. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2008, 113(D13): D13108.
- [11] Wu Q B, Hou Y D, Yun H B, Liu Y Z. Changes in active-layer thickness and near-surface permafrost between 2002 and 2012 in alpine ecosystems, Qinghai-Xizang (Tibet) Plateau, China. *Global and Planetary Change*, 2015, 124: 149-155.
- [12] Wang Z W, Wang Q, Wu X D, Zhao L, Yue G Y, Nan Z T, Wang P C, Yi S H, Zou D F, Qin Y, Wu T H, Shi J Z. Vegetation changes in the permafrost regions of the Qinghai-Tibetan Plateau from 1982-2012: Different responses related to geographical locations and vegetation types in high-altitude areas. *Plos One*, 2017, 12(1): e0169732.
- [13] Wang Z W, Wang Q, Zhao L, Wu X D, Yue G Y, Zou D F, Nan Z T, Liu G Y, Pang Q Q, Fang H B, Wu T H, Shi J Z, Jiao K Q, Zhao Y H, Zhang L L. Mapping the vegetation distribution of the permafrost zone on the Qinghai-Tibet Plateau. *Journal of Mountain Science*, 2016, 13(6): 1035-1046.
- [14] 武胜男, 张曦, 高晓霞, 许驭丹, 吴晓慧, 单席凯, 刘世梁, 董全民, 董世魁, 温璐. 三江源区“黑土滩”型退化草地人工恢复植物群落的演替动态. *生态学报*, 2019, 39(7): 2444-2453.
- [15] Yi S H, Zhou Z Y, Ren S L, Xu M, Qin Y, Chen S, Ye B. Effects of permafrost degradation on alpine grassland in a semi-arid basin on the

- Qinghai-Tibetan Plateau. *Environmental Research Letters*, 2011, 6(4): 045403.
- [16] Yi S H. FragMAP: a tool for long-term and cooperative monitoring and analysis of small-scale habitat fragmentation using an unmanned aerial vehicle. *International Journal of Remote Sensing*, 2016: 1-12.
- [17] Thomas C D, Cameron A, Green R E, Bakkenes M, Beaumont L J, Collingham Y C, Erasmus B F, De Siqueira M F, Grainger A, Hannah L, Hughes L, Huntley B, Van Jaarsveld A S, Midgley G F, Miles L, Ortega-Huerta M A, Peterson A T, Phillips O L, Williams S E. Extinction risk from climate change. *Nature*, 2004, 427(6970): 145-148.
- [18] 白炜, 奚晶阳, 王根绪. 短期增温与施氮对青藏高原高寒沼泽草甸生态系统 CO₂ 排放的影响. *生态学杂志*, 2019, 38(4): 927-936.
- [19] Qin Y, Yi S H, Ding Y J, Xu G W, Chen J J, Wang Z W. Effects of small-scale patchiness of alpine grassland on ecosystem carbon and nitrogen accumulation and estimation in northeastern Qinghai-Tibetan Plateau. *Geoderma*, 2018, 318: 52-63.
- [20] Li Z W, Cao Y M, Wei J C, Duan M, Wu L X, Hou J X, Zhu J J. Time-series InSAR ground deformation monitoring: Atmospheric delay modeling and estimating. *Earth-Science Reviews*, 2019, 192: 258-284.
- [21] Chen F L, Lin H, Li Z, Chen Q, Zhou J M. Interaction between permafrost and infrastructure along the Qinghai-Tibet Railway detected via jointly analysis of C- and L-band small baseline SAR interferometry. *Remote Sensing of Environment*, 2012, 123: 532-540.
- [22] 王志伟, 岳广阳, 吴晓东, 张文, 王普昶, 宋雪莲, 吴佳海. 主动微波光谱影像对新疆天山山脉区域地表形变的监测研究. *光谱学与光谱分析*, 2020, 40(8): 2366-2372.
- [23] Chen F L, Lin H, Zhou W, Hong T H, Wang G. Surface deformation detected by ALOS PALSAR small baseline SAR interferometry over permafrost environment of Beiluhe section, Tibet Plateau, China. *Remote Sensing of Environment*, 2013, 138: 10-18.
- [24] Zhao R, Li Z W, Feng G C, Wang Q J, Hu J. Monitoring surface deformation over permafrost with an improved SBAS-InSAR algorithm: With emphasis on climatic factors modeling. *Remote Sensing of Environment*, 2016, 184: 276-287.
- [25] Liu L, Zhang T J, Wahr J. InSAR measurements of surface deformation over permafrost on the North Slope of Alaska. *Journal of Geophysical Research*, 2010, 115(F3).
- [26] Liu L, Schaefer K, Zhang T J, Wahr J. Estimating 1992—2000 average active layer thickness on the Alaskan North Slope from remotely sensed surface subsidence. *Journal of Geophysical Research*, 2012, 117(F1).
- [27] Imaizumi F, Nishiguchi T, Matsuoka N, Trappmann D, Stoffel M. Interpretation of recent alpine landscape system evolution using geomorphic mapping and L-band InSAR analyses. *Geomorphology*, 2018, 310: 125-137.
- [28] 王丽春, 焦黎, 来风兵, 张乃明. 基于遥感生态指数的新疆玛纳斯湖湿地生态变化评价. *生态学报*, 2019, 39(8): 2963-2972.
- [29] 韩海燕, 王玉涛, 孙皓, 殷欢欢, 朱同斌, 周敏. 基于 BIOME-BGC 模型的青藏高原五道梁草地生态系统碳动态模拟. *中国农学通报*, 2019, 35(7): 83-89.
- [30] Zhang G L, Zhang Y J, Dong J W, Xiao X M. Green-up dates in the Tibetan Plateau have continuously advanced from 1982 to 2011. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2013, 110(11): 4309-4314.
- [31] 王志伟, 史健宗, 岳广阳, 赵林, 南卓铜, 吴晓东, 乔永平, 吴通华, 邹德富. 玉树地区融合决策树方法的面向对象植被分类. *草业学报*, 2013, 22(5): 62-71.