

引用格式: Min Yufang, Zhang Yaonan, Kang Jianfang, *et al.* Study on Spatial-temporal Dynamic Monitoring of Degree of Desertification in CPEC based on MODIS Image[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2021, 36(4): 827-837. [敏玉芳, 张耀南, 康建芳, 等. 基于MODIS影像的中巴经济走廊荒漠化程度时空动态监测研究[J]. 遥感技术与应用, 2021, 36(4): 827-837.]  
DOI: 10.11873/j.issn.1004-0323.2021.4.0827

## 基于MODIS影像的中巴经济走廊荒漠化程度 时空动态监测研究

敏玉芳<sup>1,2,3</sup>, 张耀南<sup>1,3</sup>, 康建芳<sup>1,3</sup>, 冯克庭<sup>1,2,3</sup>

(1. 中国科学院西北生态环境资源研究院, 甘肃 兰州 730030;

2. 中国科学院大学, 北京 100049;

3. 国家冰川冻土沙漠科学数据中心, 甘肃 兰州 730030)

**摘要:**荒漠化是全球最为严重的生态环境问题之一, 中巴经济走廊荒漠化问题尤为严重, 干旱和大面积的荒漠是其主要的生态环境约束因素。以MODIS数据为基础, 提取关键的地表特征参量, 量化研究荒漠化程度与地表特征参量间的关系与规律; 构建了基于地表反照率-植被特征空间、决策树的遥感监测模型, 并以2015年数据为例, 分析了中巴经济走廊荒漠化程度, 结果表明: Albedo-MSAVI、Albedo-NDVI和决策树C5.0共3种方法的总体精度分别为88.33%、85.83%和89.2%, Kappa系数分别为0.836 3、0.802 3和0.847 1, 分析认为决策树方法最适宜反演中巴经济走廊荒漠化程度。最后基于决策树方法计算了2000~2015年中巴经济走廊荒漠化程度分布数据, 分析结果表明在中巴经济走廊极度和重度荒漠化土地占整个区域的50%~60%, 中度和轻度荒漠化土地占20%左右, 非荒漠化土地和冰雪水体占20%左右。由于2000年左右, 巴基斯坦经历了50 a来最严重的旱灾, 2000年的重度和极度荒漠化达到总体面积的61.8%, 从2005~2015年极度荒漠化土地有所减少, 转化为重度荒漠化土地, 有部分轻度荒漠化土地转化为非荒漠化土地。总体来说极度荒漠化程度呈下降趋势。

**关键词:** 荒漠化; 中巴经济走廊; 特征空间; 决策树; MODIS

**中图分类号:** X171; TP79 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-0323(2021)04-0827-11

### 1 引言

荒漠化是指包括气候变化和人类活动在内的各种因素造成的干旱、半干旱和干旱亚湿润地区的土地退化, 属于破坏性的生物地理过程, 通常会造造成生物多样性降低, 土壤肥力下降乃至生态承载力丧失<sup>[1-2]</sup>。土地荒漠化是目前世界上最为严重的生态环境问题之一, 据统计全球有100多个国家正遭

受到土地荒漠化的影响。土地荒漠化不仅破坏了生态环境, 也会削弱社会和经济的发展。监测土地荒漠化动态变化过程, 掌握其变化规律对防治荒漠化具有非常重要的意义。

荒漠化不同于火灾、洪水、地震等自然灾害, 是一种广域、高水平、多尺度、长期的自然灾害现象。监测土地荒漠化动态变化, 掌握其变化规律具有重要意义。遥感技术以其宏观、综合、信息量大、时间

收稿日期: 2020-06-12; 修订日期: 2021-06-28

基金项目: 中国科学院信息化专项“寒旱区环境演变研究‘科技领域云’的建设与应用”(XXH13506)和国家科技基础条件平台项目“国家特殊环境特殊功能野外观测研究台站共享服务平台”(Y719H71006)资助。

作者简介: 敏玉芳(1983—), 女, 甘肃临潭人, 博士研究生, 主要从事荒漠化遥感研究。E-mail: myf@lzb.ac.cn

通讯作者: 张耀南(1966—), 男, 甘肃秦安人, 研究员, 主要从事地学大数据研究。E-mail: yaonan@lzb.ac.cn

短的优势,成为荒漠化监测和定量评价的重要数据来源和技术手段<sup>[3]</sup>。

荒漠化在遥感影像上表现为植被信息的减弱和裸地地表信息的增强,可以采用归一化植被指数(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)、改良土壤调节植被指数<sup>[4]</sup>(Modified Soil Adjusted Vegetation Index, MSAVI)、温度植被干旱指数<sup>[5]</sup>(Temperature Vegetation Dryness Index, TVDI)和反照率(Albedo)等指标因子表征。研究表明,不同的下垫面条件需要用不同的植被指数来表示。NDVI是应用最广泛的植被指数,但在植被稀疏的地区无法很好地表达,MSAVI用于解决NDVI在地表裸露程度高的地区的局限性。

研究人员发现,监测植被和土地利用的变化并不是衡量荒漠化的唯一方法<sup>[6-7]</sup>。土壤含水量是荒漠化监测的另外一个重要指标,Sandholt等<sup>[5]</sup>基于植被指数和陆地表面温度之间的关系,提出了温度植被干旱指数TVDI,用于估测土壤表层水分状况,通过温度植被干旱指数能够反演表层土壤水分。

许多学者利用植被指数和地表反照率之间的关系进行荒漠化监测研究<sup>[8-9]</sup>。Albedo是反映地表对太阳短波辐射反射特性的物理参量,而植被指数反映的是地表植被状态的重要生物量参数。随着土地荒漠化程度的增加,地表植被遭到严重的破坏,生物量减少,植被盖度降低,并伴随着地表粗糙度的增加。Li等<sup>[10]</sup>等经过定位观测研究表明,当Albedo到达一定数值时,会发生草地荒漠化,且发生荒漠化的阈值为0.3。

## 2 研究区与数据

### 2.1 研究区

中巴经济走廊(China-Pakistan Economic Corridor, CPEC)的起点是中国新疆喀什,终点位于巴基斯坦瓜达尔港,北接“丝绸之路经济带”、南连“二十一世纪海上丝绸之路”,是贯通南北丝路的关键枢纽,是一条包括铁路、公路、光缆和油气通道的贸易走廊,是“一带一路”的重要组成部分。中巴经济走廊全长约3 000 km,其中1 300 km为严寒高原、干旱和荒漠区段。尤其是在南段,干旱和大面积荒漠是其主要的生态环境约束因素。此外,随着人口的不断膨胀,巨大的人口压力也导致了农田土壤的过度使用,加剧了巴基斯坦信德省和旁遮普省两个农业区的沙漠化进程。许多肥沃的土地变成了沙

漠,农作物产量急剧下降。在总计7 960万 $\text{hm}^2$ 土地中,约6 800万 $\text{hm}^2$ 土地位于每年降雨量不足300 mm的脆弱地区。巴基斯坦约90%的土地面积处于干旱和半干旱状态,易受荒漠化影响<sup>[11]</sup>。

中巴经济走廊位于 $23^{\circ}47' \sim 40^{\circ}55' \text{N}$ ,  $60^{\circ}20' \sim 80^{\circ}16' \text{E}$ ,包括中国新疆维吾尔自治区的喀什地区和柯尔克孜族自治州和整个巴基斯坦领土(图1)。中巴经济走廊位于亚洲中南部,南部受印度洋季风的影响,其北部位于亚洲内陆地区青藏高原的部分<sup>[12]</sup>。研究区的景观包括喀喇昆仑山脉的雪峰、信德省和俾路支省郁郁葱葱的绿色灌溉平原和炎热干燥的沙漠<sup>[13]</sup>。中巴经济走廊可分为4个气候区域:北部中国喀什地区属于温带大陆性气候;巴基斯坦北部与中国接壤,属于高山高原气候;巴基斯坦中部属于热带季风气候;西南部是热带沙漠气候。

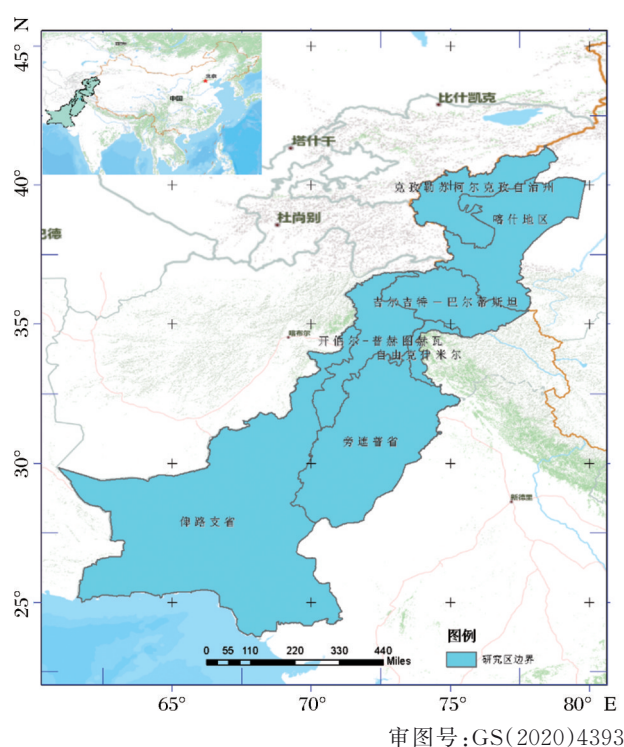


图1 研究区范围地理位置示意图

Fig.1 Geographic location of the study area

中巴经济走廊的整体生态状况相对较差,一般和较差地区超过80%,优良区不足20%。周边有喜马拉雅山脉、喀喇昆仑山脉、兴都库什山脉和天山山脉,这些地区海拔高、坡度陡、植被稀疏、水土流失严重。巴基斯坦和喀什地区的中东部地区普遍降水少、水资源不足、植被覆盖率低、人类活动频繁。巴基斯坦西南、东南沙漠地区和喀什中部沙漠地区缺水严重,区域植被覆盖率低,生物多样性缺

乏,土地退化严重,生态环境恶劣。生态条件好的地区主要分布在中北部的森林区和东南部的农业区。

## 2.2 数据预处理

中巴经济走廊荒漠化程度遥感监测模型输入基于4种数据:MODIS地表反照率产品MCD43A3数据,地面反射率数据MOD09A1,TVDI指数采用数据集产品,验证采用Landsat 8数据。

Albedo反演采用MODIS地表反照率产品MCD43A3,它是Terra和Aqua卫星综合的L3级天尺度产品,空间分辨率为500 m。NDVI和MSAVI的反演采用MODIS地面反射率数据MOD09A1,它是MODIS Terra星500 m地表反射率8天合成数据产品。

MCD43A3和MOD09A1数据都来源于美国国家航空航天局(NASA)陆地过程分布式数据档案中心(LPDAAC)。数据以HDF-EOS格式存储,采用正弦曲线投影。覆盖整个中巴走廊需要6景数据(h23v4、h23v5、h23v6、h24v4、h24v5、h24v6)。实验中首先使用MRT工具对数据进行镶嵌和重采样,将500 m分辨率的数据重采样为1 km,并将所有数据正弦曲线投影转为WGS84。然后利用中巴走廊矢量边界和Gdal的warp工具进行数据裁剪,最后计算得到研究区的NDVI、MSAVI和Albedo数据。

植被覆盖度的变化是荒漠化最直观的表现,一般在一年中植被最茂盛的时候评价这一年的荒漠化程度。以植被指数的年度最大值和Albedo的年度最小值作为基础数据。计算过程包括以下几个方面:

(1) Albedo值计算。MODIS窄波段反照率向宽波段反照率的转化使用的是Liang<sup>[14-15]</sup>研究的算法,选用短波反照率计算方法,公式如下:

$$\alpha_{short} = 0.16\alpha_1 + 0.291\alpha_2 + 0.243\alpha_3 + 0.116\alpha_4 + 0.112\alpha_5 + 0.081\alpha_6 - 0.0015 \quad (1)$$

其中: $\alpha_{short}$ 是短波反照率;  $\alpha_1 \sim \alpha_6$ 分别代表MCD43A3中1~6波段。因为白空反照率是各个入射角的积分,更接近一般意义上的地表反照率,所以本研究中选用白空反照率来计算Albedo。

(2) NDVI和MSAVI年度数据计算。采用最大值合成法(Maximum Value Compositing, MVC)。该方法在遥感数据处理方面,主要用于在一段时间内像元的数据分析重构。计算公式:

$$VI = \max_{1 \leq j \leq n} VI_{ij} \quad (2)$$

其中: $i$ 为像元名, $j$ 为 $[1, n]$ 时间区间的时间点; $VI_{ij}$

指第 $i$ 个像元在第 $j$ 时间的NDVI或者MSAVI的值。

(3) Albedo年度数据计算。Albedo数据的年度重建采用最小值合成法,该方法是指在某一段时间内,将像元最小值作为像元值。年度Albedo值的计算公式为:

$$\text{Albedo}_i = \min_{1 \leq j \leq n} \text{Albedo}_{ij} \quad (3)$$

其中: $i$ 为像元名; $j$ 为 $[1, n]$ 时间区间的时间点; $\text{Albedo}_{ij}$ 指第 $i$ 个像元在第 $j$ 时间的Albedo值。

(4) TVDI是基于NDVI-LST特征空间的土壤水分监测指数,本研究采用冯克庭等<sup>[16]</sup>基于MOD13A3和MOD11A2产品制备的《中巴经济走廊2000~2017年逐月温度植被干旱指数数据集》,取每年5~9月份数据,求平均得到逐年TVDI数据产品。

## 3 荒漠化遥感反演算法

### 3.1 基于反照率-植被特征空间的荒漠化监测模型

单一植被指数的评价结果较为片面,不能全面反映荒漠化的发展信息。学者们提出不仅仅依靠一个指标,而是通过两个指标之间的直接相关或负相关关系构建特征空间来监测荒漠化过程。通过特征空间构建的混合指数能够明确生物物理意义,反映地表覆盖度、水热组合,更好地监测土地荒漠化的变化。曾永年等<sup>[17]</sup>提出利用NDVI和Albedo的负相关关系来构造NDVI-Albedo特征空间,并计算出荒漠化差值指数(Desertification Difference Index, DDI),利用DDI来进行荒漠化程度分级。Feng等<sup>[18]</sup>提出构建Albedo-MSAVI特征空间模型,并将其应用于土壤盐渍化研究。该方法使用简单,易于获得指标,较仅使用遥感光谱信息进行分类的方法精度更高。近年来,在全球尺度和区域尺度中都有广泛的应用<sup>[17,19-20]</sup>。

实验利用反照率与植被之间的负相关关系,构建基于反照率-植被特征空间的荒漠化监测模型。如图2(a)所示,不同荒漠化地区植被与反照率之间存在显著的负相关关系。在反照率-植被特征空间中,点A、B、C、D代表4种极端状态:干裸土(低植被、高反照率)、富水裸土(低植被、低反照率)、高植被覆盖度(高植被、相对高反照率)和全植被覆盖度(高植被、低反照率)。在反照率-植被特征空间中,地表反照率不仅是植被覆盖度的函数,也是土壤含水量的函数。AC为高反照率线,反映了干旱情况,即在一定的植被覆盖度下,完全干旱区对应



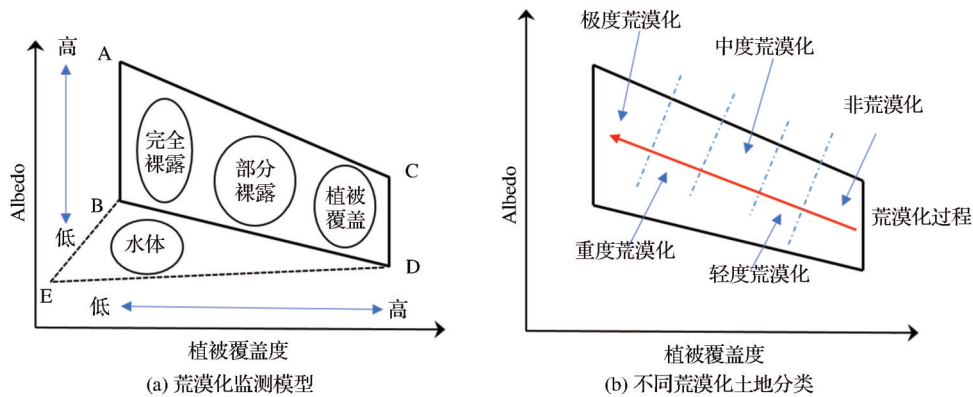
图2 Albedo-Vegetation 特征空间<sup>[17,20]</sup>

Fig.2 Albedo-Vegetation feature space

的高反照率极限;而BD为低反照率线,表示地表水充足。由于水体具有低地表反照率和低植被覆盖性质,张严俊等<sup>[21]</sup>学者对上述特征空间进行了扩展(虚线部分),BD边界以下的部分代表水体,E点为低植被覆盖和低地表反照率区域。扩展后包含水体的特征空间更能反映实际情况。

由 Albedo 和植被指数构造的特征空间中,Albedo 与植被指数的负相关关系的不同位置,代表荒漠化不同阶段的状态和程度。土地荒漠化程度随着 Albedo 值的增加而增加,随着植被指数值的减少而增加。Verstraete 等<sup>[22]</sup>的研究结论表明,在代表荒漠化变化趋势的垂直方向上划分 Albedo-Vegetation 特征空间,可以将不同的荒漠化土地有效区分开来,如图 2(b)所示。荒漠化差值指数模型 DDI 可以表示为:

$$DDI = \alpha \times \text{Vegetation}_{index} - \text{Albedo} \quad (4)$$

在具体应用中,常数  $\alpha$  可根据 Albedo-Vegetation 特征空间中斜率来确定, $k$  为特征方程的斜率。

$$\alpha \times k = -1 \quad (5)$$

根据上面的计算结果,DDI 的表达式如下:

$$DDI = -\left(\frac{1}{k}\right) \times \text{Vegetation}_{index} - \text{Albedo} \quad (6)$$

以 2015 年数据为例,在研究区域均匀选择 1 500 个样本点,以植被指数作为 X 轴,Albedo 作为 Y 轴,构建 Albedo-NDVI 和 Albedo-MSAVI 特征空间。特征空间散点图如图 3 所示。根据线性统计回归分析结果,Albedo 和植被指数间的负相关关系可以用以下线性关系式表示:

$$DDI_{NDVI} = 6.72 \times \text{NDVI} - \text{Albedo} \quad (7)$$

$$DDI_{MSAVI} = 6.766 \times \text{MSAVI} - \text{Albedo} \quad (8)$$

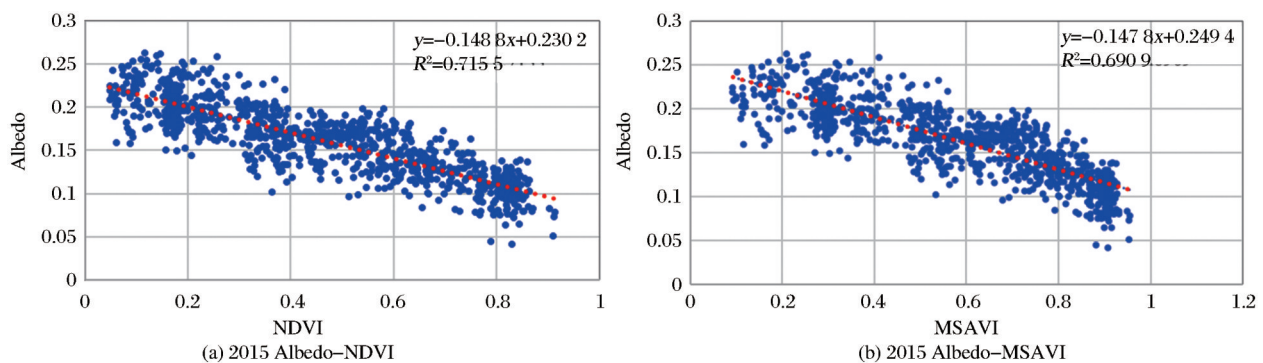


图3 2015年中巴经济走廊反照率—植被指数特征空间图

Fig.3 Albedo-Vegetation Index feature space of CPEC in 2015

目前荒漠化程度的分级主要有轻度、中度、强度的三分法与轻度、中度、重度、极重度四分法。基于 DDI 进行荒漠化等级划分时,大部分研究人员都采用 ArcGIS 重分类中的自然断裂法<sup>[20,23]</sup>。自然断裂法是基于统计学的 Jank 最优法得出的分级点<sup>[24]</sup>,这种分类法使划分的类别中类内差异最小,而类之

间差异最大。实验采用自然断裂法和荒漠化程度四分法,将 DDI 值划分为 5 个区间,用户也可以结合实地调查数据,进一步精细化调整 DDI 分级表。

### 3.2 基于决策树的荒漠化程度监测模型

在荒漠化评价中,研究人员利用决策树(Decision Tree, DT)方法构建分类模型,结合计算出的

指标来识别荒漠化的等级。决策树模型可以根据所建立的划分规则对大量数据进行分类,并且可以将树型结构规则集可视化,具有广泛的适用性<sup>[25]</sup>。常用的决策树分类方法有分类回归树(CART)<sup>[26]</sup>、快速无偏高效统计树(QUEST)等。Meng等<sup>[27]</sup>采用CART法对呼伦贝尔地区荒漠化进行分类,总体准确率为89%。Duan等<sup>[28]</sup>采用QUEST决策树对科尔沁沙地荒漠化土地进行分类,准确率高达94.97%。

荒漠化监测中常用的指标有NDVI、MSAVI、

MSDI、TGSI、TVDI和Albedo等,在实验中使用NDVI、TVDI和Albedo 3个指标构建决策树模型。根据谷歌影像和《中国荒漠化和沙化土地图集》的目视解译,为每个荒漠化等级选取了100多个训练点作为决策树模型的输入样本数据集。利用输入样本数据集,基于DT模型C5.0算法的信息增益比准则,确定各个指标的最优阈值,以区分不同的荒漠化等级。最后,利用如图4所示修剪后的层次结构规则对荒漠化现状进行了评价。

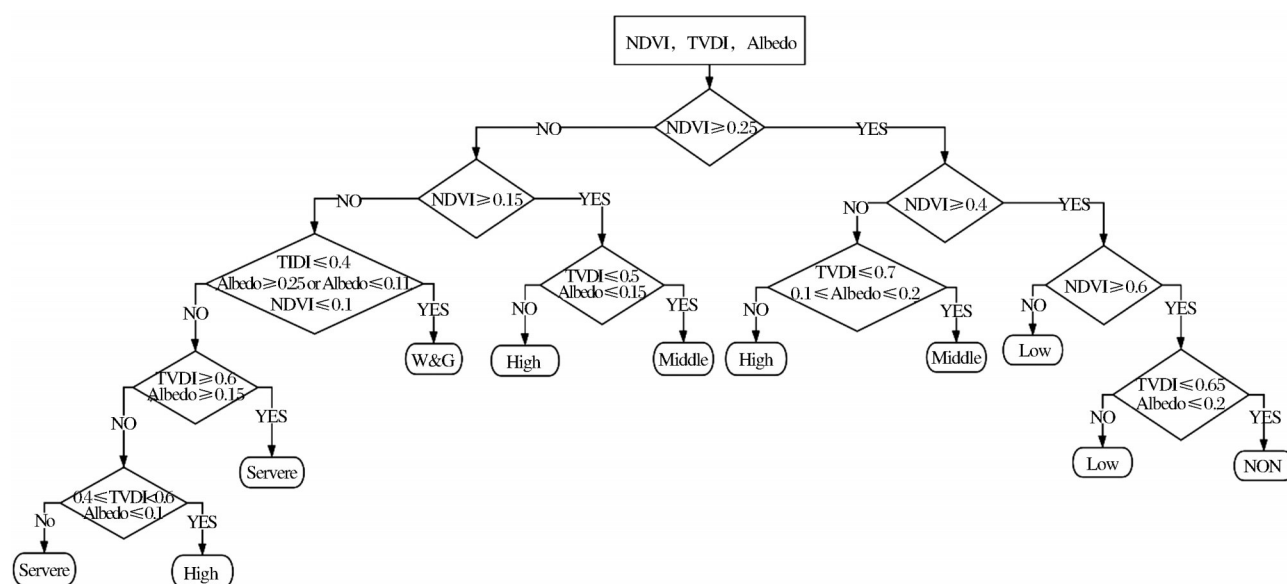


图4 利用NDVI、TVDI和Albedo构建的荒漠化程度分级决策树模型

Fig.4 Using NDVI, TVDI and Albedo to construct decision tree model of desertification

### 3.3 不同分类方法的精度对比

为了验证3种荒漠化遥感监测模型的精度,在研究区选取了240个验证点,采用高分辨率数据来评价荒漠化程度分级数据的质量。以2015年数据为例,选取2015年6~9月份处于植被生长旺季的8景Landsat 8影像数据在小范围上进行验证。8景影像空间分辨率为30 m,平均云量小于5%。运用ENVI软件对数据进行预处理,主要包括配准、几何校正、图像增强和FLAASH大气校正。首先计算8景影像的NDVI值,然后进行植被盖度的估算。植被覆盖度计算公式如下:

$$vfc = \frac{NDVI - NDVI_{soil}}{NDVI_{veg} - NDVI_{soil}} \quad (9)$$

其中: $vfc$ 为研究区的植被覆盖度, $NDVI_{veg}$ 为完全植被覆盖区域的NDVI值; $NDVI_{soil}$ 为研究区域纯沙漠的NDVI值。一般以5%置信度截取NDVI的上下阈值分别近似代表 $NDVI_{veg}$ 和 $NDVI_{soil}$ 进行计算。

参考其他研究工作,将中巴经济走廊地区的荒

漠化程度按植被覆盖度大概划分为:非荒漠化( $vfc \geq 60\%$ )、轻度荒漠化( $60\% > vfc \geq 40\%$ )、中度荒漠化( $40\% > vfc \geq 25\%$ )、重度荒漠化( $25\% > vfc \geq 15\%$ )、极度荒漠化( $vfc < 15\%$ )。验证时,在每个影像上选取各级别荒漠化验证点30个,由于Landsat跟MODIS数据分辨率不一致,所以在选取验证点时,在Landsat上选取小范围且植被覆盖度差别不大的区域作为一个验证点,分别和3种模型的分级结果进行比较,并计算Kappa系数。

表1是Albedo-NDVI, Albedo-MSAVI和DT3个模型的精度混淆矩阵,表2是分类精度对比表。如表所示,3种方法的总体精度分别为88.33%、85.83%和89.2%,Kappa系数分别为0.836 3、0.802 3和0.847 1。两种分辨率的数据评价结果基本一致,反映出本文的方法在区域尺度上评价中巴经济走廊荒漠化具有可行性。图5是利用3种方法对2015年中巴经济走廊进行荒漠化程度分级的结果图,从图中可以看出3种方法在整体上分类的结果是一致的。

的,在细节上有些差别。

在研究区俾路支省荒漠化程度比较严重,MSAVI指数消除了土壤对植被指数的影响,所以Albedo-MSAVI方法对该地区极度、重度、中度荒漠化程度识别的比较精细。Albedo-NDVI分类结果比较平均,DT方法除了考虑Albedo和NDVI,还

引入TVDI指数,将地表温度加入到数据分类,比Albedo-VI模型更全面的考虑了荒漠化程度分类依据。DT方法总体分类精度和Kappa系数都是最高,达到了89.2%和0.847 1。实验是在3种模型中选择了DT模型分析中巴经济走廊的荒漠化程度变化过程。

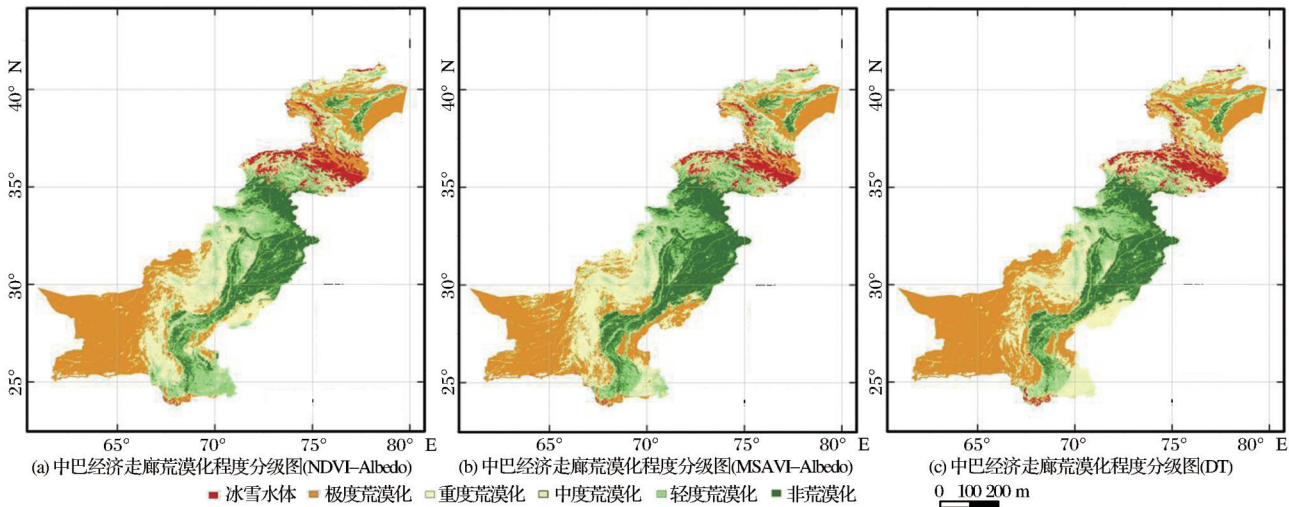


图 5 基于不同模型的 2015 年中巴经济走廊荒漠化程度分级图

Fig.5 Desertification grading map of CPEC in 2015 based on different models

表 1 Albedo-NDVI,Albedo-MSAVI 和 DT 3个模型精度混淆矩阵

Table 1 Confusion matrices of the Albedo-NDVI, Albedo-MSAVI and DT models

模型	荒漠化程度	极度荒漠化	重度荒漠化	中度荒漠化	轻度荒漠化	非荒漠化	样本点总数
Albedo-MSAVI	极度荒漠化	102	6	3	0	2	113
	重度荒漠化	2	35	3	1	0	41
	中度荒漠化	1	3	19	2	1	25
	轻度荒漠化	0	1	2	33	3	34
	非荒漠化	0	1	0	3	23	27
Albedo-NDVI	极度荒漠化	100	5	0	1	7	113
	重度荒漠化	4	34	2	1	0	41
	中度荒漠化	0	3	20	1	1	25
	轻度荒漠化	0	0	2	30	2	34
	非荒漠化	1	0	0	4	22	27
DT (NDVI, TGSI, Albedo)	极度荒漠化	106	5	1	0	1	113
	重度荒漠化	3	35	2	1	0	41
	中度荒漠化	0	1	21	2	0	25
	轻度荒漠化	0	1	1	29	3	34
	非荒漠化	1	0	1	2	23	27

#### 4 中巴经济走廊荒漠化程度时空变化分析

基于 3.2 节建立的决策树方法,计算了中巴经济走廊 2000、2005、2010 和 2015 年 4 期的荒漠化程

度分级数据。根据解译的结果,对不同时期不同程度的荒漠化土地面积进行统计(表 3)。结果表明在中巴经济走廊极度和重度荒漠化土地占整个区域的 50%~60%,中度和轻度荒漠化土地占 20% 左右,非荒漠化土地和冰雪水体占 20% 左右。

表 2 Albedo-NDVI, Albedo-MSAVI 和 DT 模型的荒漠化分类精度  
Table 2 The classification accuracy of the Albedo-NDVI, Albedo-MSAVI and DT models

模型	荒漠化程度	生产者精度/%	用户精度/%	总体精度/%	Kappa 系数
Albedo-MSAVI	极度荒漠化	90.27	97.14	88.33	0.836 3
	重度荒漠化	85.37	76.09		
	中度荒漠化	76	70.09		
	轻度荒漠化	97.06	84.62		
	非荒漠化	85.19	79.31		
Albedo-NDVI	极度荒漠化	88.5	95.24	85.83	0.802 3
	重度荒漠化	82.92	80.95		
	中度荒漠化	80	83.3		
	轻度荒漠化	88.24	81.08		
	非荒漠化	81.48	68.75		
DT (NDVI, TGSi, Albedo)	极度荒漠化	93.81	96.36	89.2	0.847 1
	重度荒漠化	85.37	83.33		
	中度荒漠化	84	80.76		
	轻度荒漠化	85.29	85.29		
	非荒漠化	85.19	85.19		

由于 1998~2002 年期间,巴基斯坦经历了 50 a 来最严重的旱灾,尤其是旁遮普地区更是遭遇了极端干旱<sup>[11,29]</sup>,所以 2000 年的极端荒漠化和重度荒漠化达到了总体面积的 61.8%,从图 6 可以明显看出 2000 年全域的极端荒漠化面积大于历年,尤其是位于巴基斯坦南部的俾路支斯坦地区,此地区多为山地和沙漠,2000 年极端荒漠化土地扩张严重。拥有大片森林和肥沃农耕土地的旁遮普地区大片非荒漠化土地都转为轻度或者中度荒漠化土地。

2005 年研究区的极重度荒漠化土地比 2000 年减少了 6.61%,转化为重度和中度荒漠化土地,非荒漠化土地也有了大幅的增加。从 2005~2015 年极度荒漠化土地有所减少,转化为重度荒漠化土地,有部分轻度荒漠化土地转化为非荒漠化土地。总体来说极度荒漠化呈下降趋势。高华等<sup>[29]</sup>通过 TVDI 模型对 2005~2014 年巴基斯坦和印度干旱程度进行模拟,得出 2005~2014 年巴基斯坦的干旱面

积占比变化比较明显,总体呈现波动下降趋势,尤其是从 2011 年开始干旱面积比重开始呈现多年下降趋势,与本研究的数据分析结果基本一致。

通过 2005、2010 和 2015 年 3 期数据,分析了 2005~2015 年中巴经济走廊荒漠化程度变化情况。图 8 可以看出,2005~2010 年期间,中巴经济走廊在中国部分的喀什地区和柯尔克孜族自治州大部分地区都是荒漠化发展区,在喀什地区的绿洲区域,荒漠化程度有所逆转。旁遮普省和德信省是荒漠化程度逆转区域,整个平原区域荒漠化程度都有所遏制。而俾路支斯坦地区虽然变化不太显著,但是主要表现为荒漠化程度继续发展。2010~2015 年期间,喀什地区的绿洲区域荒漠化逆转比较显著,其余区域都有荒漠化程度发展的趋势。巴基斯坦西北边境省开伯尔—普什图省和旁遮普省都是显著的荒漠化逆转区域。俾路支斯坦地区发生了较为严重的荒漠化发展。

表 3 不同时期中巴经济走廊荒漠化面积对比表  
Table 3 Statistical analysis of desertification area of CPEC during various periods

荒漠化程度	2000 年		2005 年		2010 年		2015 年	
	面积 /km <sup>2</sup>	百分比 /%	面积 /km <sup>2</sup>	百分比 /%	面积 /km <sup>2</sup>	百分比 /%	面积 /km <sup>2</sup>	百分比 /%
极重度荒漠化	576 740	46.55	494 893	39.94	401 938	31.89	455 860	36.69
重度荒漠化	188 945	15.25	225 642	18.21	259 343	20.93	237 153	19.14
中度荒漠化	99 152	8	100 304	8.1	133 074	10.74	108 993	8.8
轻度荒漠化	178 222	14.39	164 434	13.27	192 606	15.55	158 506	12.79
非荒漠化	135 336	11.02	189 871	15.32	193 305	15.60	220 346	17.78
冰雪水体	59 315	4.79	62 566	5.05	58 444	4.71	56 852	4.58



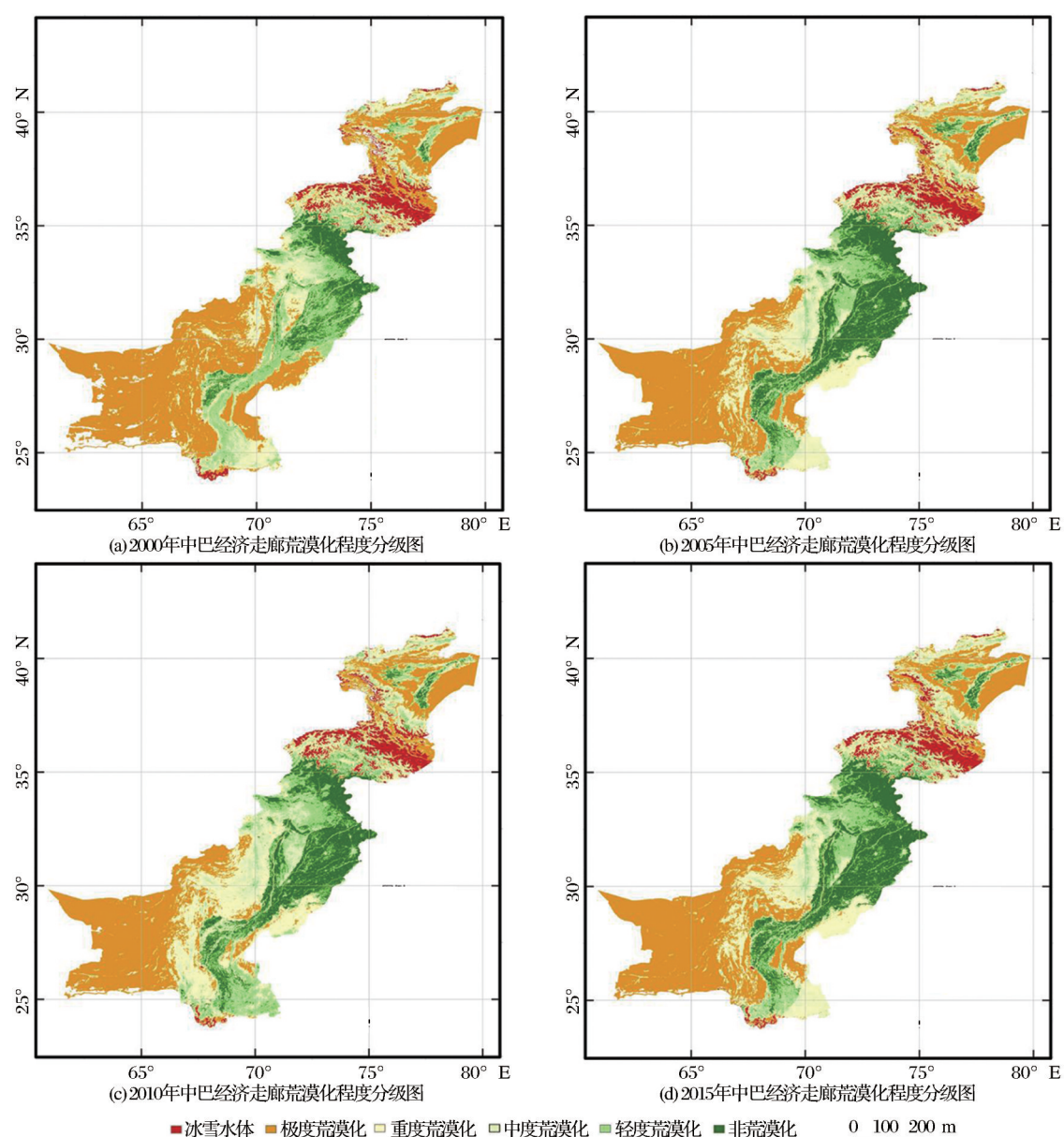


图 6 2000~2015 年中巴经济走廊荒漠化程度分级图

Fig.6 Desertification grading diagram of CPEC from 2000 to 2015

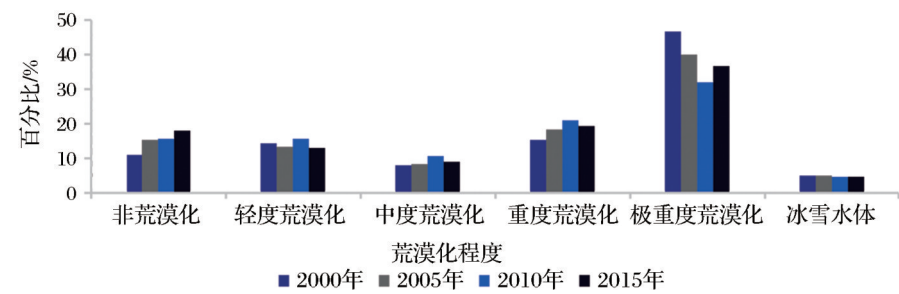


图 7 2000~2015 年中巴经济走廊各时期不同程度荒漠化土地面积变化图

Fig.7 Area changes of different desertified land of CPEC in each period

中巴经济走廊荒漠化比较严重的区域基本分布在我国的喀什地区和巴基斯坦西南部地区,土地覆盖类型一般为沙漠和荒漠农用地;北部属于喀喇

昆仑山、兴都什山和喜马拉雅山地区,山脉汇集,海拔较高,分布了大量的冰川和积雪,但是冰川附近分布了大量荒漠区域;巴基斯坦整体比较干旱,虽



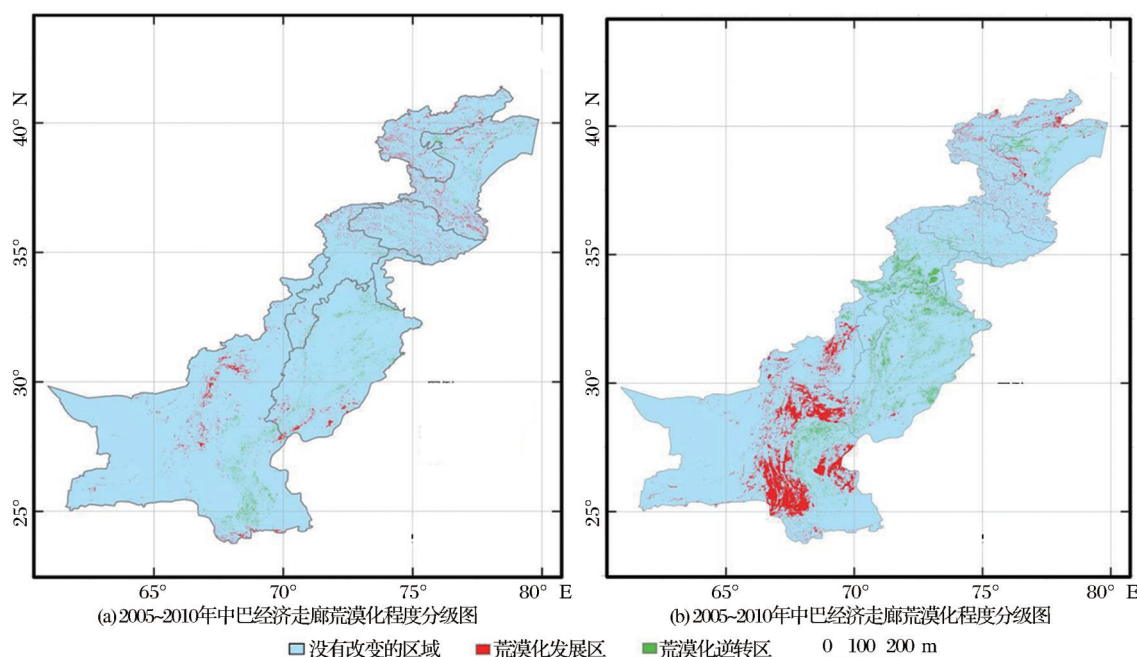


图8 2005~2010年中巴经济走廊荒漠化程度变化图

Fig.8 Dynamic change map of desertified land of CPEC in 2005~2010

然沿海,但是没有深入海洋内部,受季风的影响较小。尤其是巴基斯坦的西南部,由于西南季风被阿拉伯半岛和伊朗高原阻挡难以吹向巴基斯坦,以至于水汽很难到达巴基斯坦,导致此区域的干旱降雨稀少。

## 5 结 语

选取中巴经济走廊为研究区域,以MODIS影像为数据源,构建了Albedo-NDVI、Albedo-MSA-VI与DT 3种遥感监测模型,判断其在中巴经济走廊的适应性。结果表明,基于NDVI、Albedo、TVDI 3个指数的决策树模型反演精度要高于反照率—植被指数特征空间模型,该模型能快速的计算荒漠化程度分级数据,适宜于中巴经济走廊荒漠化信息的提取。

基于决策树方法计算了2000~2015年中巴经济走廊荒漠化程度分布数据,并分析了变化过程。结果表明在中巴经济走廊极度和重度荒漠化土地占整个区域的50%~60%,中度和轻度荒漠化土地占20%左右,非荒漠化土地和冰雪水体占20%左右。由于经历了50 a最严重的旱灾,2000年的极端荒漠化和重度荒漠化达到总体面积的61.8%,从2005~2015年极度荒漠化土地有所减少,转化为重度荒漠化土地,有部分轻度荒漠化土地转化为非荒漠化土地。总体来说极度荒漠化呈下降趋势。

在影响巴基斯坦荒漠化的因素中,根本因素是人口压力。其他造成生态退化的直接物理原因包括:过度砍伐树木、再造林活动不足、森林和牧场上不受控制和过度放牧牲畜。上述活动的结果就是破坏了植被的覆盖,还阻止草地和森林的再生<sup>[11]</sup>。巴基斯坦约有5.2%的土地被森林覆盖,每年约有3%的森林覆盖面积在减少,森林生物量减少5%,进一步加剧了沙漠化进程。约有11.20万km<sup>2</sup>的土地受到水蚀影响,大部分为北部山区,导致了每年有4 000万t的沉积物被带入印度河盆地,降低了该地区的土壤生产力,并缩短了主要上游水库的寿命。

据估计,约2万km<sup>2</sup>的土地受到涝灾的影响,大约6万km<sup>2</sup>的土地受到盐碱化的影响。这些问题在旁遮普邦省、信德省和俾路支省的一些灌区更为严重,导致土壤肥力低下,农作物减产和生物多样性丧失。在旁遮普省、信德省和俾路支省的干旱地区,约有3~5万km<sup>2</sup>的土地受到风蚀的影响。一些地区的移动沙丘高0.5~4 m,这对耕地和当地基础设施构成了威胁,该国将近60%的土地被归类为牧场,据估计大约48%的牧场退化,牧场的退化降低了生态系统的功能和服务<sup>[30-31]</sup>。

## 参考文献(References):

- [1] Wang Xinyuan, Yang Xiaopeng, Chen Xiangshun, *et al.* Re-

- search on indicators system of desertification monitoring: a case study of Gansu province[J]. *Ecological Economy*, 2016, 32(7): 174-177.[王新源,杨小鹏,陈翔舜,等.荒漠化监测指标体系的构建——以甘肃省为例[J].生态经济,2016,32(7):174-177.]
- [2] Oh K, Jeong Y, Lee D, *et al.* Determining development density using the urban carrying capacity assessment system[J]. *Landscape & Urban Planning*, 2005, 73(1): 1-15.
- [3] Kang W, Liu S. A Review of remote sensing monitoring and quantitative assessment of aeolian desertification[J]. *Journal of Desert Research*, 2014, 34(5): 1222-1229.
- [4] Qi J, Chehbouni A, Huete A, *et al.* A modified soil adjusted vegetation index[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1994, 48(2): 119-126.
- [5] Sandholt I, Rasmussen K, Andersen J. A simple interpretation of the surface temperature/vegetation index space for assessment of surface moisture status[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2002, 79(2): 213-224.
- [6] Albalawi E K, Kumar L. Using remote sensing technology to detect, model and map desertification: a review[J]. *Journal of Food, Agriculture & Environment*, 2013, 11(2): 791-797.
- [7] Guo Q, Fu B, Shi P, *et al.* Satellite monitoring the spatial-temporal dynamics of desertification in response to climate change and human activities across the Ordos plateau, China[J]. *Remote Sensing*, 2017, 9(6): 525. DOI: 10.3390/rs9060525.
- [8] Wei H, Wang J, Cheng K, *et al.* Desertification information extraction based on feature space combinations on the Mongolian Plateau[J]. *Remote Sensing*, 2018, 10(10): 1614. DOI: 10.3390/rs10101614.
- [9] Zeng N, Yoon J. Expansion of the world's deserts due to vegetation-albedo feedback under global warming[J]. *Geophysical Research Letters*, 2009, 36(17): L17401. DOI: 10.1029/2009GL039699.
- [10] Sheng G L, Harazono Y, Oikawa T, *et al.* Grassland desertification by grazing and the resulting micrometeorological changes in inner Mongolia[J]. *Agricultural & Forest Meteorology*, 2000, 102(2): 125-137.
- [11] Anjum S A, Wang L, Xue L, *et al.* Desertification in Pakistan: causes, impacts and management[J]. *Journal of Food, Agriculture & Environment*, 2010, 8(2): 1203-1208.
- [12] Zhang R, Andam F, Shi G. Environmental and social risk evaluation of overseas investment under the China-Pakistan Economic Corridor[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2017, 189(6): 253. DOI: 10.1007/s10661-017-5967-6.
- [13] Chen D, Deng X, Jin G, *et al.* Land-use-change induced dynamics of carbon stocks of the terrestrial ecosystem in Pakistan[J]. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/b/c*, 2017, 101: 13-20. DOI: 10.1016/j.pce.2017.01.018.
- [14] Liang S, Shuey C J, Russ A L, *et al.* Narrowband to broadband conversions of land surface Albedo II: validation[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2003, 84(1): 25-41.
- [15] Liang S. Narrowband to broadband conversions of land surface Albedo I: algorithms[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2001, 76(2): 213-238.
- [16] Feng K, Zhang Y, Tian D, *et al.* A dataset of monthly temperature vegetation dryness index along the China-Pakistan Economic Corridor from 2000~2017[J]. *China Scientific Data* 4(2019). (July 18, 2019). DOI: 10.11922/csdata.2018.0051.zh.
- [17] Zeng Yongnian, Xiang Nanping, Feng Zhaodong, *et al.* Albedo-NDVI space and remote sensing synthesis index models for desertification monitoring[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2006, 26(1): 75-81.[曾永年,向南平,冯兆东,等. Albedo-NDVI特征空间及沙漠化遥感监测指数研究[J].地理科学,2006,26(1):75-81.]
- [18] Feng Juan, Ding Jianli, Wei Wenyu. A study of soil salinization in Weigan and Kuqa Rivers oasis based on Albedo-MSAVI feature space[J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2018(2): 147-152.[冯娟,丁建丽,魏雯瑜.基于 Albedo-MSAVI特征空间的渭库绿洲土壤盐渍化研究[J].中国农村水利水电,2018(2):147-152.]
- [19] Li Yan, Zhou Youyou, Hu Baoqing, *et al.* Comparative study on developmental characteristics of desertification in typical southern and northern regions based on 3S techniques[J]. *Journal of Guangxi Teachers Education University (Natural Science Edition)*, 2017, 34(1): 82-90.[李燕,周游游,胡宝清,等.基于 3S 技术的南北方典型区荒漠化演变特征对比研究[J].广西师范学院学报(自然科学版),2017,34(1):82-90.]
- [20] Wu Z H, Lei S G, Bian Z F, *et al.* Study of the desertification index based on the Albedo-MSAVI feature space for semi-arid steppe region[J]. *Environmental Earth Science*, 2019, 78(6): 1-13. DOI: 10.1007/s12665-019-8111-9.
- [21] Zhang Yanjun, Tiyp Tashpolat, Xia Jun, *et al.* Desertification monitoring with remote sensing in the dentral asia: a case of Turkmenistan[J]. *Arid Land Geography*, 2013, 36(4): 724-730.[张严俊,塔西甫拉提·特依拜,夏军,等.中亚地区土地沙漠化遥感监测——以土库曼斯坦为例[J].干旱区地理,2013,36(4):724-730.]
- [22] Verstraete M M, Pinty B. Designing optimal spectral indexes for remote sensing applications[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1996, 34(5): 1254-1265.
- [23] Guo B, Wen Y. An optimal monitoring model of desertification in naiman banner based on feature space utilizing Landsat8 oli image[J]. *IEEE Access*, 2019, 8: 4761-4768. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2962909.
- [24] Jenks G F. The data model concept in statistical mapping[J]. *International Yearbook of Cartography*, 1967, 7: 186-190.
- [25] Xu D, Kang X, Qiu D, *et al.* Quantitative assessment of desertification using landsat data on a regional scale: a case study in the Ordos Plateau, China[J]. *Sensors (basel, Switzerland)*, 2009, 9(3): 53-1738.
- [26] Breiman L, Friedman J, Stone C J. Classification and Regression Trees[M]. Chapman and Hall/CRC, 1984.
- [27] Meng X, Jiang Q, Qi X, *et al.* Extraction of desertification in-

- formation in hulun buir based on MODIS image data[J]. Agricultural Science & Technology-hunan, 2012, 13(1):233-237.
- [28] Duan H, Wang T, Xian X, *et al.* Dynamics of aeolian desertification and its driving forces in the Horqin sandy land, Northern China [J]. Environmental Monitoring & Assessment, 2014, 186(10):6083-6096.
- [29] Gao Hua, Zhang Jiahua, Xia Xueqi. Drought monitoring by remote sensing over india and Pakistan based on temperature vegetation dryness index [J]. Remote Sensing Information, 2016, 31(4):62-68.[高华,张佳华,夏学齐.基于温度植被干旱指数的印度和巴基斯坦干旱监测[J].遥感信息,2016,31(4):62-68.]
- [30] Disaster Risk Reduction in Pakistan: The contribution of DEC member agencies, 2010~2012[M]. Springer, Japan, 2015: 161-173.
- [31] Rasul G, Mahmood A, Sadiq A, *et al.* Vulnerability of the indus delta to climate change in Pakistan[J]. Pakistan Journal of Meteorology, 2012, 8(16): 89-107.

## Study on Spatial-temporal Dynamic Monitoring of Degree of Desertification in CPEC based on MODIS Image

Min Yufang<sup>1,2,3</sup>, Zhang Yaonan<sup>1,3</sup>, Kang Jianfang<sup>1,3</sup>, Feng Keting<sup>1,2,3</sup>

(1.Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China;

2.University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3.National Cryosphere Desert Data Center, Lanzhou 730000, China)

**Abstract:** Desertification is one of the most serious ecological and environmental problems in the world, especially in the China-Pakistan Economic Corridor (CPEC). Based on MODIS data, this paper extracted key surface feature parameters and quantitatively studies the law and relationship between desertification degree and surface feature parameters. Three remote sensing monitoring models of Albedo-Vegetation feature space and decision tree were constructed, and the desertification degree of CPEC in 2015 was analyzed. The results showed that the overall accuracy of Albedo-MSAVI, Albedo-NDVI and C5.0 methods were 88.33%, 85.83% and 89.2%, respectively. According to the analysis, the decision tree method was the most suitable to invert the desertification degree of CPEC. Based on the C5.0, calculated the distribution data of desertification degree from 2000 to 2015, and analyzed the changes in the desertification degree of the CPEC. The results show that the extreme and severe desertification land in the CPEC accounts for 50% to 60% of the entire region. Mild desertification land accounts for about 20%, and non-desertification land and water bodies account for about 20%. Since 1998~2002, Pakistan experienced the worst drought in 50 years, so extreme desertification and severe desertification in 2000 reached the total area 61.8%. From 2005 to 2015, extreme desertification land had decreased, and it had been converted into severe desertification land, and some mild desertification land had been converted into non-desertification land. Overall, extreme desertification had a downward trend.

**Key words:** Desertification; China-Pakistan Economic Corridor; Feature space; The decision tree; MODIS