

# 基于 NDVI—Albedo 特征空间的沙漠化动态变化研究 ——以准格尔盆地南缘为例

任艳群<sup>1</sup>, 刘海隆<sup>1</sup>, 唐立新<sup>2</sup>, 姜亮亮<sup>1</sup>, 安小艳<sup>1</sup>

(1. 石河子大学 水利建筑工程学院, 新疆 石河子 832000; 2. 兵团建设交通有限公司, 新疆 石河子 832000)

**摘要:** 土地沙漠化是干旱区主要生态环境问题之一,也是干旱区农业发展的重要制约因子。以新疆农八师石河子垦区 150 团为研究区域,基于 TM 遥感影像,计算了归一化植被指数(NDVI)、地表反照率(Albedo)等指标,通过建立 NDVI—Albedo 特征空间,对研究区沙漠化的等级进行划分。将研究区的沙化土地分为极重度、重度、中度、轻度沙漠化土地,并通过地面调查验证,对其精度进行了评价。对 2000,2005 和 2010 年 3 期数据进行分类处理,并对这 3 期的沙漠化信息进行了分析。结果表明,利用该方法的分析精度满足研究要求;研究区通过 10 a 的发展变化,其沙漠化状况得到了有效改善。

**关键词:** 遥感; 沙漠化; 植被覆盖度; 干旱区

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2014)02-0267-05

中图分类号: V557<sup>+</sup>3, P931.3

DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2014.02.055

## A Study on Dynamic Changes of Desertification in South Edge of Junggar Basin Based on NDVI—Albedo Features

REN Yan-qun<sup>1</sup>, LIU Hai-long<sup>1</sup>, TANG Li-xin<sup>2</sup>, JANG Liang-liang<sup>1</sup>, AN Xiao-yan<sup>1</sup>

(1. College of Water Conservancy and Architectural Engineering, Shihezi University, Shihezi, Xinjiang, 832000, China; 2. Xinjiang Construction Transportation Limited Company, Shihezi, Xinjiang 832000, China)

**Abstract:** Desertification is not only one of the most serious ecological environment problems but also the limiting factor of the development of agriculture in arid areas. This paper took the area of 150 regiment in Shihezi City of Xinjiang Uyghur Autonomous Region as the study area, and used TM images to derived the normalized difference vegetation index(NDVI) and surface Albedo, and to classify desertification grade of study area by establishing NDVI—Albedo feature space. Desertified land in the study area can be divided into very severely desertified, severely desertified, moderately desertified, and mild desertified. The accuracy of the monitoring was tested with the ground investigation, and the result showed that the accuracy meet the requirement of the study. With the same method, we classified desertification area in 2000, 2005 and 2010, and analyzed the dynamic changes of desertification three periods. The analysis showed that the development of desertification has been effectively controlled after 10 years.

**Keywords:** remote sensing; desertification; vegetation coverage; arid area

沙漠化是干旱、半干旱及部分半湿润地区以风沙活动为主要标志的土地退化现象<sup>[1]</sup>。近年来,中国的沙漠化问题日益突出,与之密切相关的沙尘暴灾害给人们生活带来了重要影响<sup>[2]</sup>。沙漠化的实时监测与定量评价对土地质量和生态环境保护都具有重要意义。随着遥感技术的发展,其在土地沙化研究中得到了广泛的应用。植被盖度是反映沙漠化的重要指标之一。国内外学者基于 NDVI 应用线性混合模型、

回归树及象元二分法等进行了盖度分析,在植被盖度的动态监测中取得了较好的效果,该方法为沙漠化的动态监测提供了基础<sup>[3-4]</sup>。Tanser 等<sup>[5]</sup>则通过 NDVI 建立 MSDI(moring standard deviation index)指数来研究半干旱区的土地退化,取得了一定进展。近年来,基于 NDVI 和 Albedo 的特征空间对土地沙化进行定量评价得到了大量应用。该方法使用简单,指标易于获取,在沙漠化的分类及分级中,较仅使用遥感

收稿日期:2013-04-23

修回日期:2013-05-27

资助项目:国家重点基础研究发展计划(973)项目“气候变化对西北干旱区水循环影响机理与水资源安全研究”(2010CB951003); 国家科技支撑计划课题(2012BAH27B03; STSN-05-32); 新疆研究生科技创新项目(XJGRI2013056)

作者简介:任艳群(1990—),女(汉族),四川省成都市人,硕士研究生,研究方向为水文水资源。E-mail:496551408@qq.com。

通信作者:刘海隆(1974—),男(汉族),四川省德阳市人,博士,教授,主要从事水文水资源研究。E-mail:liu\_hai\_tiger@163.com。

光谱信息的分类方法精度更高。曾永年等<sup>[6]</sup>提出了沙漠化差值指数模型,对黄河源区进行了研究,达到了较好的效果。潘竟虎等<sup>[7]</sup>对张掖绿洲区的沙漠化进行了定量评价,精度达到 82%。以上方法极大提升了沙漠化动态监测与分析能力,但在西北干旱区应用仍然不足。为此,本研究选择新疆石河子 150 团为研究区,在总结前人研究成果的基础上,结合野外调查数据,利用 Landsat-TM 数据,拟建立基于 NDVI-Albedo 特征空间的干旱区沙漠化分类方法,以期对沙漠化的遥感监测与评价提供技术支撑。

## 1 研究区概况

新疆石河子 150 团地处古尔班通古特大沙漠南缘的莫索湾垦区北端,地理位置在东经 86°00′—86°42′,北纬 44°26′—45°11′。全团总面积 468 km<sup>2</sup>,海拔高度 332~361 m,平均海拔 346.0 m。东西北三面环沙,该区综合土壤侵蚀模数为 1 800 t/(hm<sup>2</sup>·a),属典型的风蚀区<sup>[8-9]</sup>。研究区属典型的大陆性气候,冬季严寒,夏季酷热,干燥少雨,蒸发量大,昼夜温差大。年平均气温 6.6 °C,年平均降水量 123.2 mm,年平均蒸发量 1 979.5 mm,年平均日照时数 2 774.1 h。年平均风速 2.4 m/s,最大瞬间风速可达 30 m/s,年平均出现 8 级以上大风 4.9 次<sup>[8]</sup>。

## 2 数据与方法

### 2.1 数据来源及处理

2.1.1 遥感数据 主要以 2010 年 8 月 10 日、2005 年 7 月 31 日和 2000 年 8 月 7 日的轨道号为 P144-R29 的 TM<sub>1-5,7</sub> 波段的影像为基本数据源。以 2010 年 8 月的数据进行方法的研究及验证,无云覆盖,已经经过辐射定标,几何校正及大气校正等图像预处理,在 ArcGIS 10.0 和 ENVI 5.0 的遥感影像处理技术的支持下,对 TM 影像进行多波段融合,叠加研究区的行政区划图,裁剪出研究区域的 TM 影像。

2.1.2 野外调查数据 在研究区布设了 20 个样点,每个样点附近设置 5 个 10 m×10 m 规格的样方,针对每个样方进行植被覆盖度的测量,具体方法为:对植被不均匀分布的样方,少数采样点不能代表样方真实情况,对两条对角线连续采样,用两条对角线上植被覆盖度的平均值代表样方的覆盖度。连续植被则采用鱼眼相机垂直向下拍摄,利用 CAN-EYE 软件对鱼眼照片进行分析,从照片中计算绿色象素的比例获得实测植被覆盖度。

将测量的结果按照沙漠化的分级标准<sup>[10]</sup>进行分类(表 1),对样点沙漠化程度进行分类的结果详见表 2。

表 1 土地沙漠化分级标准

沙化程度	主要特征
轻度	植被盖度>50%,基本无风沙流活动的沙化土地,或一般年景作物能正常生长,缺苗较少(一般少于 20%)的沙化耕地。
中度	植被盖度 30%~50%,风沙流活动不明显的沙化土地,或作物长势不旺,缺苗较多(一般 20%~30%)且分布不均的沙化耕地。
重度	植被盖度 10%~30%,风沙流活动明显或流沙纹理明显可见的沙化土地或植被盖度≥10%的风蚀残丘、风蚀劣地及戈壁,或作物生长很差,缺苗率大于 30%的沙化耕地。
极重度	植被盖度<10%的沙化土地。

表 2 研究区野外调查结果

沙化程度	样点数
沙地	32
极重度沙漠化	25
重度沙漠化	20
中度沙漠化	9
轻度沙漠化	4
耕地	10

### 2.2 基于 NDVI-Albedo 特征空间的分类方法

2.2.1 地表反照率(Albedo)的反演 基于辐射传输模型进行光谱校正,可根据辐射通量推出不同波段的权重,从而计算宽波段的地表反照率<sup>[11]</sup>。宽波段地表反照率(A)定义为<sup>[12]</sup>:

$$A = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E_u(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E_D(\lambda) d\lambda} = \frac{E_{U1} + E_{U2} + \dots + E_{UN}}{E_{D1} + E_{D2} + \dots + E_{DN}} \quad (1)$$

式中: $\lambda_1, \lambda_2$ ——波长的最小最大值,一般为 0.3 和 4  $\mu\text{m}$ ;  $E_{U1}, E_{U2}, \dots, E_{UN}, E_{D1}, E_{D2}, \dots, E_{DN}$ ——对应波段的入射辐射值和出射辐射值( $\text{W}/\text{m}^2$ )。

公式(1)可以简写为:

$$A = \omega_1 R_1 + \omega_2 R_2 + \omega_n R_n \quad (2)$$

式中: $R_i$ ——波段  $i$  的光谱反射率,  $R_i = E_{Ui}/E_{Di}$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ );  $\omega_i$ ——波段  $i$  的权重系数,  $\omega_i = E_{Di}/E_{Dk}$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ),其中,  $\omega_1 + \omega_2 + \dots + \omega_n = 1$ 。对于 TM 影像,  $i = 1, 2, 3, 4, 5, 7$ 。

本研究采用 TM<sub>1-5,7</sub> 波段组合反演地表反照率:

$$\text{Albedo} = 0.282R_1 + 0.265R_2 + 0.239R_3 + 0.166R_4 + 0.035R_5 + 0.013R_7 \quad (3)$$

式中:  $R_1, R_2, R_3, R_4, R_5, R_7$ —— $\text{TM}_{1-7}$  波段的反射率。

植被指数计算: 归一化植被指数 NDVI 可以通过 TM 影像的红光波段的反射率 ( $\rho_{\text{RED}}$ ) 和近红波段的反射率 ( $\rho_{\text{NIR}}$ ) 计算<sup>[13]</sup>。

$$\text{NDVI} = \frac{\rho_{\text{NIR}} - \rho_{\text{RED}}}{\rho_{\text{NIR}} + \rho_{\text{RED}}} \quad (4)$$

对 NDVI, Albedo 进行归一化处理:

$$\text{植被指数归一化处理: } N = \frac{\text{NDVI} - \text{NDVI}_{\min}}{\text{NDVI}_{\max} - \text{NDVI}_{\min}} \quad (5)$$

式中:  $\text{NDVI}_{\max}, \text{NDVI}_{\min}$ ——NDVI 的最大值和最小值。

$$\text{地表反照率归一化处理: } A = \frac{\text{Albedo} - \text{Albedo}_{\min}}{\text{Albedo}_{\max} - \text{Albedo}_{\min}} \quad (6)$$

式中:  $\text{Albedo}_{\max}, \text{Albedo}_{\min}$ ——Albedo 的最大值和最小值。

2.2.2 NDVI—Albedo 特征空间的建立 沙漠化过程在植被指数和地表反射率的特征空间中有显著的相关关系<sup>[6]</sup>。因此采用 NDVI—Albedo 特征空间来分析沙漠化的动态变化特征。首先建立特征空间<sup>[6]</sup>: 为了得到不同植被状况下的 Albedo 与 NDVI 的定量关系, 利用 ENVI 中的 ROI 功能, 在研究区域中选择分布于不同沙漠化等级的 350 个点, 对所有点的 Albedo 与 NDVI 信息进行回归分析, 得到特征方程:  $y = 0.3444x + 0.4690$  ( $R^2 = 0.7847$ )。可以看出, 随着植被指数的逐渐增加, 其地表反照率逐渐减小, 植被指数与地表反照率表现出很强的线性负相关关系。

2.2.3 沙漠化遥感监测差值指数 根据 Verstraete 和 Pinty<sup>[14]</sup>的研究结论, 如果在代表沙漠化变化趋势的垂直方向上划分 NDVI—Albedo 特征空间, 可以将不同的沙漠化土地有效区分开来。可以用沙漠遥感监测差值指数模型 DDI 来表示:

$$\text{DDI} = a \cdot \text{NDVI} - \text{Albedo} \quad (7)$$

在具体应用中, 为减少采样点代表性对沙漠分级指数  $I$  的影响, 其常数  $a$  可根据 NDVI—Albedo 特征空间中斜率来确定, 即  $a \cdot k = -1$ , 其中  $k$  为特征方程的斜率, 在本研究中  $k$  为  $-0.3444$ , 计算得  $a$  为  $2.9036$ 。

### 3 结果与分析

#### 3.1 150 团沙漠化分类

根据 NDVI—Albedo 特征方程确定沙漠化差值指数:

$$\text{DDI} = 2.9036\text{NDVI} - \text{Albedo} \quad (8)$$

根据公式 (8) 计算得到研究区的 DDI 值, 利用 ArcGIS 10.0 的重分类中的自然断裂法 (natural

break) 将 DDI 值分为 6 级, 即非沙漠化、轻度沙漠化、中度沙漠化、重度沙漠化、极重度沙漠化和沙地 (表 3), 自然断裂法是基于统计学的 Jenk 最优化法得出的分界点, 能够使各级的内部方差之和最小。对研究区土地进行分区结果如附图 9 所示。由附图 9 可知, 在研究区内, 轻度沙漠化土地主要分布在耕地周围, 且面积较少; 中度沙漠化土地围绕于轻度沙漠化土地, 主要位于 150 团中部和南部; 极重度沙漠化土地分布于耕地的外围区域, 主要位于 150 团的西部和西南部, 且分布面积较大; 沙地分布于 150 团的最外围区域, 特别是在北部地区。其中沙地面积有  $123.5 \text{ km}^2$ , 占研究区总面积的  $27.23\%$ ; 极重度沙漠化土地面积为  $84 \text{ km}^2$ , 占总面积的  $18.52\%$ ; 重度沙漠化土地面积为  $28.5 \text{ km}^2$ , 占研究区的  $6.29\%$ ; 中度沙漠化土地面积为  $34.2 \text{ km}^2$ , 占总面积的  $7.55\%$ ; 轻度沙漠化土地面积为  $53.8 \text{ km}^2$ , 占总面积的  $11.87\%$ ; 耕地面积最大为  $129.5 \text{ km}^2$ , 占研究区总面积的  $28.54\%$ 。

表 3 不同等级沙漠化土地的遥感监测差值指数 DDI 值

土地类型	DDI 值
沙地	1.066
极重度沙漠化土地	1.288
重度沙漠化土地	1.648
中度沙漠化土地	2.306
轻度沙漠化土地	2.352
耕地	2.674

#### 3.2 150 团沙漠化分类精度分析

在分类完成的图像中, 随机地增加 140 个点, 根据选取点所在的经纬度, 在 Google Earth 中查看该点的地表情况, 并判断其类型, 再结合野外调查的 100 个点, 共得到 240 个分类精度检验参照点, 与分类结果对照, 利用误差矩阵进行分类结果的精度分析 (表 4)。

从表 4 可以得出, 采用 NDVI—Albedo 特征空间进行的分类误差分析结果表明, 其总体精度为  $0.87$ , 用户精度为  $0.87$ , 生产精度为  $0.87$ , Kappa 系数则为  $0.84$ , 误分主要表现在重度、中度、轻度等的沙化土地信息, 地面调查与遥感数据的时间差也是形成误差的原因之一。

#### 3.3 150 团沙漠化动态变化分析

通过前面的研究表明, 基于 NDVI—Albedo 特征空间方法在沙漠化信息的提取中是可行的, 因此再分别对 2000 年 8 月 7 日、2005 年 7 月 31 日两期轨道号为 P144-R29 的  $\text{TM}_{1-5,7}$  波段的影像进行了处理, 并结合 2010 年的分类结果, 分析 2000—2010 年间研究区沙漠化的变化。

表 4 研究区遥感影像分类精度误差矩阵(NDVI—Albedo)

类别	沙地	极重度沙化	重度沙化	中度沙化	轻度沙化	耕地
沙地	38	2	1	0	0	0
极重度沙化	2	33	4	1	0	0
重度沙化	0	4	33	2	0	0
中度沙化	0	1	2	34	1	0
轻度沙化	0	0	0	2	35	5
耕地	0	0	0	1	4	35
生产精度	0.95	0.83	0.83	0.85	0.88	0.88

注:总体精度 0.87; Kappa 系数 0.84。

3.3.1 沙漠化空间变化特征 分别对 2000 和 2005 年的数据进行分类,并与 2010 年进行对比分析。分析结果表明,经过 10 a 的发展变化,150 团的耕地面积不断增加,主要向西南方向扩张,而且西南方向的沙地有很大一部分已经转移成了极重度沙漠化,轻度沙漠化土地的发展则主要向中部集中,重度沙漠化、中度沙漠化土地的变化不大,主要分布在耕地周围(表 5)。

由表 5 可知,沙地面积逐渐减少,沙漠化程度不断降低,极重度沙漠化土地面积先减少后增加是因为早期人们沙地改造的技术等方面不成熟,水资源的利用不足,所以沙漠化程度降低不很显著,中度、轻度沙漠化土地极耕地的面积增加不大,但是由于后期加大了改造沙漠的力度,研究区的水资源主要用于耕地的发展,在沙地种植梭梭等耐旱植物改善沙地土壤,所以沙漠化程度降低显著,大量的沙地向极重度、重度等沙化程度轻的土地类型过渡,而中度、轻度沙漠化土地及耕地面积增加较显著。

分别对 2000—2005 年、2005—2010 年研究区沙

漠化变化进行分析。附图 10 中土地转移指某类土地向其它类型土地转变,如沙地转移是指沙地向极重度、重度、中度、轻度、耕地的转化。由附图 10 统计可得,研究区土地 2000—2005 年变化不大,其中沙地向其它类型转换的面积为 44.4 km<sup>2</sup>;极重度沙漠化土地的变化面积为 15.5 km<sup>2</sup>;重度沙漠化土地变化面积为 5.7 km<sup>2</sup>;中度沙漠化土地有 5.1 km<sup>2</sup> 发生了变化,变化面积不大;轻度沙漠化有 10 km<sup>2</sup> 发生了变化;耕地面积有 30 km<sup>2</sup> 发生了变化。由于封沙育林草,使被破坏的荒漠植被自行恢复。同时积极采用人工种植梭梭,在研究区,梭梭是绝对的优势灌木,对固沙起到很重要的作用。2005—2010 年,特别是西南部的沙漠面积减少了很多。有 96 km<sup>2</sup> 的沙地转化为极重度、重度、中度、轻度沙漠化和耕地,其中 90% 转换为极重度沙漠化土地;极重度沙漠化土地中有 9.6 km<sup>2</sup> 发生了变化;重度沙漠化土地中发生变化的面积有 5.4 km<sup>2</sup>,占重度沙漠化面积的 24%;中度沙漠化土地变化不大,只有 6.6 km<sup>2</sup>;轻度沙漠化面积中有 13.5 km<sup>2</sup> 发生变化;而耕地的面积则有 18.1 km<sup>2</sup> 产生了变化。

表 5 研究区 2000,2005 和 2010 年不同土地类型面积统计

km<sup>2</sup>

土地类型	2000 年	所占比例/%	2005 年	所占比例/%	2010 年	所占比例/%
沙地	239.1	52	219.4	48	124.2	27
极重度	65.1	14	36.5	8	84.5	18
重度	22.5	5	25.4	6	28.8	6
中度	20.9	5	28.1	6	34.5	8
轻度	31.5	7	44.3	10	54.3	12
耕地	77.7	17	103.1	23	130.5	29
总计	456.8	100	456.8	100	456.8	100

3.3.2 沙漠化时间变化特征 结合研究区沙漠化土地的分布状况,在研究区内采取了一系列的措施来改善沙漠化状况。对于研究区最外围的沙地及极重度沙漠化区域,进行人工种植梭梭林、红柳、杨树林等,建立防风固沙林带,降低风速,阻止流沙移动扩展;在重度和中度沙漠化区域实施围栏封育,严禁樵采、滥

牧和滥挖,并种植苜蓿等可以改善土壤的植被,使被破坏的生态系统逐渐恢复;对于最中间的轻度和非沙漠化区域,也就是农田及居住区,在条田的四周及主干道的两侧实行林网化建设,种植杨树、沙枣等。在这些措施的作用下,2000—2010 年 150 团的土地格局发生了巨大的变化,随着沙漠化改造的不断进行,

沙漠化程度则不断降低,沙地的面积在逐年减少,耕地面积不断增加。2000—2005年,由于人们对沙漠化土地的改造力度不够,且水资源的使用率较低,所以沙漠化程度降低不大,沙地面积由 239 km<sup>2</sup> 只减少到 219.4 km<sup>2</sup>,极重度沙漠化土地由 65.1 km<sup>2</sup> 降低为 36.5 km<sup>2</sup>,重度沙漠化土地变化不大,中度沙漠化土地由 31.5 km<sup>2</sup> 增加到 44.3 km<sup>2</sup>,耕地面积由 77.7 km<sup>2</sup> 增加到 103.1 km<sup>2</sup>。2005—2010年,沙漠化程度降低,一部分沙地向其它类型土地转化,沙地面积继续下降到 123.5 km<sup>2</sup>,而极重度、重度、中度、轻度及耕地的面积则逐年增加。极重度沙漠化土地增加到 84 km<sup>2</sup>,重度沙漠化土地增加到 28.8,中度沙漠化土地增加到 53.8 km<sup>2</sup>,耕地面积则由 103.1 km<sup>2</sup> 增加到 130.5 km<sup>2</sup>(图1)。

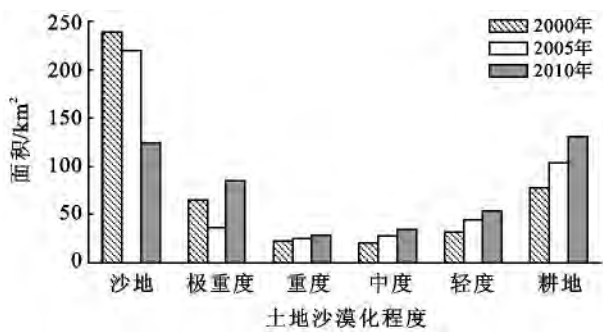


图1 研究区 2000, 2005, 2010 年土地沙漠化程度分级结果

## 4 结论

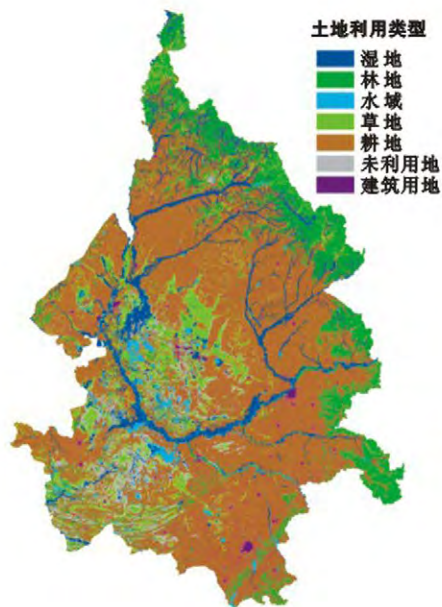
(1) 地表反照率的反演的计算公式是由 TM 影像的 1—5, 7 波段进行组合得到的。研究表明,基于 NDVI—Albedo 特征空间进行沙漠化信息提取,虽然可以较好地识别不同沙漠化程度的土地信息,但是由于所用的指标较简单,对于极重度沙漠化和重度沙漠化、轻度沙漠化和耕地的识别仍然存在一定的误差。

(2) 在研究区沙漠化的动态变化分析中,可以看出经过 10 a 的发展变化,150 团的沙漠化在空间和时间上的变化都很大。在空间上,耕地不断向西南部扩张,沙地主要分布在西北部;在时间上,土地格局发生的较大的变化,耕地面积由 2000 年的 77.7 km<sup>2</sup> 发展到 2010 年的 129.4 km<sup>2</sup>,沙地面积由 239 km<sup>2</sup> 减少到 123.5 km<sup>2</sup>,其它类型土地面积均有不同程度的增加。

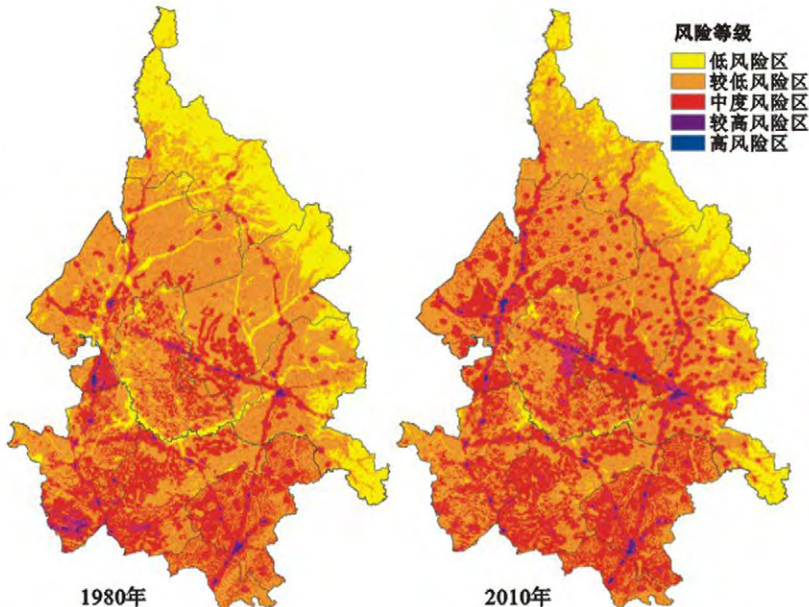
(3) 沙漠化是一种很复杂的地理现象,研究区受资料的限制,考虑到气候因素、人为因素和其它因素的影响,就使得分类结果存在一些误差。特征空间分类法虽然在本研究中取得了较好的效果,但是应用于遥感影像分类还处于探索阶段,存在很多问题,有待进一步解决。

### [ 参 考 文 献 ]

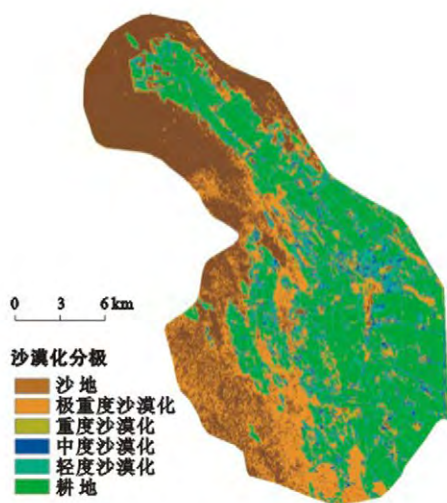
- [1] 王涛,朱震达. 我国沙漠化研究的若干问题: 沙漠化的概念及其内涵[J]. 中国沙漠, 2002, 23(3): 209-214.
- [2] 刘同海,吴新宏,董永平,等. 沙漠化遥感信息研究综述[J]. 遥感技术与应用, 2004, 19(6): 526-532.
- [3] Hansen M C, DeFries R S, Townshend J R G. Towards an operational MODIS continuous field of percent tree cover algorithm: Examples using AVHRR and MODIS data[J]. Remote Sensing of Environment, 2002, 83(1/2): 303-319.
- [4] 刘琳,姚波. 基于 NDVI 像元二分法的植被覆盖变化监测[J]. 农业工程学报, 2010, 26(1): 230-234.
- [5] Tanser F C, Palmes A R. The application of a remotely sensed diversity index to monitor semi-arid, heterogeneous, South African landscape[J]. Journal of Arid Environments, 1999, 43(4): 477-484.
- [6] 曾永年,向南平,冯兆东,等. Albedo—NDVI 特征空间及沙漠化感监测指数研究[J]. 地理科学, 2006, 26(1): 75-81.
- [7] 潘竟虎,秦晓娟. 基于植被指数—反照率特征空间的沙漠化信息遥感提取: 以张掖绿洲及其附近区域为例[J]. 测绘科学, 2010, 35(3): 193-195.
- [8] 刘和鸣,兵团年鉴 2010[M]. 新疆生产建设兵团: 兵团年鉴社, 2010: 657-669.
- [9] 汤波. 150 团水土保持生态修复现状及对策[J]. 生态建设, 2009(4): 60-61.
- [10] 董玉祥. 中国北方沙漠化灾害危险度分区评价[J]. 地理学报, 1997, 52(2): 146-153.
- [11] 阿布都瓦斯提吾拉木,秦其明. 基于辐射模拟反演 ETM<sup>+</sup> 数据宽波段反照率[J]. 北京大学学报: 自然科学版, 2007, 43(4): 473-483.
- [12] 王继燕,罗格平,严坤,等. 基于 TM 影像天山北坡地表反演方法的研究[J]. 遥感应用, 2011, 114(2): 63-68.
- [13] 高志海,魏怀东,丁峰. TM 影像 VI 提取植被信息技术研究[J]. 干旱区资源与环境, 1998, 12(3): 98-103.
- [14] Verstraete M, Pinty B. Designing optimal spectral indexes for remote sensing applications[J]. Remote Sensing of Environment, 1996, 34(5): 1254-1265.



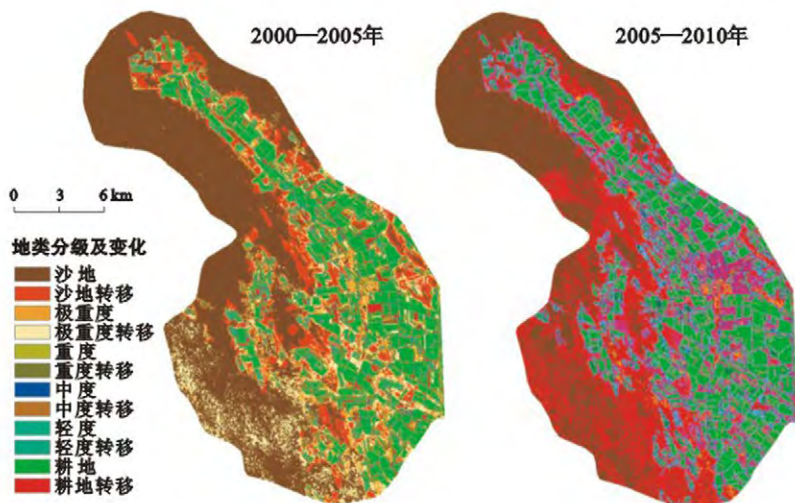
附图7 松嫩平原2010年土地利用状况



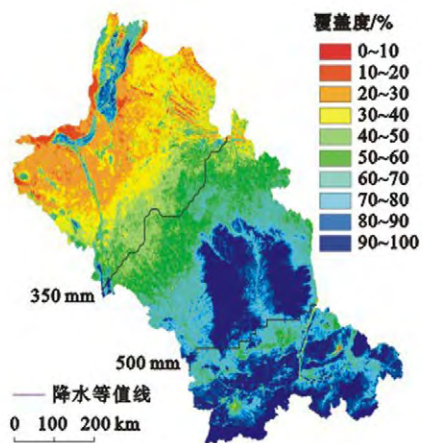
附图8 松嫩平原1980和2010年土地利用生态安全风险等级分布格局



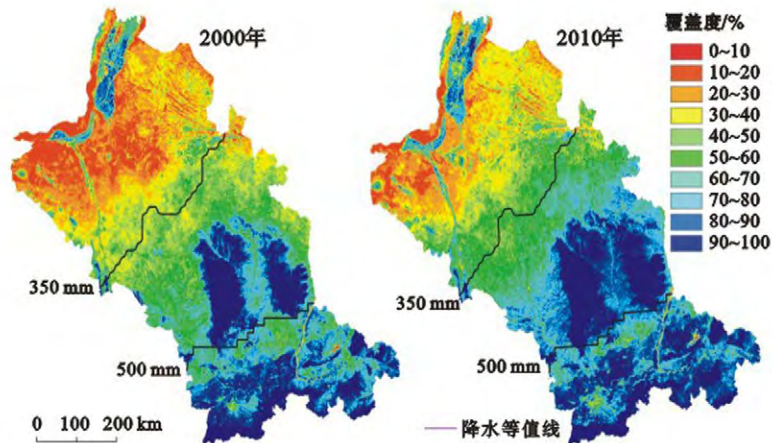
附图9 新疆石河子150团沙漠化分级



附图10 新疆石河子150团2000—2010年沙漠化发展变化



附图11 黄土高原中部2000和2010年降水梯度带平均植被覆盖度



附图12 黄土高原中部2000和2010年降水梯度带植被覆盖度对比