

# 基于 SPOT-VGT 的宁夏盐池县近 8 年生态环境动态监测

杜灵通 李国旗

(宁夏大学西北退化生态系统恢复与重建省部共建教育部重点实验室)

**摘要:**为评价宁夏盐池县近年来生态环境质量的变化,该文利用最新的 10 d 合成 SPOT-VGT NDVI 数据,合成最大化植被指数(MNDVI)和年平均植被指数(YMNDVI),并结合盐池县的降水数据,分析了 1999—2006 年间 MNDVI 和 YMNDVI 的变化。同时,还用一元线性回归分析法模拟了这 8 年来每个像元 MNDVI 和 YMNDVI 的变化趋势。MNDVI 的变化趋势显示,在 1999—2006 年盐池县植被出现改善的面积为 6 345 km<sup>2</sup>,占总土地面积的 73.27%,而出现退化的面积为 1 449 km<sup>2</sup>,只占总土地面积的 16.72%;YMNDVI 的变化趋势也显示,植被出现改善的土地面积大于植被出现退化的土地面积。综合分析结果表明,宁夏盐池县 1999 年以来整体生态环境处于好转状态,虽然有部分年份受严重干旱影响出现植被退化,但整体上地表植被开始增加,生态环境开始改善,已扭转了 20 世纪 90 年代生态环境恶化的局面,并开始显露出一定的抵御自然灾害的能力。

**关键词:**生态环境;SPOT-VGT;遥感;生态治理工程;盐池县

**中图分类号:**S718.55 **文献标识码:**A **文章编号:**1000-1522(2008)05-0046-06

DU Ling-tong; LI Guo-qi. **Dynamic monitoring of eco-environment change over 1999-2006 in Yanchi County, Ningxia Hui Autonomous Region based on SPOT-VGT data.** *Journal of Beijing Forestry University* (2008) 30(5) 46-51 [Ch, 18 ref.] Key Laboratory for Restoration and Reconstruction of Degraded Ecosystem in North-western China of Ministry of Education, Ningxia University, Yinchuan, 750021, P. R. China.

For estimating the eco-environment changes in Yanchi County, Ningxia Hui Autonomous Region, northwestern China, the authors used the 10-days synthesized normalized difference vegetation index (NDVI) which acquired by SPOT-VGT sensor, synthesized maximum normalized difference vegetation index (MNDVI) and yearly mean normalized difference vegetation index (YMNDVI) and analyzed their changes from 1999 to 2006 based on the precipitation data. At the same time, the paper used the linear regression methods to analyze the change trend of MNDVI and YMNDVI during these 8 years. The results of MNDVI change trend show that Yanchi County has 6 345 km<sup>2</sup> areas, about 73.27% of whole county, where vegetation cover was increasing, and 1 449 km<sup>2</sup> areas, about 16.72% of whole county, where vegetation cover was decreasing. The YMNDVI change trend also shows that Yanchi County has more vegetation increasing areas than decreasing areas. The ecosystem of Yanchi County has been greatly changed since 1999. Although the vegetation was affected by drought disaster that happened in the period, the ecosystem has become more and more stabilization that can endure some natural disasters.

**Key words** eco-environment; SPOT-VGT; remote sensing; ecosystem rehabilitation project; Yanchi County

为了恢复与重建西北脆弱的生态系统,1998 年以来我国在生态脆弱区实施了包括天然林保护、退耕还林还草等一系列生态建设工程。这些工程对地区和区域的生态系统恢复与重建起到了重要的作

用<sup>[1]</sup>。目前利用 Landsat 卫星数据对生态典型治理区进行评估的研究较多,吴炳方等<sup>[2]</sup>对我国 5 个生态治理区 1997—2002 年的生态环境变化进行了动态监测,结果表明各治理区的环境正在逐渐改善;杜

收稿日期:2007-12-21

http://www.bjfujournal.cn; http://journal.bjfu.edu.cn

基金项目:国家自然科学基金项目(30660039)、教育部新世纪优秀人才支持计划项目(NCET-05-0896)。

第一作者:杜灵通,助理研究员。主要研究方向:生态环境遥感。电话:0951-2061909 Email: dult80@sina.com 地址:750021 银川市宁夏大学 A 区 39 信箱。

(责任编辑:李国旗,博士,研究员,主要研究方向:应用生态学。电话:0951-2061838。Email: liguoqie@sxu.edu.cn 地址:同上) www.cnki.net

灵通<sup>[3]</sup>利用 1975、1987 和 2001 年 3 期的 Landsat 卫星数据对宁夏南部山区土地利用变化研究的结果表明, 重大生态工程的建设, 特别是退耕还林还草, 为当地草地和林地的恢复起到了重要的作用; 张学俭等<sup>[4]</sup>对宁夏盐池县 20 世纪 90 年代的土地利用变化研究表明, 盐池县生态环境局部有所好转, 但整体处于继续恶化状态。Landsat 卫星时间分辨率低, 不能在时间序列上连续地对区域生态系统进行监测。Stow 等<sup>[5]</sup>在研究北极生态系统时发现, 高时间分辨率的遥感植被指数与生态环境变化密切相关; 近年来其也用于北半球生态系统光合作用监测<sup>[6]</sup>。此外, 研究表明高时间分辨率的归一化植被指数 (NDVI) 与绿色叶片生物量、叶面积指数、植物光合能力、总的干物质积累及年净初级生产力等均有良好的相关性, 可用于表征植被盖度的好坏<sup>[7-8]</sup>, 亦可用于评价生态环境质量状况<sup>[9]</sup>。本研究以宁夏盐池县为研究区, 利用 SPOT 卫星的 VEGETATION (VGT) 数据对该地区近 8 年来的生态环境变化进行了动态监测。

## 1 研究区概况

盐池县位于宁夏回族自治区东部 (37°04'~38°10'N, 106°30'~107°47'E), 属陕、甘、宁、蒙 4 省 (区) 交界地带, 东邻陕西定边县, 南接甘肃环县, 北靠内蒙古鄂托克前旗, 总面积约 8 661.3 km<sup>2</sup>, 占宁夏总面积的 13%。盐池县北接毛乌素沙地, 南靠黄土高原, 属典型的过渡地带。在地形上自南向北从黄土高原向鄂尔多斯台地过渡; 在气候上从半干旱区向干旱区过渡; 在植被上从干草原向荒漠过渡; 在资源利用上从农区向牧区过渡, 是典型的农牧交错带<sup>[10]</sup>。盐池县深居内陆, 属典型中温带大陆性季风气候, 年平均气温 8.1℃, 极端最高气温 34.9℃, 极端最低气温 -24.2℃, 无霜期 165 d, 年降水量 250~350 mm, 并从南向北递减。全县植被低矮、稀少, 以多年生草本植物为主, 间有柠条 (*Caragana korshinskii*) 为主的半灌木、灌木, 没有天然森林。土壤主要是黑垆土、灰钙土和风沙土。

盐池县 1999 年被列为全国 100 个生态建设重点县之一, 近几年盐池县又连续争取到多个生态建设工程。2001 年盐池县被列为退耕还林还草工程试点县; 2002 年又开始实施天然草原恢复与建设工程, 开始全面实行封山禁牧; 此外, 盐池县全境还被列入天然林资源保护工程建设范围。统计资料表明, 截至 2006 年底盐池县林木保存面积达 2 896 km<sup>2</sup>, 其中退耕还林工程完成造林 1 080 km<sup>2</sup>, 退耕 280 km<sup>2</sup>, 宜林荒山造林 773 km<sup>2</sup>, 森林覆盖率为

2002 年的 24% 提高到 29.3%, 局部地区达到 40%, 在宁夏全区率先实现沙漠化逆转。虽然来自当地政府部门的统计资料表明盐池县近年来林、草地面积有明显增加, 但这些生态治理工程是否从根本上扭转了当地的生态环境恶化趋势, 还需要从科学的角度进行客观评价。

## 2 研究方法

### 2.1 SPOT-VGT 数据预处理

本研究利用比利时佛莱芒技术研究所 (VITO) 提供的覆盖东亚的 VGT-S10 数据集<sup>[11]</sup>, 时间跨度为 1999 年 1 月到 2006 年 12 月, 共有 288 景图像。由于该数据集是覆盖整个东亚地区的, 且包含单波段和 NDVI, 而本研究只需要覆盖宁夏地区的 NDVI 数据, 因此在 ENVI4.2 环境下将数据集中的 NDVI 提取出来, 同时利用盐池县的矢量边界数据进行裁剪, 并将原始投影系统转换到自定义的投影系统 (Albers 等面积圆锥投影, Krasovsky 椭球体, 中央子午线为 105°, 两条标准纬线分别为北纬 25°和北纬 47°, 中央纬线为 0°) 下。

原始 VGT 经大气校正、辐射校正和几何校正后合成的 NDVI 数据界于 -1~1 之间, 为了便于存储, 将 -1~-0.1 的值设置为 -0.1, 再通过以下公式将 NDVI 转换成 0~250 之间的灰度值 (DN):

$$DN = (N_{DVI} + 0.1) / 0.004$$

式中,  $N_{DVI}$  为 NDVI 值。

因此, 在数据预处理过程中, 必须按以下公式将 DN 转换为真实的 NDVI 值:

$$N_{DVI} = 0.004 DN - 0.1$$

在遥感应用中, 特别是时间序列的对比研究, 去云层的影响非常重要。对于宁夏盐池这一常年干旱少雨的地区, 10 d 最大值合成数据就基本可以消除云层的影响。

### 2.2 植被指数合成与分析方法

#### 2.2.1 最大化植被指数 (MNDVI) 计算

MVC (Maximum Value Composite) 是目前国际上通用的最大化合成法<sup>[12]</sup>, 用于将一个月每旬的数据取最大值。此法假设每旬中 NDVI 值最大的那一天天气是晴朗的, 不受云层的影响, 就取这个最大值作为这一旬的 NDVI 值, 这样可以消除云、大气太阳高度角的部分干扰<sup>[13]</sup>。本研究将它的用法延伸了一下, 用 10 d 最大化合成 NDVI 合成年最大化 NDVI (MNDVI)。

$$M_{NDVI} = \max N_{DVI_i}, i = 1, 2, \dots, 36$$

式中,  $M_{NDVI}$  为年最大化 NDVI。

此方法合成的 MNDVI 可以看成是一年内植被

最丰盛时期的 NDVI 值,代表一年内植被生长最好的状态<sup>[14]</sup>。

### 2.2.2 年平均植被指数(YMNDVI)计算

VITO 提供的是 10 d 最大化合成的 NDVI,对于宁夏盐池这种干旱少雨的地区,其基本上可以消除云的影响,所以 10 d 最大化合成 NDVI 反映的是 10 d 一个周期的植被状况。为了评价年平均生态环境状况,本研究合成了年平均植被指数(Yearly Mean Normalized Difference Vegetation Index, YMNDVI),其计算如下:

$$Y_{MNDVI} = \frac{1}{36} \sum_{i=1}^{36} N_{DVI_i}$$

式中,  $Y_{MNDVI}$  是年平均 NDVI。

### 2.2.3 趋势分析法

一元线性回归分析可以模拟每个栅格的变化趋势,Stow 等<sup>[15]</sup>用该方法来模拟植被的绿色变化率(Greenness Rate of Change, GRC)。季节合成归一化植被指数(Seasonally Integrated Normalized Difference Vegetation Index, SINDVI)与地表的植被状态密切相关<sup>[9]</sup>,GRC 被定义为某时间段内的 SINDVI 年际变化的最小次方线性回归方程的斜率<sup>[15-16]</sup>,其计算公式为:

$$\Theta_{Slope} = \frac{n \sum_{j=1}^n (j S_{INDVI_j}) - \sum_{j=1}^n j \sum_{j=1}^n S_{INDVI_j}}{n \sum_{j=1}^n j^2 - \left( \sum_{j=1}^n j \right)^2}$$

式中,  $n$  为模拟时间段长度,  $n=8$ ; 变量  $j$  为年序号;  $S_{INDVI_j}$  表示第  $j$  年的季节合成归一化植被指数,本研究中的  $S_{INDVI_j}$  为以年为周期合成的最大化植被指数(MNDVI)和年平均植被指数(YMNDVI)。

变化趋势反映了在研究期间内,季节合成的植被指数(年或季)的变化趋势,某像点的趋势线是这个像点在研究期内各年 SINDVI 值用一元线性回归模拟出来的一个总的变化趋势,  $\Theta_{Slope}$  即这条趋势线的斜率,这个趋势线并不是简单的最后一年与第一年的连线。当  $\Theta_{Slope} > 0$  时,说明 SINDVI 在研究期内的变化呈增加趋势,反之则呈减少趋势。

## 3 结果与分析

### 3.1 盐池县植被指数变化

一般认为 NDVI 达到 0.1 以上表示有植被覆盖; 0.1 以下则表示地表无植被覆盖,如裸土、沙漠、戈壁、水体、冰雪和云<sup>[17]</sup>。只有植被指数在 0.1~0.8 之间时,植被指数才与植被的生长情况呈正相关关系。从生态学的角度看,一个地区植被指数的变化可以反映该地区生物量的变化,也可以认为植被指

数状况越好,生态环境质量状况就越好。利用 2.2.1 和 2.2.2 中所述的方法,计算出盐池县 1999—2006 年的 MNDVI 和 YMNDVI(图 1、图 2)。

由于盐池地处北纬 37° 以上,所以植被的生长受季节影响大,在生长季节即植被生长状态最好的情况下,全县大部分 NDVI 在 0.1 以上(图 1)。而对于全年来说,在冬季和早春农作物及草场植被返青之前,盐池县的大部分土地裸露,没有植被覆盖,其 NDVI 在 0.1 以下,这也导致在年平均植被指数图上,NDVI 小于 0.1 的面积较多(图 2)。但 YMNDVI 的特点是可以消除由于季节性短期降水引起的植被指数异常,反映全年植被的整体状况。

从图 1 可以看出,盐池县除了严重干旱影响的年份(2000、2005 年)外,其余年份的 MNDVI 越来越高,即地表植被均处于好转状态。虽然 2005 年盐池县也遭受了同 2000 年一样严重的干旱,但干旱对植被的影响明显小于 2000 年,2005 年植被指数图比 2000 年植被指数图绿色部分多,这表明随着退耕还林还草等生态工程的建设,盐池县自然植被好转后,抵御自然灾害的能力增强。图 2 也显示出,在没有干旱影响的情况下,YMNDVI 开始逐年增大,地表植被逐年转好。

由于计算出来的 MNDVI、YMNDVI 是以图像表达的,为了便于量化比较各年份植被的变化,利用以下公式,统计各幅图 MNDVI、YMNDVI 的平均值  $\overline{M}_{NDVI}$ 、 $\overline{Y}_{MNDVI}$ :

$$\overline{M}_{NDVI} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n M_{NDVI_i}$$

$$\overline{Y}_{MNDVI} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Y_{MNDVI_i}$$

式中,  $n$  为研究区内的像素数。

从图 3 可以看出,  $\overline{M}_{NDVI}$  反映的是一年中植被生长最好状态下的 NDVI,其变化受短期降水影响严重,年际变动较大,植被最好年份 2003 年( $\overline{M}_{NDVI}$  为 0.33)与最差年份 2000 年( $\overline{M}_{NDVI}$  为 0.21)相差 0.12。 $\overline{Y}_{MNDVI}$  则体现的是一年内整体植被的生长状况,其受降水影响较小,年际变动也相对较小,植被最好年份 2003 年( $\overline{Y}_{MNDVI}$  为 0.17)与最差年份 2000 年( $\overline{Y}_{MNDVI}$  为 0.11)相差 0.06。从  $\overline{M}_{NDVI}$ 、 $\overline{Y}_{MNDVI}$  的变化可以看出,2000 和 2005 年的严重干旱(降雨量小于 200 mm)导致植被指数降低明显,在严重干旱发生的次年,整体生态系统的恢复在一定程度上还受前一年的干旱影响。

在 1999—2006 年的 8 年中,  $\overline{Y}_{MNDVI}$  和  $\overline{M}_{NDVI}$  变化趋势基本相同,趋势线斜率均为正,处于增长状态,只是各自的增长幅度有所不同,而这 8 年的降水则呈明显减少的趋势。在这种气候条件下,植被指数

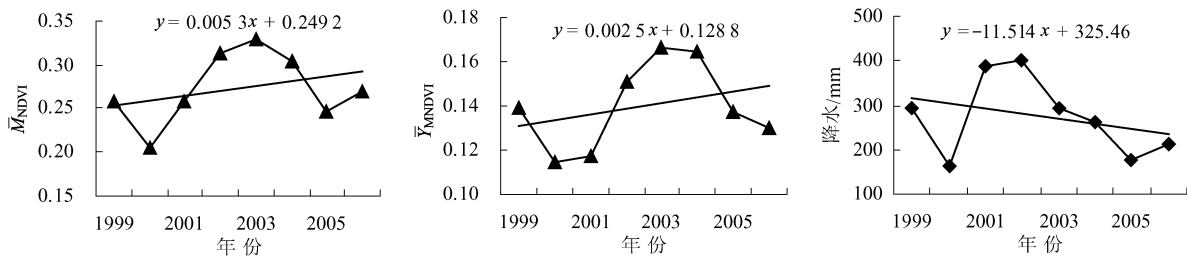


图 3 1999—2006 年盐池  $\bar{Y}_{MNDVI}$ 、 $\bar{M}_{MNDVI}$  和降水变化

FIGURE 3 Variation of  $\bar{Y}_{MNDVI}$ ,  $\bar{M}_{MNDVI}$  and precipitation in Yanchi County from 1999 to 2006

还处于增长状态，这也说明盐池县的整体生态环境处于好转状态，生态治理工程的效益初步显现，已开始显露出一定的抵御自然灾害的能力。

### 3.2 趋势分析

利用 2.2.3 中所述的趋势分析算法，并利用前人<sup>[18]</sup>植被指数退化研究的划分标准(表 1)，对宁夏盐池县 8 年间的 SINDVI(MNDVI 或 YMNDVI)的变化趋势进行分析，计算结果见图 4。从 MNDVI 的变化趋势可以看出，在盐池县的中东部和东南部地区，其 MNDVI 的变化呈明显的上升趋势，这些地区在 1999—2006 年中，植被状况出现明显改善。而在盐池县北部和西部地区，MNDVI 呈下降趋势，说明这些地区在这 8 年中，植被状况未得到改善，处于退化状态。但总体来看，盐池县的地表植被还是大面积的开始恢复。YMNDVI 的变化趋势与 MNDVI 的变化趋势基本相同，由于 YMNDVI 反映的是全年整体植被状态，受短期的季节性降水影响较小，因此其变化趋势相对较缓。

本研究对盐池县近 8 年的 MNDVI 变化趋势结果进行统计分析(表 1)。从中可以看出在 1999—2006 年的 8 年间，盐池县植被出现改善的面积为 6 345 km<sup>2</sup>，占总土地面积的 73.27%，其中达到中度改善以上的面积为 4 736 km<sup>2</sup>，占总土地面积的 54.67%；出现植被退化的面积为 1 449 km<sup>2</sup>，占总土地面积的 16.72%。从 MNDVI 变化趋势来看，盐池县出现植被改善的地区明显大于植被退化的地区，

这表明盐池县生态环境状况在 1999—2006 年的 8 年间明显改善。对盐池县近 8 年 YMNDVI 变化趋势的统计分析也表明，盐池县在这 8 年间植被出现好转，共有 2 924 km<sup>2</sup> 的植被出现改善，占总面积的 33.76%；而植被出现退化的面积为 2 405 km<sup>2</sup>，占总土地面积的 27.77%。

## 4 结 论

本研究利用高时间分辨率的 SPOT-VGT 遥感数据，合成了最大化植被指数(MNDVI)和年平均植被指数(YMNDVI)，对盐池县 1999—2006 年的生态环境质量状况进行了动态监测，得出以下 4 点结论：

1) 在 1999—2006 年的 8 年中，盐池县 MNDVI 和 YMNDVI 虽然受干旱影响有所变动，但整体处于好转状态，即盐池县整体植被开始恢复，生态环境开始向良性发展。

2) 1999—2006 年间各年的 MNDVI、YMNDVI 平均值  $\bar{M}_{MNDVI}$ 、 $\bar{Y}_{MNDVI}$  的变化表明，在降水处于减少的趋势下，即区域整体气候条件变差的情况下， $\bar{M}_{MNDVI}$  和  $\bar{Y}_{MNDVI}$  却处于增长态势，说明盐池县的整体生态环境处于好转状态，并开始显露出一定的抵御自然灾害的能力。

3) 通过一元线性回归模拟 1999—2006 年这 8 年来盐池县的植被指数变化趋势，结果表明，在盐池县的中东部、东南部地区，植被状况出现明显改善。而在盐池县北部靠近毛乌素沙漠的地区和西部部分

表 1 盐池县近 8 年植被指数趋势变化结果统计

TABLE 1 Statistical result of MNDVI and YMNDVI change trends for the past 8 years (1999—2006) in Yanchi County

变化趋势	程度	MNDVI		YMNDVI	
		面积/km <sup>2</sup>	面积百分比/%	面积/km <sup>2</sup>	面积百分比/%
$\Theta_{Slope} \leq -0.009 0$	严重退化	134	1.54		
$-0.009 0 < \Theta_{Slope} \leq -0.004 5$	中度退化	427	4.93	11	0.13
$-0.004 5 < \Theta_{Slope} \leq -0.001 0$	轻微退化	888	10.25	2 394	27.64
$-0.001 0 < \Theta_{Slope} \leq 0.001 0$	基本不变	867	10.02	3 332	38.47
$0.001 0 < \Theta_{Slope} \leq 0.004 5$	轻微改善	1 609	18.58	2 817	32.53
$0.004 5 < \Theta_{Slope} \leq 0.009 0$	中度改善	2 316	26.74	107	1.23
$\Theta_{Slope} > 0.009 0$	明显改善	2 420	27.95		

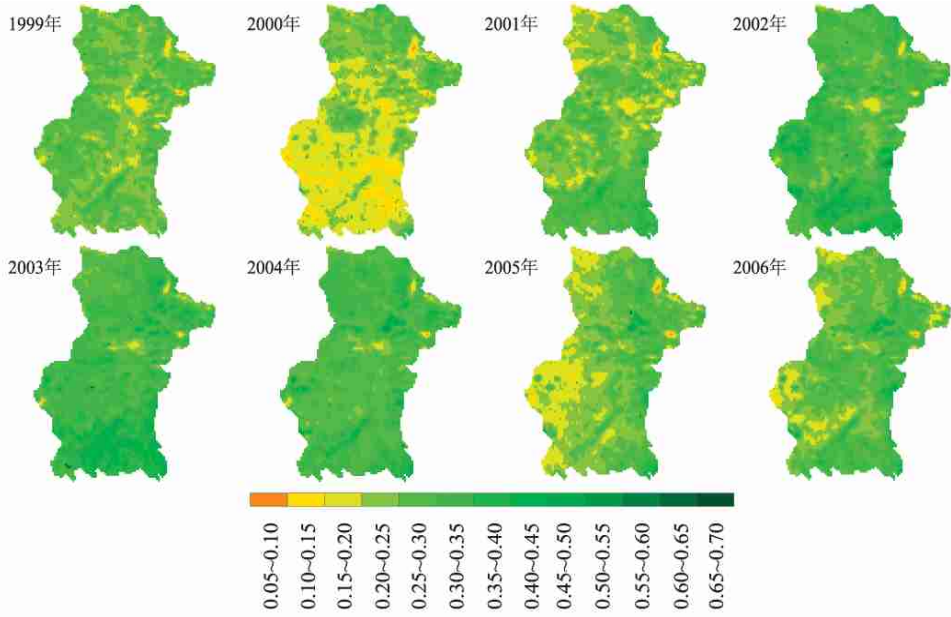


图1 1999—2006年盐池县各年MNDVI图

FIGURE 1 Map of MNDVI in Yanchi County from 1999 to 2006

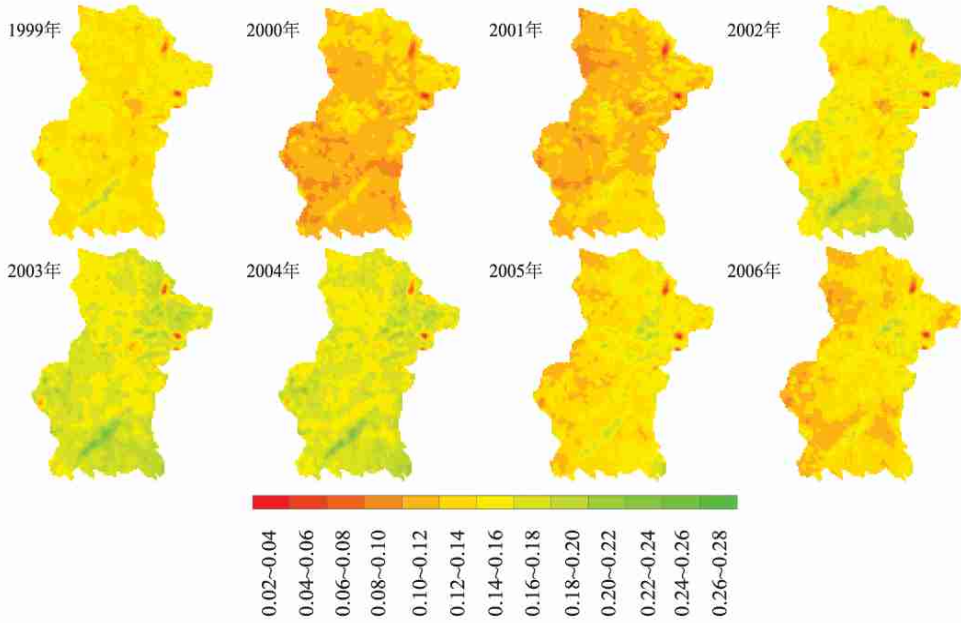


图2 1999—2006年盐池县各年YMNDVI图

FIGURE 2 Map of YMNDVI in Yanchi County from 1999 to 2006

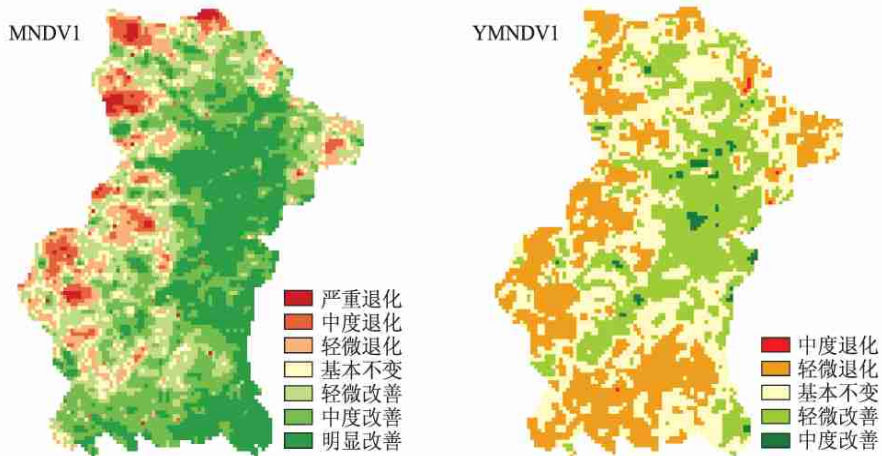


图4 1999—2006年盐池县MNDVI、YMNDVI变化趋势

FIGURE 4 Trends of MNDVI and YMNDVI changes in Yanchi County from 1999 to 2006

地区, 植被状况未得到改善, 仍处于退化状态。

4) 通过对 MNDVI 的变化趋势统计表明, 在 1999—2006 年盐池县植被出现改善的面积为 6 345 km<sup>2</sup>, 占总土地面积的 73.27%, 而出现退化的面积为 1 449 km<sup>2</sup>, 只占总土地面积的 16.72%; YMNDVI 的变化趋势统计也显示, 植被出现改善的土地面积大于退化面积。但是由于 MNDVI、YMNDVI 的构建方法存在差异, 因此二者所划分出来的植被改善和退化面积有所不同。

综上所述, 盐池县从 1999 年以来, 地表植被状况开始明显好转, 区域生态环境明显改善, 逆转了 20 世纪 90 年代盐池县生态环境整体处于恶化的局面<sup>[4]</sup>。这与盐池县近年来实施的退耕还林还草、天然林保护、“三北”防护林四期、外援治沙和封山禁牧等生态治理工程密切相关, 盐池县生态治理项目的生态效应已开始初步显现。

### 参 考 文 献

- [1] 李俊清, 崔国发. 西北地区天然林保护与退化生态系统恢复理论思考[J]. 北京林业大学学报, 2000, 22(4): 1-7.  
LI J Q, CUI G F. On nature forest protection and degraded ecosystem restoration in northwest China [J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2000, 22(4): 1-7.
- [2] 吴炳方, 李苗苗, 颜长珍, 等. 生态环境典型治理区 5 年期遥感动态监测[J]. 遥感学报, 2005, 9(1): 32-38.  
WU B F, LI M M, YAN C Z, et al. Environment monitoring over 1997-2002 with remote sensing in 5 national environmental project sites[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2005, 9(1): 32-38.
- [3] 杜灵通. 基于遥感技术的宁夏南部山区 LUCC 研究[J]. 地理科学进展, 2006, 25(6): 94-101.  
DU L T. Study on land use/cover change in mountain areas of southern Ningxia based on RS technology [J]. *Progress in Geography*, 2006, 25(6): 94-101.
- [4] 张学俭, 冯仲科. RS 和 GIS 支持下的我国农牧交错生态脆弱区 LUCC 研究——以宁夏盐池县为例[J]. 北京林业大学学报, 2006, 28(1): 32-38.  
ZHANG X J, FENG Z K. LUCC in farming pasture ecotonal areas based on RS and GIS—a case study of Yanchi County in Ningxia [J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2006, 28(1): 32-38.
- [5] STOW D A, HOPE A, MCGUIRE D, et al. Remote sensing of vegetation and land-cover change in Arctic Tundra Ecosystems [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2004, 89: 281-308.
- [6] MYNENI R, KEELING C, TUCKER C, et al. Increased plant growth in the northern high latitudes from 1981 to 1991 [J]. *Nature*, 1997, 386: 698-702.
- [7] TUCKER C J, VANPRAET C I, SHARMAN M J, et al. Satellite remote sensing of total herbaceous biomass production in the Senegalese Sahel: 1980-1984 [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1985, 17: 233-249.
- [8] GRAMER W, KICKLIGHTER D, BONDEAU A, et al. Comparing global models of terrestrial net primary productivity (NPP): Overview and key results [J]. *Global Change Biology*, 1999, 5(Supp. 1): 1-15.
- [9] GOWARD S N, DYE D G. Evaluating north America net primary productivity with satellite observations [J]. *Advances in Space Research*, 1987, 7: 165-174.
- [10] ZHONG Z H, LI K H. The feature and evaluation of ecotone in China [J]. *The Journal of Chinese Geography*, 1997, 7(2): 33-44.
- [11] MAISONGRANDE P, DUCHEMIN B, DEDIEU G. VEGETATION/SPOT: An operational mission for the earth monitoring, presentation of new standard products [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2004, 25(1): 9-14.
- [12] HOLBEN B N. Characteristics of maximum-value composite images from temporal AVHRR data [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1986, 7(11): 1 417-1 437.
- [13] EIDENSHINK J C, FAUNDEEN J L. The 1 km AVHRR global land data set: First stages of implementation [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1994, 15(17): 3 443-3 462.
- [14] HOPE A, BOYNTON W L, STOW D A, et al. Inter-annual growth dynamics of vegetation in the Kuparuk River watershed based on the normalized difference vegetation index [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2003, 24(17): 3 413-3 425.
- [15] STOW D A, DAESCHNER S, HOPE A, et al. Variability of the seasonally integrated normalized difference vegetation index across the north slope of Alaska in the 1990s [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2003, 24(5): 1 111-1 117.
- [16] MA M G, VEROUSTRAETE F. Interannual variability of vegetation cover in the Chinese Heihe River Basin and its relation to meteorological parameters [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2006, 27(16): 3 473-3 486.
- [17] SHABANOV N, ZHOU L, KNYAZIKHIN Y, et al. Analysis of inter-annual changes in northern vegetation activity observed in AVHRR data from 1981 to 1994 [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2002, 40(1): 115-130.
- [18] 宋怡, 马明国. 基于 SPOT VEGETATION 数据的中国西北植被覆盖变化分析 [J]. 中国沙漠, 2007, 27(1): 89-93.  
SONG Y, MA M G. Study on vegetation cover change in northwest China based on SPOT VEGETATION data [J]. *Journal of Desert Research*, 2007, 27(1): 89-93.

(责任编辑 冯秀兰)