

## 2000 ~ 2014 年海流兔河流域植被覆盖度变化及其驱动因素分析

潘桂行<sup>1</sup>, 乔晓英<sup>1,2\*</sup>, 黄金廷<sup>3</sup>, 雷磊<sup>1</sup> (1. 长安大学环境科学与工程学院, 陕西西安 710054; 2. 干旱区地下水文与生态效应教育部重点实验室, 陕西西安 710054; 3. 中国地质调查局西安地质调查中心, 陕西西安 710054)

**摘要** 基于 MODIS NDVI 数据, 利用线性回归法分析植被覆盖度的时空变化趋势。研究海流兔河流域 2000 ~ 2014 年间植被覆盖度的变化规律, 确定其变化的影响因素。结果表明, 研究区 96.9% 的区域面积 NDVI 处于不断上升的趋势, 区域年平均 NDVI 增量达到 0.006 5。通过转移矩阵法研究出该区 3 个时段 4 种不同等级植被覆盖度的变化趋势, 各等级植被覆盖度均有不同程度的增加。NDVI 值 < 0.40 的区域面积的百分比由 88.0% 降低到 75.8%, 尤其是 < 0.20 的区域变化最为明显, 由最初占区域总面积的 20.8% 下降到 3.5%。研究区 15 年来植被覆盖度不断增加, 植被生态呈现良性发展趋势, 导致这种变化的主要影响因素是人类活动。

**关键词** NDVI; 时空变化; 海流兔河流域; 人类活动

**中图分类号** S181; Q948 **文献标识码** A **文章编号** 0517-6611(2015)31-264-04

## Variation in Vegetation Cover and the Driving Factors in the Hailiutu River Catchment during 2000 - 2014

PAN Gui-xing<sup>1</sup>, QIAO Xiao-ying<sup>1,2\*</sup>, HUANG Jin-ting<sup>3</sup> et al (1. School of Environmental Science and Engineering, Chang'an University, Xi'an, Shaanxi 710054; 2. Key Laboratory of Subsurface Hydrology and Ecology in Arid Areas, Ministry of Education, Xi'an, Shaanxi 710054; 3. Xi'an Center of Geological Survey, CGS, Xi'an, Shaanxi 710054)

**Abstract** Based on MODIS NDVI data, using linear regression method, temporal and spatial variation of vegetation cover was analyzed. The variation law of vegetation cover in the Hailiutu River Catchment during 2000 - 2014 was studied, the influencing factors of the variation were determined. The results illustrated that in a 96.9% area NDVI has a rising trend, regional annual average NDVI increase to 0.006 5. Using transfer matrix method to research the change trend of different levels of vegetation coverage in the area. The percentage of area which NDVI value is less than 0.40, reduced from 88.0% to 75.8%, especially for area of NDVI value less than 0.20, reduced from 20.8% to 3.5%.

In the study area, the vegetation cover degree is increasing, and the vegetation ecology is a positive development trend, the main influencing factor of this change is human activity.

**Key words** NDVI; Spatial and temporal changes; Hailiutu River; Human activity

植被覆盖度是刻画陆地表生植被数量的重要指标, 其变化是区域生态系统变化的重要指标<sup>[1]</sup>。已有的研究表明, 气象因子(如降水和气温等)和人类活动是植被覆盖度变化的重要影响因素<sup>[2]</sup>。由于遥感技术具有实时性、动态性和客观性等优势, 近年来已成为对地观测研究的有力工具<sup>[3]</sup>, 特别在大尺度土地利用与植被覆盖变化规律的研究方面。遥感数据源具有信息量大、多时相性等特点, 可以有效地记录植被多年的变化状况<sup>[4]</sup>, 为干旱与半干旱地区多年以来植被的覆盖度变化分析和预测提供数据支撑<sup>[5-6]</sup>, 从而为大面积监测地表植被状况的演化过程提供了技术的可能性。归一化植被指数 NDVI(Normalized Difference Vegetation Index)是目前应用最为广泛的植被指数, 已有研究成果表明, NDVI 与植被覆盖度有着很好的线性关系<sup>[7]</sup>, 能够较好地反映地表植被的覆盖和变化状况<sup>[8-10]</sup>, 被认为是地表植被的最佳指示因子<sup>[11]</sup>。

海流兔河流域地处毛乌素沙地东南边缘地区, 由于降水稀少, 蒸发强烈, 是生态环境极度脆弱的干旱 - 半干旱区。2000 年以来, 该地区实施了退耕还林还草等生态恢复工程, 生态环境有所改善。为了评估生态恢复工程的效果, 该研究利用遥感技术对 2000 ~ 2014 年间海流兔河流域 15 年的植被覆盖的时空变化过程及其趋势进行了评价, 并分析了植被覆

盖度变化的影响因素, 对流域内植物资源的恢复与保护提供技术支撑。

## 1 自然地理概况

海流兔河流域地处毛乌素沙地东南边缘地区, 位于 38°00' ~ 39°00' N, 108°30' ~ 109°20' E 之间, 为无定河流域的子流域, 面积约 2 600 km<sup>2</sup><sup>[12]</sup>。流域的海拔高度介于 1 020 ~ 1 480 m, 其中流域北部为毛乌素沙地, 地势较高; 向南向黄土高原过渡, 地势逐渐降低。流域内主要以风积沙丘地貌为主, 西北部地区以及中部零星分布湖盆滩地地貌。流域中部为海流兔河, 补浪河是其支流。河流下游地区 U 型河谷发育, 为该区的主要耕地区。海流兔河流域地处温带大陆性气候区, 根据流域内乌审旗气象站的多年气象资料, 流域内年降水量 250 ~ 440 mm, 降水年际和年内变化大。夏季多降暴雨, 最大日降水量可达 100 ~ 200 mm, 占全年降水 60% ~ 75%, 尤以 8 月为多。降水年际变率大, 多雨年为少雨年 2 ~ 4 倍。多年平均蒸散发量约为 2 180 mm, 其中 5 ~ 6 月蒸散发量最高, 约为 350 mm/月。流域内日平均气温为 8.1 °C, 日最高气温为 38.6 °C(1935 年), 日最低气温为 -32.7 °C(1954 年)。流域内的植被以旱生的草本、灌木为主, 其次为人工种植的旱柳、杨树等乔木。

## 2 数据来源与研究方法

该研究采用 NASA(美国国家航天局)EOS 卫星提供的 MODIS 数据产品(该数据来自于 <http://ladsweb.nascom.nasa.gov/>), 由于该数据包含的信息大、可免费获取、数据质量较高, 已成为研究区域植被覆盖变化的基础数据。该研究采用 MODIS13Q1 数据产品, 为栅格化的 NDVI 数据, 数据格

**基金项目** 中央高校基本科研业务费项目(自然科学类 2013G1502040); 陕西省矿产资源勘察与综合利用重点实验室项目(2015005)。

**作者简介** 潘桂行(1987 -), 男, 河北威县人, 硕士研究生, 研究方向: 地下水与生态环境保护。\* 通讯作者, 副教授, 博士, 硕士生导师, 从事水资源与环境科学等方面教学。

**收稿日期** 2015-09-23

式为 EOS-HDF。该数据已对植被指数进行了一定的数据修正,其时间分辨率为 16 d,空间分辨率为 250 m。

为减少数据处理的工作量,又能客观地表示出植被生长的状况,该研究采用整个植被生长期的 14 期影像数据产品(第 97~305 天)。运用 ENVI 软件对数据进行投影变换等处理,采用最大合成法(Maximum Value Composites, MVC)生成年度  $NDVI_{mvc}$  数据,作为该年的 NDVI 值。最大合成法可有效消除云的遮蔽、大气气溶胶的影响以及太阳高度角等的干扰<sup>[13]</sup>,能够更精确反映地表的 NDVI 值。

Stow 等运用线性回归方程的斜率来分析每个像元 NDVI 的年度变化趋势<sup>[14-15]</sup>,该研究使用该方法模拟 2000~2014 年间  $NDVI_{mvc}$  的变化趋势,其计算公式为:

$$\text{slope} = \frac{n \times \sum_{i=1}^n (i \times NDVI_{mvc}^i) - \sum_{i=1}^n i \sum_{i=1}^n NDVI_{mvc}^i}{n \times \sum_{i=1}^n i^2 - (\sum_{i=1}^n i)^2} \quad (1)$$

式中,slope 值为像元点趋势线的斜率;变量  $i$  为 1~15 年的年序号; $NDVI_{mvc}^i$  为第  $i$  年  $NDVI_{mvc}$ 。运用 ENVI 中的 Band Math 功能,计算出 2000~2014 年间  $NDVI_{mvc}$  的变化趋势,即 slope。其中,slope > 0 表明该像元的  $NDVI_{mvc}$  在 15 年间是增加的,反之则是降低的。由于该趋势线斜率并不是简单首尾两年  $NDVI_{mvc}$  的斜率,可更加客观反映植被覆盖度的变化趋势。

利用转移矩阵法计算不同等级植被覆盖度的变化,然后将不同阶段的植被等级影像进行两两叠加计算,从而得出各等级植被覆盖度转移矩阵,并计算出各等级植被覆盖度在不同阶段的变化结果。

### 3 结果

**3.1  $NDVI_{mvc}$  空间分布特征** 图 1 为研究区 2000~2014 年植被生长期(4~10 月)的  $NDVI_{mvc}$  分布图。从图 1 可知, $NDVI_{mvc}$  介于 0~0.75 之间。流域北部的巴音淖尔湖区由于地表水体的存在,植被覆盖度极低, $NDVI_{mvc} < 0.10$ 。 $NDVI_{mvc} < 0.30$  的地区主要分布在北部、中南部以及流域分水岭地区,大部分为风积沙丘地貌区,在这些地区植被覆盖度较差; $NDVI_{mvc}$  介于 0.30~0.40 的区域主要分布在流域的中部,这些地区是地形较为平缓的沙丘区; $NDVI_{mvc}$  介于 0.40~0.60 的区域主要分布在湖盆滩地区; $NDVI_{mvc} > 0.60$  的地区主要分布在海流兔河河谷区以及补浪河附近地区,为流域的主要农耕区。总体来看,研究区的植被覆盖南部优于北部,尤其是河谷以及河流两岸滩地地区,植被覆盖最好。

**3.2  $NDVI_{mvc}$  时间变化趋势** 总体上讲,2000 年以来,海流兔河流域年均  $NDVI_{mvc}$  值呈增加趋势,年均增量约 0.006 5 (图 2)。但  $NDVI_{mvc}$  在不同时段内变化特征不同,其中 2000~2003 年呈现较大的波动增长趋势,年均增量约为 0.018;而 2004~2014 年则呈现较小幅度的波动上升趋势,年均增量约为 0.064。

尽管海流兔河流域年  $NDVI_{mvc}$  总体呈现稳定增长趋势,但其变化规律在空间上存在明显差异。为了分析  $NDVI_{mvc}$  的空间变化规律,利用方程 1 计算出各像元的 slope 值(图 3)。从图 3 可知,15 年来海流兔河流域植被覆盖度总体上为增

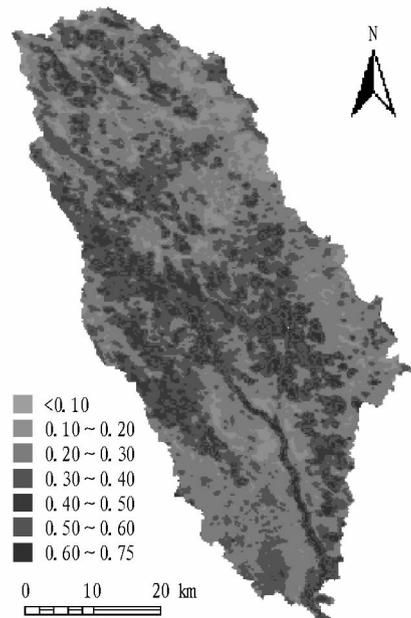


图 1 海流兔河流域  $NDVI_{mvc}$  平均值空间分布

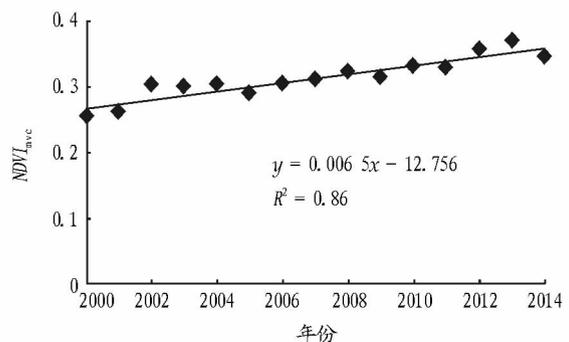


图 2 2000~2014 年  $NDVI_{mvc}$  年际变化趋势

加,仅在小部分区域出现减小。其中, $NDVI_{mvc}$  增大的区域约占流域面积的 97%,降低的区域仅约占总面积的 3%。降低的地方主要为城乡建设用地和工厂建设用地,其对植被覆盖度的破坏极大。同时,该区域在西南部地区大面积开垦耕地也对生态造成一定破坏。

**3.3 不同植被覆盖等级的面积变化** 为了更好地研究 2000~2014 年  $NDVI_{mvc}$  值的分布和变化,同时考虑到现行的我国政府荒漠化监测周期为 5 年,将研究期的 15 年划分为 2000~2004、2005~2009、2010~2014 年 3 个 5 年的小时段。分别统计各时段内  $NDVI_{mvc}$  值的分布情况,然后再比较各时段内  $NDVI_{mvc}$  的转移变化。为了有效避免部分栅格区域因异常年份扰动而引起的  $NDVI_{mvc}$  异常值的影响,笔者以每 5 年的均值作为各时段  $NDVI_{mvc}$  值。该值可以较为客观实际地反映研究区近 15 年以来的不同 NDVI 等级的变化差异。

利用转移矩阵法计算不同等级植被覆盖度的变化,从而计算出各等级植被覆盖度在不同阶段的变化情况,计算结果见表 1。从表 1 可知,第 1~2 时段  $NDVI_{mvc} < 0.20$  的区域变化显著,由 20.8% 下降到 9.7%,表明植被覆盖较差的区域明显减少, $NDVI_{mvc}$  其他区间所占面积均有不同程度的增加。这就表明在第 1~2 时段内,研究区  $NDVI_{mvc}$  在总体上是增大

的,意味着植被覆盖度明显增加,植被生态环境好转;第2~3时段,NDVI<sub>mvc</sub> < 0.20 的区域继续下降,NDVI<sub>mvc</sub> 介于 0.20 ~ 0.40 的面积也开始下降,向 NDVI<sub>mvc</sub> 较大的等级转化。在第2~3时段 NDVI<sub>mvc</sub> 显著增大,表明区域生态环境持续好转。

表1 各时段5年平均NDVI<sub>mvc</sub>值的分布情况

年份	NDVI <sub>mvc</sub> 值在各区间的面积百分比//%			
	<0.20	0.20~0.40	0.40~0.55	>0.55
2000~2004	20.8	67.2	10.0	2.0
2005~2009	9.7	74.7	12.4	3.2
2010~2014	3.5	72.3	20.2	4.0

对比图3和图4可更加直观地看出研究区3个时段内NDVI<sub>mvc</sub>空间变化规律。第1~2时段NDVI<sub>mvc</sub>降低的区域约为0.9%,基本稳定的部分为86.9%,增加的部分为12.2%。第2~3时段NDVI<sub>mvc</sub>降低的区域为1.5%,保持稳定的部分约75.5%,增加的部分约23.0%。对图4a和图4b进一步进行统计分析发现,第2时段比第1时段平均NDVI<sub>mvc</sub>增加了0.026,第3时段比第2时段增加了0.033。空间上,NDVI<sub>mvc</sub>降低的区域主要分布在西北部地区,局部分布在分水岭

地区。

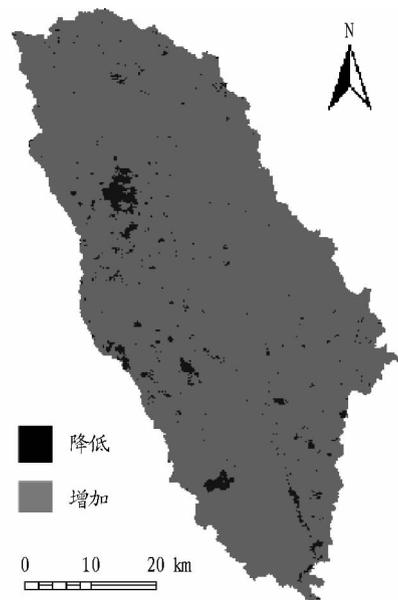
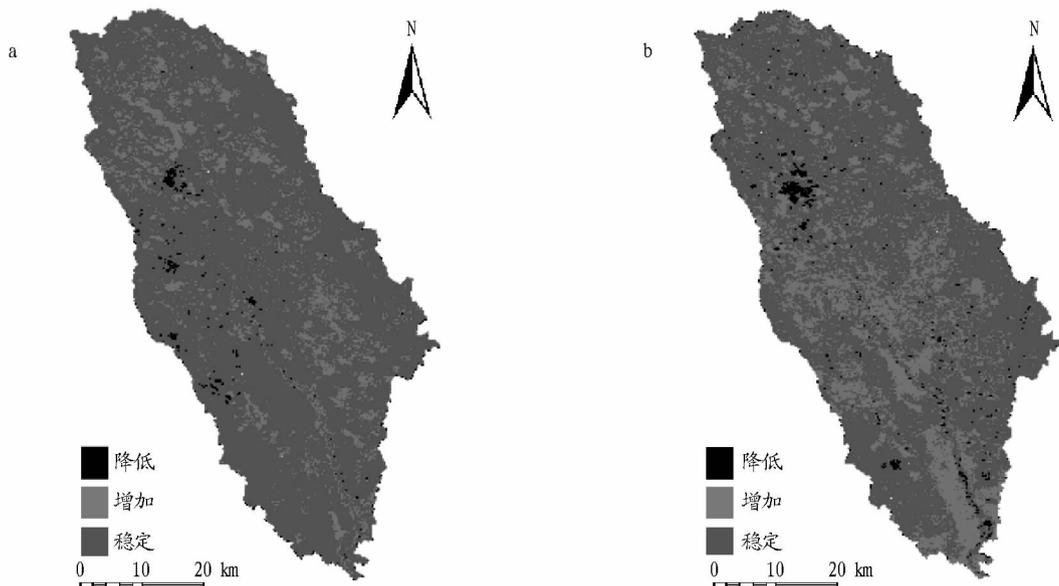


图3 2000~2014年NDVI<sub>mvc</sub>变化趋势空间分布



注:a.第2时段与第1时段差值的空间分布;b.第3时段与第2时段差值的空间分布。

图4 各时段5年平均NDVI<sub>mvc</sub>变化的空间分布

#### 4 植被覆盖变化的驱动因素分析

**4.1 自然因素对植被覆盖度变化的影响** 气象因素往往是区域植被变化的主要自然因素,尤其是降水与气温<sup>[16]</sup>。该研究利用乌审旗气象资料。2000~2014年该区域年降水量和气温波动变化,而NDVI<sub>mvc</sub>呈现出不断上升的趋势。从图5可知,NDVI<sub>mvc</sub>与年降水量的相关系数为0.24,相关性较差;而与年均气温相关系数为0.01,相关性极差。因此,该区植被变化与自然因素(降水和温度)的相关性并不明显,自然因素并不是驱动植被覆盖度变化的主要原因。

**4.2 人为因素对植被覆盖度变化的影响** 自2000年以来,该区实施了一系列的生态环境恢复治理工程,如退耕还林还草、飞播造林、天然林保护以及禁牧等。为了查明生态恢复

工程与植被恢复的关系,利用流域所在的榆林市榆阳区 and 鄂尔多斯市乌审旗的统计数据,分析了海流兔河流域植树造林与植被覆盖变化的关系。图6为海流兔河流域榆阳区部分(榆阳区国民经济和社会发展统计公报2003~2013年数据)和乌审旗部分(乌审旗国民经济和社会发展统计公报2007~2013年数据)植树造林面积与NDVI的相关性分析,相关系数分别为0.80和0.85,且通过了0.05的置信度检验。从图6可知,研究区植树造林与NDVI相关性较好,是植被覆盖度增加的主要原因。

#### 5 讨论

(1)2000年以来,我国西部生态环境总体上呈现不断改善的趋势<sup>[17-19]</sup>。前人研究结果表明,这种改善表现在植被

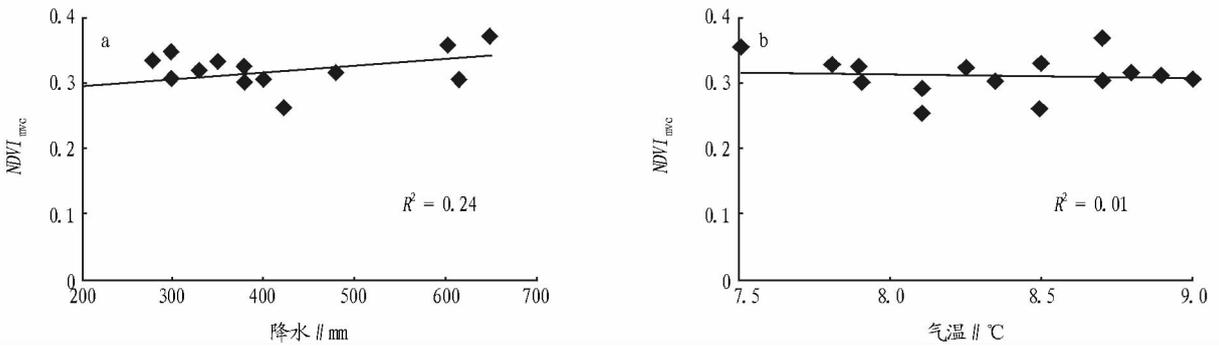


图 5 NDVI<sub>Mvc</sub>与年降水量(a)、年均温(b)的相关性

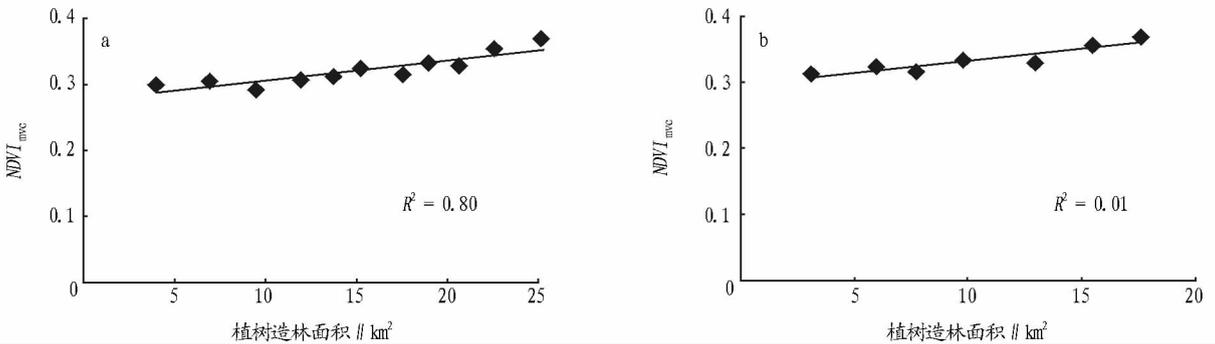


图 6 植树造林面积与 NDVI<sub>Mvc</sub> 的相关性

注:a.海流兔河流域榆阳区部分;b.海流兔河流域乌审旗部分。

的低覆盖区不断减小,中、高覆盖区不断增加<sup>[20-21]</sup>,该研究结果也证实了前人的结论。但在局部地区也出现了植被退化的现象,如在毛乌素沙地的局部地区<sup>[22]</sup>和祁连山的部分河谷区<sup>[23]</sup>。该研究也发现,在海流兔河流域的河谷区出现了植被覆盖度减小的情况。造成退化的原因主要是这些地区人口增加、人类活动加剧造成的,虽然面积不大,但局部退化也应加强关注。

(2)前人的研究结果表明,造成植被覆盖度变化的主要因素包括降水、气温和人类活动<sup>[23]</sup>。在人类活动较少的地区(如青藏高原地区),气象因子是短期或长期植被覆盖度变化的主要原因<sup>[9]</sup>。而在人类活动剧烈的地区,植被覆盖度变化的受控因素比较复杂。植被覆盖度的短期变化(月变化或是季节变化)主要是受气象条件(如降雨和气温)控制<sup>[23]</sup>,而植被覆盖度的稳定增长一般是人为因素造成的,如在西北地区普遍观测到的植被覆盖度增加就与生态恢复工程具有密切的关系。

## 6 结论

(1)研究区 NDVI<sub>Mvc</sub> 值主要分布在 0.20~0.40 之间,约占区域总面积的 75.3%。分水岭及风积沙丘区为该区域植被覆盖度低的主要地区,湖盆滩地为植被覆盖中度地区,河流谷底及补浪河农耕区为植被覆盖最好的地区。

(2)2000~2014 年的 15 年间,研究区 NDVI<sub>Mvc</sub> 平均值呈现不断上升趋势,年均增量 0.006 5,但占总面积 3.1% 的区域仍呈现不断降低的趋势。

(3)研究区 NDVI<sub>Mvc</sub> 值不断增加,预示植被覆盖度发生正向的转移,植被覆盖等级不断在发生优化,因而海流兔河流

域植被覆盖度呈良性发展的趋势。

(4)自然因素的变化并不是研究区 2000~2014 年间植被覆盖度变化的主要原因。自 2000 年来,大规模的植树造林在一定程度上缓解了区域生态环境压力,揭示人类活动是该区域植被覆盖度变化的主要因素。

## 参考文献

- [1] 于小飞,孙睿,陈永俊,等.乌审旗植被覆盖度动态变化及其与降水量的关系[J].资源科学,2006,28(4):31-37.
- [2] 信忠保,许炳心,郑伟.气候变化和人类活动对黄土高原植被覆盖变化的影响[J].中国科学(D辑,地球科学),2007,37(11):1054-1514.
- [3] 李明杰,侯西勇,应兰兰,等.近十年黄河三角洲 NDVI 时空动态及其对气温和降水的响应特征[J].资源科学,2011,33(2):322-327.
- [4] 李震,严福礼,范祥涛.中国西北地区 NDVI 变化及其与温度和降水的关系[J].遥感学报,2005,5(3):308-313.
- [5] 严建武,李春娥,袁雷,等.EOSMODIS 数据在草地资源监测中的应用进展综述[J].草业科学,2008,25(4):1-9.
- [6] 张宏斌,唐华俊,杨桂霞,等.2000-2008 年内蒙古草原 MODIS NDVI 时空特征变化[J].农业工程学报,2009,25(9):168-175.
- [7] 刘芳,张红旗,董光龙.伊犁河谷草地植被 NDVI 变化及其降水敏感性特征[J].资源科学,2014,36(8):1724-1731.
- [8] PIAO S L, MOHAMMAT A, FANG J Y, et al. NDVI-based increase in growth of temperate grasslands and its responses to climate changes in China [J]. Global environmental change, 2006, 16(4): 340-348.
- [9] 杨元合,朴世龙.青藏高原草地植被覆盖变化及其与气候因子的关系[J].植物生态学报,2006,30(1):1-8.
- [10] CARLSON T N, RIPLEY D A. On the relation between NDVI, fractional vegetation cover, and leaf area index [J]. Remote sensing of environment, 1997, 62(3):241-252.
- [11] 赵英时.遥感应用分析原理与方法[M].北京:科学出版社,2003:374-375.
- [12] 金晓娟,张强,杨春杰.海流兔河流域植被分布与地形地貌及地下水水位关系研究[J].地学前缘,2013,20(3):227-233.
- [13] 朴士龙,方精云.1982~1999 年我国陆地植被活动对气候变化响应的季节差异[J].地理学报,2003,58(1):119-125.

(下转第 271 页)

表 2 2005~2013 年沙坡头自然保护区各生态子系统的生态价值变化

生态子系统	生态价值			变化//%		
	2005 年	2010 年	2013 年	2005~2010 年	2005~2013 年	2010~2013 年
林地	13.87	20.03	24.56	6.16	10.69	4.53
耕地	1.46	3.11	3.07	1.64	1.61	-0.04
水面	2.59	4.17	5.01	1.58	2.42	0.84
建设用地	0.02	0.03	0.05	0.01	0.03	0.02
园地	0.73	1.28	1.36	0.55	0.63	0.08
未利用土地	2.58	2.08	1.83	-0.50	-0.74	-0.25
草地	0.54	0.20	0.20	-0.34	-0.34	0
区域	3.11	4.41	5.15	1.30	2.04	0.74

(2) 通过多样性和集中性描述沙坡头自然保护区土地利用结构的动态变化程度,结果显示 2005~2013 年保护区多样性指数、多样化指数、均匀度指数均增加,优势度指数降低,说明沙坡头自然保护区土地利用类型分配趋于多样化和平均化,该荒漠生态系统的复杂性和稳定性有所增强。

(3) 2013 年沙坡头自然保护区的生态价值为 5.15,比 2005 年增加了 2.04,其中林地的增加最大,水面和耕地次之。2005~2013 年沙坡头自然保护区土地利用生态价值总体上呈快速增长态势。该保护区生态价值并没有随着时间的变化而减少,沙坡头自然保护区荒漠生态系统已越来越健康。

#### 参考文献

[1] RAPPORT D J. What constitutes ecosystem health? [J]. *Perspectives in biology and medicine*, 1989, 33: 120-132.

[2] 侯扶江,徐磊. 生态系统健康的研究历史与现状[J]. *草业学报*, 2009, 18(6): 210-216.

[3] 马克明,孔红梅,关文彬,等. 生态系统健康评价:方法与方向[J]. *生态学报*, 2001, 21(12): 2112-2113.

[4] 王成,魏朝富,高明. 土地利用结构变化对区域生态健康的影响:以重庆市沙坪坝区为例[J]. *应用生态学报*, 2005, 16(12): 2296-2298.

[5] JANSEN L J M, GREGORIO A D. Parametric land cover and land use classifications as tools for environmental change detection [J]. *Agricultural ecosystems & environment*, 2002, 91: 89-100.

[6] SEMWAL R L, NAUTIYAL S, SEN K K, et al. Patterns and ecological implications of agricultural land-use changes: A case study from central Himalaya, India [J]. *Agricultural ecosystem & environment*, 2004, 102: 81-92.

[7] O'NEIL R V, HUNSAKER C T, JONES K B, et al. Monitoring environmental quality at the landscape scale [J]. *Bop Science*, 1997, 47(8): 513-519.

[8] 程琳,李锋,邓华锋. 中国超大城市土地利用状况及其生态系统服务动态演变[J]. *生态学报*, 2011, 31(20): 6194-6202.

[9] 刘春雨,董晓峰,刘英英. 西北干旱区土地利用结构变化及生态服务价值的响应:以民乐县为例[J]. *兰州大学学报(自然科学版)*, 2013, 49(5): 675-687.

[10] 陆丽珍,詹远增,叶艳妹,等. 基于土地利用空间格局的区域生态系统健康评价:以舟山岛为例[J]. *生态学报*, 2010, 30(1): 245-251.

[11] 李锋,王如松. 城市绿地系统的生态服务功能评价、规划与预测研究[J]. *生态学报*, 2003, 23(9): 1930-1934.

[12] 孙继周,吴洪斌,刘荣国,等. 沙坡头自然保护区植物群落的消长变化及可持续发展研究[J]. *西北植物学报*, 2003, 23(4): 544-549.

[13] 刘道发,黄族豪,吴洪斌,等. 宁夏沙坡头国家级自然保护区动物资源的消长[J]. *生物多样性*, 2002, 10(2): 156-162.

[14] 张迎梅,王香亭. 宁夏沙坡头自然保护区鸟类区系与沙漠治理[J]. *兰州大学学报(自然科学版)*, 1990, 26(3): 88-98.

[15] 来婷婷,王乃昂,高翔,等. 1990-2011 年沙坡头自然保护区景观变化[J]. *干旱区地理*, 2014, 37(1): 115-124.

[16] 华东师范大学河口海岸学国家重点实验室,宁夏中卫沙坡头国家级自然保护区管理局. 气候变化对宁夏沙坡头国家级自然保护区生物多样性影响评估与对策(一期) [R]. 宁夏中卫沙坡头国家级自然保护区管理局, 2014: 22.

[17] 刘耀彬,刘卫东,谭木魁. 城乡土地利用结构合理性评判研究:以舟山市定海区为例[J]. *人文地理*, 2008(3): 46.

[18] 熊琛,李名勇. 福建省土地利用结构合理性动态分析[J]. *亚热带水土保持*, 2010, 22(3): 6-7.

[19] 武建军,杨思全. 基于模糊模式识别理论的土地利用合理性分析[J]. *地理科学进展*, 2002, 21(3): 230.

[20] 刘艳芳,明冬萍,杨建宇. 基于生态绿当量的土地利用结构优化[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2002, 27(5): 493-500.

[21] 赵丹,李锋,王如松. 基于生态绿当量的城市土地利用结构优化:以宁国市为例[J]. *生态学报*, 2011, 31(20): 6243-6246.

[22] 孙建卫,黄贤金. 基于生态绿当量的江苏省土地利用现状研究 [M] // 刘彦随,胡宝清,杨子生. 中国土地资源战略与区域协调发展研究. 北京:气象出版社, 2006: 60-63.

[23] 毛文永. 生态环境影响评价概论(修订版) [M]. 北京:中国环境科学出版社, 2007: 67-69, 123-124.

[24] 唐礼俊. 余山风景区景观空间格局分析及其规划初探[J]. *地理学报*, 1998, 53(5): 429-437.

[25] 贾生元. 生态影响评价理论与技术 [M]. 北京:中国环境出版社, 2013: 124-125.

[26] 李杰. 土地利用图的评价方法[J]. *宁夏大学学报(自然科学版)*, 1996, 17(2): 65.

[27] 陈士银,刘耀林,周飞. 湛江市土地利用结构及生态服务价值研究[J]. *地理与地理信息科学*, 2007, 23(3): 83-85.

[28] 周生路,黄劲松. 东南沿海低山丘陵地区土地利用结构的地域分异研究:以温州市为例[J]. *土壤学报*, 2003, 40(1): 38, 43.

[29] RAPPORT D J, WHITEFORD W G. How ecosystems respond to stress: Common properties of arid and aquatic system [J]. *Bioscience*, 1989, 49: 193-203.

[30] COSTANZA R, D'ARCE R, DE GROOT R, et al. The value of the world's ecosystem services and nature [J]. *Nature*, 1997, 387: 253-260.

(上接第 267 页)

[14] 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(3): 281-308.

[15] HOPE A S, BOYNTON W L, STOW D A. Interannual growth dynamics of vegetation in the Kuparuk river watershed, Alaska based on the normalized difference vegetation index [J]. *International journal of remote sensing*, 2003, 24(17): 3413-3425.

[16] 徐兴奎,林朝晖,薛峰,等. 气象因子与地表植被生长的相关性分析[J]. *生态学报*, 2003, 23(2): 221-230.

[17] 张茂省,卢娜,陈劲松. 陕北能源化工基地地下水开发的植被生态效应及对策研究[J]. *地质通报*, 2008, 27(8): 1299-1312.

[18] 张茂省,卢娜. 植被生态对气候变化和人类活动的响应[J]. *地质通报*, 2013, 32(5): 909-918.

[19] 侯元香,罗德. 退耕还林工程在改善西部生态环境的作用分析[J]. *防护林科技*, 2008(2): 47-49.

[20] 刘静,银山,张国胜,等. 毛乌素沙地 17 年间植被覆盖度变化的遥感监测[J]. *干旱地区资源与环境*, 2009, 23(7): 162-167.

[21] 张宏斌,唐华俊,杨桂霞,等. 2000-2008 年内蒙古草原 MODIS NDVI 时空特征变化[J]. *农业工程学报*, 2009, 25(9): 168-175.

[22] 徐浩杰,杨太何,曾彪. 2000-2010 年祁连山植被 MODIS NDVI 的时空变化及影响因素[J]. *干旱区资源与环境*, 2012, 26(11): 87-91.

[23] 白建军,白江涛,王磊. 2000-2010 年陕北地区植被 NDVI 的时空变化及其与区域气候的关系[J]. *地理科学*, 2014, 34(7): 882-888.