

陕北红碱淖流域景观格局变化研究

谭良玺¹, 张会英¹, 张瑞芳¹, 罗竹梅², 李旭祥¹, 刘萍萍¹

(1. 西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安; 2. 陕西省治沙研究所沙产业室, 719000, 陕西榆林)

摘要: 选用1986年、1989年、1999年和2002年4个时期的Landsat-TM/ETM的遥感影像,利用ERDAS IMAGINE软件和fragstats3.3景观格局分析系统定量分析了陕北红碱淖流域土地利用/土地覆盖和景观格局的变化特征。结果表明:1986~2002年,红碱淖流域的密灌、林草地和其他水域面积分别增加了15.45%、30.33%和106.16%,沙丘稀灌、耕地和湖泊面积分别减少了40.05%、10.10%、24.33%,说明流域内湖泊退化严重,沙丘稀灌和耕地主要向密灌和林草地景观转化;流域景观指数中,流域平均斑块面积减少,斑块总数、形状指数、多样性指数增加,说明流域景观破碎化程度加剧,流域景观类型增加;退耕还林工程的实施使流域内林草地斑块面积增大;流域上游修建水库拦蓄和农灌开采地表水量是湖泊面积减少的主要原因,人类社会活动是流域景观格局变化的主要因素。

关键词: 红碱淖流域;土地利用/土地覆盖;景观格局

中图分类号: Q149 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2010)03-0126-07

Study on the Landscape Pattern Change of Hongjiannao Watershed in Northern Shaanxi Province

TAN Liangxi¹, ZHANG Huiying¹, ZHANG Ruifang¹, LUO ZHumei², LI Xuxiang¹, LIU Pingping¹

(1. School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 2. Office of Sand Industry, Institute of Desertification Control of Shaanxi Province, Yulin, Shaanxi 719000, China)

Abstract: With ERDAS IMAGINE and the fragstats3.3 landscape pattern analysis system, dynamics and its impacting factors of the land use/land cover and landscape pattern in Hongjiannao watershed were quantitatively analyzed with some landscape indices. The results show that during 1986-2002, the areas of dense shrub, forest/infield and other water types increased by 15.45%, 30.33%, and 106.16%, respectively. The areas of arable land, dune shrub and the lakes decreased by 40.05%, 10.10%, and 24.33%, respectively, showing that the lakes were seriously degraded and the dune sparse shrub and cultivated land primarily transformed to dense shrub and forest meadow. Some landscape pattern indices increased, such as the total number of patches, shape index, diversity index, but the average patch area decreased, indicating that the degree of watershed landscape fragmentation and the landscape types increased. With the implementation of the returning farmland to forest (grass) project, the landscape fragmentation was mitigated during 1999-2002. Our conclusion is that the construction of reservoirs upstream and agricultural irrigation lead primarily to the reduction of lake area and human socio-economic activity has the main influence on the landscape pattern changes in the Hongjiannao watershed.

Keywords: Hongjiannao watershed; land use/land cover; landscape patterns

收稿日期: 2009-08-27. 作者简介: 谭良玺(1983—),女,硕士生;刘萍萍(联系人),女,博士,讲师. 基金项目: 陕西省自然科学基金资助项目(2007D08);陕西省“13115”重大科技专项基金资助项目(2009ZDKG-67);陕西省科技攻关资助项目(2008K08-03).

人类对土地的利用首先导致的是地表自然形态改变,进而影响地表净第一生产力,并最终作用于生物地球化学循环过程,导致全球或区域性环境变化^[1]. 土地利用结构变动是宏观土地利用变化的主要表现之一^[2]. 研究景观在时间和空间上的结构与量上的动态变化趋势,是研究内部驱动机制,预测未来变化方向的前提^[3]. 景观格局的演变直接反映出流域环境时空动态特征^[4]. 主要景观类型的转化过程,更能直接体现景观演化的方向、速度和空间差异,并易于从中剖析引起这种演变的驱动力因子^[5],清楚地揭示景观内在规律性. 因此,分析景观格局的变化,对了解区域生态环境变化十分重要^[6]. 目前,基于遥感和GIS技术运用景观生态学中的景观指数分析,已被广泛应用于湿地景观格局、格局动态变化研究以及驱动力的分析之中^[7].

陕北能源化工基地位于我国水土流失和风沙危害最严重的陕北黄土丘陵区 and 长城沿线风沙滩区,是我国生态环境最脆弱的地区之一,随着国家退耕还林(草)工程的实施,区域植被覆盖明显增加. 然而,由于区内社会经济活动的发展和能源基地的大规模建设,区域地下水位下降,水资源供需矛盾突出^[8]. 位于陕北能源化工基地的红碱淖是具有典型意义的沙漠湖泊景观. 湖泊不仅对气候变化有很好的指示作用,对整个流域环境变化也有很好的综合指示作用^[9]. 因此,本文依据景观生态学的原理和研究方法,结合遥感和GIS技术,对红碱淖流域土地利用/土地覆盖变化和流域景观格局进行系统研究,探讨了1986~2002年红碱淖流域景观格局特征,揭示自然和人为活动对红碱淖流域生态景观格局和动态的影响,为陕北能源化工基地脆弱生态环境的保护、建设和实现可持续发展提供决策支持^[10].

1 研究区概况

红碱淖流域位于 $109^{\circ}31' \sim 110^{\circ}04' \text{E}$, $38^{\circ}53' \sim 39^{\circ}20' \text{N}$,流域面积约 $1\,500 \text{ km}^2$,包括陕西省神木县尔林兔镇、中鸡镇,内蒙古自治区伊金霍洛旗新街镇和台格苏木4个镇. 流域内居民约为4.5万人. 当地多年平均降水约为 400 mm ,年平均温度为 9.5°C ,年平均风速为 2.3 m/s . 流域内主要生长有沙生地带性植被,盖度平均在30%左右. 红碱淖是典型的内陆封闭流域湖泊,湖水依赖时令河、降水和地下水补给,无流出^[11]. 红碱淖湖面海拔高程为 $1\,200 \text{ m}$,东西最宽处为 10 km ,南北最长处为 12 km ,湖岸线长 43.7 km ,最大水深 12 m . 20世纪70年代,该湖

泊面积基本稳定在 60 km^2 ,水量约 4.9 亿 m^3 . 20世纪90年代,尤其是1995年后湖面面积由1986年的 56 km^2 下降为2006年的 40 km^2 ,减少28.6%^[12]. 水量由 4.9 亿 m^3 下降至 3.2 亿 m^3 ,约减少34.7%^[11].

2 研究方法

2.1 遥感图像处理及信息提取

选择1986年、1989年、1999年、2002年4个时期的Landsat5和Landsat7的TM和ETM+遥感影像数据,轨道号为127-33. 接受时间均在水分充足、植被情况比较好的8、9月份. 采用Erdas8.7对4期遥感数据进行预处理,包括ETM+二进制数据导入、多波段图像的彩色合成、图像裁切、图像的几何校正等^[13]. 在参考我国土地利用类型分类体系的基础上,结合红碱淖流域特点,采取目视判别和野外调查的方法,建立研究区影像各类地物解译标志. 基于分类模板选择监督分类方法,将流域土地利用/土地覆盖划分为湖泊、密灌、沙丘稀灌、林草地、耕地和其他水域共6类(见图1). 由于4期遥感图像年份及季节时间不完全相同,且受当年气候及拍摄条件等影响,导致难以有效地进行沼泽和河流解译标识,将河流、沼泽合并为其他水域进行讨论.

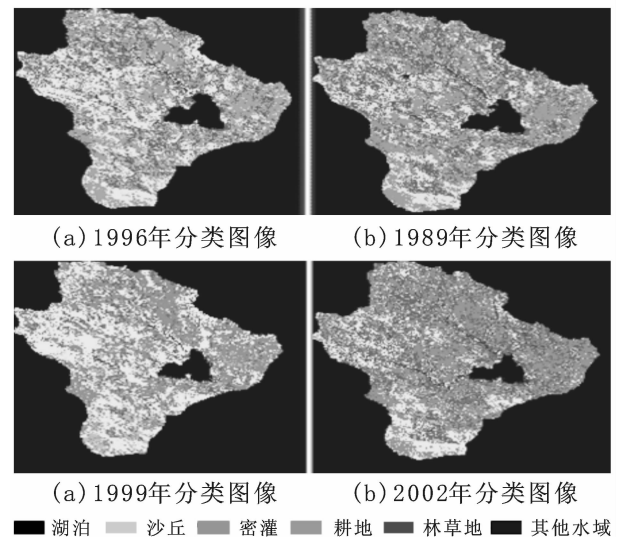


图1 1986~2002年土地利用/土地覆盖分类图

2.2 流域景观格局指数计算

运用fragstats3.3景观格局分析系统,计算流域景观斑块面积、数量、形状指数、分维数指数、多样性指数等多种景观格局指数^[14],其中景观多样性常用Shannon-Weaner指数来描述. Shannon-Weaner多样性指数反映了景观的复杂性;分维数反映出空

间实体几何形状的不规则性.

Shannon-Weaner 多样性指数为

$$H=-\sum_{i=1}^m(p_i)\text{lb}_2(p_i) \tag{1}$$

式中: p_i 为第 i 类景观所占的面积比例; m 为景观类型数目^[15-16].

分维数可以通过下式计算得出

$$P=kA^{D/2} \tag{2}$$

式中: P 为斑块的周长; A 为斑块面积; D 为分维数; k 为常数^[17].

3 结果与讨论

3.1 流域土地利用/土地覆盖变化

遥感图像经过预处理和监督分类后,利用 GIS 软件统计得到在 1986 年、1989 年、1999 年、2002 年 4 个时期中,红碱淖流域湖泊、密灌、沙丘稀灌、林草地、耕地和其他水域共 6 种土地利用类型面积的变化(见图 2).

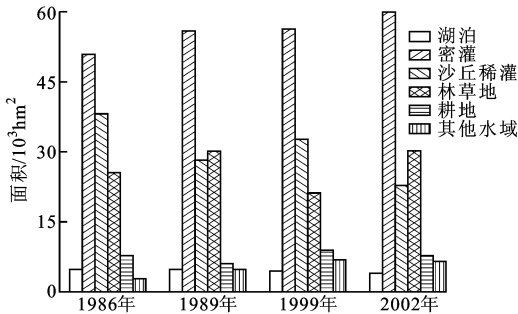


图 2 1986~2002 年红碱淖流域不同土地利用/土地覆盖类型面积的变化

流域土地利用/土地覆盖变化结果表明:1986~2002 年,流域内密灌、林草地、其他水域面积分别增加 8 249.3 hm²、4 600.8 hm² 和 3 847.64 hm²,即分别增加了 15.45%、30.33%、106.16%,年增加率分别为 0.97%、1.90%和 6.64%;沙丘稀灌、耕地、湖泊面积分别减少 15 433 hm²、88.77 hm² 和 1 176.02 hm²,即分别减少了 40.05%、10.10%、24.33%,年减少率分别为 2.50%、0.07% 和 1.52%. 流域内不同土地利用类型的转化特征表现为:1986~1989 年,沙丘稀灌和耕地主要向密灌和其他水域类型转化,反映了这一时期土地利用/土地覆盖主要受到自然因素的影响;1989~1999 年林草地主要向耕地和其他水域土地类型转化,反映了这一时期人类加大了对土地资源的开发利用;1999~

2002 年,沙丘稀灌和耕地主要向林草地转化,反映了这一时期国家退耕还林(草)工程的实施对流域土地利用/土地覆盖变化的影响. 但是,1986~2002 年流域内湖泊面积从 5 222.45 hm² 减小到 4 046.43 hm²,尤其是在 1999~2002 年,湖泊面积年减少率达到 3.44%,反映了这一时期红碱淖湖泊退化严重,水量减少明显.

流域土地利用动态度变化分析表明(见表 1),流域各种土地利用变化速率的大小排序为其他水域>沙丘稀灌>林草地>湖泊>密灌>耕地. 其中,林草地、沙丘和湖泊 3 种土地利用类型动态度在 1999~2002 年最大,其他水域、耕地和密灌 3 种土地利用类型动态度在 1986~1989 年最大,流域综合土地利用类型动态度变化在 1999~2002 年最大,表明这一时段人类活动对流域土地利用/土地覆盖的影响作用最强. 同时,该时期流域内林草地的土地利用类型动态度达到了 14.27%,反映出国家退耕还林(草)工程的实施这一人为因素对流域土地利用/土地覆盖变化的作用明显.

表 1 土地利用类型年变化率与综合土地利用动态度

土地利用 类型	年变化率/%			
	1986~1989	1989~1999	1999~2002	1986~2002
湖泊	-1.39	-0.98	-3.44	-1.52
密灌	3.38	0.01	1.72	0.97
沙丘	-8.79	1.59	-9.84	-2.50
林草地	5.77	-2.98	14.27	1.90
耕地	-6.00	4.49	-5.60	-0.07
其他水域	23.02	4.24	-1.78	6.64
综合土地 利用动态度	2.98	0.73	3.06	0.79

3.2 流域景观变化

1986~2002 年红碱淖流域景观变化特征分析(见图 3)表明,1986~1999 年红碱淖流域斑块平均面积减少 2.812 9 hm²,斑块总数增加 3.132 1 万个,说明流域景观破碎化程度加剧,景观生态系统退化,这主要是人类活动加剧了人为景观对自然生态系统的替代所致. 1999~2002 年流域景观斑块平均面积增加 0.004 hm²,斑块总数减少了 78 个,表明 1999 年后流域景观受人为干扰影响破碎化的现象有所改善. 形状指数增加是景观复杂化的表现,总体

上 1986~2002 年流域景观形状指数由 105.643 6 增加到 131.178 6, 其中 1999~2002 年增加幅度最大, 反映流域景观趋向复杂化. 1986~2002 年流域景观 Shannon-Weaner 多样性指数分别由 1.453 7 上升到 1.465 1, 说明流域内景观类型增加, 景观异质性增大, 斑块类型在景观中趋于均匀分布.

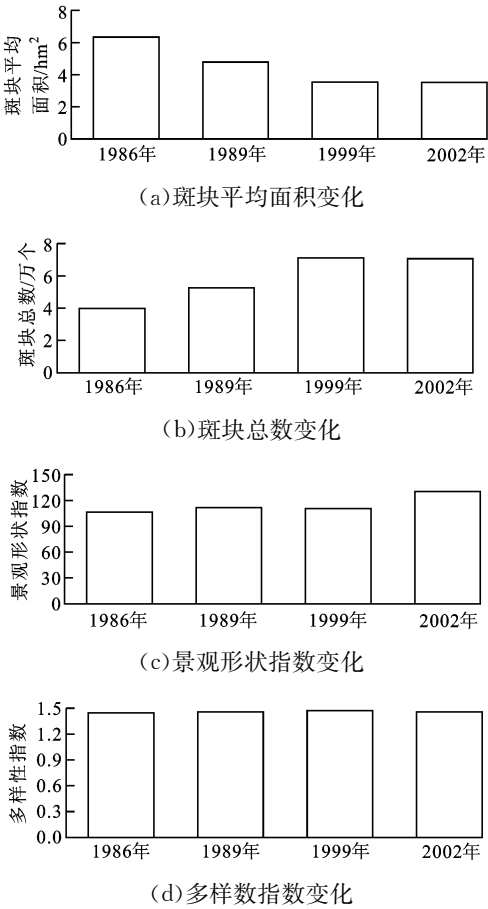


图 3 1986~2002 年红碱淖流域景观格局指数

3.3 流域景观斑块变化

红碱淖流域景观不同斑块类型特征及其变化趋势(见图 4)表明: 1986~2002 年, 红碱淖流域密灌、林草地和沙丘稀灌总斑块面积最大, 反映红碱淖流域以植被景观类型为主的景观特征; 密灌、沙丘稀灌、耕地、其他水域斑块平均面积总体减小, 说明景观破碎化程度加剧; 林草地斑块平均面积在 1999 年后增大, 说明退耕还林(草)工程的实施使流域内自然植被得到恢复; 湖泊斑块平均面积在 1999 年后急剧减小, 说明 1999 年湖泊景观破碎化程度加剧, 特别是在流域的豪赖河和扎莎克河的入湖处(见图 2), 这两个子流域入湖补给量约占子流域入湖补给量的 45%^[11]. 因素分析可知, 1986~2002 年流域温度升高和降水量减少^[18-19], 而扎莎克河流域上游修

建水库拦蓄和农灌开采地表水, 致使减少了约 10⁷ m³ 的入湖补给量^[20]. 同时, 90 年代后流域内大规模抽取地下水进行农灌, 使得湖周围潜水位平均下降 1 m^[21], 说明自然因素是湖泊面积减少的内在原因, 人为因素是湖泊面积减小的主要原因.

一般分维数愈大, 表明斑块形状越复杂, 受到的干扰也越小^[17]. 总体上, 红碱淖流域景观中 6 个不同景观类型分维数均小于 1.5, 说明流域各个景观斑块形状较为规则, 受到的人为干扰较大. 1999~2002 年不同景观斑块类型分维数明显增加, 说明在这一时期景观斑块形状复杂化, 流域景观主要向自然景观转变.

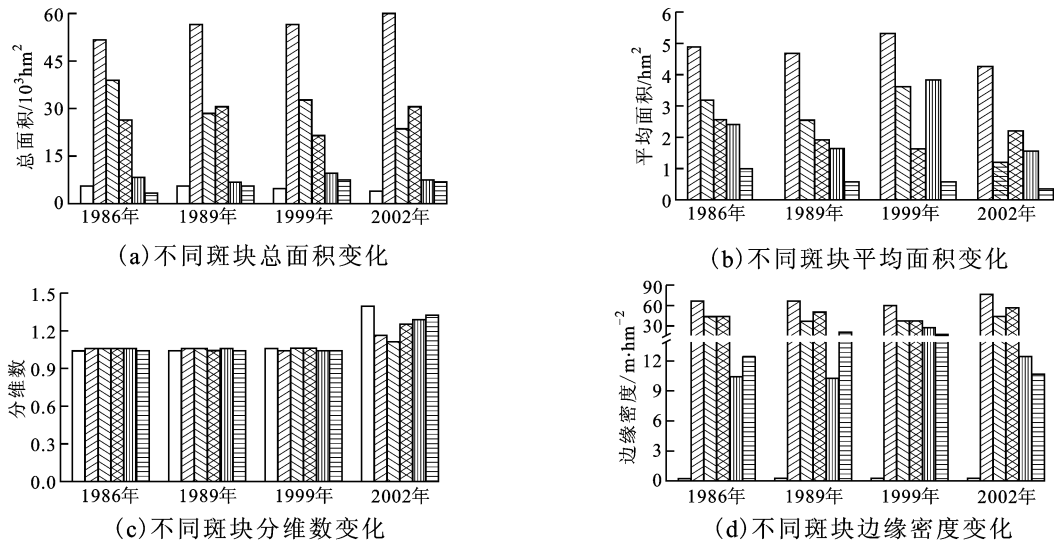
景观类型边缘密度越大, 说明景观类型被边界割裂的程度越高, 反映景观空间结构越复杂, 人类干扰影响越大^[22]. 湖泊、密灌、沙丘稀灌的边缘密度在 1999~2002 年上升, 说明 1999 年后这 3 种景观类型受人类干扰影响大, 边界割裂程度高. 林草地和耕地的边缘密度变化反映了人类活动对流域景观的影响. 1989~1999 年, 林草地边缘密度减小, 耕地边缘密度增加, 反映这一时期人类开发活动增强. 在 1999~2002 年, 林草地边缘密度增加, 耕地边缘密度减小, 表明流域自然植被恢复, 反映了国家退耕还林(草)工程实施的影响.

4 景观格局变化的驱动因素分析

影响景观格局变化的驱动因素可分为自然因素和社会经济因素^[17-18]. 在资源消耗型社会经济增长模式下, 流域内土地利用/土地覆盖和景观格局的变化明显受到人口因子、资源利用政策和经济政策因子的驱动^[5]. 因此, 选取流域内温度、降水、人口、羊存栏数, 参考神木县的工业生产总值与内蒙古自治区境内的生态建设情况来分析景观格局变化的驱动因素(见图 5). 从自然因素来看, 红碱淖流域在 1986~2002 年间, 温度呈上升趋势, 降水量呈下降趋势, 尤其在 1997~2000 年降水明显偏少, 说明红碱淖流域在 1986~2002 年间气候呈现暖干化趋势. 人为因素表明: 1986~1989 年, 流域人口持续增长, 羊只数量小幅上升, 工业总产值基本保持不变, 生态建设面积有所增加, 导致流域内耕地面积减少, 密灌和其他水域面积增加; 1989~1999 年, 流域内人口持续增长, 羊只数量稳定增加, 特别是 1995 年前后流域内的 4 个乡镇大力发展畜牧业^[23], 工业生产总值逐步上升, 这一时期人为活动对景观格局干扰强烈, 导致林草地面积减少, 流域内景观格局破碎化严重; 1999

~2002 年,国家退耕还林(草)工程的实施对景观格局的影响效果显著,土地封育面积大量增加,林草地大幅增加,植被景观类型增加,景观破碎化现象得到缓解.由于人口数量开始下降,而羊只数量急剧上升,工业总产值迅速提高,因此为满足工农业对水资源的需求,湖泊上游大力兴建水库拦截蓄水,流域内

通过抽取地下水来灌溉农田(水浇地)以及绿化建设面积大量增加^[24-25],这些均加速了流域内湖泊面积的萎缩.总之人口、工农业的发展、生态建设和上游水利工程建设等人为因素是影响流域景观格局变化的主要因素.



□ 湖泊 ▨ 密灌沙丘 ▩ 稀灌 ▤ 林草地 ▦ 耕地 ▧ 其他水域
图 4 1986~2002 年红碱淖流域景观斑块特征

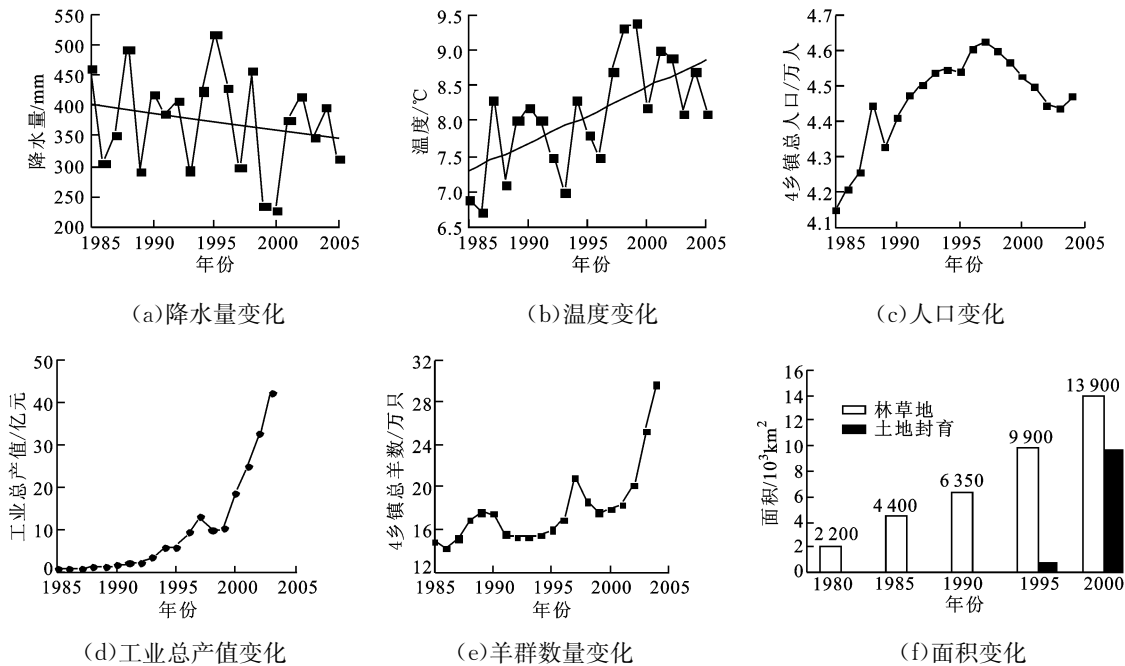


图 5 红碱淖流域景观格局变化驱动因素

5 结 论

1986~2002 年,红碱淖流域密灌、林草地和其

他水域土地利用面积增加,沙丘稀灌、耕地和湖泊面积减少,流域内湖泊退化严重,沙丘稀灌和耕地主要向密灌和林草地景观转化.流域景观斑块总数增大,

斑块平均面积总体减小,反映红碱淖流域总体景观破碎化程度增强,受人为活动干扰程度增大。景观斑块变化分析显示,密灌、沙丘稀灌、耕地、湖泊和其他水域景观的破碎化程度加剧。但是,1999~2002流域景观总体破碎化趋势有所缓解,植被作为优势景观类型增加,林草地斑块面积增加,反映国家退耕还林(草)工程实施的作用。总体上,人口、工农业的发展、生态建设和上游水利工程建设等人为因素对红碱淖流域景观格局变化的影响明显,是影响流域景观格局变化的主要因素。随着社会经济活动对流域景观格局的驱动作用,密灌和林草地斑块面积将不断增加,沙丘稀灌将逐渐减少,植被景观类型得到恢复。但是,如果不采取措施,人类综合开发活动将继续加剧流域内湖泊和其他水域景观类型的退化。

参考文献:

- [1] 孙睿,朱启疆.中国陆地植被净第一性生产力及季节变化研究[J].地理学报,2000,50(1):36-45.
SUN Rui, ZHU Qijiang. Distribution and seasonal change of net primary productivity in China from April, 1992 to March, 1993 [J]. Acta Geographica Sinica, 2000, 50(1):36-45.
- [2] 李平,李秀彬,刘学军.我国现阶段土地利用变化驱动力的宏观分析[J].地理研究,2001,20(2):129-138.
LI Ping, LI Xiubin, LIU Xuejun. Macro-analysis on the driving forces of the land-use change in China [J]. Geographical Research, 2001, 20(2):129-138.
- [3] 王宪礼,胡远满,布仁仓.辽河三角洲湿地的景观变化分析[J].地理科学,1996,16(3):260-265.
WANG Xianli, HU Yuanman, BU Rencang. Analysis of wetland landscape changes in Liaohe delta [J]. Scientia Geographica Sinica, 1996, 16(3):260-265.
- [4] 谢炳庚,李晓青.湿地景观生态学理论和方法研究[M].长沙:中南工业大学出版社,1997.
- [5] 郭跃东,何岩,张明祥,等.洮儿河中下游流域湿地景观演变及驱动力分析[J].水土保持学报,2004,18(2):118-121.
GUO Yuedong, HE Yan, ZHANG Mingxiang, et al. Characteristics and driving forces of wetland changes in middle-lower reaches of Taoer river [J]. Journal of Soil Water Conservation, 2004, 18(2):118-121.
- [6] 高志强,刘纪远,庄大方.基于遥感和GIS的中国土地利用/土地覆盖的现状研究[J].遥感学报,1999,3(2):134-139.
GAO Zhiqiang, LIU Jiyuan, ZHUANG Dafang. The research of Chinese land use/land cover present situations [J]. Journal of Remote Sensing, 1999, 3(2):134-139.
- [7] 刘红玉,张世奎,吕宪国.三江平原湿地景观结构的时空变化[J].地理学报,2004,59(3):391-400.
LIU Hongyu, ZHANG Shikui, LYU Xianguo. Wetland landscape structure and the spatial-temporal changes in 50 years in the Sanjiang plain [J]. Acta Geographica Sinica, 2004, 59(3):391-400.
- [8] 张茂省,侯光才.陕北能源化工基地地下水特征与勘察思路[J].地下水,2004,26(4):65-67.
ZHANG Maosheng, HOU Guangcai. Groundwater characteristics and investigation method in the northern Shaanxi energy & chemical industry base, China [J]. Ground Water, 2004, 26(4):65-67.
- [9] 胡汝骥,姜逢清,王亚俊,等.亚洲中部干旱区的湖泊[J].干旱区研究,2005,22(4):424-430.
HU Ruji, JIANG Fengqing, WANG Yajun, et al. Study on the lakes in arid areas of central Asia [J]. Arid Zone Research, 2005, 22(4):424-430.
- [10] 周亮进.闽江河口湿地景观生态学研究进展[D].上海:华东师范大学资环学院,2007.
- [11] 李德胜.自然与人为二因子对红碱淖近35年来水量变化影响的量化研究[D].西安:西安交通大学能源与动力工程学院,2007.
- [12] 李文娟.基于3S技术的红碱淖湿地动态变化及影响因素研究[D].西安:西安交通大学能源与动力工程学院,2004.
- [13] 党安荣,王晓栋,陈晓峰,等.ERDAS IMAGINE遥感图像处理[M].北京:清华大学出版社,2003.
- [14] 冷奕明,张文秀.城市化与土地利用变化研究——以成都市为例[J].西南农业学报,2006,19(2):215-217.
LENG Yiming, ZHANG Wenxiu. The research into the urbanization and the change of land use-based on Chengdu, southwest China [J]. Journal of Agricultural Sciences, 2006, 19(2):215-217.
- [15] 吴琴.基于遥感的黄陵县土地利用/土地覆盖动态监测[D].杨凌:西北农林科技大学地图学与地理信息系统,2007.
- [16] 廖和平,彭征,洪惠坤,等.重庆市直辖以来的城市空间扩展与机制[J].地理环境,2007,26(6):1137-1146.
LIAO Heping, PENG Zheng, HONG Huikun, et al. Research on dynamic mechanism and model of urban spatial expansion since the establishment of Chongqing municipality [J]. Geographical Research, 2007, 26(6):1137-1146.
- [17] 余新晓,牛健植,关文彬,等.景观生态学[M].北京:高等教育出版社,2006.
- [18] 王根绪,刘进其,陈玲.黑河流域典型区土地利用格局变化及影响比较[J].地理学报,2006,61(4):339-348.

- WANG Genxu, LIU Jinqi, CHEN Ling. Comparison of spatial diversity of land use changes and the impacts on two typical areas of Heihe river basin [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2006, 61(4): 339-348.
- [19] 中国地理学会自然地理专业委员会编. 土地覆被变化及其环境效应[M]. 北京: 星球地图出版社, 2005: 164-175.
- [20] 尹立河, 张茂省, 董佳秋. 基于遥感的毛乌素沙地红碱淖面积变化趋势及其影响因素分析[J]. *地质通报*, 2008, 27(8): 1151-1156.
- YIN Lihe, ZHANG Maosheng, DONG Jiaqiu. Area variation and controlling factors of lake Hongjiannao, Mu Us desert, China based on remote sensing techniques [J]. *Geological Bulletin of China*, 2008, 27(8): 1151-1156.
- [21] 唐克旺, 王浩, 刘畅. 陕北红碱淖湖泊变化和生态需水初步研究[J]. *自然资源学报*, 2003, 18(2): 304-309.
- TANG Kewang, WANG Hao, LIU Chang. Preliminary study of Hongjiannao lake's variation and ecological water demand [J]. *Journal of Natural Resources*, 2003, 18(2): 304-309.
- [22] 常禹, 苏文贵, 高瑞平. 沈阳市东部土地利用格局变化[J]. *应用生态学报*, 1997, 8(4): 421-425.
- CHANG Yu, SU Wengui, GAO Ruiping. Changes of land use pattern in eastern Shenyang [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1997, 8(4): 421-425.
- [23] 马玉峰. 农牧交错区土地利用变化及其驱动力研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院水土保持与荒漠化防治专业, 2007.
- [24] 韩锦涛. 山西娄烦土地利用/覆被变化及驱动机制研究[D]. 山西: 黄土高原研究所自然地理专业, 2007.
- [25] 胡权刚. 基于遥感的陕蒙交界地区土地利用变化研究[D]. 西安: 西安交通大学能源与动力工程学院, 2008.

(编辑 王焕雪)