

# 黄河水电开发区域土地利用与景观格局分析<sup>\*</sup>

师旭颖,郝芳华,林 隆,欧阳威

(北京师范大学 环境学院,水环境模拟国家重点实验室,北京 100875)

**摘 要:**在 GIS 和 RS 技术支持下,以黄河上游水电梯级开发区域为研究对象,采用景观生态学数量分析方法,在 1977 年、1996 年、2000 年和 2006 年遥感影像数据的基础上,分析区域 30 a 来土地利用和景观格局变化。结果表明:除水域和未利用土地减少外,其他土地利用类型均有所增加,其中耕地增加幅度最大;1977 - 1996 年间土地利用变化率最高,2000 - 2006 年间水域面积减少极为剧烈,减少的面积主要流向耕地和草地;研究区景观斑块数和破碎度均逐年增加,景观结构日趋破碎;区域景观异质性在 1977 - 1996 年间不断增加,而在 1996 - 2006 年间有所减弱。

**关键词:**土地利用;景观格局;水电开发;地理信息系统;遥感;黄河流域

**中图分类号:**F301.24;P901

**文献标识码:**A

**文章编号:**1005-3409(2009)04-0174-06

## The Analysis of Land Use and Landscape Pattern in Hydropower Cascade Exploitation Region of the Yellow River

SHI Xu-ying, HAO Fang-hua, LIN Long, OU YANG Wei

(State Key Joint Laboratory of Environmental Simulation and Pollution Control, School of Environment, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

**Abstract :**Based on the remote sensing (RS) images of 1977, 1996, 2000, and 2006, the land use and landscape pattern changes in the areas of cascade hydropower station construction during the past 30 years in the upper reaches of the Yellow River had been analyzed with the geographic information system (GIS) technologies and ecological quantity analytical method. The results indicated that all land use types increased to some extent except watershed and unused land, and the areas of cultivated land increased most significantly. The change rates of land use were the highest between 1977 and 1996. The area of watershed decreased dramatically from 2000 to 2006, and the cause of decrease in watershed area was changing into cultivated and grass land. Both the patch number and fragmentation indices increased in the study area, and the landscape was being more fragmental over a period of 30 years. The heterogeneity in the area exhibited an ascending trend during 1977 to 1996, whereas it decreased from 1996 to 2006.

**Key words :**land use; landscape pattern; hydropower exploitation; GIS; RS; Yellow River watershed

黄河流域是我国水电开发的重点区域,特别是黄河上游刘家峡 - 青铜峡(刘青段)河段,具有得天独厚的水电开发条件。区域经济发展需要水电能源的开发,但水电开发同时会对生态环境产生复杂影响<sup>[1-3]</sup>。研究区大部分地处黄土丘陵沟壑区,干旱少雨,植被稀少,面临水土流失、草场退化及生境破碎化等一系列生态环境问题<sup>[4-5]</sup>。土地利用变化是全球变化的主题,又是环境变化的主要驱动因子或表现之一<sup>[6]</sup>。景观格局分析是景观生态研究的核心问题,对于大尺度

区域生态环境现状及发展趋势分析都是十分有效的手段<sup>[7]</sup>。而地理信息系统和遥感技术的不断发展,使土地利用和景观格局的研究更高效、更精确,又为揭示常规方法难以获取的环境动态信息,进行大尺度生态监测和建模研究提供了条件<sup>[3]</sup>。

鉴于此,以 GIS、RS 为技术支持,选取黄河上游刘家峡 - 青铜峡河段水电梯级开发区域为研究对象,在较大的时空尺度上,分析水电梯级开发不断深入的情况下,区域 30 a 来的土地利用变化,揭示其

<sup>\*</sup> 收稿日期:2008-01-12

基金项目:国家自然科学基金(40471127);黄河流域内蒙古农业灌区非点源污染机理研究和水环境模拟国家重点实验室专项基金课题(08ESPCT-Z)

作者简介:师旭颖(1986-),女,内蒙古赤峰人,硕士,主要从事环境评价、规划与 GIS 应用研究。E-mail: shixuyingbnu@gmail.com

通信作者:郝芳华(1963-),女,江苏连云港人,教授,博士生导师,主要从事环境评价、规划与管理方面的研究。E-mail: fanghua@bnu.edu.cn

景观格局的动态演变过程,以期为黄河流域土地利用结构调整、景观格局优化配置和水电开发的环境保护决策提供科学依据。

1 研究区概况

研究区地跨甘肃、宁夏两省,地理位置在 35°47′09″ - 38°14′13″ N,103°3′27″ - 106°26′35″ E 之间,干流河长约 598 km,总面积 21 603.25 km<sup>2</sup>。刘青段地处青藏高原强烈切割的中高山区,海拔 2 800 ~ 4 800 m,地势由西北向东南倾斜。本河段特有的峡谷与川地相间分布的地形地貌特征创造了水电站

建设的良好条件。

研究区西南部为中温带半干旱气候,东北部为温带荒漠气候,干旱少雨,蒸发量大。年均气温 8.2 ~ 9.6℃,年均降水量由兰州市的 330 mm 向东北逐渐降低,到青铜峡降至 172 mm,降水年际变化大且雨量分配不均,多集中在 7 - 9 月,年蒸发量则在 1 600 ~ 2 100 mm 之间。研究区位于黄河两岸川地,人口居住相对密集,库区台地经平整多开发为耕地。由于受黄河及其支流的切割,区内形成了沟壑纵横、支离破碎的地形,加之区域内土质疏松、暴雨集中,坡地面积大,造成研究区水土流失严重,生态环境脆弱。

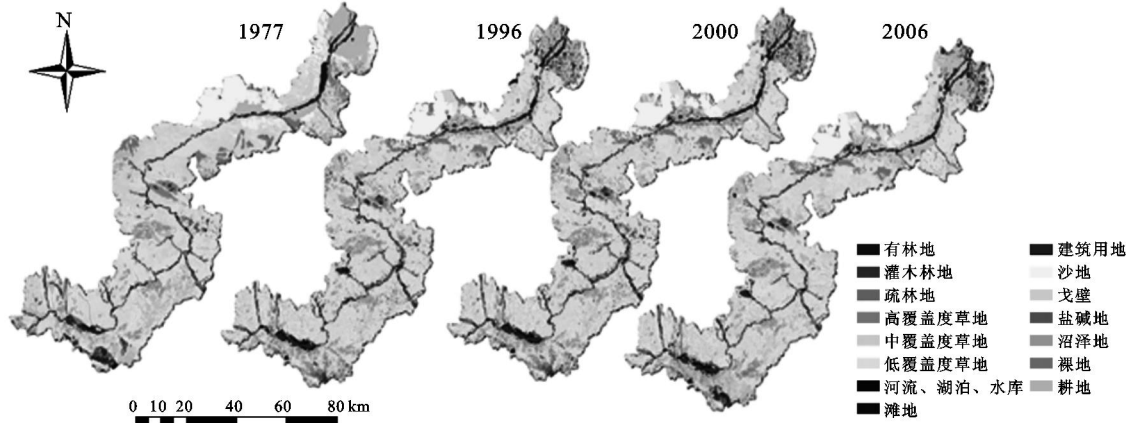


图 1 研究区土地利用类型图

2 研究方法

2.1 数据采集与处理

依据刘青段水电梯级开发特点(1977 - 1996 年有 4 座电站蓄水运行,1996 - 2000 年有 5 座电站,2000 - 2006 年有 7 座电站),分别选取 1977 年的 MSS(Multi - Spectral)、1996 年和 2000 年的 Landsat - 5 TM 以及 2006 年的 Landsat - 7 ETM+ 遥感影像数据,时相均在 7 - 9 月之间。

结合区域地貌特征和生态系统特征,通过 1:25 万 DEM 数据和流域水系图及区域子流域划分提取研究区域。在此基础上,对原始影像进行辐射校正、配准、镶嵌,获得区域边界内影像数据。采取野外调查与室内解译相结合的方法,应用 ENVI 软件和 ArcGIS 图像处理软件,根据全国土地利用分类系统中的二级图例系统,按 1:10 万精度进行遥感影像解译,绘制出 4 期土地利用类型图(图 1),将该区的土地利用划分为耕地、林地、草地、水域、建筑用地、未利用土地 6 个一级地类并生成 6 种景观和 24 个二级地类。在对数据进行空间叠置分析过程中,采用二级土地分类系统,而对分类结果进行统计处理时,考虑到二级分类系统数据过于庞杂,不便表现总体变化规律,故采用分类系统中的一级地类。

2.2 土地利用变化率和景观格局指数计算

土地利用变化率可定量描述区域土地利用变化的速度及变化中的类型差异,其计算式如式(1)。

$$K = \frac{U_b - U_a}{U_a} \times 1/T \times 100\% \tag{1}$$

式中:K——研究时段内土地利用类型变化率;U<sub>a</sub>, U<sub>b</sub>——该类型在研究初期和末期的面积;T——研究时段<sup>[8]</sup>。

采用景观格局分析软件 FRAGSTATS<sup>[9]</sup>进行景观指数计算,分别从类型水平和景观水平上分析区域的景观格局时空变化,主要选取斑块数目(NP)、平均斑块面积(MPS)、破碎度指数(C)、景观形状指数(LSI)、Shannon 多样性指数(SHDI)、Shannon 均匀度指数(SHEI)、蔓延度指数(CONTAG) 7 个指标描述不同景观的要素特征。在计算景观指标过程中给定的格网分辨率为 100 m × 100 m。

3 结果及分析

3.1 土地利用变化分析

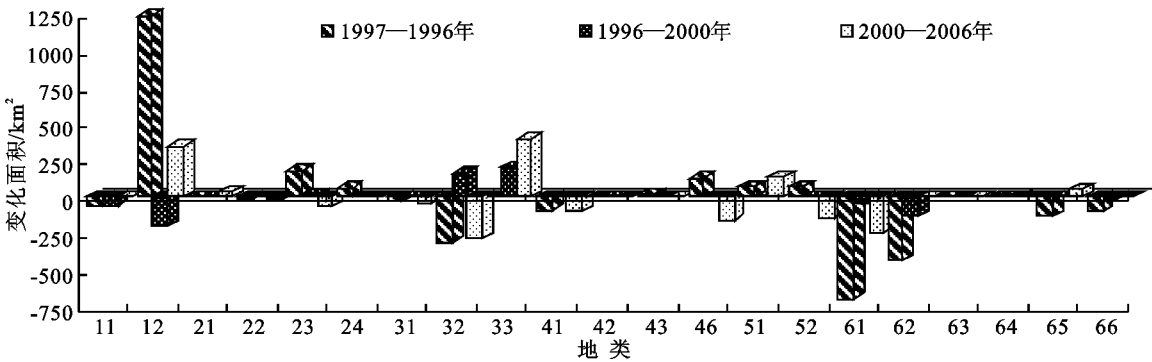
3.1.1 土地利用变化阶段特点 研究区土地利用结构变化如表 1 所示。1977 - 2006 年间,除水域和未利用土地面积有所减少外,其他土地利用类型均有不同程度增加。其中,耕地面积净增加 1 299.4

km<sup>2</sup>,增加了 29.55 %,是面积增加最大的地类;林地净增加 233.45 km<sup>2</sup>,增加了 66.63 %,位居第 2;建筑用地增加了 182.24 km<sup>2</sup>,增加 42.85 %。未利用土地是面积减少最大的地类,面积净减少 1 674.26 km<sup>2</sup>,减少了 44.58 %。耕地、建筑用地的增加和未利用土地的减少,说明人类活动对土地利用的需求持续上升,区域整体土地利用开发强度不断加大。水库的建成改善了干旱山区提水灌溉和人畜饮水条件,促进了新灌区的发展,对区域的土地利用开发起

了一定推动作用<sup>[10]</sup>。

表 1 研究区土地利用结构变化 km<sup>2</sup>

土地利用类型	1977 年	1996 年	2000 年	2006 年
耕地	4396.68	5577.48	5336.77	5696.08
林地	350.34	591.88	618.06	583.79
草地	12362.87	12043.60	12420.80	12510.62
水域	312.50	374.64	363.16	123.92
建筑用地	425.32	582.41	593.28	607.56
未利用土地	3755.54	2433.24	2271.17	2081.28



11. 水田,12. 旱地,21. 有林地,22. 灌木林地,23. 疏林地,24. 其他林地,31. 高覆盖度草地,32. 中覆盖度草地,33. 低覆盖度草地,41. 河渠,42. 湖泊,43. 水库坑塘,46. 滩地,51. 城镇用地,52. 农村居民点用地,61. 沙地,62. 戈壁,63. 盐碱地,64. 沼泽地,65. 裸土地,66. 裸岩石砾地

图 2 二级土地利用类型面积变化情况

如图 2 所示,二级地类中旱地增加最为明显,其次是低覆盖度草地。说明耕地的增加主要来源于旱地,且以 1977 - 1996 年最为显著,草地的增加主要来源于低覆盖度草地,且以 2000 - 2006 年最为明显。30 a 来沙地面积净减少了 977.99 km<sup>2</sup>,是减少最多的二级地类,未利用土地的减少主要由沙地的大幅度下降所致。20 世纪 80 年代初期,国家开始全面推广水土保持重点建设工程,研究区各级地方的水土保持工作起到了一定成效,土地沙化现象有所减缓。水电建设会在短时间内加重施工区域的水土流失,但从梯级水库长期运行来看,在大尺度范围下水电站的梯级开发没有明显加重区域的水土流失状况。

3.1.2 土地利用动态转化分析 区域不同时期土地利用动态变化率如表 2 所示。1977 - 1996 年间,除草地和水域外,其它地类的转变率均是 3 个时期中最大的,说明该时期区域土地利用演变最为剧烈。该时期有刘家峡、青铜峡、盐锅峡、八盘峡 4 座水电站蓄水运行,林地在该时期内变化率最大,且为正向趋势(3.63 %),水域变化也为正向趋势,草地有较小的负向趋势变化率,说明该期水电建设运行对区域的生态退化没有产生明显影响。1996 - 2000 年间,未利用土地是变化率最大的地类(- 1.67 %),林地位居第二。未利用土地和耕地呈负向增长,林地和草地为正

向增长,表明此段时期内大力推广生态建设工程,通过退耕还草、退耕还林等生态保护手段,区域生态环境有所好转。2000 - 2006 年间,水域面积变化极为明显(- 10.98 %),下降幅度较大。该时期内新增小峡和沙坡头两座水电站,且均为中型水电工程,对比 2000 年和 2006 年的土地利用图,可以看出小峡和沙坡头水电站附近区域除耕地和建筑用地略有增加,水域及其他地类没有发生明显变化。说明水电站由于蓄水发电灌溉,会使河道流量有一定减少,但并不是水域面积剧烈下降的主要原因。

表 2 1977 - 2006 年土地利用动态变化率 %

土地利用类型	1977 - 1996 年	1996 - 2000 年	2000 - 2006 年
耕地	1.41	- 1.08	1.12
林地	3.63	1.11	- 0.92
草地	- 0.14	0.78	0.12
水域	1.05	- 0.77	- 10.98
建筑用地	1.94	0.47	0.40
未利用地	- 1.85	- 1.67	- 1.39

为了进一步分析 2000 - 2006 年间水域面积的流失去向,以及近年来研究区各土地利用类型的相互转化情况,论文计算了 2000 年和 2006 年的土地利用转移矩阵(表 3)。

表 3 2000 - 2006 年间土地利用转移矩阵

土地利用类型	指标	2006 年					
		耕地	林地	草地	水域	建筑用地	未利用地
2000 年	面积/ km <sup>2</sup>	4772.28	7.89	380.68	11.62	151.70	12.60
	耕地 流出率/ %	89.42	0.15	7.13	0.22	2.84	0.24
	耕地 流入率/ %	83.78	1.35	3.04	9.38	24.97	0.61
	面积/ km <sup>2</sup>	63.64	498.00	40.38	1.95	11.39	2.70
	林地 流出率/ %	10.30	80.57	6.53	0.32	1.84	0.44
	林地 流入率/ %	1.12	85.30	0.32	1.58	1.87	0.13
	面积/ km <sup>2</sup>	508.66	72.44	11522.47	12.13	71.34	233.76
	草地 流出率/ %	4.10	0.58	92.77	0.10	0.57	1.88
	草地 流入率/ %	8.93	12.41	92.10	9.79	11.74	11.23
	面积/ km <sup>2</sup>	105.54	0.99	110.53	95.23	48.01	2.85
	水域 流出率/ %	29.06	0.27	30.44	26.22	13.22	0.78
	水域 流入率/ %	1.85	0.17	0.88	76.85	7.90	0.14
	面积/ km <sup>2</sup>	189.95	3.34	162.29	1.73	228.83	7.15
	建筑用地 流出率/ %	32.02	0.56	27.35	0.29	38.57	1.21
	建筑用地 流入率/ %	3.33	0.57	1.30	1.39	37.66	0.34
	面积/ km <sup>2</sup>	56.02	1.12	294.26	1.26	96.30	1822.21
	未利用地 流出率/ %	2.47	0.05	12.96	0.06	4.24	80.23
	未利用地 流入率/ %	0.98	0.19	2.35	1.02	15.85	87.55

由流出率分析可知,水域流出面积最多的是耕地和草地。可见由于研究区存在大范围的围湖造田、水产养殖、水生生物种植等现象,这些人类活动均会使湖泊和河流出现不同程度萎缩,是引起水域面积下降的主要原因。耕地流出面积最多的是草地和建筑用地,说明区域耕地面积的减少主要由退耕还草和建筑用地占用引起。林地面积流出量最大的是耕地,这表明当地居民毁林造田现象十分严重,据当地林业部门统计,0.53 万 hm<sup>2</sup> 的青铜峡湿地保护区如今已有 0.307 万 hm<sup>2</sup> 被强行开垦为耕地,林地只剩下 267 hm<sup>2</sup><sup>[11]</sup>;草地向其他地类均有不同程度转移,但转移面积最大的是耕地,说明将草地开垦为耕地是草地减少的主要原因。有 12.96 % 的未利用土地转为草地,表明部分区域的生态环境有所改善。

由流入率分析可知,水域和建筑用地在耕地和草地的流入量中都占有很大比例,这与水电开发区域的引黄灌溉和水电建设移民安置有一定关系。对于建筑用地而言,耕地是最大的流入地类,可见建筑用地的增加主要是对耕地的占用,当地居民在原有贫瘠的耕地上建设房屋,并不断开垦新耕地。由表 3 可以看出,建筑用地在该时期内保留率较低,说明 2000 - 2006 年间区域人口流动较为频繁,从而引起建筑用地和其他地类的相互转化。

3.2 景观格局变化分析

3.2.1 景观结构变化特征 斑块数目及面积等景观基本特征指数是景观格局分析的基础和景观结构特性的具体反映,具有重要的生态意义<sup>[12]</sup>。由表 4 可知,随着水电开发梯度的增加,景观斑块数逐年增多,破碎度也由 1977 年的 0.146 2 增至 2006 年的 0.406 6,表明区域景观破碎化程度不断加深,各种景观类型的变化各具特点(图 3)。草地斑块数远高于其他地类,30 a 来,草地的斑块数和平均斑块面积变化趋势与总体景观极为相似,斑块数持续增加,平均斑块面积不断下降,这与草地是研究区的景观基质有很大关系。如图 3 所示,除未利用土地外,其他景观在 1977 - 2000 年间斑块数都不断增加,平均斑块面积不断减小,说明各景观类型也均趋于破碎化。2000 - 2006 年间,除草地景观外各景观的斑块数均下降,而林地和建筑用地景观的平均斑块面积表现为增加趋势,呈现出空间集中化特征。林地的斑块数减少,但有林地在该时段内面积有所增加,说明有大量的植被斑块转化为有林地。

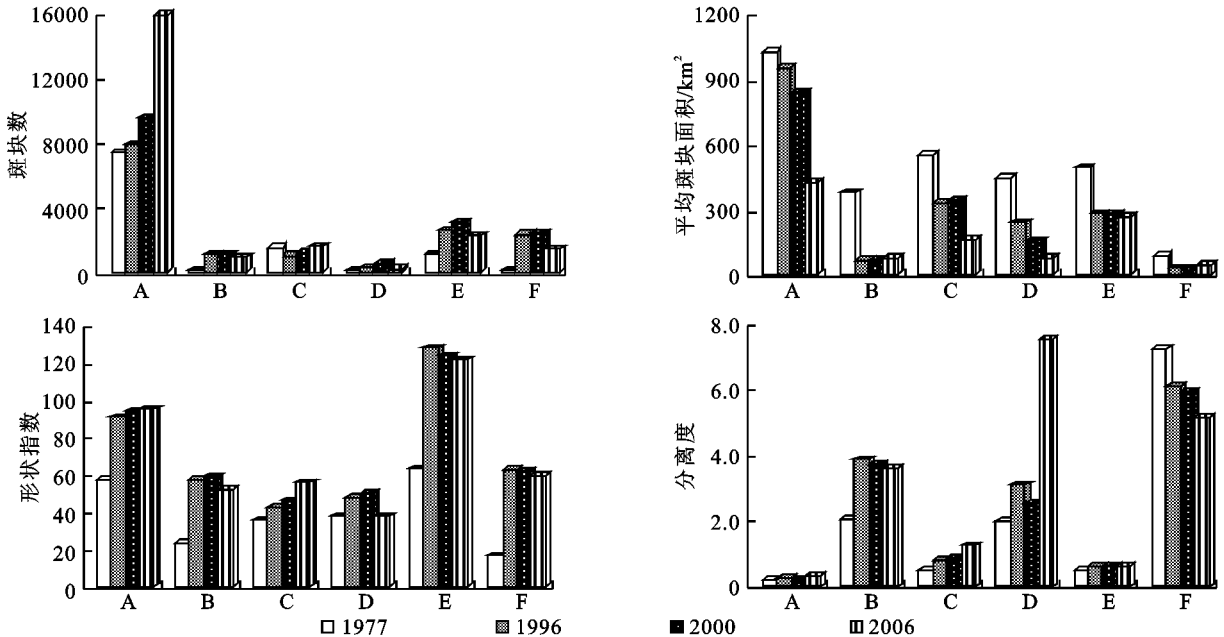
3.2.2 景观异质性变化分析 由表 4 可以看出,各景观指数在 1977 - 1996 年间变幅很大,1996 年以后趋于平缓。1977 - 1996 年间,研究区先后有 4 座水电站蓄水运行,且已进入稳定运行阶段,水电梯级

建设带动了地方经济发展,加剧了城市化进程,会引起局部区域景观格局发生一定变化。此外,该时段时间跨度长,受到人口、经济、政策、气候等干扰因素多,这些不定因素也是该时期景观指数变化剧烈的原因。1996 - 2006 年 10 a 间,研究区有 3 座新增水电站相继运行,该时段时间跨度短,水电站运行数目多,而各景观指数变化平缓,说明从大尺度上看水电

建设对区域景观变化累积影响较小。

表 4 研究区景观格局特征变化

年份	斑块数	破碎度	形状指数	多样性	均匀度	蔓延度
1977	10270	0.1462	49.8011	1.1131	0.6212	65.922
1996	15160	0.3383	87.0725	1.1876	0.6628	61.924
2000	17746	0.3575	88.0965	1.1694	0.6526	62.309
2006	22239	0.4066	89.8062	1.1159	0.6225	63.918



A:草地景观;B:林地景观;C:未利用土地景观;D:水域景观;E:耕地景观;F:建筑用地景观

图 3 类型水平上各景观类型指数变化

分离度指数反映景观的聚合程度<sup>[12]</sup>。如图 3 所示,6 种景观类型中,草地和耕地景观的分离度明显低于其他景观,说明草地和耕地在空间上往往呈面状分布,反映出这些景观类型在研究区中占据主要地位。林地、水域和建筑用地景观的分离度较高,在空间上往往呈孤立的散点状或线状分布,反映出这些景观类型在区域占次要地位,被主要景观类型显著隔离。同一景观类型在不同时期变化也较大。2000 - 2006 年间,水域分离度明显升高,说明该时期人类用水需求增加,水域景观连通性下降。30 a 来建筑用地的分离度指数不断下降,说明该类型斑块距离趋近,城市化程度变大,农村城乡景观逐渐向城郊景观过渡。受可开发利用土地资源量的限制,主要在原有城镇居民点附近扩张。

30 a 来区域景观形状指数逐渐增加,由 1977 年的 49.801 1 增至 2006 年的 89.806 2,表明景观总体形状复杂化,受人类活动影响加剧。对各景观类型而言,草地和未利用土地景观的形状指数持续增加,说明这两种景观形状越来越不规则,斑块类型的复杂性在增加,这主要由于大面积的草地和未利用土地被耕地和建筑用地嵌入所致。由于各居民点多

因地势开发而成,分布比较分散,因而各景观类型的形状指数以建筑用地景观最高;耕地景观位居第二,反映了流域内大多数农田形状不规则,农田质量不高或有些地段不适合耕种,这主要因为区域有大量坡耕地存在。

如表 4 所示,除蔓延度指数外,其余各景观指数在 1977 - 1996 年间均有不同程度增加。蔓延度由 1977 年的 65.922 降至 1996 年的 61.924,表明各景观类型间聚合度减少,区域内景观主要由连结性较差的多种斑块类型组成。景观多样性和均匀度指数增加,说明区域景观异质性增强,景观更加多样化和丰富化,且分布更均匀更规则,同时说明在满足社会经济发展和不破坏地区生态环境前提下,人类有意识的、建设性的改造区域的景观生态环境。1996 - 2006 年间,各景观指数的变化趋势正好相反。景观多样性指数降低,表明研究区景观异质性不断减小,各景观类型所占比例在数值上相对差异增大。这与该时段内草地和耕地面积大幅度增加有一定关系。随着耕地的扩展,蔓延度逐年增加,景观连通性加强,景观异质性减弱。

4 结论与讨论

(1) 1977 - 2006 年间,研究区林地、草地、建筑用地和耕地面积增加,水域和未利用土地面积减少。耕地面积上升幅度最大,沙地面积下降最为明显。水电梯级开发带动了当地种植业的发展,区域整体土地利用强度不断加大,由于水土保持政策的推行,水土流失现象有所减缓。

(2) 区域土地利用在 1977 - 1996 年间演变最为剧烈,林地在该时期内变化率最大,且为正增长;1996 - 2000 年间未利用土地和耕地呈负向增长,林地和草地为正向增长,区域生态环境有所好转;2000 - 2006 年间,水域面积下降极为明显,水域面积的减少主要是向耕地和草地的转化。同时,水电站的蓄水运行和毁林造田等人类活动,促进了其他地类向耕地的转化,废弃的荒耕地会进一步转化为建筑用地。

(3) 区域景观斑块数量和破碎度不断增加,破碎化程度逐渐加深,受人为干扰逐年增大,各景观类型也均呈现出破碎化趋势。区域景观形状指数逐年增加,景观形状复杂化。1977 - 1996 年间,景观蔓延度降低,景观多样性和均匀度指数均增加,各景观类型间聚合度减少,景观更加丰富化和均匀化,1996 - 2006 年间,各景观多样性指数变化趋势正好相反。

黄河上游水电开发对整个黄河流域的生态系统稳定都会产生重要影响。目前,大型河流水电梯级对区域生态环境的影响还没有系统的研究。本文选取水电开发区域为研究对象,分析在水电梯级开发的大环境背景下,区域土地利用和景观格局的演变规律,对黄河流域的环境保护和管理具有重要意义。从结果分析来看,水电开发建设对区域土地利用和景观格局有一定影响,但是从大尺度景观看,这种影响并不明显,且多为间接影响。由于研究区人口密度大,除水电开发建设外,其他经济活动较为频繁,特别是当地居民盲目垦荒、围湖造田等人类活动,是

引起当地生态环境变化的主要原因。限于篇幅,本文没有对区域景观变化的驱动力进行深入分析,如何将水电建设与其他人类活动对区域景观格局的影响区分开来,突出水电建设对区域生态环境的累积影响,有待于进一步深入的研究。

参考文献:

[1] 张文静. 黄河黑山峡水电开发建设对区域景观格局的影响[J]. 水土保持学报, 2006, 20(5): 162-165.

[2] 刘海龙. 峡谷区域水电开发景观影响评价: 以怒江为例[J]. 地理科学进展, 2006, 25(5): 21-30.

[3] 郑玲芳, 郝芳华, 杨胜天. 天生桥一级水库蓄水前后库周土地覆盖变化研究[J]. 水土保持研究, 2005, 12(2): 80-83.

[4] 郑妍文. 黄河流域甘肃段生态保护与建设的调查[J]. 开发研究, 1999(6): 28-30.

[5] 王世新. 黄河兰州(市区)段河道湿地资源概况及保护建议[J]. 农林科技, 2007, 36(1): 52-53.

[6] 李秀彬. 全球环境变化研究的核心领域: 土地利用/土地覆盖变化的国际研究动向[J]. 地理学报, 1996, 51(6): 553-558.

[7] 宋冬梅, 肖笃宁, 张志城, 等. 甘肃民勤绿洲的景观格局变化及驱动力分析[J]. 应用生态学报, 2003, 14(3): 535-539.

[8] 邹秀萍, 齐清文, 徐增让, 等. 怒江流域土地利用/覆被变化及其景观生态效应分析[J]. 水土保持学报, 2005, 19(5): 147-151.

[9] Mc Garigal K, Marks B J. spatial analysis program for quantifying landscape structure[Z]. Forest Science Department, Oregon State University, Corvallis Oregon, 1994: 62.

[10] 杨德保, 尚可政, 王式功. 黄河上游水电工程建设与西北经济发展[J]. 科学·经济·社会, 1998, 16(2): 17-20.

[11] 高宁生. 黄河鸟岛为何只剩下美丽的名字[J]. 生态经济, 2004(2): 20-25.

[12] 李哈滨, 伍业刚. 景观生态学的数量研究方法[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 1992: 209-233.

(上接第 173 页)

[9] 李戎凤, 胡春元, 王义. 马家塔露天矿生态复垦区土壤养分状况研究[J]. 内蒙古农业大学学报, 2007, 28(2): 106-110.

[10] 许明祥, 刘国彬, 卜崇峰, 等. 圆盘入渗仪法测定不同利用方式土壤渗透性试验研究[J]. 农业工程学报, 2007, 18(4): 54-58.

[11] 李裕元, 邵明安. 土壤翻耕对坡地水分转化与产流产沙特征的影响[J]. 农业工程学报, 2003, 19(1): 46-50.

[12] 查小春, 唐克丽. 黄土丘陵林区开垦地人为加速侵蚀

与土壤物理力学性质的时间变化[J]. 水土保持学报, 2001, 15(3): 20-23.

[13] 周蓓蓓, 邵明安. 土石混合介质饱和导水率的研究[J]. 水土保持学报, 2006, 20(6): 52-66.

[14] 李志强, 曹永新, 李伟光, 等. 安家岭露天排土场复垦适宜性评价与效益分析[J]. 露天采矿技术, 2007(2): 58-60.

[15] 白中科, 赵景逵, 李晋川, 等. 大型露天煤矿生态系统受损研究: 以平朔露天煤矿为例[J]. 生态学报, 1999, 19(6): 870-875.