

# 分水后黑河干流中游地区景观动态变化及驱动力

李传哲<sup>1,2,\*</sup>, 于福亮<sup>1,2</sup>, 刘 佳<sup>1,2</sup>

(1. 中国水利水电科学研究院水资源研究所, 北京 100038; 2. 水利部水资源与水生态工程技术研究中心, 北京 100038)

**摘要:**综合利用 GIS、RS 技术和景观生态学方法, 分析了黑河干流中游地区 1985 ~ 2005 年, 尤其是黑河干流水量统一调度实施后(即 2000 年以后)的景观动态变化及驱动机制。结果表明: (1) 研究区景观发生了较大变化, 1985 ~ 2000 年, 耕地、林地、城乡工矿居民用地逐渐增加, 而草地、水域、未利用土地不断减少; 2000 ~ 2005 年耕地、城乡工矿居民用地逐渐增加, 而草地、林地、水域、未利用土地不断减少。 (2) 在类型水平上, 分水后, 耕地和城乡工矿居民用地呈连片趋势发展, 破碎度降低, 形状更为规则, 空间连接性增强; 林地、草地、水域和未利用土地破碎度增加, 分布更为分散, 连通性和优势度降低。 (3) 在景观水平上, 分水后, 研究区景观多样性水平提高, 异质性在增加, 破碎化程度越来越大, 景观中斑块空间连接性下降, 优势度在减少, 斑块类型在景观中趋于均匀分布, 土地利用向着多样化和均匀化方向发展。 (4) 研究区景观变化的驱动力主要包括人口增长、经济社会发展, 2000 年以后, 可利用水量的约束直接影响着研究区的景观变化。

**关键词:** 景观; 驱动力; 分水; 黑河中游地区

文章编号: 1000-0933(2009)11-5832-11 中图分类号: Q149, TV121 文献标识码: A

## Dynamic change of landscape and its driving forces in midstream of Heihe mainstream basin after water redistribution

LI Chuan-Zhe<sup>1,2,\*</sup>, YU Fu-Liang<sup>1,2</sup>, LIU Jia<sup>1,2</sup>

1 Department of Water Resources, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China

2 Research Center of Water Resources & Ecology of the Ministry of Water Resources, Beijing 100038, China

*Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(11): 5832 ~ 5842.

**Abstract:** Based on the techniques of GIS/RS and the methods of the landscape ecology, the characteristics of the landscape changes and driving forces in midstream of Heihe mainstream basin from 1985 to 2005 were analyzed in the paper, especially the changes of landscape after water redistribution scheme in Heihe River basin was executed. The results showed as follows: (a) The landscape had changed greatly in Heihe River basin from 1985 to 2000, the farmland, woodland, resident and industry land increased, while grassland, water area and unused land decreased; the farmland, resident and industry land continued to increase from 2000 to 2005, and the changes of other patch type was adverse. (b) After 2000, at the class level, farmland and resident and industry land have become more fragmented, along with the area increasing, and patch shape has tended to be more regular, and the spatial connectedness of these two types increased gradually. The fragmentation, spatial connectedness and landscape dominance of woodland, grassland, water area and unused land had similar change trends. The fragmentation increased, but the spatial connectedness and landscape dominance of these four types decreased respectively. (c) At the landscape level, the diversity, heterogeneity and fragmentation of landscape increased after 2000, while the spatial connectedness and landscape dominance decreased. (d) The main forces of landscape change included population growing and the economic development. However, the reduce of available water resources in Heihe River has become the main force since 2000 which caused the significant changes of the landscape change.

**基金项目:** 国家重点基础研究发展(973)计划资助项目(2006CB403405); 国家自然科学基金资助项目(50709042)

收稿日期: 2008-12-12; 修订日期: 2009-04-27

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: lichuanzhe@tom.com

**Key Words:** landscape; driving forces; water redistribution; the midstream of Heihe mainstream basin

景观生态学是一门实用性很强的科学,它以研究人类社会同其生存空间的相互关系为主要内容,可以为区域的生态环境与社会经济可持续发展提供有力的科学依据,在研究可持续发展方面显示出重大价值<sup>[1]</sup>,其作用被越来越多的研究者所认识和强调<sup>[2~9]</sup>,其主要研究对象是景观的结构、功能和变化<sup>[10]</sup>。景观动态变化是景观生态学研究中的核心问题之一,它主要研究景观结构、功能、空间格局随时间的变化情况。近年来,我国学者针对西北干旱区的特点,在绿洲景观、湿地景观、农业景观、沙漠景观等方面作了大量的研究<sup>[11~17]</sup>。

黑河是我国西北地区第二大内陆河,发源于祁连山,跨青海、甘肃、内蒙古三省(区),流域总面积达 12.8 万 km<sup>2</sup>,黑河出山口莺落峡以上为上游,莺落峡至正义峡为中游,正义峡以下为下游。由于水资源总量不足,黑河流域区域之间水事矛盾频发,自 20 世纪 60 年代以来,随着中游社会经济的发展,进入下游水量逐渐减少,下游额济纳绿洲地区出现了河道断流、湖泊干涸等一系列生态问题。自 2000 年水利部正式启动黑河省级分水工作以来,张掖市多次采取“全线闭口、集中下泄”的方式多年全面完成了黑河水量调度工作。但同时也给张掖市的农业、生态环境造成了一些影响<sup>[18~22]</sup>。本文以遥感图像解译为基础,在 RS 和 GIS 技术支持下,分析与揭示黑河分水前后干流中游地区景观动态变化的特征和规律,并分析其驱动机制,对黑河干流中游地区社会、经济、生态环境系统的可持续发展具有重要意义。

## 1 研究区概况

黑河分水以祁连山出山口莺落峡水文站的来水量为依据,以中游出口正义峡水文站的下泄水量为指标,二站之间的干流中游地区为用水限制区,受分水影响较大。所以,本文研究区选择黑河干流中游地区,即张掖市的甘州区、临泽县和高台县三县区属黑河干流中游的部分。研究区位于东经 98°57′~100°52′,北纬 38°39′~39°59′,总面积 9501.85 km<sup>2</sup>,属温带干旱大陆性气候,降水少而蒸发强烈,年均降水量 70~312 mm,年均蒸发量 1900~2403 mm。截止 2005 年底,研究区总人口 80.30 万人,2005 年 GDP 为 77.42 亿元,其中一、二、三产增加值分别为 25.90 亿元、24.53 亿元、26.99 亿元。

## 2 研究方法

### 2.1 数据来源及处理

采用的数据资料有 1985 年和 2000 年 LANDSAT TM 遥感影像和 2005 年的 CBERS 遥感影像,1:25 万地形图和行政区划图,研究区 1985~2005 年相关统计资料。其中 1985 年和 2000 年的遥感影像已有解译成果,2005 年的 CBERS 遥感影像在本次研究中基于 ERDAS 和 ARCGIS 平台解译完成。三期遥感影像时相均为 6~10 月份。景观分类参照全国土地利用分类方法,将研究区景观类型分为耕地、林地、草地、水域、城乡工矿居民用地和未利用土地 6 类一级类型。3 个时期的景观图见图 1。

### 2.2 景观转移概率矩阵

基于 ARCGIS 平台对 3 期遥感资料进行空间叠加分析,提取各类景观相互转化的面积,据此建立景观类型转移矩阵,在景观类型转移矩阵的基础上建立景观类型转移概率矩阵。计算公式为:

$$P_{ij} = A_{ij} / A_i \quad (1)$$

式中, $P_{ij}$ 为景观类型  $i$  转化为类型  $j$  的转移概率; $A_{ij}$ 为景观类型  $i$  转化为  $j$  的面积; $A_i$ 为景观类型  $i$  在研究时段的初始面积,结果见表 1。

### 2.3 景观指标选取

结合研究区特点,同时排除了一部分相关性很高的指标,本文在斑块类型水平上(class-level)选用了斑块类型面积( $CA$ )、斑块类型百分比( $PLAND$ )、斑块密度( $PD$ )、最大斑块指数( $LPI$ )、周长-面积分维数( $PAFRAC$ )、聚集度( $AI$ )、散布与并列指数( $IJI$ )、斑块结合度指数( $COHESION$ )等 8 个指标;在景观水平上(landscape-level)选用了斑块个数( $NP$ )、斑块密度( $PD$ )、最大斑块指数( $LPI$ )、景观形状指数( $LSI$ )、周长-面积分维数( $PAFRAC$ )、聚集度( $AI$ )、蔓延度指数( $CONTAG$ )、散布与并列指数( $IJI$ )、景观分割度( $DIVISION$ )、香

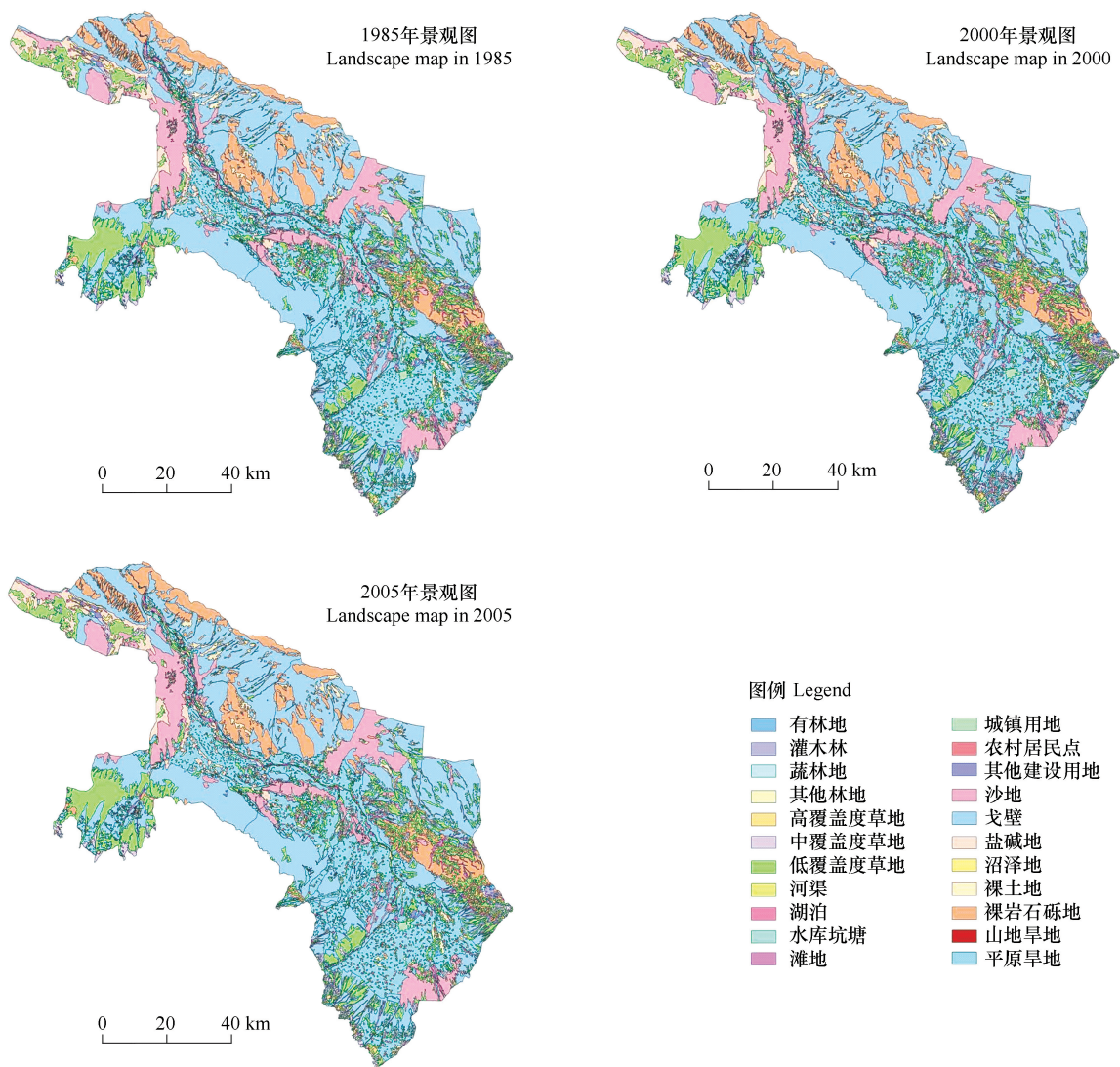


图1 不同时期黑河干流中游地区景观图

Fig. 1 Landscape maps of midstream of Heihe mainstream basin in 1985, 2000 and 2005

有林地 woodland;灌木林 shrubby land;疏林地 open forest land;其他林地 other forest land;高覆盖度草地 high coverage grassland;中覆盖度草地 moderate coverage grassland;低覆盖度草地 low coverage grassland;河渠 river/channel;湖泊 lake;水库坑塘 reservoir/pond;滩地 beach land;城镇用地 urban land;农村居民点 rural residential area;其他建设用地 other built-up land;沙地 desert;戈壁 gobi desert;盐碱地 saline or alkaline land;沼泽地 swamp;裸土地 bare ground;裸岩石砾地 rock gravel ground;山地旱地 mountain dry land;平原旱地 plain dry land

农多样性指数(*SHDI*)、香农均度指数(*SHEI*)等11个指标。景观动态变化计算采用了景观指标计算软件FRAGSTATS,各项指标的公式和意义可以参考其说明文件。景观动态变化分析将在斑块类型水平和景观水平两种尺度上进行,斑块类型水平和景观水平上的各景观指数计算结果分别见表2和表3。

### 3 景观动态变化分析

#### 3.1 景观转移分析

从1985~2000年景观类型转移概率矩阵知:(1)耕地主要向城乡工矿居民用地和林地转变,各占2.01%和0.57%;而耕地的增加量主要来源于未利用土地、草地和水域;(2)林地中有1.02%转为水域,有0.64%转为耕地;而耕地、未利用土地和草地是林地的主要增加源;(3)草地有1.58%转为耕地,有0.16%转为城乡工矿居民用地,同时有0.16%转为水域;草地主要由未利用土地、耕地和水域转化而来;(4)水域有3.84%转为耕地,1.14%转为未利用土地;水域的增加量主要来自未利用土地、草地和林地;(5)城乡工矿居民用地主要

转为水域和耕地,各占 0.03% 和 0.01%;城乡工矿居民用地的增加量主要来自耕地和草地;(6)未利用土地主要转为耕地和草地,各占 1.23% 和 0.08%;未利用土地的增加量主要来自水域、耕地、草地。

表 1 不同时期黑河干流中游地区景观类型转移概率矩阵 (%)

Table 1 Transition probability matrix of landscape class of midstream of Heihe mainstream basin from 1985 to 2005							
年份 Year	类型 Types	耕地 Farmland	林地 Woodland	草地 Grassland	水域 Water area	城乡工矿居民用地 Resident and industry land	未利用土地 Unused land
1985 ~ 2000	1	97.18	0.57	0.09	0.07	2.01	0.07
	2	0.64	98.26	0.00	1.02	0.07	0.02
	3	1.58	0.02	98.02	0.16	0.16	0.05
	4	3.84	0.00	0.48	94.53	0.00	1.14
	5	0.01	0.00	0.00	0.03	99.96	0.00
	6	1.23	0.02	0.08	0.04	0.02	98.61
2000 ~ 2005	1	94.29	0.62	2.59	0.13	1.12	1.25
	2	7.63	85.02	3.62	0.00	1.50	2.23
	3	6.03	0.11	92.02	0.12	1.01	0.71
	4	3.80	0.11	0.93	94.00	0.06	1.10
	5	3.15	0.15	0.50	0.01	96.11	0.08
	6	0.61	0.02	0.42	0.03	0.02	98.90
1: 耕地 Farmland; 2: 林地 Woodland; 3: 草地 Grassland; 4: 水域 Water area; 5: 城乡工矿居民用地 Resident and industry land; 6: 未利用土地 Unused land							

表 2 不同时期黑河干流中游地区各种斑块类型的景观动态

Table 2 Changes of different patch types in midstream of Heihe mainstream basin in different years							
指标 Index	年份 Year	耕地 Farmland	林地 Woodland	草地 Grassland	水域 Water area	城乡工矿居民用地 Resident and industry land	未利用土地 Unused land
CA (km <sup>2</sup> )	1985	1749.65	175.38	1402.13	255.79	140.70	5778.19
	2000	1804.21	183.96	1381.95	249.80	179.17	5702.76
	2005	1848.35	170.42	1352.39	240.57	210.08	5680.04
PLAND (%)	1985	18.3375	1.9305	14.6600	2.7196	1.6079	60.7444
	2000	18.9032	2.0149	14.4715	2.6650	1.9553	59.9901
	2005	19.4525	1.7935	14.2329	2.5318	2.2109	59.7783
PD (个/km <sup>2</sup> )	1985	0.0093	0.0141	0.0360	0.0189	0.0219	0.0114
	2000	0.0089	0.0152	0.0319	0.0182	0.0239	0.0114
	2005	0.0087	0.0159	0.0363	0.0191	0.0241	0.0122
LPI (%)	1985	12.8933	0.2333	3.6030	0.2481	0.0744	51.9851
	2000	15.0422	0.2283	3.6576	0.2978	0.1092	52.5955
	2005	15.7419	0.2132	3.6030	0.2798	0.1302	51.4541
PAFRAC	1985	1.6355	1.5812	1.5978	1.6561	1.6218	1.5643
	2000	1.6382	1.5549	1.6054	1.6822	1.6171	1.5658
	2005	1.6375	1.5665	1.6018	1.6626	1.6567	1.5618
AI (%)	1985	67.5151	31.3008	55.0612	27.8360	13.7255	85.7696
	2000	66.7185	31.0484	56.1665	27.6438	15.3305	85.7313
	2005	67.0270	30.2205	54.8742	27.3612	15.3743	85.6487
IJI (%)	1985	89.0542	84.4134	60.7196	76.7928	51.3109	72.3664
	2000	89.1038	83.5353	60.6165	74.6855	51.5337	74.1392
	2005	90.1076	83.9584	60.8099	76.7514	47.3395	72.6150
COHESION	1985	97.8033	60.6833	87.9220	63.4354	31.0391	99.2786
	2000	98.3012	59.7919	89.6551	64.8882	34.0254	99.3154
	2005	98.3674	58.8096	88.0034	62.4309	36.9104	99.2650



表 3 不同时期黑河干流中游地区景观动态

Table 3 Changes of landscape of midstream of Heihe mainstream basin in different years

年份 Year	NP (个 ind.)	PD (ind./km <sup>2</sup> )	LPI (%)	LSI	PAFRAC	CONTAG (%)	IJI (%)	AI (%)	DIVISION	SHEI	SHDI
1985	1060	0.1116	51.9851	20.0757	1.5961	46.0881	75.8593	74.1348	0.7091	0.6340	1.1360
2000	1040	0.1095	52.5955	20.1479	1.6026	45.8887	76.4978	74.0329	0.6971	0.6370	1.1410
2005	1105	0.1163	51.4541	20.4313	1.5993	45.3448	76.4804	73.6308	0.7071	0.6440	1.1530

从 2000 ~ 2005 年景观类型转移概率矩阵知:(1)耕地主要向草地、城乡工矿居民用地和未利用土地转换,各占 2.59%、1.25% 和 1.12%;而耕地的增加量主要来源于草地、未利用土地和林地;(2)林地主要向耕地和草地转换,各占 7.63% 和 3.62%;而林地的增加量主要来源于耕地;(3)草地主要向耕地转变;而草地的增加量主要来源于耕地和未利用土地;(4)水域主要向耕地和未利用土地转变,各占 3.80% 和 1.10%;而水域的增加量主要来源于耕地、未利用土地和草地;(5)城乡工矿居民用地主要向耕地转换;而城乡工矿居民用地的增加量主要来源于耕地和草地;(6)未利用土地主要向耕地和草地转换,各占 0.61% 和 0.42%;而未利用土地的增加量也主要来源于耕地和草地。

### 3.2 斑块类型水平上景观变化分析

#### 3.2.1 斑块结构特征分析

从 3 期的斑块类型面积(CA)和斑块类型百分比(PLAND)以及景观类型转移矩阵可以看出,在整个黑河干流中游地区,占主要优势的景观类型一直为未利用土地、耕地和草地,其中未利用土地面积占总面积的 60% 左右,是研究区景观的基质类型。耕地面积一直在增长,2000 ~ 2005 年(分水后)耕地增长量与 1985 ~ 2000 年(分水前)相当,说明分水后研究区耕地没有减少,反而在增加,并且增长速度加快。耕地扩张会增加新的用水,但分水后研究区用水进一步受到限制,使原有的部分耕地因缺水而撂荒,促使耕地向其他景观类型的转换。林地面积 1985 ~ 2000 年增加了 8.59km<sup>2</sup>,增加 4.90%,分水后呈减少趋势,2005 年相比 2000 年减少 13.54km<sup>2</sup>。林地中有林地和灌木林面积基本不变,疏林地和其他林地有不同程度的减少。出现这种局面的原因是,黑河实施分水后,研究区可用水资源量减少,靠近耕地或耕地区的林地生态用水进一步减少。草地呈逐年减少趋势,2005 年相比 1985 年草地面积减少 49.74km<sup>2</sup>,减少幅度 3.55%。其中高覆盖度草地几乎不变,而中、低覆盖度草地分别减少 5.94km<sup>2</sup> 和 43.09km<sup>2</sup>。低覆盖草地的大量减少,进一步表明分水后草地的生态用水减少。水域面积一直在减少,1985 ~ 2005 年水域面积减少 15.22km<sup>2</sup>,减少幅度 5.95%。水域面积减少主要体现在滩地减少 19.41km<sup>2</sup>,滩地减少实际上是研究区内耕地向河流滩地扩展。城乡工矿居民用地面积逐年增加,1985 ~ 2005 年增加 69.38km<sup>2</sup>,增加幅度 49.31%。城乡工矿居民用地分水后的增长量几乎与分水前的增长量相当,表明分水后,研究区的城市化进程加快。未利用土地逐年减少,1985 ~ 2005 年减少 98.15km<sup>2</sup>,减少幅度 1.70%。

斑块密度(PD)反映景观的破碎化程度,同时也反映景观空间异质性程度。斑块密度愈大,景观的破碎程度愈大,景观异质性愈高<sup>[23]</sup>。在黑河干流中游地区,各类景观的斑块密度均较小,草地和城乡工矿居民用地相对较大,较为破碎,受人类活动影响最为强烈。耕地的斑块密度从 1985 年的 0.0093 个/km<sup>2</sup> 一直减少到 2005 年的 0.0087 个/km<sup>2</sup>,反映了耕地一直在扩张。其他 5 种景观类型在分水后斑块密度均呈增加趋势,表明斑块更加破碎。林地和草地斑块密度增加与林草地开荒和沙化、部分林草地退化有密切关系。城乡工矿居民用地斑块增加主要是由于城市化进程加快,新增斑块的出现。而对未利用土地开发力度加大是其斑块数目增加的主要原因。

最大斑块指数(LPI)是各类型中的最大斑块面积与景观总面积之比的百分数,可用其量化类型水平上最大斑块占整个景观的比例,是一种简单的优势度衡量法。在研究区,未利用土地 LPI 最大,其次是耕地和草地。说明研究区未利用土地占绝对优势,其次是耕地和草地,这与研究区的基质类型为未利用土地的分析一致。从变化趋势来看,分水后耕地和城乡工矿居民用地的 LPI 有所增加,林地、草地、水域和未利用土地的

*LPI* 有所减少。耕地 *LPI* 增加说明了耕地在该区域面积上呈增大、空间上呈连片的趋势,这与耕地的蔓延发展形式一致。城乡工矿居民用地的 *LPI* 增加主要是由于经济发展,人口增长,城市化进程加快,斑块面积扩大并趋于成片成团的分布,在景观中的优势增加。林地、草地、水域和未利用土地的 *LPI* 降低,表明连片面积上在缩小、空间上被分割,在景观中的优势有所减少。

### 3.2.2 斑块分维数分析

分维数用于度量斑块或景观类型的复杂程度,对于具有分形结构的景观,其缀块性在不同尺度上应表现出很大的相似性,如果分维数在某一尺度域上不变,那么该景观在这一尺度范围可能具有结构的自相似性。分维数大小反映了人类活动对景观的影响,一般介于 1~2 之间。分维数越接近 1,斑块的自相似性越强,斑块形状越有规律。斑块的几何形状越趋于简单,说明斑块受人为干扰的程度越大,因为人为干扰所形成的斑块一般几何形状较为规则,易出现相似性的斑块形状。本文分维数采用面积-周长法来测定。分水后耕地、草地、水域和未利用土地的面积-周长分维数有所减少,说明这 4 种景观斑块形状朝简单、规则方向变化,受干扰程度更加强烈,如人类活动和水资源的时空分配。而分水后,林地和城乡工矿居民用地的面积-周长分维数增加,说明斑块形状变得较为复杂。

### 3.2.3 斑块聚集度和分离度分析

聚集度指数(*AI*)反映景观中不同斑块类型的非随机性或聚集程度,可反映景观组分的空间配置特征。如果一个景观由许多离散的小斑块组成,其聚集度的值较小;当景观中以少数大斑块为主或同一类型斑块高度连结时,聚集度的值则较大。研究区未利用土地的聚集度 *AI* 值最大,其次是耕地、草地、水域和林地,城乡工矿居民用地的聚集度 *AI* 值最小,说明未利用土地斑块相对较大,城乡工矿居民用地斑块相对分散破碎。从变化趋势来看,分水后林地、草地、水域和未利用土地聚集度均有所下降,说明其斑块间分布趋于分散,这是由于林地、草地、水域等对水资源依赖性增强。城乡工矿居民用地和耕地聚集度略有上升,说明其斑块分布更加集中,有不断连片的趋势。

散布与并列指数(*IJI*)是描述景观分离度的指数之一,其取值越小,说明与该景观类型相邻的其他类型越少,当 *IJI* 为 100 时,说明该类型与其它所有类型完全、等量相邻。研究区耕地的 *IJI* 最高,林地和水域次之,城乡工矿居民用地最低,说明耕地的空间邻接分布复杂,相邻景观类型最多,而城乡工矿居民用地的邻接景观类型较少,只和耕地、林地、草地等少数景观类型相邻;在变化趋势上,分水后研究区耕地、林地和水域的 *IJI* 明显增加,表明与更多的景观类型相邻,且周围的斑块类型分布集中且分布均匀;未利用土地和城乡工矿居民用地的 *IJI* 显著减小,表明分水后人类的干扰强度与范围大大增强,使原本零散的城乡工矿居民用地逐渐连成片,分布更集中。

### 3.2.4 斑块连接性分析

斑块结合度指数(*COHESION*)是对各斑块类型的物理连通性的描述。耕地和未利用土地的 *COHESION* 最高,接近 100,说明耕地和未利用土地一直是该区域最主要的两种景观类型,连通性最好,城乡工矿居民用地的 *COHESION* 最低,说明其空间分布相对分散,连接性较低。从变化趋势来看,林地、草地和水域连通性降低,城乡工矿居民用地连通性增大,耕地和未利用土地基本没有发生变化。城乡工矿居民用地在整个区域都呈增大的趋势,这是工矿居民点增多的结果。分水后,耕地连通性的提高和林地、草地和水域的连通性的降低表明,耕地在原有基础上,在原有的其他类型零星土地进一步转化为耕地,在外从原有的耕地边缘向外扩展;而林地、草地和水域被支离破碎。

## 3.3 景观水平上景观变化分析

### 3.3.1 景观特征指数分析

2000 年研究区共有 1040 个斑块,分水后到 2005 年,斑块数(*NP*)增加到 1105 个,斑块增加 65 个,而分水前研究区斑块从 1985 年到 2000 年减少 20 个。斑块密度(*PD*)相应由 2000 年的 0.1095 个/ $\text{km}^2$ 增加到 2005 年的 0.1163 个/ $\text{km}^2$ 。斑块数增加说明了景观更为破碎。最大斑块指数(*LPI*)有所减少,从 2000 年的

52.5955% 下降到 2005 年的 51.4541%, 说明研究区中最大斑块和最小斑块面积的差距减小, 斑块面积向趋于比较均匀的方向发展, 人类活动对土地利用的干扰越来越强烈。

### 3.3.2 景观形状特征分析

分水后, 研究区景观形状指数 (*LSI*) 从 2000 年的 20.1479 增大到 2005 年的 20.4313, 景观形状向趋于复杂的方向发展。分维数是度量景观形状的另一个指标, 它主要分析斑块类型及整个景观的破碎度。分水后, 研究区周长—面积分维数从 2000 年的 1.6026 下降到 2005 年的 1.5993, 说明分水后研究区景观受人为影响加大, 景观形状趋于复杂, 破碎度加大。

### 3.3.3 景观空间构型分析

描述景观空间构型的指数包括蔓延度指数 (*CONTAG*)、散布与并列指数 (*IJI*)、聚集度指数 (*AI*) 以及景观分割度指数 (*DIVISION*) 等。

蔓延度指数描述景观中不同景观类型的团聚程度, 取值范围 0 ~ 100%, 当 *CONTAG* 的值为 0 时, 说明景观以最大的程度分离 (每一个斑块都为一种不同的类型) 和散布 (所有斑块都以相同比例相邻接), 而当其值为 100% 时, 说明整个景观仅由一个斑块构成。取值小表明景观由许多分散的小斑块组成, 取值大表明景观由少数团聚的大斑块组成。3 个时期景观蔓延度指数均小于 50%, 说明研究区景观比较破碎, 小斑块比较多, 这主要是由于城镇面积的扩张以及开荒造成的耕地面积增加所致。景观分割度是度量景观可分离性的指数, 取值范围 0 ~ 1, 当景观由一个斑块组成时, 该值为 0, 当景观由一个像元大小的小斑块组成时, 景观分割度趋近于 1。分水后, 研究区景观蔓延度指数由 2000 年的 45.8887 下降到 2005 年的 45.3448, 散布与并列指数由 2000 年的 76.4978 下降到 2005 年的 76.4804, 聚集度指数由 2000 年的 74.0329 下降到 2005 年的 73.6308, 而景观分割度指数由 2000 年的 0.6971 增加到 2005 年的 0.7071。研究区景观蔓延度指数、散布与并列指数、聚集度指数相对下降, 景观分割度指数增加。说明景观的空间连接性下降, 景观要素类型空间分布不均衡, 优势斑块类型的比例下降, 其他斑块类型的优势度增加, 斑块分布更为分散, 并混合在一起。

### 3.3.4 景观多样性指数分析

香农多样性指数 (*SHDI*)、香农均度指数 (*SHEI*) 是一种基于信息理论的测量指数, 在生态学中应用很广。多样性指数反映景观类型的多少和景观中斑块的多度和异质性。均匀度指数描述景观各组分配均匀程度。其值越大, 表明景观各组成成分分配越均匀。分水后, 研究区的 *SHDI* 和 *SHEI* 均在增加, *SHDI* 由 2000 年的 1.141 增加为 2005 年的 1.153, *SHEI* 由 2000 年的 0.637 增加为 2005 年的 0.644。香农多样性指数和香农均度指数增加说明了景观多样性水平提高, 异质性在增加, 景观中斑块优势度在减少, 斑块类型在景观中趋于均匀分布, 土地利用向着多样化和均匀化方向发展。这与分水后耕地、城乡工矿居民用地面积大幅度增加, 草地、林地、水域和未利用土地面积减少, 进而导致各景观类型所占比例差异减少有关。

## 4 景观变化的驱动力分析

景观变化的驱动力包括自然因素和人为因素两方面。自然因素包括气温、降水、地质地貌、土壤等, 人为因素包括人口、技术水平、富裕程度、政治经济结构等。景观变化是两者共同作用的结果, 但在几十年甚至百年尺度上, 自然因素引起的环境变化幅度相对较小, 而人类活动产生的环境变化, 在强度上甚至超过了自然因素引起的环境变化, 成为主要因素<sup>[24]</sup>。

### 4.1 自然因素

景观变化与气温、降水、地质地貌、土壤等自然因素密切相关, 由于本文研究的时间尺度是 20a, 相对较短, 研究区地质、地貌以及土壤等自然因素发生变化不大<sup>[25]</sup>, 在自然因素中, 气温和降水相对表现活跃, 对景观变化亦影响相对较大。

如图 2 和图 3 所示, 研究区的降水量和气温趋势线变化并不明显, 特别是分水后短期内, 研究区降水量和气温变化不大。说明在短时间内, 气候因素对研究区景观变化的驱动作用有限。

干旱区景观格局高度依赖水资源条件。水资源在很大程度上决定着干旱区的环境状况与环境质量, 也决

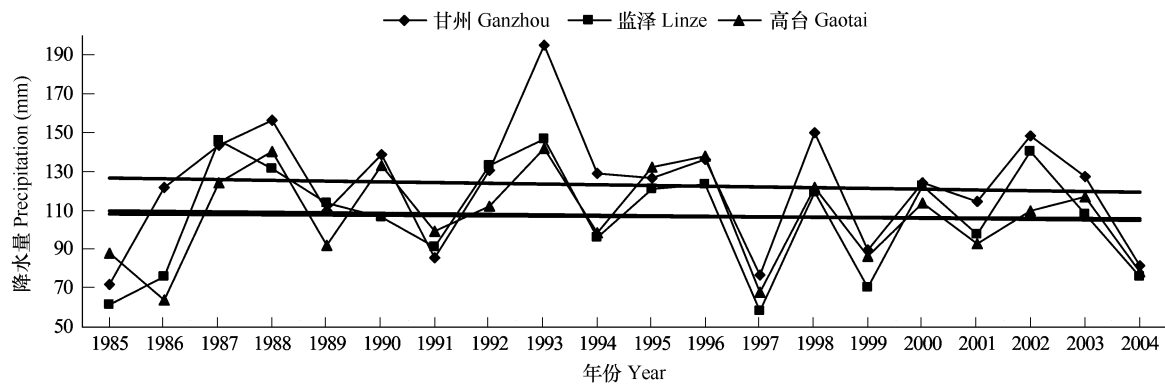


图2 1985~2004年研究区各县区年降水量变化情况

Fig. 2 The precipitation of different county in study area from 1985 to 2004

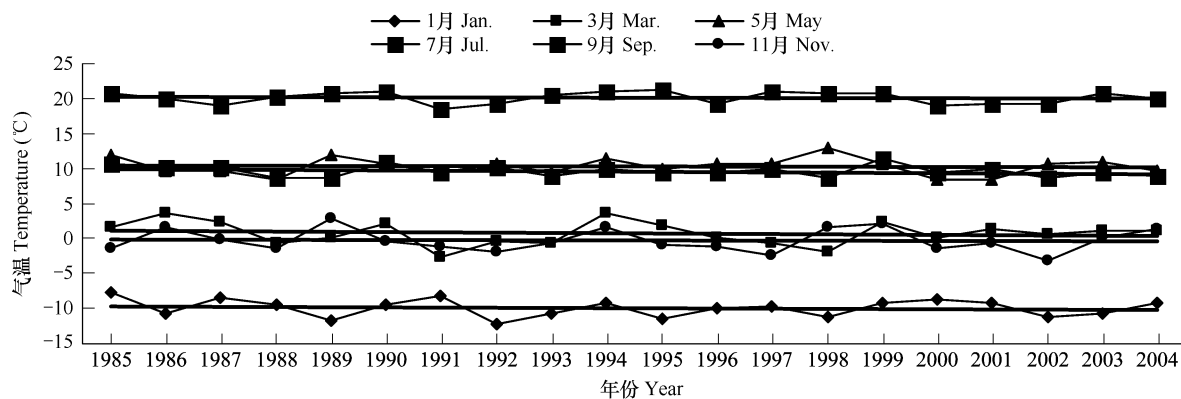


图3 1985~2004年研究区不同月份气温变化情况

Fig. 3 The temperature of study area from 1985 to 2004

定着干旱区内陆河流域景观格局的稳定与演化,其作用是其它任何生态因子都无法替代的。有水是绿洲,无水成荒漠,这是水资源对干旱区景观格局重要性的最好刻画。气候因素主要通过改变水文状况来影响研究区景观,而人为因素既可以直接改变景观格局,又可以通过取用水资源来间接促进景观演变。

根据黑河干流水文资料分析(图4),黑河干流正义峡来水与莺落峡来水有很强相关性和同步性,两者相关系数达0.90以上。1985~2000年莺落峡和正义峡年平均来水量分别为16.35亿 $\text{m}^3$ 和8.47亿 $\text{m}^3$ ,2001~2004年莺落峡和正义峡年平均来水量15.57亿 $\text{m}^3$ 和8.55亿 $\text{m}^3$ ,由此初步估算消耗在黑河干流中游地区的水量略有减少,1985~2000年研究区耗水7.88亿 $\text{m}^3$ ,2000~2004年研究区耗水减少到7.03亿 $\text{m}^3$ 。在其他因素变化不大的情况下,消耗在研究区的水量减少,势必引起草地、林地、水域景观面积的减少。

#### 4.2 人为因素

在自然、水文等因素改变研究区景观的同时,人为因素的影响是明显而复杂的。人类活动对景观格局的影响力度与影响范围越来越大,近年来已成为公认的改变地表生物圈的主要动力。黑河干流中游地区景观变化既受到自然环境的长期制约,更受到人类活动的干预和社会经济条件的影响;尤其是在短期效应上,政治、经济和社会决策对研究区景观变化起着决定性作用。

1985~2005年,研究区最大的人类活动就是启动黑河省级分水,完成黑河干流水量统一调度。黑河分水后,研究区总用水量趋于减少(表4),从2000年的18.94亿 $\text{m}^3$ 减少到2005年的17.77亿 $\text{m}^3$ ,减少了1.17亿 $\text{m}^3$ ,其中农业和生态用水在减少,生活和工业用水在增加。农田灌溉亩均用水量由2000年的718 $\text{m}^3/666.7\text{m}^2$ 下降到2005年的655 $\text{m}^3/666.7\text{m}^2$ ,下降较多,但还有较大节水潜力。供水水源中,地表水源由于黑河水量统

一调度约束使其供水量减少,而不得不加大地下水的开采力度,从2000年的2.19亿 $\text{m}^3$ ,增加到2005年的3.96亿 $\text{m}^3$ ,引起研究区地下水水位的下降。生态用水的减少,地下水水位的下降<sup>[21]</sup>,使研究区草地、林地、水域面积呈现出退化的趋势。

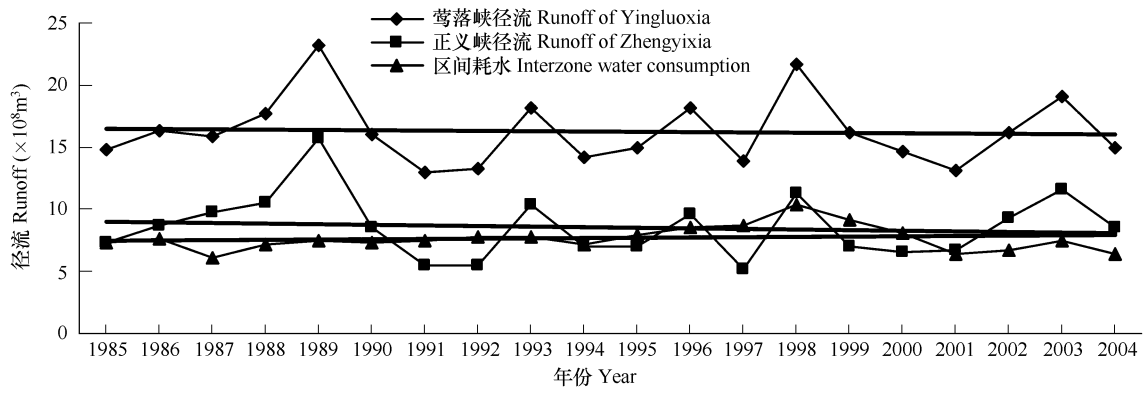


图4 黑河干流莺落峡、正义峡水文站实测年径流量变化

Fig.4 The change of annual runoff of Yingluoxia and Zhengyixia hydrologic station in the middle reaches of Heihe River

表4 2000~2005年研究区用水情况(亿 $\text{m}^3$ )

Table 4 The water use in study area from 2000 to 2005

分类 Types	年份 Year					
	2000	2001	2002	2003	2004	2005
农业用水 Agricultural water	16.64	14.97	15.07	16.28	15.45	15.32
工业用水 Industrial water	0.51	0.52	0.57	0.61	0.65	0.66
生活用水 Domestic water	0.37	0.38	0.43	0.47	0.48	0.48
生态用水 Ecological water	1.42	1.34	1.78	1.29	1.32	1.31
总用水量 Total water	18.94	17.22	17.85	18.66	17.90	17.77
其中:地表水 Surface water	16.75	14.01	14.90	15.15	13.84	13.81
地下水 Groundwater	2.19	3.21	2.95	3.51	4.05	3.96

此外,研究区人口增长和社会经济发展对其景观格局的演变驱动尤为突出和直接。研究区1985年的总人口为64.70万,2005年总人口增长到80.30万,其中1985~2000年人口增长相对较快。其中农业人口由1985年的55.80万人增长到2005年的57.77万人,非农业人口则由1985年的8.90万人增长到2005年的22.53万人,非农业人口增长相对较快。1985~2005年间耕地、城乡工矿居民用地面积增大,草地、林地、水域面积减少,这些变化归根结底是人口增加和经济发展需要的结果。人口增加必然会导致城镇扩张,从而使居民建筑用地和交通用地增加。为满足对粮食的需求,人们不断开垦草地、林地、湿地,以扩大耕地面积。

社会经济的快速发展,人民群众的生活水平日益提高,其消费结构从最初单一粮食产品转向肉、蛋等高营养产品,促进了养殖业的发展。1985~2005年研究区养殖的大牲畜数量增长迅速,其中2000~2005年增长较快,由2000年的27.58万头增长到2005年的36.70万头,即黑河干流水量统一调度后研究区大牲畜数量增长了33%。为了增加养殖数量,势必造成林地、草地、湿地的开垦;同时,牲畜数量增长,造成严重超载,也会加速林草地的退化与沙化。

5 结论

本文从类型和景观两个水平研究了黑河干流中游地区1985~2005年的景观结构及其动态演变,特别是详细分析了黑河流域干流水量统一调配以来(分水后)研究区的景观动态变化,并分别从自然因素和人为因素等影响研究区景观变化的主要驱动因子探讨了研究区景观格局演化的驱动机制。

(1)1985~2005年研究区景观发生了较大的变化。耕地、城乡工矿居民用地一直在增加,草地、水域、未

利用土地一直在减少,林地 1985 ~ 2000 年在增加,而 2000 ~ 2005 年在减少。分水后,研究区耕地和城乡工矿居民用地增加较快,林地、草地和水域面积减少。

(2)在斑块类型水平上,分水后,耕地由于扩张,呈连片趋势发展,破碎度降低,斑块大小分布更为均匀,形状更为规则,空间连接性增强,分布集中;林地破碎度增加,斑块形状更加复杂,分布更为分散,连通性降低;草地破碎度增加,形状更为规则,分布更为分散,连通性降低;水域破碎度增加,斑块边缘和形状在简单化,优势度降低,斑块大小更为均匀,分布更为分散,连通性降低;城乡工矿居民用地由于新增斑块的出现,斑块面积扩大并趋于成片的聚集,分布更集中,在景观中的优势增加,形状更为简单、规则,连通性增强;未利用土地由于开发程度加大,使其空间上被分割,优势度降低。

(3)在景观水平上,分水后,研究区斑块数、斑块密度、景观形状指数、景观分割度指数、香农多样性指数和香农均度指数增加,最大斑块指数、周长—面积分维数、景观蔓延度指数、散布与并列指数、聚集度指数减少,说明景观多样性水平提高,异质性在增加,破碎化程度越来越大,景观中斑块空间连接性下降,优势度在减少,斑块类型在景观中趋于均匀分布,土地利用向着多样化和均匀化方向发展。

(4)对研究区景观变化的驱动因子分析表明,人为因素特别是人口增加以及与水有关的人类活动,是研究区景观格局变化最活跃、最主要的驱动力。人口增长和社会经济发展是驱动研究区景观变化的根本因子,人口增加必然会导致城镇扩张,居民建筑用地和交通用地增加,驱动耕地、未利用土地向城乡工矿居地转换,社会经济发展促使人们不断开垦草地、林地、未利用土地以扩大耕地面积。黑河分水后,较大减少了流域中游地区水资源的可利用量,导致研究区草地、林地、水域相应退化,植被覆盖度降低。

(5)鉴于黑河流域干流水量统一调配以后,研究区可利用水资源更为紧缺,为解决水资源带来的社会经济发展瓶颈制约问题,需要严格控制耕地发展规模;需要合理优化种植业内部的用地结构,以水定产业结构;还需要大力推进张掖市节水型社会建设,研究区农业用水占总用水的 85% 以上,其节水潜力较大,限制和淘汰高耗水作物,如水稻和带田作物等,在今后的发展中需要特别加强农业节水力度。

## References:

- [ 1 ] Zev Naveh, Lieberman A S, Landscape Ecology. Second edition, New York: Springer-verlag, 1994.
- [ 2 ] Forman R T T, Landscape mosaics. The Ecology of Landscape and Region. Cambridge University Press, 1995.
- [ 3 ] Forman R T T, Some general principles of landscape and regional ecology. Landscape Ecology, 1995, 10:133 — 142.
- [ 4 ] Risser P G, Karr J R, Forman R T T, Landscape ecology: Directions and approaches. Illinois Natural Survey Special Publication number 2, Champaign, Illinois, 1984.
- [ 5 ] Turner M G. Landscape ecology: the effect of pattern on process. Annual Review of Ecology and Systematics, 1989, 20:171 — 197.
- [ 6 ] Andy P. Dobson *et al.*, Hope for the future: restoration ecology and conservation biology. Science, 1997, 277 — 515.
- [ 7 ] Xiao D N, Zhong L S. Ecological principles of landscape classification and assessment. Chinese Journal of Applied Ecology, 1997, 9(2):217 — 221.
- [ 8 ] Xiao D N, Li X Z. Development and Prospect of Contemporary Landscape Ecology. Scientia Geographica Sinica, 1997, 17(4):356 — 363.
- [ 9 ] Xiao D N, Bu R C, Li X Z. Spatial Ecology and Landscape Heterogeneity. Acta Ecologica Sinica, 1997, 17(5):453 — 461.
- [ 10 ] Forman R T T, Godron M. Landscape Ecology. Wiley, New York, 1986.
- [ 11 ] Xian D N, Li X Y, Song D M. Landscape changes and ecological reconstruction in Minqin Huqu oasis. Acta Ecologica Sinica, 2005, 25 (10): 2477 — 2483.
- [ 12 ] Guo M, Xiao D N, Li X. Changes of landscape pattern between 1986 and 2000 in Jiuquan oasis, Heihe River basin. Acta Ecologica Sinica, 2006, 26(2):457 — 466.
- [ 13 ] Li H L, Xiao D N, Wang Q B, *et al.* Landscape changes of typical agricultural oasis in arid regions and its driving factors. Acta Ecologica Sinica, 2004, 24 (9): 1878 — 1883.
- [ 14 ] Zhao R F, Zhou H R, Xiao D N, *et al.* Changes of wetland landscape pattern in the middle and lower reaches of the Tarim River. Acta Ecologica Sinica, 2006, 26(10):3470 — 3478.
- [ 15 ] Chang X L, Yu Y J, Cao Y Y, *et al.* Ecological effects of landscape structure on desertification process of Keerqin sandy land. Chinese Journal of Applied Ecology, 2005, 16(1):59 — 64.



- [16] Meng J J, Wu X Q. Research on the Landscape Spatial Pattern of Suzhou in the Middle Western Hexi Corridor. *Arid Land Geography*, 2004, 27(2): 179—185.
- [17] Lu L, Li X, Cheng G D, *et al.* Analysis on the landscape structure of the Heihe River Basin, Northwest China. *Acta Ecologica Sinica*, 2001, 21(8): 1217—1224.
- [18] Li N, Yang T B. Research on LUCC in Middle Reaches of Heihe River Basin after Water Redistribution. *Journal of Desert Research*, 2008, 28(2): 223—226.
- [19] Ma G X, Tian Y J. Study on Risk Aversion of Ecology-economy System of Zhangye Oasis After Water Allocation of Heihe River. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2006, 20(4): 61—66.
- [20] Zhang B, Zhang K, Hao J X. Research on Optimization of Land Use Structure in Middle Reaches of Heihe River after Water Distribution. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2004, 18(2): 88—91, 195.
- [21] Wei Z, Jin H J, Nan Y C, *et al.* The Effect on Water Environment in Middle and Downstream Area of Heihe River after Water Allocation. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2007, 26(5): 34—36, 54.
- [22] Wei Z, Jin H J, Nan Y C, *et al.* Analysis of the Change of Groundwater Resources due to Water Allocation in the Irrigation Areas of the Middle Heihe River. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2008, 30(2): 344—350.
- [23] Chen L D, Fu B J. Analysis of Impact of Human Activity on Landscape Structure in Yellow River Delta — A Case Study of Dongying Region. *Acta Ecologica Sinica*, 1996, 16(4): 337—344.
- [24] Li X B. International Research on Environmental Consequence of Land Use/Cover Change. *Advance in Earth Sciences*, 1999, 14(4): 395—400.
- [25] Zhang B, Mao Y C, Liu J F. Analysis Driving Forces of LUCC in Heihe Middle Reaches. *Arid Land Geography*, 2006, 29(5): 726—730.

#### 参考文献:

- [7] 肖笃宁, 钟林生. 景观分类与评价的生态原则. *应用生态学报*, 1998, 9(2): 217—221.
- [8] 肖笃宁, 李秀珍. 当代景观生态学的进展和展望. *地理科学*, 1997, 17(4): 356—363.
- [9] 肖笃宁, 布仁仓, 李秀珍. 生态空间理论与景观异质性. *生态学报*, 1997, 17(5): 453—461.
- [11] 肖笃宁, 李小玉, 宋冬梅. 石羊河尾间绿洲的景观变化与生态恢复对策. *生态学报*, 2005, 25(10): 2477—2483.
- [12] 郭明, 肖笃宁, 李新. 黑河流域酒泉绿洲景观生态安全格局分析. *生态学报*, 2006, 26(2): 457—466.
- [13] 李华蕾, 肖笃宁, 王秋兵, 等. 干旱区典型农业绿洲的景观变化与原因分析. *生态学报*, 2004, 24(9): 1878—1883.
- [14] 赵锐锋, 周华荣, 肖笃宁, 等. 塔里木河中下游地区湿地景观格局变化. *生态学报*, 2006, 26(10): 3470—3478.
- [15] 常学礼, 于云江, 曹艳英, 等. 科尔沁沙地景观结构特征对沙漠化过程的生态影响. *应用生态学报*, 2005, 16(1): 59—64.
- [16] 蒙古军, 吴秀芹. 河西走廊中西段肃州区景观空间格局研究. *干旱区地理*, 2004, 27(2): 179—185.
- [17] 卢玲, 李新, 程国栋, 等. 黑河流域景观结构分析. *生态学报*, 2001, 21(8): 1217—1224.
- [18] 李娜, 杨太保. 黑河分水后中游地区 LUCC 监测. *中国沙漠*, 2008, 28(2): 223—226.
- [19] 马国霞, 田玉军. 黑河分水后张掖绿洲“生态-经济”系统风险规避研究. *干旱区资源与环境*, 2006, 20(4): 61—66.
- [20] 张勃, 张凯, 郝建秀. 分水后黑河中游地区土地利用结构优化研究. *水土保持学报*, 2004, 18(2): 88—91, 195.
- [21] 魏智, 金会军, 南永超, 等. 黑河分水对中游水环境的影响. *灌溉排水学报*, 2007, 26(5): 34—36, 54.
- [22] 魏智, 金会军, 蓝永超, 等. 黑河实施分水后中游灌区地下水资源量的变化分析. *冰川冻土*, 2008, 30(2): 344—350.
- [23] 陈利顶, 傅伯杰. 黄河三角洲地区人类活动对景观结构的影响——以山东省东营市为例. *生态学报*, 1996, 16(4): 337—344.
- [24] 李晓兵. 国际土地利用-土地覆盖变化的环境影响研究. *地球科学进展*, 1999, 14(4): 395—400.
- [25] 张勃, 毛彦成, 柳景峰. 黑河中游土地利用/覆盖变化驱动力的定量分析. *干旱区地理*, 2006, 29(5): 726—730.