

基于信息熵的南四湖流域土地利用变化分析与预测

张 琨, 张宝雷, 梁 凯

(山东师范大学 人口·资源与环境学院, 济南 250014)

摘要: 南四湖流域是南水北调东线工程的关键区域, 研究该区土地利用现状及未来发展态势对于保障工程顺利实施以及促进区域可持续发展具有重要意义。在 RS 与 GIS 技术的支持下, 获取了南四湖流域 1995 年- 2010 年土地利用序列数据, 并利用信息熵理论对流域土地利用类型变化和结构演变进行定量分析。结果表明, 1995 年- 2010 年南四湖流域耕地持续减少, 植被覆盖水平有所恢复, 水域湿地和建设用地大幅度增加; 土地利用信息熵升高, 均衡度增加, 优势度降低, 单个类型对整体结构的控制力下降, 土地利用结构趋于均衡; 1995 年- 2000 年土地利用程度综合指数降低, 但 2000 年之后持续升高, 流域土地利用处于发展期。利用 GM(1, 1) 模型进行土地利用演变预测, 结果显示流域土地利用结构将进一步调整并向均衡化方向发展。

关键词: 土地利用变化; 信息熵; GM(1, 1) 模型; 南四湖流域

中图分类号: F301.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-1683(2013)05-0038-05

Analysis and Prediction of Land Use Change in the Nansihu Lake Watershed

Based on Information Entropy Theory

ZHANG Kun, ZHANG Bao lei, LIANG Kai

(College of Population, Resources and Environment, Shandong Normal University, Ji'nan 250014, China)

Abstract: The Nansihu Lake Watershed is the key area of Eastern Route of South to North Water Diversion Project, and therefore it is of great importance to study the current situation of land use and its future development trend in order to guarantee the smooth implementation of the South to North Water Diversion Project and to promote the sustainable development of the area. Under the support of RS and GIS technology, a series of land use data was obtained in the Nansihu Lake Watershed from 1995 to 2010, and the information entropy theory was used to analyze the variation and structural evolution of land use quantitatively. The results showed that (1) the farm land reduces continuously, the level of vegetation cover recovers, and the wetland and construction land increase from 1995 to 2010; (2) the land use information entropy increases, the equilibrium degree rises whereas the dominance degree decreases, indicating the decreasing controlling force of single type to the entire land use structure and a tendency to balance of land use structure; and (3) the comprehensive index of land use degree decreases from 1995 to 2000, but increases continuously since 2000, suggesting a developing stage for land use in the watershed. The GM(1, 1) model was used to predict the land use change, which indicated that the land use structure would further adjust to reach the balance.

Key words: land use change; information entropy; GM(1, 1) model; Nansihu Lake Watershed

区域土地利用受到自然演变和人类活动的双重影响, 是社会系统、经济系统和生态系统耦合机制的外在表征。明确土地利用特征性质及其变化机制, 对于区域的合理规划和有效开发具有重要意义。土地系统本身是具有耗散结构的自然历史综合体, 表现出结构和功能的有序性特征, 可以通过信息熵来描述其有序程度^[1], 反映土地利用变化过程。近年

来, 学术界对此进行了许多有益的探索, 如杨晓娟等^[2]将兰州市 1959 年- 2004 年用地结构信息熵分为持续下降、剧烈上升后缓慢增长以及急速回落三个阶段, 其经济社会驱动力主要为建设投资规模和人口增长及就业情况; 周子英等^[3]利用信息熵分析长沙市土地利用结构演变, 认为长沙市土地利用结构向无序方向转化, 结构性减弱, 并表现出明显的区域

收稿日期: 2013-05-05 修回日期: 2013-08-08 网络出版时间: 2013-08-22

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20130822.1705.007.html>

基金项目: 教育部人文社科基金青年项目(12YJC790254; 11YJC790283); 山东省高校人文社会科学研究项目(J11WF12); 山东省自然科学基金(2010ZRE14029)

作者简介: 张 琨(1988-), 男, 山东济南人, 硕士研究生, 主要从事资源环境监测和 GIS 应用方面研究。E-mail: zhangkds@163.com

通讯作者: 张宝雷(1979-), 男, 山东临沂人, 副教授, 博士, 主要从事 3S 技术在资源环境中的应用研究。E-mail: blzhangsd@163.com

差异性,演变根本动因为第二产业迅速增长。然而,前人研究多以单个市县作为研究区域^[47],或侧重于对土地利用结构演变情况及其驱动力进行分析,而对于区域性土地利用结构演变及其趋势预测的研究则相对较少。

南四湖流域位于淮河流域北部,是南水北调东线工程的枢纽区域,区内土地利用情况对于南水北调东线工程的开展实施具有重要影响。近年来,流域范围内持续开展了以低碳生产、宜居生活为目标的建设活动,同时为改善流域生态环境质量,保证南水北调东线工程顺利实施,还加强了对流域生态环境的整治力度。在此背景下,流域土地利用类型变化频率加快,面积变化幅度增大。本研究从流域整体入手,借助信息熵理论对南四湖流域土地利用演变情况进行分析,并利用GM(1,1)灰色预测模型,对未来土地利用结构进行预测,以期确定流域土地利用变化特点,明确土地利用演变进程,为南水北调东线工程的顺利实施以及流域的可持续发展提供理论支持。

1 研究区概况

南四湖流域北起大汶河南岸,南抵炎黄河南堤,东至鲁中南低山丘陵区西侧边缘,西以黄河堤坝为界,包括济宁、枣庄、菏泽三市以及泰安的宁阳县,流域总面积约为28 916 65 km²,见图1。为典型的暖温带大陆性季风气候,全年60%~80%的降水集中在6月—9月。南四湖流域水系发达,河网纵横,包含入湖河流53条,出湖河流3条,水资源较为丰富。流域地处鲁南经济带,经济实力相对薄弱,但是自然地理条件优越,拥有较大发展潜力。截至2010年底,流域总人口为2 273万人,人口密度为782人/km²,其中乡村人口为1 650 37万人,占总人口的72.6%。2010年流域生产总值为5 342 94亿元,一、二、三产业所占比例为13.0:54.7:32.3。

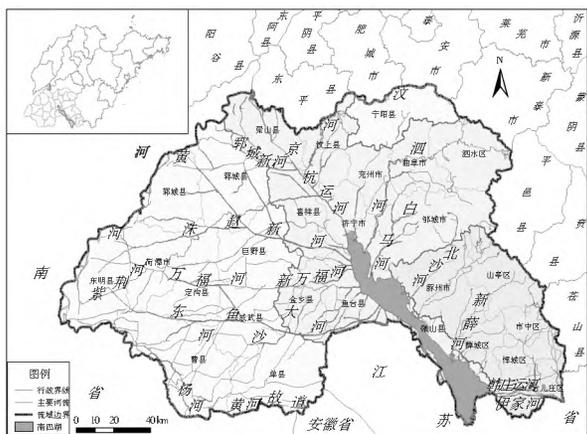


图1 南四湖流域位置

Fig. 1 Location of the Nansihu Lake Watershed

2 数据基础与研究方法

2.1 数据基础

南四湖流域的土地利用以成片分布的耕地为主,林地和草地也基本上成片分布,但斑块相对破碎。以往研究^[8 12]表明,Landsat TM/ETM+影像能够满足1:10万地面调查的精度要求,同时该影像的处理技术成熟且价格相对适宜,因

此本研究选择1995年、2000年和2005年的TM影像(空间分辨率30 m)以及2010年的ETM+影像(空间分辨率15 m)为基础数据源,影像来源于国际科学数据服务平台。为了更好地提取地表植被,选择了7月—8月份的影像。

根据南四湖流域的实际情况,将其主要土地利用类型分为耕地、林地、草地、水域湿地、建设用地和未利用地6种。本研究采用计算机自动分类与目视解译相结合的方式,获取1995年、2000年、2005年和2010年四期的土地利用数据,并通过外业调查修订到定性精度与定量精度达到95%后,形成最终的土地利用序列数据。

2.2 研究方法

2.2.1 土地利用结构信息熵

根据Shannon信息熵公式,将土地利用结构信息熵定义如下:

$$P_i = A_i / A$$

$$H = - \sum_{i=1}^N P_i \cdot \ln P_i \quad (1)$$

式中: A 为流域土地总面积, A_i ($i=1, 2, \dots, N$)表示第 i 种土地利用类型面积; P_i 为各类型占流域总面积的比重; H 为土地利用结构信息熵,其大小能够反映利用类型种类的多少以及各类型分布的离散水平^[13]。根据信息熵理论,当流域处于初始状态,即不受自然及人为因素影响时,信息熵达到最小值,即 $H_{\min} = 0$;随着流域开发的进行,利用类型增加,各类型间面积差异减小,信息熵随之增大;当各土地利用类型面积相等,即 $P_1 = P_2 = \dots = P_n = A/N$ 时,信息熵达到最大值 $H_{\max} = \ln N$ 。

基于信息熵,将土地利用结构均衡度及优势度定义为:

$$J = H / H_{\max} = - \sum_{i=1}^N P_i \cdot \ln P_i / \ln N$$

$$I = 1 - J \quad (2)$$

式中: J 为均衡度,体现的是土地利用类型分布的均衡程度,其值域为 $[0, 1]$ 。当 J 取最小值0时,流域土地利用处于最不平衡状态;当 J 取最大值1时,流域土地利用达到平衡状态。 I 表示优势度,所反映的是单个利用类型对流域整体土地利用结构的支配水平。

2.2.2 土地利用程度指标

流域土地利用变化是持续进行的动态过程,可以通过土地利用程度综合指数来定量地描述流域利用变化水平,反映其演变趋势。综合指数定义为:

$$La = \sum_{i=1}^n B_i \cdot C_i \times 100 \quad (3)$$

式中: La 为流域土地利用程度综合指数,其值域为 $[100, 400]$,当一个时期内该指数呈增加趋势时,表明流域土地利用在该时期处于发展期,反之则处于调整期或衰退期^[14]; B_i 表示第 i 级土地利用程度分级指数; C_i 表示流域内第 i 级土地利用程度分级的面积比重^[15]; n 为土地利用程度分级数,见表1。

2.2.3 GM(1,1)灰色预测模型

对土地利用变化趋势进行预测需要涉及区域资源禀赋、经济基础、人口结构等诸多自然、社会和经济因素,且各因素间相互影响^[16],难以准确把握。GM(1,1)灰色预测模型是

表 1 土地利用程度分级赋值
Table 1 Classification of land use degree

土地利用程度分级	未利用地	林地草地 水域用地	农业用地	城镇聚落用地
包含利用类型	未利用地	林地、草地、 水域湿地	耕地	建设用地
土地利用程度分级指数	1	2	3	4

将土地利用变化过程视作在一定幅值范围、一定时区内进行变化的灰色过程,通过对少量的、不完全的等时距信息数据进行处理,探寻系统内在规律^[7],并通过建立时间响应函数,实现对系统在未来某时刻特征值的预测。本研究利用南四湖流域 1995 年、2000 年、2005 年和 2010 年四期的土地利用信息熵构建了 GM(1, 1) 预测模型,其中前三期数据用于模型参数计算,第四期数据用于精度检验。模型建立步骤如下。

(1) 对原始数据 $X^{(0)}(1), X^{(0)}(2), \dots, X^{(0)}(t)$ 进行累加,生成新数列 $X^{(1)}(1), X^{(1)}(2), \dots, X^{(1)}(t)$ 。

(2) 利用生成数列进行 GM(1, 1) 建模,并用残差对模型进行修正,得到最终时间响应函数:

$$X^{(1)}(t+1) = [X^{(0)} - \frac{u}{a}] \exp(-at) + \frac{u}{a} \quad (4)$$

式中: a 为发展系数,用以表征灰色系统的发展态势; u 为灰色作用量; t 为时间。

(3) 精度检验。为了保证模型与实际情况的契合程度,需要进行精度检验。检验分为两部分,首先是误差不大于 5%,第二是通过后验比 c 和小误差概率 p 检验。两参数检验标准详见表 2。

表 2 灰色预测精度检验标准

Table 2 Test standard of gray prediction accuracy

后验比 c	小误差概率 p	精度评价
> 0.95	< 0.35	好
> 0.80	< 0.5	合格
> 0.70	< 0.65	勉强
≤ 0.70	≥ 0.65	不合格

以南四湖流域 1995 年-2005 年土地利用结构信息熵数据为基础,假设土地利用各影响因子水平保持稳定,利用 GM(1, 1) 模型构建土地利用结构信息熵时间响应模型:

$$\begin{cases} X^{(1)} = 46.9975e^{0.0208t} - 46.0581 \\ X^{(0)}(t+1) = X^{(1)}(t+1) - X^{(1)}(t), t = 1, 2, \dots, n \end{cases} \quad (5)$$

利用 GM(1, 1) 模型计算 2010 年土地利用结构信息熵并与实际值进行对比,误差小于 5%,同时模型后验比为 0.0267,小误差概率为 1.00,模型精度达到“好”的标准,说明构建的模型具有较高的科学性和可靠性,能够对流域土地利用结构信息熵进行高精度预测。

3 结果分析

3.1 土地利用类型变化分析

从表 3 南四湖流域各土地利用类型的面积变化可以看出,耕地是流域主要的土地利用类型,其面积不断减少,但是减少速度逐渐放缓。1995 年-2000 年耕地年均减少

12 841.28 hm², 2000 年-2005 年年均减少量下降为 7 580.29 hm², 2005 年-2010 年降至每年 7 399.03 hm²。造成耕地减少的主要原因是建设用地的在社会经济发展的驱动之下大规模扩展而大量占用耕地,1995 年-2010 年开发为建设用地的耕地面积达 95 409.63 hm²,占耕地转出总面积的 59.96%。与之相伴的是建设用地的大量扩张,到 2010 年面积净增 97 576.64 hm²,较 1995 年增加 25.25%,增幅高居各类型之首。流域林地也保持增长,2010 年林地面积较 1995 年增加 25.13%。不过,草地有一定程度的减少,2010 年草地面积比 1995 年下降了 7 487.37 hm²,年均降低 499.16 hm²。流域范围内的水域湿地增加较为明显,2010 年的面积较 1995 年增加 20.61%。

总体来看,流域林地增加面积大于草地减少面积,植被覆盖度总体有所提升,这得益于山东省对生态环境保护的日益重视。自 2000 年以来山东省先后颁布实施了《山东省建设规划纲要》、《山东省生态环境保护条例(草案)》等文件,开展了大规模生态保护与建设项目,对流域植被的恢复起到了促进作用。而关于水域湿地增加的原因,一是受南水北调工程的影响,大量修建了沟渠、坑塘、人工水库等水利设施,另一方面是山东省政府在南四湖流域实施退耕还湿、退池还湖的措施,仅在南四湖主要河流入湖口就建设了约 5.5 hm² 人工湿地。

表 3 南四湖流域 1995 年-2010 年各土地利用类型面积

Table 3 The area of each land use type in the Nansihu Lake Watershed from 1995 to 2010 hm²

类型	1995	2000	2005	2010
耕地	2 100 273.50	2 036 067.10	1 998 165.67	1 961 170.54
林地	65 874.21	73 925.17	79 547.10	82 427.92
草地	166 215.68	162 818.61	161 821.24	158 728.31
水域	162 710.28	193 808.21	194 183.68	196 252.41
建设用地	386 500.35	415 100.83	448 497.74	484 076.98
未利用地	14 032.27	13 886.39	13 390.87	12 950.14
合计	2 895 606.29	2 895 606.31	2 895 606.30	2 895 606.30

3.2 土地利用结构变化分析

根据公式(1)、公式(2)计算出 1995 年-2010 年南四湖流域土地利用结构信息熵、均衡度及优势度,结果见表 4。

(1) 15 年间信息熵呈现单调递增趋势,最小值为 1995 年的 0.9392,此时土地利用结构较为有序,此后信息熵逐渐升高,在 2000 年、2005 年、2010 年分别达到 0.9880、1.0107、1.0301。但信息熵增加的速率则在逐渐放缓,1995 年-2000 年信息熵增长 0.0488,2000 年-2005 年为 0.0227,2005 年-2010 年为 0.0193。信息熵的变化表明流域土地利用结构无序程度升高,但向无序演变的速率逐渐放缓。这一趋势与流域内人类对土地系统施加的定向干预有关:1995 年-2010 年共有 970.92 hm² 的林地和 2 313.81 hm² 的草地被开垦为耕地以应对农作物需求量的增加,同时也有 6 575.76 hm² 的耕地因退耕还林而转化为草地,而随着南水北调东线工程的全面启动,人工水域的面积迅速增加。

(2) 均衡度表现为单调递增,由 1995 年的 0.5242 增加至 2010 年的 0.5749,而优势度表现为单调递减,由 1995 年

的0.4758下降至2010年的0.4251,降幅为10.66%。上述变化趋势表明流域土地利用结构分布趋于均衡,单个类型对整体土地利用结构的控制水平下降。耕地作为南四湖流域最主要的土地利用类型,受到开发建设活动的影响导致其面积不断下降,1995年-2010年耕地面积减少达139102.93 hm²,对土地利用结构控制水平降低;建设用地比重随着流域开发的进行而逐渐提升,林地随着退耕还林等生态保护措施的推进而逐渐恢复,水域湿地则在南水北调东线工程的带动下扩张。各土地利用类型对土地利用结构的影响力此消彼长,使得土地利用结构均质性增强。

表4 南四湖流域土地利用结构演变

Table 4 Evolution of land use structure in the Nansihu Lake Watershed

年份	信息熵 H	均衡度 J	优势度 I
1995	0.9392	0.5242	0.4758
2000	0.9880	0.5514	0.4486
2005	1.0107	0.5641	0.4359
2010	1.0301	0.5749	0.4251

3.3 土地利用程度分析

根据公式(3)的计算结果,1995年-2010年南四湖流域土地利用程度综合指数均保持在300左右,土地利用程度处于中上水平。十五年来土地利用程度综合指数呈现先降后升趋势,1995年-2000年间由298.75小幅下降至298.52,2000年-2010年持续增长,其中2000年-2005年增加量为1.01,2002年-2010年增加量为1.19,流域土地利用总体处于发展期。出现这种变化趋势是因为1995年-2000年南四湖流域内进行了大规模农田水利建设活动,该时期被改造为水域的耕地面积达32403.24 hm²。而自2000年起,建设用地的扩展成为土地利用程度综合指数持续增长的主要驱动因素。

4 变化趋势预测

利用公式(5)对2015年-2030年南四湖流域土地利用结构进行预测,见表5。结果表明,土地利用结构信息熵和均衡度呈递增趋势,而优势度则表现为递减趋势。南四湖流域处于经济高速发展时期。随着流域开发活动的推进,各利用类型对土地利用结构的影响力逐渐拉近,土地利用结构不断调整并逐渐趋于稳定。

表5 2015年-2030年土地利用结构预测结果

年份	信息熵 H	均衡度 J	优势度 I
2015	1.0524	0.5873	0.4127
2020	1.0745	0.5997	0.4003
2025	1.0971	0.6123	0.3877
2030	1.1202	0.6252	0.3748

5 结论

(1) 1995年-2010年南四湖流域耕地持续减少,且减少速度逐渐加快;林地增加较为明显,草地略有减少,流域植被覆盖水平有所恢复;在南水北调东线工程的带动下水域湿地

面积增加20.61%;建设用地保持持续高速扩张态势。

(2) 土地利用结构信息熵由0.9392增加至1.0301,流域土地利用结构性下降;均衡度呈增加趋势,优势度呈降低趋势,各利用类型趋于均衡分布,单个类型对利用结构整体的控制力降低;土地利用程度综合指数保持在300左右并在2000年-2010持续增加,土地利用程度属于中上水平,土地利用总体处于发展期。

(3) 利用GM(1,1)模型对流域2015年-2030年土地利用变化进行预测,结果显示信息熵和均衡度将继续增加,优势度持续降低,表明各利用类型对土地利用结构控制力继续拉近,土地利用结构将进一步调整。

参考文献(References):

- [1] 谭永忠,吴次芳.区域土地利用结构的信息熵分异规律研究[J].自然资源学报,2003,18(1):112-117. (TAN Yongzhong, WU Cifang. The Laws of the Information Entropy Values of Land Use Composition [J]. Journal of Natural Resources. 2003, 18(1): 112-117. (in Chinese))
- [2] 杨晓娟,杨永春,张理茜.基于信息熵的兰州市用地结构动态演变及其驱动力[J].干旱区地理,2008,31(2):297-297. (YANG Xiaojuan, YANG Yongchun, ZHANG Lishan. Dynamic Evolution and Driving Force of the Land Use Structure in Lanzhou City Based on the Information Entropy [J]. Arid Land Geography, 2008, 31(2): 297-297. (in Chinese))
- [3] 周子英,段建南,梁春风.长沙市土地利用结构信息熵时空变化研究[J].经济地理,2012,32(4):124-129. (ZHOU Ziyang, DUAN Jianan, LIANG Chunfeng. Temporal spatial Changes Analysis of Land Use Structure in Changsha City Based on Information Entropy [J]. Economic Geography. 2012, 32(4): 124-129. (in Chinese))
- [4] 魏丽娜,刘学录.甘肃省土地利用结构信息熵动态研究[J].甘肃农业大学学报,2007,42(3):97-101. (WEI Lina, LIU Xuelu. Reviews on Land Use Change Modeling [J]. Journal of Gansu Agricultural University, 2007, 42(3): 97-101. (in Chinese))
- [5] 王晓娟,陈英,齐鹏.基于信息熵的张掖市土地利用结构分析及其灰色预测[J].干旱区研究,2011,28(1):92-97. (WANG Xiaojiao, CHEN Ying, QI Peng. Study on Land Use Structure in Zhangye City Base on Information Entropy and Grey Prediction [J]. Arid Zone Research, 2011, 28(1): 92-97. (in Chinese))
- [6] 赵菲菲,刘东,刘萌.基于信息熵和灰关联的建三江分局土地利用结构驱动力分析[J].水土保持研究,2012,19(3):250-258. (ZHAO Feifei, LIU Dong, LIU Meng. Driving Force Analysis of Land Use Structure in Jiansanjiang Branch Bureau Based on Information Entropy and Gray Correlative Degree [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2012, 19(3): 250-258. (in Chinese))
- [7] 曾忠平,裴韬,彭兰霞.武汉南江湖区土地利用结构信息熵与湖泊形态变化分形分析[J].资源科学,2008,30(7):106F-1067. (ZENG Zhongping, PEI Tao, PENG Lanxia. Fractal Analysis and Information Entropy of Land Use Structure for Lake Morphology in Urban Lake Area, Wuhan City [J]. Resources Science, 2008, 30(7): 106F-1067. (in Chinese))
- [8] 孔次芬,李月臣,简太敏.基于RS和GIS重庆都市区土地利用/覆被变化过程及预测分析[J].水土保持研究,2012,19(2):

- 205-209. (KONG Cifeng, LI Yuechen, JIAN Taimin. The Process and Prediction of Land Use/Cover Changes Based on RS and GIS in Metropolitan Area of Chongqing City[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2012, 19(2): 205-209. (in Chinese))
- [9] 谈英武, 崔荃, 曹海涛. 遥感技术在南水北调西线工程中的应用[J]. 南水北调与水利科技, 2006, 4(1): 107-109. (TAN Yingwu, CUI Quan, CAO Haitao. Application Remote Sensing Technology to the West Route Project in South to North Water Transfer [J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2006, 4(1): 107-109. (in Chinese))
- [10] 林木生, 陈兴伟, 陈莹. 晋江西流域土地利用覆被变化及其洪水响应分析[J]. 南水北调与水利科技, 2011, 9(1): 39-42. (LIN Mushi, CHEN Xingwei, CHEN Ying. Flood Response to Land use and Land cover Change of Xixi Basin [J]. South to North Water Diversion and Water Science & Technology, 2011, 9(1): 39-42. (in Chinese))
- [11] 张若琳, 万力, 张发旺. 土地利用遥感分类方法研究进展[J]. 南水北调与水利科技, 2006, 4(2): 80-83. (ZHANG Ruolin, WAN Li, ZHANG Fawang. Development of Research on Remote Sensing Classification Technology for Land Use and Cover [J]. South to North Water Diversion and Water Science & Technology, 2006, 4(2): 80-83. (in Chinese))
- [12] 张丽, 高维. 基于 RS 与 GIS 的抚顺市土地利用与覆盖变化研究[J]. 安徽农业科学, 2012, 40(11): 6897-6900. (ZHANG Li, GAO Wei. Study of Land Use / Land Cover Change Based on RS and GIS in Fushun City [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2012, 40(11): 6897-6900. (in Chinese))
- [13] 陈彦光, 刘继生. 城市土地利用结构和形态的定量描述: 从信息熵到分维数[J]. 地理研究, 2001, 20(2): 146-152. (CHEN Yanguang, LIU Jisheng. An Index of Equilibrium of Urban Land use Structure and Information Dimension of Urban Form [J]. Geographical Research, 2001, 20(2): 146-152. (in Chinese))
- [14] 郭成轩, 甄坚伟. 土地利用变化动态模型的综合分析与评价[J]. 国土资源科技管理, 2003, (5): 22-26. (GUO Chengxuan, ZHEN Jianwei. A Comparison of land a Comment on Dynamic models of Land Use Change [J]. Scientific and Technological Management of Land and Resources, 2003, (5): 22-26. (in Chinese))
- [15] 庄大方, 刘纪远. 中国土地利用程度的区域分异研究[J]. 自然资源学报, 1997, 12(2): 105-111. (ZHUANG Dafang, LIU Jiyuan. Study on the Model of Regional Differentiation of Land Use Degree in CHINA [J]. Journal of Natural Resources, 1997, 12(2): 105-111. (in Chinese))
- [16] 琚兴华, 史冲. 土地利用变化建模研究综述[J]. 甘肃联合大学学报, 2010, 24(5): 51-54. (JU Xinghua, SHI Chong. Review on Land Use Change Modeling [J]. Journal of Gansu Lianhe University, 2010, 24(5): 51-54. (in Chinese))
- [17] 马媛, 黄翀, 郑巍. 玛曲县土地利用变化分析与预测[J]. 干旱区研究, 2012, 29(4): 735-741. (MA Yuan, HUANG Chong, ZHENG Wei. Analysis and Prediction of Land Use Change in Maqu County [J]. Arid Zone Research, 2012, 29(4): 735-741. (in Chinese))

(上接第 28 页)

- [12] 河北省衡水水文水资源勘测局. 衡水湖湿地保护与环境功能研究[R]. 2006. (Hengshui Bureau of Hydrology and Water Resourvey Survey. Ecology Conservation and Environment Function Research of Hengshui Lake wetland [R]. 2006. (in Chinese))
- [13] 张彦增, 尹俊岭, 崔希东, 等. 衡水湖湿地恢复与功能 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2010. (ZHANG Yanzeng, YIN Junling, CUI Xidong, et al. The Hengshui Lake Wetland Restoration and Ecological Function [M]. Beijing: China Water Conservancy and Hydropower, 2010. (in Chinese))
- [14] 衡水地区水利局. 衡水地区水利志 [M]. 石家庄: 河北人民出版社, 1995. (Hengshui area Water Conservancy Bureau. Hengshui Regional Water Conservancy [M]. Shijiazhuang: Hebei People's Publishing House, 1995. (in Chinese))
- [15] 孙霞, 银燕, 孙玉稳, 等. 衡水湖地区气溶胶分布特征的航测研究[J]. 中国粉体技术, 2011, 17(4): 14-18. (SUN Xia, YIN Yan, SUN Yurwen, et al. Aerial Survey of Distribution of Aerosols in Hengshui Lake Area [J]. China Powder Science and Technology, 2011, 17(4): 14-18. (in Chinese))