

基于 MCE-CA 耦合模型的嘉兴市土地利用预测情景下生态敏感性评价

荣月静^{1,2}, 张 慧^{1*}, 赵显富²

(1.环境保护部南京环境科学研究所, 江苏 南京 210042; 2.南京信息工程大学地理与遥感学院, 江苏 南京 210044)

摘 要:基于全国生态环境 10 年变化(2000—2010 年)遥感调查与评估项目中嘉兴市 2000 年、2005 年和 2010 年 3 期 TM 遥感影像数据,运用 MCE-CA 模型,预测出 2005 年、2010 年土地利用格局,与实际情况进行模拟精度检验,其 *Kappa* 系数达到 0.94 和 0.92,证明模型精度很高。通过 MCE-CA 模型预测嘉兴市 2015 年、2020 年土地利用格局,计算生态服务价值变化率与土地利用强度变化率的比值得到土地利用变化下的生态敏感性指数,运用 ArcGIS 空间叠加功能分析其过程,目的在于得到生态敏感性分布情况。得出:2000—2020 年嘉兴市的景观格局发生了较大变化,耕地大幅度减少,建设用地大幅度增加。2000—2010 年生态敏感性急剧增高,说明近 10 年生态环境受到威胁愈来愈严重;2010—2020 年在林草湿地不可转化为建设用地,耕地和未利用地可转化为建设用地的预测情境下,生态敏感性有所降低,生态环境得到改善。此土地利用与生态敏感性预测结果对嘉兴市的城市规划、可持续发展具有一定的借鉴作用。

关键词:土地利用动态模拟;MCE-CA 模型;生态敏感性

中图分类号:F301.23

文献标志码:A

文章编号:2095-6819(2015)04-0343-11

doi: 10.13254/j.jare.2014.0359

Evaluation of Ecological Sensitivity of Land Use in Jiaxing City Based on MCE-CA Model

RONG Yue-jing^{1,2}, ZHANG Hui^{1*}, ZHAO Xian-fu²

(1.Nanjing Institute of Environmental Science, MEP, Nanjing 210042, China; 2.College of Geography and Remote Sensing, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China)

Abstract: Based on three periods TM remote sensing image data in Jiaxing City of Year 2000, 2005 and 2010 in the national ecological environment remote sensing investigation and assessment project (2000—2010), by using MCE-CA model, the forecast land use of year 2005 and 2010 was obtained. Compared the forecast land use with the true land use of year 2005 and 2010, the *Kappa* index was 0.94 and 0.92, it proved that the simulation accuracy of MCE-CA model was high. The land use pattern in 2015 and 2020 could also be obtained by using MCE-CA model. With the rate of land use change intensity ratio and ecological service change value ratio, the land use ecological sensitivity index could be obtained. By using ArcGIS spatial overlay analysis to analyze the process, the sensitivity function distribution could be obtained. It concluded that the landscape pattern changed seriously in Jiaxing City from year 2000 to 2020, the farm land decreased greatly, the construction land increased greatly. The ecological sensitivity increased dramatically from year 2000 to 2010, and the ecological environment was threatened more and more seriously. In the situation of the forest, grass and wetlands could not be transformed into construction land, farm land and uncultivated land could be transformed into construction land from year 2010 to 2020, the ecological sensitivity decreased, ecological environment would be improved. Above all, the land use and ecological sensitivity prediction results is propitious to sustainable development planning in Jiaxing City.

Keywords: land use dynamic simulation; MCE-CA model; ecological sensitivity

土地利用变化作为全球变化的主要动因,目前已受到全球变化研究的广泛关注。对未来土地利用变化

的预测,有助于政府制定相关政策,从而对土地利用的开发、利用、整治和保护在时间和空间上作出预先安排,这对于区域土地资源的配置和可持续利用具有重要的现实意义。当前,土地利用变化可以通过多种模型模拟,其中地理学具有代表性的就是以元胞自动机(CA)预测土地利用变化的模型。国外从 20 世纪 90 年代元胞自动机模型广泛的应用在景观格局与生态学上^[1-3],运用 GIS 不断推动 CA 模型在城市模拟中的

收稿日期:2014-12-16

基金项目:国家环保公益性行业科研专项“道路建设工程生态环境影响定量评价技术和方法”(201209029-1)

作者简介:荣月静(1989—),女,山西阳泉人,硕士,研究方向为区域生态恢复与资源可持续利用研究。

E-mail: rongyuejing@126.com

* 通信作者:张 慧 E-mail: zhnies@126.com

应用^[4-6],国内黎夏等^[7-10]结合 CA 与神经网络、CA 与面向对象、CA 与多准则来分析城市用地变化,均能很准确地得到预测结果,另外罗平^[11]、徐昔保^[12]利用元胞自动机分别在深圳、兰州等地区对土地利用动态演化进行研究,取得很好的结果。

生态敏感性是指生态系统对人类活动干扰和自然环境变化的反映程度,说明发生区域生态环境问题的难易程度和可能性大小^[13]。生态敏感性代表了区域的生态脆弱性,是区域环境评价的重要内容之一。城市生态敏感性预测评价可针对城市潜在生态环境问题进行具体落实,了解空间分布特征,为制定环境政策、预防和治理生态环境问题提供科学依据^[14]。吴金华等^[15]运用 ArcGIS 空间叠加统计方法进行延安市土地生态敏感性评价,并对生态敏感性分等级,评价结果准确、客观。罗鹏等^[16]以龙滩库区为研究区,基于 ArcGIS 地理处理框(Geoprocessing framework),对库区生态敏感性和生态区划进行研究。宋晓龙等^[17]基于格网对黄河三角洲结合生境适宜性和人为干扰建立生态敏感性模型,黄静等^[18]基于土地利用强度和生态服务价值分析厦门市生态敏感性等,评价结果为今后环境问题预防和保护提供有效的科学依据。

本文借鉴前人研究方法,以嘉兴市为研究对象,在利用 TM 遥感影像数据进行景观生态分类的基础上,采用 MCE-CA 模型,对研究区 2015 年、2020 年景观格局进行模拟预测并依据预测结果对嘉兴市未来 10 年的生态敏感性进行深入分析,为嘉兴市的土地利用、城市建设和区域可持续发展提供有效决策支持。

1 研究区概况

嘉兴市位于浙江省东北部、长江三角洲杭嘉湖平原腹心地带,地处北纬 30°15′~31°02′,东经 120°20′~121°32′之间,是长江三角洲重要城市之一。嘉兴市属亚热带季风气候,具有春湿、夏热、秋燥、冬冷的特点,因地处中纬度,夏令湿热多雨的天气比冬季干冷的天气短得多。年平均气温在 15.4~16.4℃。多年平均年降水量大部分集中在 3—9 月,5—6 月份梅雨集中,常常发生洪涝;8—9 月份常有台风和极峰大雨。嘉兴市域面积 3 915 km²,主要土地利用类型有旱地、水田、林地、草地、湿地、水库、运河、人工用地等。2010 年,嘉兴市总人口达到 341.6 万人,非农业人口 146.87 万人,城市化率由 2000 年的 23.7%快速提升到 2010 年的 43%。2010 年实现地区生产总值 2 300 亿元,人均

生产总值 5.2 万元,在全国排名第 47 位。近年来平均 GDP 增速维持在 13%左右,比全国平均 GDP 增速高出 4%,嘉兴市进入经济高速增长时代。

2 材料与方法

2.1 数据来源与处理

本文采用全国生态环境 10 年变化(2000—2010 年)遥感调查与评估项目中 3 个时相的遥感数据为主要数据源,分别为 2000 年、2005 年和 2010 年 3 个时期的 Landsat TM/ETM 数据影像,分辨率为 30 m,遥感数据整体质量较好,没有大范围云系覆盖,地物信息丰富,为区域的景观格局研究提供了充足的信息来源。数据处理平台包括 Erdas9.2、Arcgis10.0、Geo-SOS 软件。以《土地利用现状分类》标准为基础,结合研究区土地利用覆盖类型与研究内容,解译遥感影像时将嘉兴市土地利用类型分为 6 大类,即森林、草地、湿地、耕地、建设用地和未利用地。最后,在 Geo-SOS 软件中,在此数据基础上运用 MCE-CA 模型对嘉兴市 2015 年、2020 年土地利用变化进行预测。

2.2 MCE-CA 模型

元胞自动机(Cellular automaton, CA)是一种时间、空间和状态都离散的网格动力学模型,具有很强的运算能力、空间建模能力,能有效模拟具有时空特征的复杂动态系统^[14]。

多准则判断模型(Multi-criteria evaluation, MCE)是在一些不相关、不一致的规则基础上评估一系列可供选择的方案和决策中找出最优决策的分析方法,它是分析决策理论的重要内容之一^[19-21]。

MCE 模型对土地利用变化的预测着重于数量,而空间参数较弱,无法得知各土地利用类型在空间上的变化程度;CA 模型具有了较强的空间概念,有较强的模拟复杂空间系统的时空动态演变能力。吸收了 MCE 和元胞自动机等理论对有关时间序列和空间预测二者优点的 MCE-CA 模型,可在数量和空间两方面较好地进行土地利用变化时空格局模拟。

MCE-CA 模型需要加载土地利用与驱动因子数据,使用 AHP 方法获取各变量权重,并设定参数,然后进行模拟。

2.3 生态敏感性评价

本文建立土地利用变化下的生态敏感性指数,利用生态系统服务价值变化率与土地利用强度变化率的比值对生态系统在土地利用变化驱动下的敏感性响应灵敏程度进行表征:

$$I_{(j)} = \left| \frac{\Delta ES_{(j-1,j)}}{\Delta LU_{(j-1,j)}} \right| = \left[\frac{(ES_j - ES_{j-1})/ES_{j-1}}{(LU_j - LU_{j-1})/LU_{j-1}} \right] \quad (1)$$

式中, $I_{(j)}$ 代表第 j 年土地利用变化的生态敏感性指数; $ES_{(j-1,j)}$ 代表第 $j-1$ 年至第 j 年生态系统服务价值变化率; $LU_{(j-1,j)}$ 代表第 $j-1$ 年至第 j 年土地利用变化率; ES_j 代表第 j 年生态系统服务价值; ES_{j-1} 代表第 $j-1$ 年生态系统服务价值; LU_j 代表第 j 年土地利用强度; LU_{j-1} 代表第 $j-1$ 年土地利用强度以 $j-1$ 年作为研究基准年。

以上公式中,土地利用强度指数与生态服务价值计算公式如下:

(1) 土地利用强度指数:

$$L = \sum_{i=1}^n (G_i \times C_i) \times 100\% \quad (2)$$

式中, L 代表土地利用强度指数; G_i 代表第 i 种土地利用类型的强度等级值; C_i 代表第 i 种土地利用类型面积占研究区总面积的比例; n 代表研究区土地利用的数量。土地利用类型根据其自然状态被人为干扰的程度进行分级,等级越高代表受到人为干扰的程度越高,未利用地为 1 级,林地、草地、湿地为 2 级,耕地为 3 级,建设用地为 4 级。

(2) 生态服务价值用参考文献[22]公式来估算,其中:

研究区内某种土地利用类型的生态服务价值计算公式: $TV_k = A_k \times VC_k$

研究区内生态系统服务总价值计算公式为:

$$ESV = \sum A_k \times VC_k \quad (3)$$

式中, ESV 为研究区生态系统服务总价值; A_k 为第 k

类土地利用类型的面积; VC_k 为生态价值系数,即单位面积的生态系统服务价值。

3 结果与分析

3.1 基于 MCE-CA 模型的土地利用预测分析

3.1.1 生成 ASCII 软件识别的栅格数据

本文土地利用变化的预测是运用地理模型系统软件 Geo-SOS 的多准则判断与元胞自动机耦合模型进行的,要求的数据类型是 ASCII 栅格数据,因此要将现有的 ArcGIS 支持下的 shapefile 文件进行数据转换。栅格大小的设置根据研究区的面积和 MCE-CA 模型运行的速度设置为 $100 \text{ m} \times 100 \text{ m}$ 。利用转换后的栅格文件统计栅格即元胞的个数。然后将 raster 文件在 ArcGIS 中转为 ASCII 文件,图 1 为嘉兴市 2000 年、2005 年、2010 年土地利用现状图。

3.1.2 使用 AHP 方法获取各变量权重

影响土地利用变化的驱动因素包括自然因素和人文因素两类。自然因素包括高程 DEM、坡度 SLOPE、坡向 ASPECT、到湖泊的距离、到主要河流的距离;人文因素包括到主要城镇的距离、到主要铁路的距离、到主要公路的距离。其中距离因素采用缓冲区分析或欧式距离,本研究采用缓冲区分析所得(图 2)。

AHP 使用两两比较的方法来决策多个因素的权重问题,针对因素 A 与因素 B 的重要程度,使用 1~9 的标度赋予一定的数值,若因素 i 与因素 j 比较的 a_{ij} ,则因素 j 与因素 i 比较的判断的 $1/a_{ij}$,依据专家意见,本研究影响土地利用变化的驱动因素中到重点镇的距离重要性大于到主要公路的距离、到主要铁路的距

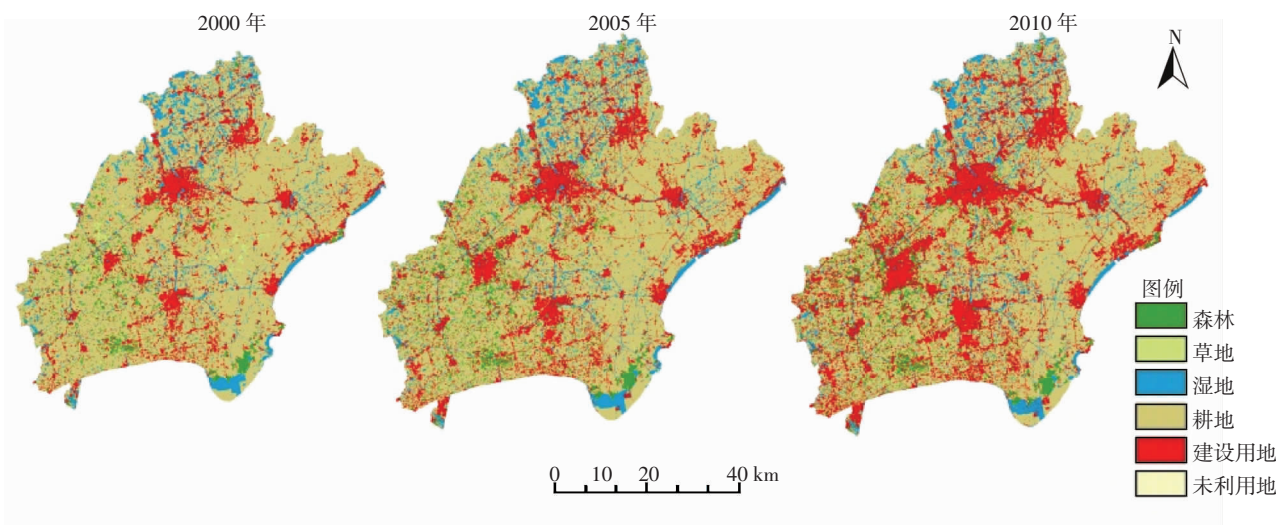


图 1 嘉兴市 2000—2010 年土地利用现状图

Figure 1 The current land use from year 2000 to 2010 in Jiaying City

离;到主要公路、主要铁路的距离重要性大于到主要河流、主要湖泊的距离;到主要河流、主要湖泊的距离重要性大于高程、坡度、坡向因子(表 1)。模型中要设置模拟所需要的各类参数,其中全局因素影响比例设为 0.6,领域因素影响比例设为 0.4,因此驱动因素权重总值为 0.6。

3.1.3 MCE-CA 模型精度检验

MCE-CA 模型模拟未来土地利用,3.1.2 章节中各系数可以作为模型的有效输入,在充分考虑经济发展、生态环境和粮食安全的前提下设置以下情景,即耕地、未利用地可向建设用地转换,森林、草地、湿地不可向建设用地转换,然后设定驱动因子的两两比较

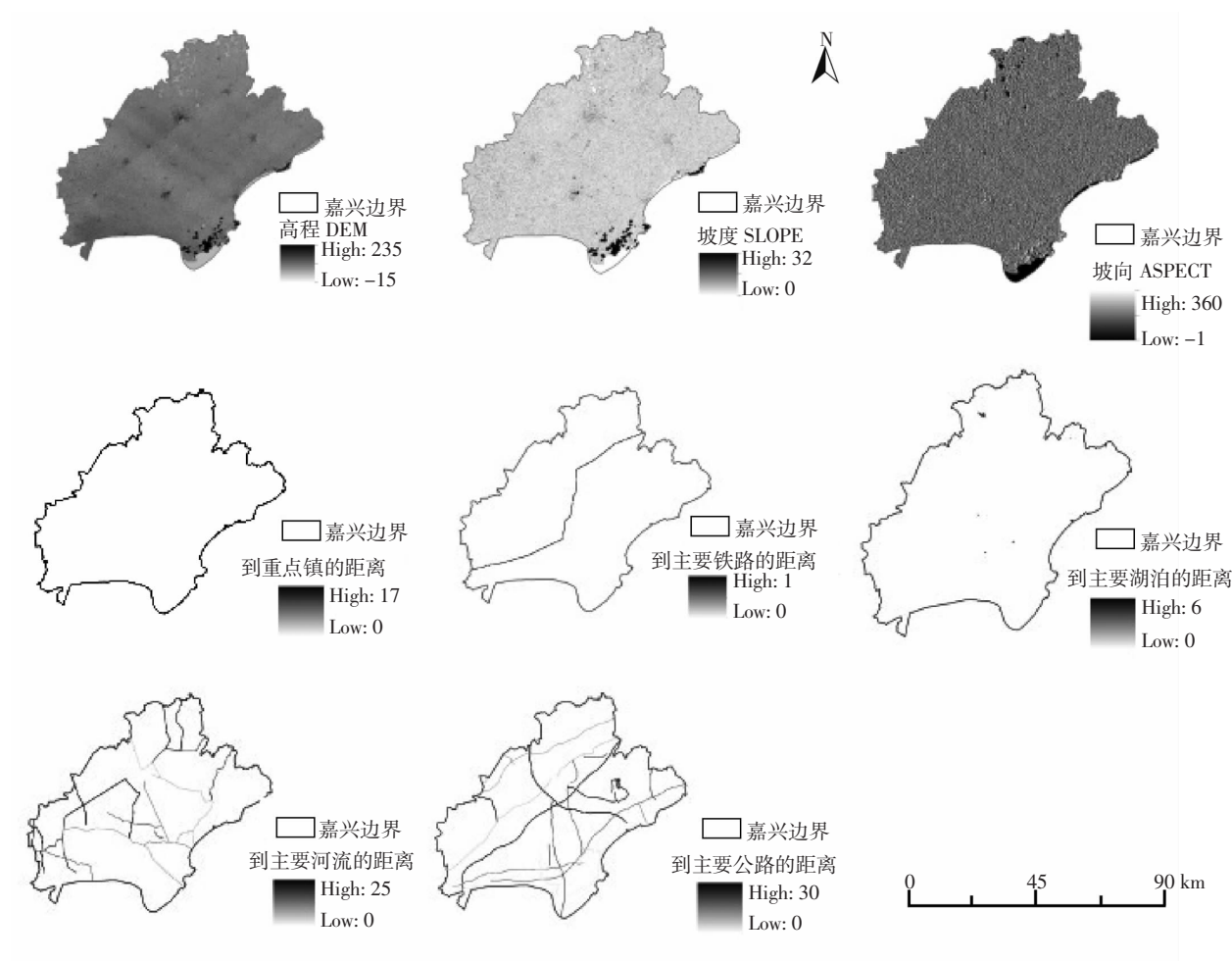


图 2 嘉兴市影响土地利用变化的驱动因素

Figure 2 The driving factors effecting on land use change in Jiading City

表 1 影响土地利用变化的驱动因素的两两比较值与权重值

Table 1 The comparison and weight value of the driving factors effecting on land use change

驱动因子	高程 DEM	坡度 SLOPE	坡向 ASPECT	到重点镇的距离	到主要公路的距离	到主要铁路的距离	到主要河流的距离	到主要湖泊的距离	权重值
高程 DEM	1	1	1	1/8	1/4	1/4	1/2	1/2	0.026
坡度	1	1	1	1/8	1/4	1/4	1/2	1/2	0.026
坡向	1	1	1	1/8	1/4	1/4	1/2	1/2	0.026
到重点镇的距离	8	8	8	1	1/4	1/4	1/2	1/2	0.209
到主要公路的距离	4	4	4	1/2	1	1	2	2	0.104
到主要铁路的距离	4	4	4	1/2	1	1	2	2	0.104
到主要河流的距离	2	2	2	1/4	1/2	1/2	1	1	0.052
到主要湖泊的距离	2	2	2	1/4	1/2	1/2	1	1	0.052

值(表 1),扩散参数 α 值设为 1,模拟转换总量设为 1 000,元胞滤波器为 5×5 ,以 2000 年土地利用为基准,取 5 次循环次数建立 2005 年的土地利用预测图;以 2005 年土地利用为基准,取 5 次循环次数,建立 2010 年的土地利用预测图(图 3)。将 2005 年、2010 年土地利用预测图与实际情况作比较,模型模拟土地利用空间变化的精度进行检验通常采用 *Kappa* 指数方法:

$$Kappa=(P_0-P_e)/(P_r-P_e)$$

式中, P_0 为模拟正确的比例; P_e 为模型随机情况下模拟正确的比例; P_r 为理想分类情况下正确模拟的比例。

运用 ArcGIS 的空间分析功能 Spatial Analysis Tools | Math | Minus 工具,把 2005 年、2010 年模拟图和 2005 年、2010 年实际土地类型图做相减运算,提取 0 值栅格个数,即正确栅格数分别为 383 553、372 693,总栅格数为 402 159,得到 2005 年、2010 年 P_0 分别为 0.95 和 0.93;土地类型一共有 6 个,所以模型随机情况下模拟正确的比例为 $1/6$,即 $P_e=0.167$,理想分类情况下模拟比例, $P_r=1$,计算得到 2005 年、2010 年的 *Kappa* 指数分别为 0.94、0.92,模拟精度非常好。

3.1.4 土地利用预测结果

按照以上方法,以 2010 年土地利用图为准,取 5 次循环次数建立 2015 年的土地利用,取 10 次循环次数,建立 2020 年的土地利用图。图 4 为嘉兴市 2015 年、2020 年的土地利用变化模拟图。

3.2 嘉兴土地利用变化下的生态敏感性评价过程

3.2.1 土地利用强度指数计算

由表 2 可知,2000—2020 年,研究区土地利用变化趋势为草地、湿地、耕地、未利用地面积减少,林地和建设用地的面积都有所增加,耕地减少面积最多为 313.63 km²,建设用地增加面积最多为 376.53 km²。耕地占总面积的比例由 2000 年的 68.39%下降到 2020

年的 60.60%,而建设用地则由 15.21%上升到 24.57%。

按照公式 2,依据表 2 中各土地利用类型所占比例与土地利用程度的分级,计算出 2000 年、2005 年、2010 年、2015 年、2020 年嘉兴市土地利用强度指数分别为 2.99、3.02、3.10、3.03、3.10。

3.2.2 生态系统服务价值研究方法

Costanza 等^[22]使生态系统服务价值估算的原理及方法从科学意义上得以明确。但在该项研究某些数据存在较大偏差,谢高地等^[23-24]在对我国 200 位生态学者进行问卷调查的基础上,制定出我国生态系统生态服务价值当量因子表。嘉兴市的土地利用情况有以下特点:嘉兴市垦殖指数高,粮食产量高,粮食单位面积产量是全国粮食产量 2 倍左右;嘉兴市农业开发历史悠久,广大平原地区以栽培植物为主,丘陵山地现存自然植被以次生为主;嘉兴市草地面积非常少,大多为森林严重破坏后出现的初期次生类型或堰湖泊河流分布的芦苇群落;嘉兴市水质污染较严重,五类和劣五类水约占占了嘉兴水量的 80%^[25]。基于上述认识,在谢高地等^[23-24]研究我国生态服务价值量的基础上,结合嘉兴市实际情况,笔者重新调整了嘉兴市不同类型的生态服务价值指数,见表 3。

嘉兴市地处太湖流域,是全国著名的水稻高产区,每 667 m² 产量可达 800 kg 左右,是全国平均粮食的 2 倍左右。根据胡瑞法等^[26]研究,中国 2005 年全国平均粮食生产的单位面积总收益为 36.29 元·km⁻²,单位面积总投入(包括劳动、化肥、机械和其他 4 项)为 9.30 元·km⁻²,估计获得土地用于粮食生产的影子地租约为 22.50 元·km⁻²,依此计算中国 1 个生态服务价值当量因子的经济价值量为 4.49 元·km⁻²。因此太湖流域的 1 个生态服务价值当量因子的经济价值量为 9 元·km⁻²·a⁻¹,即为此次研究所采用的基准数值,再与生态系统单位面积服务价值当量值相乘,获得一个嘉

表 2 2000—2020 年各种生态系统类型面积和比例变化

Table 2 The area and proportion changes of different land use types from 2000 to 2020

土地类型	2000 年		2005 年		2010 年		2015 年		2020 年	
	面积 /km ²	比例 /%	面积 /km ²	比例 /%	面积 /km ²	比例 /%	面积 /km ²	比例 /%	面积 /km ²	比例 /%
森林	174.12	4.33	209.45	5.21	200.22	4.98	193.43	4.81	199.24	4.95
草地	94.80	2.36	50.28	1.25	43.35	1.08	43.84	1.09	42.77	1.06
湿地	390.48	9.71	375.20	9.33	355.19	8.83	353.54	8.79	354.71	8.82
耕地	2 751.36	68.39	2 661.88	66.17	2 435.10	60.53	2 726.79	67.78	2 437.73	60.60
建设用地	611.81	15.21	725.78	18.04	988.91	24.58	705.19	17.53	988.34	24.57
未利用地	0.25	0.01	0.24	0.01	0.05	0	0.03	0	0.03	0
合计	4 022.82	100.00	4 022.82	100.00	4 022.82	100.00	4 022.82	100.00	4 022.82	100.00

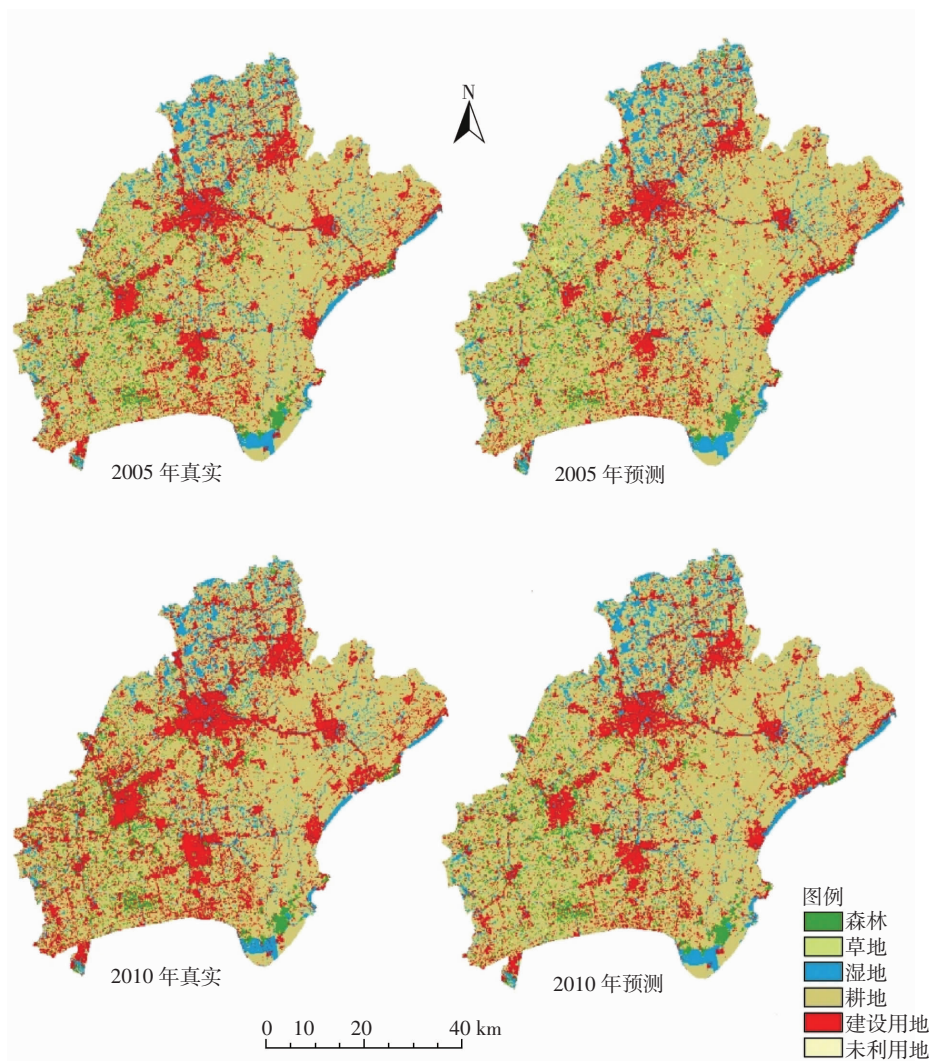


图 3 基于 MCE-CA 模型 2005 年、2010 年土地利用分布预测图与真实图比较

Figure 3 Comparison between simulation map based on MCE-CA model and reality map of year 2005 and 2010

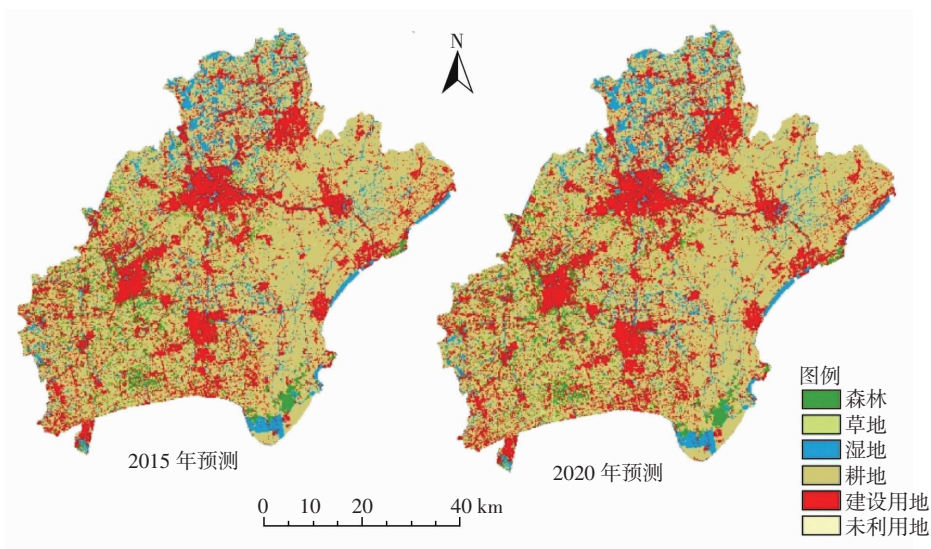


图 4 基于 MCE-CA 模型预测 2015 年、2020 年土地利用分布图

Figure 4 Simulation map of year 2015 and 2020 based on MCE-CA model

兴市生态系统服务单价表,见表 4。

按照公式 3,依据表 2 中的各土地利用类型面积与表 4 中单位面积生态服务价值,计算出嘉兴市 2000—2020 年的生态服务价值分别为 33.07 亿、32.54 亿、30.52 亿、32.22 亿元和 30.50 亿元(表 5)。

3.2.3 土地利用变化与生态系统服务价值的相关性研究

利用 SPSS 软件对嘉兴市土地利用强度与生态系统服务价值进行相关性分析,计算 Pearson 相关系数,得出嘉兴市土地利用强度指数与生态系统服务价值总量呈负相关,相关系数为-0.995,结果通过 0.01 水平双边显著性灵敏性检验;并且土地利用强度指数与耕地生态系统价值量呈显著性负相关,相关系数为-0.968;与建设用地生态系统价值量显著性呈正相关,相关性系数为 0.994。土地利用强度指数与森林、草地、湿地和未利用地生态系统价值量无显著性相关,具体情况见表 6、图 5。

3.3 土地利用变化的生态敏感性评价结果

根据预测,以嘉兴市 2000 年土地利用为基准,计

表 5 嘉兴市 2000—2020 年各生态系统服务价值量

Table 5 The ecosystem service value from year 2000 to 2020 in Jiaxing City

年份 Year	生态系统服务价值(×10 ⁹ 元)						合计
	森林	草地	湿地	耕地	建设用地	未利用地	
2000 年	0.37	0.10	0.68	2.09	0.07	0	3.31
2005 年	0.44	0.05	0.65	2.02	0.09	0	3.25
2010 年	0.42	0.05	0.62	1.85	0.12	0	3.05
2015 年	0.41	0.05	0.62	2.07	0.08	0	3.22
2020 年	0.42	0.04	0.62	1.85	0.12	0	3.05

算嘉兴市 2005 年、2010 年、2015 年、2020 年土地利用变化下的生态系统敏感性指数分别为 1.39、2.53、2.52、2.35。

采用 ArcGIS 的空间处理功能,对 2000—2020 年不同时段的土地利用图叠加相交,利用生态敏感性的公式 1,即土地利用强度变化率与生态服务价值变化率的比值,可以在 ArcGIS 中进行属性字段的计算,或者计算出土地利用强度变化率与生态服务价值变化

表 3 嘉兴市单位面积生态系统服务价值量

Table 3 Ecosystem service value per unit area equivalent of Jiaxing City

一级类型 Primary	二级类型 Second	林地 Woodland	草地 Grassland	耕地 Farmland	建设用地 Construction	水域 Water	未利用地 Unused
供给服务	食品生产	0.43	0.43	1	0	0.53	0.02
	原材料生产	2.98	0.93	0.39	0	0.35	0.04
调节服务	气体调节	4.32	1.5	0.72	0	0.51	0.06
	气候调节	4.07	1.56	0.97	0	2.06	0.13
	水文调节	1.55	0.92	0.90	0	6.55	0.07
	废物处理	1.72	1.32	1.39	0	4.87	0.26
支持服务	保持土壤	2.65	2.24	1.47	0.22	0	0.17
	维持生物多样性	3.62	1.87	1.02	0.43	2.83	0.4
文化服务	提供美学景观	2.08	0.87	0.57	0.68	1.64	0.24
	合计	23.42	11.64	8.43	1.33	19.34	1.39

表 4 嘉兴市单位面积生态服务价值(万元·km⁻²·a⁻¹)

Table 4 Ecosystem service value per unit area of Jiaxing City (10 000 yuan·km⁻²·a⁻¹)

一级类型 Primary	二级类型 Second	林地 Woodland	草地 Grassland	湿地 Water	农田 Farmland	建设用地 Construction	未利用地 Unused
供给服务	食品生产	3.87	3.87	4.77	9	0	0.18
	原材料生产	26.82	8.37	3.15	3.51	0	0.36
调节服务	气体调节	38.88	13.5	4.59	6.48	0	0.54
	气候调节	36.63	14.04	18.54	8.73	0	1.17
	水文调节	13.95	8.28	58.95	8.1	0	0.63
	废物处理	15.48	11.88	43.83	12.51	0	2.34
支持服务	保持土壤	23.85	20.16	0	13.23	1.98	1.53
	维持生物多样性	32.58	16.83	25.47	9.18	3.87	3.6
文化服务	提供美学景观	18.72	7.83	14.76	5.13	6.12	2.16
	合计	210.78	104.76	174.06	75.87	11.97	12.51

表 6 2000—2020 年土地利用强度系数与各生态系统
生态服务价值及总量 Pearson 相关系数

Table 6 The Pearson correlation coefficient of land use intensity
index and ecological service value of the ecological system

生态系统服务价值	与土地利用强度指数相关系数
森林	0.54
草地	-0.738
湿地	-0.795
耕地	-0.968**
建设用地	0.994**
未利用地	-0.762
生态服务价值总量	-0.995**

率栅格图,用栅格计算器 Raster calculator 计算出 2005 年、2010 年、2015 年、2020 年嘉兴市土地利用下的生态敏感性分布图(图 6)。结合相关文献,将嘉兴市生态敏感性程度重新分级,生态敏感性低区域(I 值为 1~11),生态敏感性中区域(I 值为 11~22),生态敏感性高区域(I 值为 22~33),生态敏感性区域之外的面积为生态不敏感区域,具体情况见表 7。

表 7 中,从土地利用下的生态敏感性程度来看,不同时期生态敏感型不同,但生态敏感性高区域所占比例最小,生态敏感性中等区域次之,生态敏感性低区域比例较大,任何时期生态不敏感区域面积都最

大。从 2005 年到 2010 年,嘉兴市生态敏感性高区域面积有所增加,增加比例为 0.07%,生态敏感性中等区域面积有所下降,下降比例为 0.11%,生态敏感性低区域面积有所增加,增加比例为 2.97%,总体从 2005 年到 2010 年嘉兴市生态敏感性增加,说明嘉兴市生态环境遭到破坏,生态脆弱性增强,恢复力减弱;从 2010 年到 2015 年,嘉兴市生态敏感性高区域面积有所增加,增加比例为 0.30%,生态敏感性中等区域面积增加较多,增加比例为 6.26%,生态敏感性低区域面积有所下降,下降比例为 4.93%,总体 2010 年到 2015 年生态敏感性有轻微下降,说明嘉兴市 2015 年在 2010 年的基础上,生态环境变化不大,但有好转趋势;从 2015 年到 2020 年,嘉兴市生态敏感性高区域面积有所下降,下降比例为 0.24%,生态敏感性中等区域面积下降较多,下降比例为 5.98%,生态敏感性低区域面积有所增加,增加比例为 0.08%,总体生态敏感性指数从 2.52 下降到 2.35,说明 2015 年到 2020 年,嘉兴市生态敏感性逐步降低,生态环境逐步好转。

图 6 中,从时间和空间来看,2005 年到 2015 年,生态敏感性高和中等区域逐渐增多,结合嘉兴市高程和河流数据,主要出现在山区丘陵地带、河流附近,生态敏感性高区域说明生态环境受到土地利用变化的

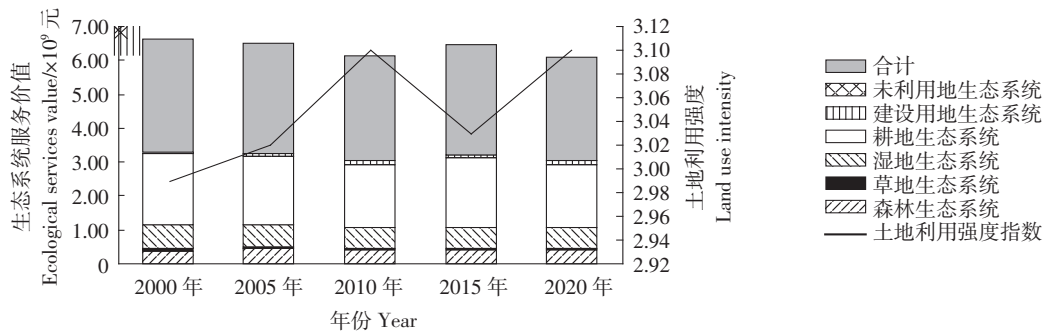


图 5 2005—2020 年嘉兴市生态系统服务价值及土地利用强度变化

Figure 5 The changes of ecosystem services value and land use intensity of Jiading City from Year 2000 to 2020

表 7 2005—2020 年嘉兴市土地利用变化的生态敏感性面积

Table 7 Ecological sensitivity area of land use changes of Jiading City from 2005 to 2020

区域	2005 年		2010 年		2015 年		2020 年	
	面积 /km ²	比例 /%	面积 /km ²	比例 /%	面积 /km ²	比例 /%	面积 /km ²	比例 /%
生态敏感性高	0.01	0	2.81	0.07	14.82	0.37	5.18	0.13
生态敏感性中等	4.94	0.12	0.53	0.01	252.09	6.27	11.75	0.29
生态敏感性低	107.40	2.67	226.87	5.64	28.57	0.71	31.65	0.79
生态不敏感	3 910.47	97.21	3 792.61	94.28	3 727.34	92.65	3 974.24	98.79
合计	4 022.82	100.00	4 022.82	100.00	4 022.82	100.00	4 022.82	100.00

影响程度高,这是由于城市化进程,建设用地不断扩张,山区丘陵地区受到较多人为干扰所致;生态敏感性低的区域主要出现在城区附近,这是由于这些地方已经成为高楼林立、人口密度集中的城市生态系统,用地类型基本不会再发生改变,成为了生态不敏感区域;从 2015 年到 2020 年由于土地利用预测中森林、草地、湿地不可转化为建设用地,未利用地和耕地可转化为建设用地的决策,生态高敏感性和中等敏感性区域面积减少,生态环境得到改善。

4 结论

(1)合理的土地利用预测对城市未来土地的开发与利用、城市建设规划起至关重要的作用。本研究基于 MCE-CA 模型,结合土地利用现状和地形、道路、河流湖泊与城镇等驱动因素,通过主观打分求得各变

量对城市发展变化影响的权重,得到 2005 年、2010 年嘉兴市土地利用预测图,与实际土地利用通过 *Kappa* 系数验证精度分别为 0.94、0.92,证明 MCE-CA 这种方法适合城市扩展模拟。

(2)基于 MCE-CA 模型,以 2010 年土地利用为基准,建立 2015 年、2020 年土地利用情景,结果表明嘉兴市土地利用面积趋势主要为建设用地面积增加,耕地面积逐渐减少,模型结果输出 2015 年与 2020 年的土地利用分布图,从而为该区生态建设和可持续发展提供决策依据。

(3)嘉兴市土地利用强度指数与生态系统服务价值总量呈显著性负相关,相关系数为-0.995,并且土地利用强度指数与耕地、建设用地生态系统价值量呈显著性相关,相关系数为-0.968 和 0.994,土地利用强度指数与森林、草地、湿地和未利用地生态系统价值

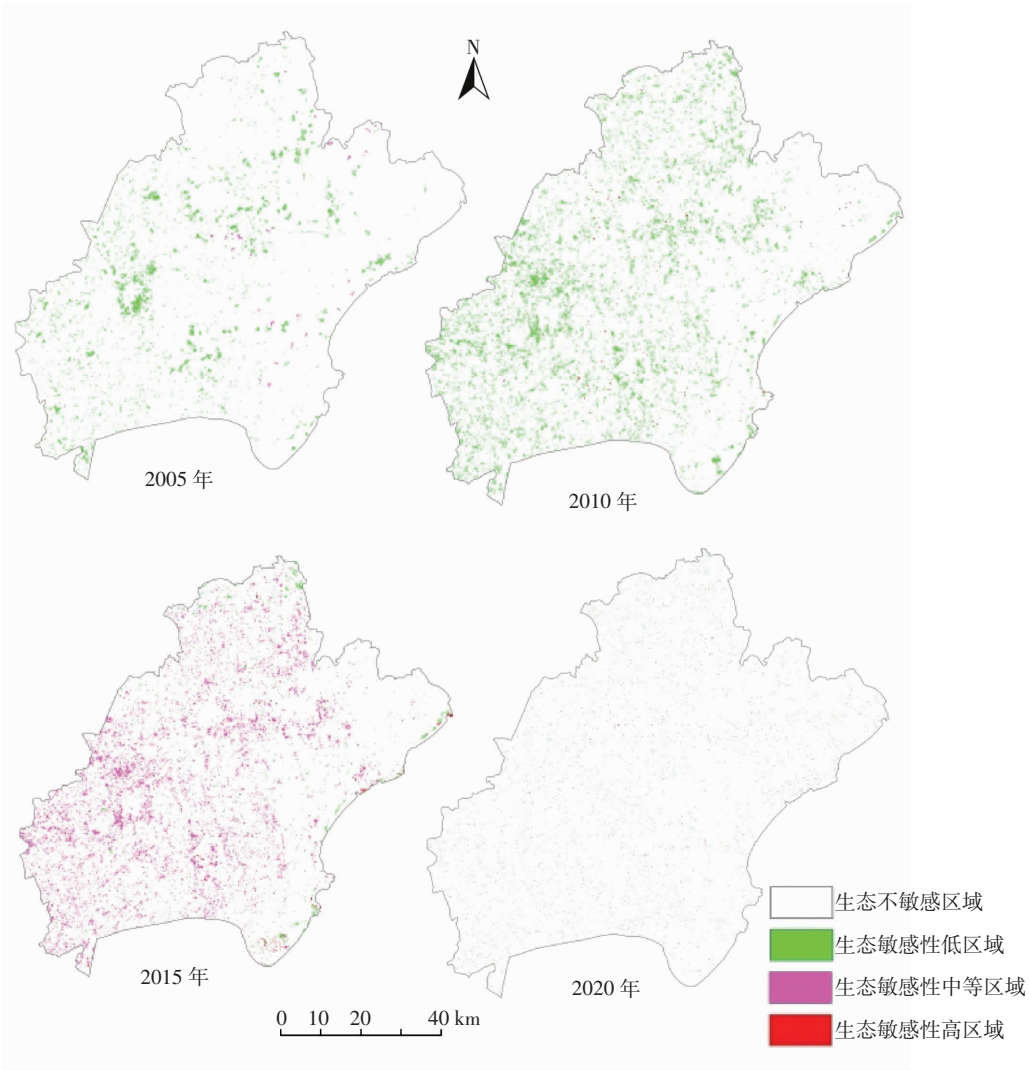


图 6 2005—2020 年嘉兴市土地利用的生态敏感性分布图

Figure 6 Distribution of ecological sensitivity area of land use changes of Jiading City from Year 2005 to 2020

量无显著性相关。说明土地利用强度随耕地减少而增加,随建设用地的增加而增加,受森林、草地、湿地和未利用地变化影响不大。

(4)生态敏感性分析和评价结合土地利用强度变化和生态服务价值变化,运用地理信息和遥感技术,将嘉兴市生态敏感区分为 4 个等级,生态敏感性高区域、生态敏感性中等区域、生态敏感性低区域、生态不敏感区域。研究表明,嘉兴市从 2000 年到 2010 年 10 年生态敏感性愈来愈高,从 2010 年到 2020 年在林草湿地不可转化为建设用地、耕地和未利用地可转化为建设用地的预测情境下,生态敏感性逐步下降,生态不敏感区域面积比例增加,生态高敏感区域有下降趋势。

综上,嘉兴市为保持生态敏感性维持稳定,生态环境逐步改善,则需要对生态敏感性高的地区进行实地考察,即针对山区丘陵地带要进行植被恢复,针对沿水系分布的高敏感性地带,要进行水源地保护,在河流两带划出保护绿带,恢复和提高水源涵养、水土保持等生态服务功能。城市生态敏感性评价有助于制定城市环境政策、有效环境规划与管理。

参考文献:

- [1] Deadman P D, Brown R D, Gimblett H R. Modelling rural residential settlement patterns with cellular automata[J]. *Journal of Environmental Management*, 1993, 37: 147-160.
- [2] White R, Engelen G. Cellular automata as the basis of integrated dynamic regional modelling[J]. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 1997, 24: 235-246.
- [3] Couclelis H. From cellular automata to urban models: new principles for model development and implementation[J]. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 1997, 24: 165-174.
- [4] Lett C, Siber C, Dube P, et al. Forest dynamics: A special gap model simulated on a cellular automata networks[J]. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 1999, 25: 403-411.
- [5] Michael Batty, Xie Yichun, Sun Zhanli. Modeling urban dynamics through GIS-based cellular automata[J]. *Computers, Environment and Urban Systems*, 1999, 23: 205-233.
- [6] Almeida C M D, Michael Batty, Antonio Miguel Vieira Monteiro, et al. Stochastic cellular automata modeling of urban land use dynamics[J]. *Computer, Environment and Urban Systems*, 2003, 27: 481-509.
- [7] 黎 夏, 叶嘉安. 约束性单元自动化 CA 模型及可持续城市发展形态的模拟[J]. *地理学报*, 1999, 54(4): 3-12.
LI Xia, YE Jia-an. Constrained cellular automata for modelling sustainable urban forms[J]. *Acta Geographica Sinica*, 1999, 54(4): 3-12. (in Chinese)
- [8] 黎 夏, 叶嘉安. 基于神经网络的单元自动机 CA 及真实和优化的城市模拟[J]. *地理学报*, 2002, 57(2): 159-166.
LI Xia, YE Jia-an. Neutral-network-based cellular automata for realistic and idealized urban simulation[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2002, 57(2): 159-166. (in Chinese)
- [9] 黎 夏, 伍少坤. 面向对象的地理元胞自动机[J]. *中山大学学报(自然科学版)*, 2006, 45(3): 90-94.
LI Xia, WU Shao-kun. An object-oriented geographical cellular automata[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, 2006, 45(3): 90-94. (in Chinese)
- [10] 黎 夏, 杨青生, 刘小平. 基于 CA 的城市演变的知识挖掘及规划情景模拟[J]. *中国科学(地球科学)*, 2007, 37(9): 1242-1251.
LI Xia, YANG Qing-sheng, LIU Xiao-ping. Knowledge mining and planning scenarios simulation of city evolution based on cellular automata[J]. *Science in China Press*, 2007, 37(9): 1242-1251. (in Chinese)
- [11] 罗 平. 地理特征元胞自动机及城市土地利用演化研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2004.
LUO Ping. Research on the cellular automata based on geographic feature and urban land use evolvement[D]. Wuhan: Wuhan University, 2004. (in Chinese)
- [12] 徐昔保. 基于 GIS 与元胞自动机的城市土地利用动态演化模拟与优化研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2007.
XU Xi-bao. Urban land use dynamic evolution simulation and optimization based on GIS and cellular automata[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2007. (in Chinese)
- [13] Ouyang Z Y, Wang X K, Miao H. China's eco-environmental sensitivity and its spatial heterogeneity[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2000, 20(1): 9-12.
- [14] Xu G C, Kang M Y, Zhao C J, et al. Appraisal of eco-sensitivity on Fukang City[J]. *Journal of Beijing Normal University (Natural Science)*, 2007, 43(1): 88-92.
- [15] 吴金华, 李纪伟, 朱鸿儒. 基于 ArcGIS 区统计的延安市土地生态敏感性评价[J]. *自然资源学报*, 2011, 26(7): 1180-1188.
WU Jin-hua, LI Ji-wei, ZHU Hong-ru. Land ecological sensitivity evaluation of Yan'an based on zonal statistics of ArcGIS[J]. *Journal of Natural Resources*, 2011, 26(7): 1180-1188. (in Chinese)
- [16] 罗 鹏, 石军南, 孙 华. 基于 GIS 空间模型的库区生态敏感性评价研究[J]. *水土保持研究*, 2007, 14(2): 255-258.
LUO Peng, SHI Jun-nan, SUN Hua. Reservoir ecological sensitivity assessment based on GIS spatial analysis model[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2007, 14(2): 255-258. (in Chinese)
- [17] 宋晓龙, 李晓文, 白军红, 等. 黄河三角洲国家级自然保护区生态敏感性评价[J]. *生态学报*, 2009, 29(9): 4836-4846.
SONG Xiao-long, LI Xiao-wen, BAI Jun-hong, et al. The ecological sensitivity evaluation in Yellow River Delta national natural reserve[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(9): 4836-4846. (in Chinese)
- [18] 黄 静, 崔胜辉, 李方一, 等. 厦门市土地利用变化下的生态敏感性[J]. *生态学报*, 2011, 31(24): 7441-7449.
HUANG Jing, CUI Sheng-hui, LI Fang-yi, et al. Ecological sensitivity of Xiamen City to land use changes[J]. *Acta Ecologica*, 2011, 31(24): 7441-7449. (in Chinese)
- [19] 方 芳. 空间多准则决策研究概述[J]. *测绘科学*, 2014, 39(7): 9-12.

- FANG Fang. Review of spatial multi-criteria decision making[J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2014, 39(7): 9-12.(in Chinese)
- [20] 姜 华, 高国安, 刘栋梁. 多准则决策评价系统设计[J]. 系统工程理论与实践, 2000, 1(3): 12-16.
- JIANG Hua, GAO Guo-an, LIU Dong-liang. Design and implement of multiple criteria decision evaluation system[J]. *Systems Engineering Theory and Practice*, 2000, 1(3): 12-16.(in Chinese)
- [21] 王坚强. 模糊多准则决策方法研究综述[J]. 控制与决策, 2008, 23(6): 601-606.
- WANG Jian-qiang. Overview on fuzzy multi-criteria decision-making approach[J]. *Control and Decision*, 2008, 23(6): 601-606.(in Chinese)
- [22] Costanza R, D Arge R, de-Groot R, et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital[J]. *Nature*, 1997, 386(6630): 253-260.
- [23] 谢高地, 鲁春霞, 冷允法, 等. 青藏高原生态资产的价值评估[J]. 自然资源学报, 2003, 18(2): 189-196.
- XIE Gao-di, LU Chun-xia, LENG Yun-fa. et al. Ecosystem diversity and economic valuation of Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Journal of Natural Resources*, 2003, 18(2): 189-196.(in Chinese)
- [24] 谢高地, 甄 霖, 鲁春霞, 等. 生态系统服务的供给、消费和价值化[J]. 资源科学, 2008, 30(1): 93-99.
- XIE Gao-di, ZHEN Lin, LU Chun-xia, et al. Supply, consumption and valuation of ecosystem services in China[J]. *Resources Science*, 2008, 30(1): 93-99.(in Chinese)
- [25] 嘉兴市水利局. 嘉兴市水资源公报[R].
- Jiaxing City Water Conservancy Bureau. Jiaxing City water resources bulletin[R].(in Chinese)
- [26] 胡瑞法, 冷 燕. 中国主要粮食作物的投入与产出研究[J]. 农业技术经济, 2006, 8(3): 2-8.
- HU Rui-fa, LENG Yan. The research on the input and output of the main food crops of China[J]. *Journal of Agrotechnical Economics*, 2006, 8(3): 2-8.(in Chinese)