

基于生态足迹定量分析的土地利用结构优化研究 ——以江苏省徐州市为例

奚砚涛¹, 牛坤², 薛丽芳¹

(1. 中国矿业大学 资源与地球科学学院, 江苏 徐州 221116; 2. 六盘水师范学院 矿业工程系, 贵州 六盘水 553004)

摘要: 生态足迹是定量研究区域可持续发展的一种重要方法。运用生态足迹方法分析了徐州市 1989—2008 年生态足迹和生态承载力的动态变化, 并利用生态足迹和生态承载力等指标对江苏省徐州市土地利用可持续性进行了评估。结果表明, 徐州市人均生态足迹由 1989 年的 1.13 hm² 上升到 2008 年的 2.57 hm²; 人均生物承载力由 1989 年的 0.580 hm² 下降到 2008 年的 0.450 hm²; 人均生态赤字由 1989 年的 0.550 hm² 上升到 2008 年的 2.100 hm², 表明徐州市土地集约化程度低。采用线性回归模型对该区人口进行预测, 采用灰色预测模型对 2010—2015 年的生态足迹变化情况进行了预测, 在此基础上, 构建了基于生态足迹方法的多目标线性规划模型, 以生态赤字最小化和经济效益最大化为目标函数, 设置了 7 个变量, 制定了 9 个约束条件。根据模型求解优化方案, 对徐州市土地利用结构进行了优化调整。

关键词: 生态足迹; 生态承载力; 土地利用结构优化; 多目标规划; 江苏省徐州市

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2014)02-0293-07

中图分类号: F301.23

DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2014.02.060

A Study on Optimization of Land Use Structure Based on Quantitative Analysis of Ecological Footprint

—A Case Study of Xuzhou City, Jiangsu Province

XI Yan-tao¹, NIU Kun², XUE Li-fang¹

(1. School of Resource and Earth Science, CUMT, Xuzhou, Jiangsu 221116, China;

2. Mining Engineering Department, Liupanshui Normal University, Liupanshui, Guizhou 553004, China)

Abstract: Ecological footprint method is an effective approach for quantitative evaluation of the regional sustainable development. Dynamic changes of ecological footprint(EF) and ecological capacity(EC) were analyzed based on ecological footprint method and land use sustainability was assessed using EF, EC and other indicators of Xuzhou City, Jiangsu Province from 1999 to 2008. The results showed that the per capita ecological footprint of Xuzhou City increased from 1.13 hm² in 1989 to 2.57 hm² in 2008, and the per capita ecological capacity decreased from 0.58 hm² in 1989 to 0.45 hm² in 2008. The per capita ecological deficit increased from 0.55 hm² in 1989 to 2.10 hm² in 2008. Intensification of land-use is low in Xuzhou City. The author used a linear regression model to predict the population, and predicted the ecological footprint of 2010—2015 by gray prediction model. The multi-objective linear programming model was built to optimize the land use structure in Xuzhou City, which minimizes ecological deficit and maximizes economic benefits as the objective function, and sets up seven variables and nine constraints. The land use structure was optimized in Xuzhou City according to optimal scheme.

Keywords: ecological footprint; ecological capacity; optimization of land use structure; multi-objective programming; Xuzhou City of Jiangsu Province

生态足迹方法作为一种度量可持续发展程度的生物物理评价方法, 被广泛应用于各个层面^[1-3]。生态足迹分析法是由加拿大生态经济学家 William 和

Wackernagel 于 20 世纪 90 年代初期提出的, 并由 Wackernagel 于 1996 年进一步完善的一种直观的、较易操作的度量可持续发展状态和程度的方法^[4-5]。

收稿日期: 2013-04-28

修回日期: 2013-05-16

资助项目: 国家自然科学基金项目“面向流域的城市化水文效应与城市可持续发展研究”(41201166); 国家国际科技合作专项(2012DFG22140); 江苏高校优势学科建设工程项目

作者简介: 奚砚涛(1973—), 男(汉族), 江苏省丰县人, 博士, 副教授, 主要从事地图学与地理信息系统的研究。E-mail: xyt556@cumt.edu.cn。

土地利用优化问题是土地利用规范化中的核心内容,人们在长期的土地利用中发现,土地生态系统可以提供给人类多种价值,这些价值或是经济的,或是社会的,或是生态的^[6-7]。优化土地利用结构是在保证土地利用效率最大化的约束下,解决土地供需平衡和合理分配国民经济各部门之间的土地资源的有效途径。由于土地利用的区域性差异,于是便产生了一定区域范围内土地资源利用结构优化问题^[8-9]。

本研究利用生态足迹方法,对徐州市 1989—2008 年生态足迹进行计算和评价,分析了该地区土地利用与经济可持续发展的可持续性,并预测了未来的生态足迹及生态承载力等。在此基础上,从生态角度出发,以生态足迹计算结果为切入点,确定生态赤字的最小,经济效益最大为目标函数,设定了与土地利用结构关系密切的土地资源、社会需求和生态环境要求等方面的 9 个约束条件,构建了徐州市土地利用规划的多目标规划模型,对徐州市的土地利用结构进行了优化,并对优化结果进行了评价,为徐州市土地利用结构优化提供科学的、可行的工具与手段,并为土地管理部门的决策起到一定的辅助作用。

1 生态足迹计算及定量分析

1.1 研究区概况

徐州市位于江苏省的西北部,东经 $116^{\circ}21'15''$ — $118^{\circ}43'13''$,北纬 $33^{\circ}43'44''$ — $34^{\circ}58'45''$ 之间,东西长约 210 km,南北宽约 140 km,该市辖区总面积为 1.11×10^6 hm^2 ,位于苏、鲁、豫、皖 4 省交汇处,东部沿海与中部地带、上海经济区与环渤海经济圈的结合部。徐州市总人口 908.66 万,其中非农业人口 284.50 万。人口密度 807 人/ km^2 。有回、满等 47 个少数民族人口 2.03 万。工业生产以煤炭、电力为主,冶金、机械、建材、化工、食品轻纺等综合发展。1984 年与周邻 16 个地市联合成立淮海经济区,而徐州市则是位居淮海经济区的中心城市。1994 年 4 月 22 日列入全国较大城市管理序列,享有立法权。

1.2 生态足迹与生态承载力模型

生态足迹模型主要通过构造土地利用消费矩阵来解释人类消费活动与赖以生存的土地资源之间的关系,生态足迹作为可持续发展的有效度量工具之一,获得了广泛关注^[10]。通常生物生产土地类型主要考虑:耕地、林地、草地、化石能源生产用地、建筑用地和水域 6 种类型^[11]。生态承载力表达区域范围内实际所能提供的各类生态生产性土地总面积,并通过与生态足迹比较,计算生态盈亏来衡量区域可持续发展状况^[12-13]。生态足迹与生态承载力计算模型为:

$$EF = N \times ef = N \sum aa_i = \sum r_j \times A_j = N \sum c_i / p_i \quad (1)$$

$$EC = N \times ec = N \sum a_j \times r_j \times y_j \quad (2)$$

式中:EF——总的生态足迹;N——人口数;ef——人均生态足迹; c_i —— i 种商品的人均消费量; p_i —— i 种消费商品的平均生产能力; aa_i ——人均 i 种交易商品折算的生物生产面积; i ——所消费商品和投入的类型; A_i ——第 i 种消费项目折算的人均占有的生物生产面积; r_j ——均衡因子;EC——总的生态足迹;ec——人均生态承载力($\text{hm}^2/\text{人}$); a_j ——人均生物生产面积; y_j ——产量因子。

1.3 参数选取与确定

均衡因子是生态足迹模型分析法进行建模的重要因子,本文采用世界自然基金会(WWF)2008 年更新发布的数值:可耕地 2.64,森林 1.33,牧草地 0.5,水域 0.4,建设用地 2.64^[14]。

产量因子数值的选取非常重要,不同土地类型的生态足迹计算过程中,产量因子的选取对最终结果的影响很大。参阅相关文献得出,前人对于生态足迹的研究大都选取采用了 WWF 提供的数值^[15]。为了使研究更符合我国的国情,根据我国实际情况对产量因子作了重新调整计算。耕地产量因子,选取徐州市近 5 a 来,主要农耕地产品的年平均产量与其全球农耕地产品平均产量相比的结果。水域产量因子,根据查阅的相关资料,选择 Wackernagel 对中国产量因子取值的算法^[16-17];林地产量因子,因其用途不同,林地分为化石能源排放气吸收林和果木林。徐州市地处暖温带,暖温带森林对温室气体的吸收能力约为 $4.5 \text{ t}/\text{hm}^2$,而全球平均吸收能力为 $3.8 \text{ t}/\text{hm}^2$,两者相比的比值为化石能源森林的产量因子;果木林的产量因子为徐州市近 5 a 水果的年平均产量与全球产品平均产量的比值,计算结果为 1.39;草地产量因子:由于徐州市的牧草地数量比较少,并且对本研究生态足迹计算的影响不大,因此可直接选取 Wackernagel 对中国总生态足迹进行计算时所采用的产量因子;建成地的产量因子计算方法与耕地相同。表 1 为各地类均衡因子和产量因子的取值。

表 1 各地类的均衡因子和产量因子

生态生产性 土地类型	耕地	草地	林地	水域	建设用地	化石能 源用地
均衡因子	2.64	0.45	1.33	0.40	2.64	1.10
产量因子	1.73	0.45	1.39	1.00	2.17	1.18

1.4 计算与分析

对于生态足迹消费项目的计算包括两大类,分别

是生物资源类消费项目以及能源类消费项目。人类满足日常生产生活消费的大部分来源于这两类消费资源。各种消费品生态足迹的计算,可以用徐州市不同类型资源的消费量与生产此类资源的土地的全球平均产量相除,之后将得数按相同用地类型进行归类合并,从而得出各种用地类型的生态足迹需求。将徐州市的消费转化为提供这类消费需要的生态生产性面积。其数据来源于徐州市统计年鉴和江苏省统计资料。根据世界环境与发展委员会(WCED)建议,为了维护生物多样性,预留出 12% 的生态生产性土地面积^[18]。因此,只有 88% 的生态承载力,是实际可以利用的生态承载力。由于现实中,人类并没有留出一

定量的准备土地用于补偿因化石能源的消耗而损失的自然资源存量,因此,化石能源地在生态承载力(土地供给)的计算中具有不可操作性,不予考虑。表 2 为 1989—2008 年徐州市人均生态足迹计算结果,表 3 为 1989—2008 年徐州市人均生态承载力计算结果。表 3 体现了徐州市 1989—2008 年期间生态足迹的动态变化情况,也反映了土地利用结构动态发展过程以及土地可持续发展进程,弥补了生态足迹模型只能静态的描述某个区域特定时间点发展状况的缺陷。通过描述徐州市生态生产性土地供给的动态发展过程,可以大致体现出近 20 a 来区域土地可持续利用的发展势态。

表 2 徐州市 1989—2008 年人均生态足迹

hm²

年份	耕地	草地	林地	水域	化石能源用地	建设用地	人均生态足迹
1989	0.343	0.245	0.019	0.031	0.478	0.015	1.131
1990	0.321	0.271	0.022	0.032	0.446	0.015	1.106
1991	0.324	0.278	0.016	0.035	0.436	0.015	1.104
1992	0.320	0.297	0.021	0.039	0.436	0.016	1.128
1993	0.312	0.377	0.033	0.048	0.536	0.017	1.322
1994	0.279	0.441	0.033	0.057	0.767	0.019	1.596
1995	0.297	0.521	0.050	0.069	0.713	0.019	1.668
1996	0.324	0.656	0.047	0.079	0.737	0.020	1.862
1997	0.336	0.400	0.049	0.085	0.752	0.021	1.642
1998	0.313	0.414	0.052	0.095	0.686	0.004	1.565
1999	0.346	0.405	0.055	0.101	0.741	0.010	1.658
2000	0.303	0.446	0.056	0.104	0.727	0.010	1.646
2001	0.304	0.466	0.058	0.108	0.734	0.011	1.682
2002	0.306	0.494	0.060	0.111	0.819	0.014	1.804
2003	0.226	0.517	0.058	0.112	0.938	0.023	1.920
2004	0.306	0.557	0.039	0.117	1.155	0.015	2.190
2005	0.289	0.613	0.039	0.122	1.321	0.018	2.403
2006	0.299	0.632	0.039	0.127	1.358	0.026	2.483
2007	0.303	0.638	0.040	0.130	1.360	0.030	2.501
2008	0.310	0.641	0.042	0.137	1.395	0.031	2.556
年均	0.308	0.465	0.041	0.087	0.827	0.018	1.748

通过徐州市 1989—2008 年生态足迹供给、生态足迹需求、生态赤字和生态压力指数的计算数据得出,1989 年徐州市的人均足迹需求为 1.13 hm²,到 2008 年达到 2.57 hm²,共增长了 1.44 hm²,总体呈大幅增长的趋势,而从图 1 可以看出,生态承载力的发展趋势波动不大,基本为水平发展。1989 年徐州市的生态赤字为 0.62 hm²,2008 年增加至 2.16 hm²生态赤字的绝对值增大了 1.54 hm²。生态压力指数由 1989 年的 1.20 增长到 2008 年的 5.40。同我国其

它省、市的生态压力指数作比较,能够看出徐州市的生态环境的压力比较紧张。

2 徐州市人口及生态足迹预测分析

2.1 总人口预测

采用一元线性回归模型^[19],以 2000 年为规划基准年,2015 年为规划水平年,对徐州市 2015 年的人口经济指标进行预测,并建立回归模型:

$$p(x) = 6.041x + 888.3317 \quad (3)$$

模型拟合结果与样本实际值、相对误差结果详见表 4, 拟合优度 $R^2 = 0.9889$, 平均相对误差为 0.001%, 所以选用此模型对徐州市 2009—2015 年的

总人口规模进行预测, 结果详见表 5。预测结果表明 2015 年徐州市总人口数将达到 984.988 万人, 由此可得 2018 年人口总数将超 1 000 万。

表 3 1989—2008 年徐州市人均生态承载力

hm²

年份	耕地	草地	林地	水域	建设用地	人均生态承载力	实际生态承载力
1989	0.375	0.000	0.008	0.003	0.198	0.580	0.514
1990	0.348	0.000	0.007	0.003	0.187	0.566	0.498
1991	0.340	0.000	0.007	0.003	0.184	0.534	0.470
1992	0.334	0.000	0.007	0.003	0.183	0.527	0.464
1993	0.329	0.000	0.007	0.003	0.181	0.520	0.457
1994	0.322	0.000	0.007	0.003	0.179	0.511	0.450
1995	0.315	0.000	0.007	0.003	0.182	0.507	0.446
1996	0.312	0.000	0.007	0.003	0.180	0.501	0.441
1997	0.308	0.000	0.007	0.003	0.179	0.496	0.437
1998	0.304	0.000	0.007	0.003	0.177	0.490	0.432
1999	0.303	0.000	0.007	0.003	0.176	0.489	0.431
2000	0.291	0.000	0.006	0.003	0.177	0.477	0.420
2001	0.289	0.000	0.006	0.003	0.176	0.474	0.417
2002	0.288	0.000	0.006	0.003	0.181	0.477	0.420
2003	0.286	0.000	0.006	0.003	0.180	0.475	0.418
2004	0.283	0.000	0.006	0.003	0.178	0.470	0.413
2005	0.279	0.000	0.006	0.003	0.177	0.465	0.409
2006	0.280	0.000	0.006	0.002	0.174	0.463	0.407
2007	0.278	0.000	0.006	0.002	0.170	0.456	0.402
2008	0.276	0.000	0.006	0.002	0.170	0.450	0.400
年均	0.405	0.000	0.007	0.003	0.185	0.470	0.413

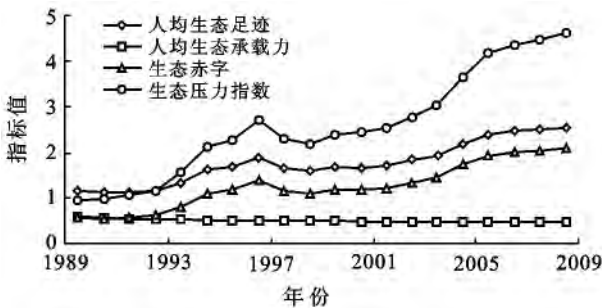


图 1 徐州市人均生态足迹、生态承载力、生态赤字及生态压力动态变化

表 4 徐州市 2000—2008 年人口拟合结果

年份	实际人口/万人	拟合人口/万人	相对误差/%
2000	896.440	894.373	0.002
2001	901.860	900.414	0.002
2002	904.440	906.455	-0.002
2003	908.660	912.496	-0.004
2004	916.850	918.537	-0.002
2005	925.310	924.578	0.001
2006	934.730	930.619	0.004
2007	937.590	936.660	0.001
2008	940.950	942.701	-0.002

表 5 徐州市 2009—2015 年人口预测结果

万人

年份	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
预测人口	948.742	954.783	960.824	966.847	972.906	978.947	984.988

2.2 生态足迹预测

灰色系统分析方法是通过时间序列的数据累加, 再滤去原始序列中混入的随机量, 并进行关联度分析, 通过原始数据的规律性, 建立相应的微分方程模型, 最终生成预测模型并寻求系统变动的规律, 从而预测事物未来的发展趋势和状态^[12]。由于 GM(1,1)

建模过程简单、求解简便和模拟精度较高, 现已广泛应用于经济、农业和生态等领域^[20-23]。

建立徐州市人均生态足迹灰色模型:

$$x(k+1) = 26.2614e^{0.0682751k} - 24.6034 \quad (4)$$

其中: $k=2, 3, 4, \dots, n$, 表 6 为徐州市 200—2008 年人均生态足迹预测结果。

表 6 徐州市 2000—2008 年人均生态足迹预测结果

年份	实际值/hm ²	拟合值/hm ²	残差	相对误差/%
2000	1.646	1.650	0.004	0.250
2001	1.682	1.754	0.072	4.300
2002	1.804	1.864	0.060	3.351
2003	1.920	1.982	0.062	3.234
2004	2.190	2.106	-0.083	3.807
2005	2.403	2.239	-0.164	6.832
2006	2.483	2.379	-0.103	4.160
2007	2.501	2.529	0.027	1.092
2008	2.570	2.688	0.131	5.139

根据 GM(1,1) 后验差检验方法原理,进行模型检验。后验差比 C 越小越好,表明预测值与实际值之差

并不太离散;小误差概率 P 越大越好,表明残差与残差平均值之差小于给定值 0.674 55 的点较多。若 C 和 P 都在允许范围内,表明预测模型可靠。根据模型计算可知精度为 96.43%,后验差比 C 为 0.28、小误差概率 P 为 1,指标均达到一级标准,预测方程合格。用此模型对徐州市未来几年的人均生态足迹进行预测(表 7)。

基于徐州市 2009—2015 年的人均生态足迹模型计算结果及人口统计数据,可以得到总生态足迹。并通过灰色预测建模分析生态承载力发展趋势(表 7),预测得未来 5 a 内的生态赤字,指导土地利用优化模型的构建。

表 7 徐州市 2009—2015 年人均生态足迹及生态承载力预测结果

年份	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
人均生态足迹	2.857	3.036	3.227	3.430	3.645	3.874	4.118
人均生态承载力	0.398	0.396	0.393	0.391	0.388	0.385	0.383

由表 8 可看出,规划期内,徐州市的生态足迹仍然会呈现加速上升趋势,而相应的生态承载力却出现缓慢下降;表明区域生态赤字将随之逐步增大。在徐州市现有的发展模式基础上,根据预测结果表明,到 2015 年,人均生态足迹将达到 4.12 hm²,总生态足迹为 4.06×10^7 hm²,远大于目前徐州市的实际面积,因此人地关系十分紧张,急需采取土地集约利用战略,以供制约和引导需求,优化土地利用结构,改善现有土地利用的模式。

表 8 徐州市 2009—2015 年总生态足迹预测结果 10^4 hm²

年份	生态足迹	生态承载力	生态赤字
2009	2 710.168	377.873	2 332.295
2010	2 898.837	377.785	2 521.052
2011	3 100.517	377.681	2 722.835
2012	3 316.034	377.556	2 938.478
2013	3 546.526	377.430	3 169.096
2014	3 792.823	377.282	3 415.541
2015	4 056.070	377.121	3 678.950

3 土地利用结构优化

对土地资源的结构优化构建多目标线性规划模型,该模型具有可调性和可控性,其重要特点是对各个目标分级加权,然后进行逐级优化^[24-25]。根据徐州市实际情况,土地利用的结构优化当满足区域的环境友好型可持续发展模型,在寻求经济效益目标最大化的同时兼顾城市的生态效益^[24]。其中,主导目标是生态足迹目标。本研究选取生态足迹目标和经济效

益目标,构建多目标线性规划模型,通过相关的指标及规划期目标构建约束条件,使其充分满足城市的生态建设目标。

3.1 设置变量及约束条件

从生态足迹和土地利用结构优化的角度考虑,变量设置要充分满足其用地类型的需求。据此,决策变量的选择以徐州市土地利用现状为基础,从地区实际和模型构建要求出发,综合考虑资料的可操作性,设置了 7 个变量,分别为: x_1 为耕地, x_2 为草地, x_3 为园地, x_4 为林地, x_5 为水域, x_6 为建设用地, x_7 为其它用地。

根据生态足迹预测及《徐州市土地利用总体规划大纲(2006—2020 年)》,构建约束条件(表 9)。

3.2 构建目标函数

3.2.1 以生态赤字最小为目标 通过对徐州市生态足迹的计算分析,根据生态足迹计算模型,构建生态赤字的目标函数,即:

$$\min(ED) = \min(EF - EC) \quad (5)$$

式中:目标值 ED ——徐州市 2015 年生态赤字,变量 EC ——生态承载力。由生态足迹的预测结果,已知 2015 年的生态足迹 EF 总需求为 4.06×10^7 hm²。

根据生态足迹计算模型得到生态承载力计算公式:

$$EC = 2.64 \times 1.73x_1 + 0.45 \times 0.45x_2 + 1.33 \times 1.39(x_3 + x_4) + 0.4 \times 1.00x_5 + 2.64 \times 2.17x_6 \quad (6)$$

由此得到生态足迹的目标函数:

$$\min(ED) = 40\ 560\ 700 - 4.57x_1 + 0.2x_2 + 1.85(x_3 + x_4) + 0.4x_5 + 5.73x_6 \quad (7)$$

表 9 徐州市土地利用结构优化约束因素

约束因素	表达式
人口约束	按照规划期 2015 年的预测人口限制数,根据农用地及城镇人口密度,得出人口的土地承载约束力为: $2.904 \times (x_1 + x_2 + x_3 + x_4) + 130 \times 0.070 2 \times x_5 \leq 9 849 880$
土地供给约束	土地总面积约束: $x_1 + x_2 + x_3 + x_4 + x_5 + x_6 + x_7 = 1 114 232.7$
	占补平衡原则得出耕地最小约束为: $x_1 \geq 597 734$
	总农业用地不减少: $x_1 + x_2 + x_3 + x_4 \geq 829 979.8$
生态约束	修规指导性用地约束: 水域 $x_5 \leq 39 500$, 保留用地 $x_7 \leq 151 045.1$
	建设用地: $209 322.8 \leq x_6 \leq 220 000$
非负约束	保护环境,规划期不低于现有水平: 草地 $x_2 \geq 65.2$, 园地 $x_3 \geq 74 355.7$, 林地 $x_4 \geq 41 964.9$ $x_i \geq 0, i=1,2,\dots,7$

3.2.2 以经济效益最大为目标

$$B(x) = \sum_{i=1}^7 K_i W_i X_i \quad (8)$$

式中: K_i ——各类用地效益系数,为常数; W_i ——各类用地的相对权重; X_i ——各类用地面积(hm^2)。

(1) 定各类用地的相对权重 W 。应用 AHP 层次分析法^[25]确定各类用地类型的效益权重集 $W_i (i=1, 2, \dots, 7)$, 其他土地的相对权重为 0, 即 $W = (0.004 2, 0.743 8, 0.008 3, 0.000 9, 0.008 8, 0.234 1, 0)$ 。

(2) 确定效益系数 K 。选用耕地效益,即每公顷耕地产出效益的预测值来确定常数 K 。根据历年耕地产出效益,2010 年平均单位面积耕地的产出:

$$V_{\text{耕地}} = W_{\text{耕地}} \times K_{\text{耕地}} = 1.245 5 \text{ 万元}/\text{hm}^2$$

由此得到 K 值,并据此求得其它各地类的 K 值。然后乘以相应的权重值,从而求得相应用地类型单位面积上的产出效益,即: $K \cdot W = (2.431 8, 305.839 7, 4.451 1, 0.540 7, 9.665 3, 107.857 8, 0)$

3.3 模型构建与求解

基于生态足迹方法的土地利用结构优化模型的徐州市 2015 年目标函数及约束条件公式,并采用间接算法,将多目标函数转化成单目标问题选用 LINDO 软件进行多目标线性规划的求解。通过对构建模型进行规划求解,计算得到规划期 2015 年土地利用类型优化结果(表 10)。由表 10 可以看出,土地利用优化大体趋势体现为基本农耕地保有量不变,生态用地合理增加,水域,湿地有所减少,建设用地不断增加,土地经济效益增长。

根据优化结果,重新计算了 2015 年徐州市生态足迹与生态承载力,在人均生态不变的情况下,人均生态承载力为 0.465 hm^2 ,比 2005 年增加了 $0.000 7 \text{ hm}^2$,比 2015 年的预测值增加了 0.082 hm^2 ,人均生态赤字为 3.652 ,比预测值减少了 2.21% 。达到了土地利用结构优化的目的。

表 10 徐州市 2015 年土地利用结构优化结果

土地类型	2005 年(现状)		2015 年(优化)	
	总面积/ hm^2	比例/ $\%$	总面积/ hm^2	比例/ $\%$
耕地	597 734.0	53.65	599 045.4	53.76
草地	65.2	0.01	520.3	0.05
园地	74 355.7	6.67	75 032.5	6.73
林地	41 964.9	3.76	60 150.2	5.40
水域	39 745.0	3.57	39 483.1	3.54
建设用地	209 322.8	18.79	214 900	19.30
其它土地	151 045.1	13.55	125 101.2	11.22

4 结论

(1) 1989—2008 年徐州市时间序列的人均生态足迹需求逐年增加,而人均承载力变化不大,且建设用地面积增加,而草地,林地,水域承载面积严重不足,土地供需结构失衡。同时徐州市 1989—2008 年的生态协调系数随着时间的推移,离极大值 1.414 的差距变大,生态承载缺陷度值不断提高,表明徐州市的经济发展水平不断提高,但可持续发展与生态环境保护的压力越来越大。

(2) 2000—2015 年徐州市生态承载力稳定发展,而生态足迹处于增长趋势,到 2015 年,人均生态足迹将达到 4.118 hm^2 ,总生态足迹为 $4.06 \times 10^7 \text{ hm}^2$,生态赤字增加到 $3.68 \times 10^7 \text{ hm}^2$,不能满足区域可持续发展的要求。

(3) 针对目前徐州市土地利用现状及趋势存在的问题,构建了徐州土地利用结构的多目标优化模型。经调整后,徐州市 2015 年生态承载力比 2005 年增加了 $0.000 7 \text{ hm}^2$,比 2015 年的预测值增加了 0.082 hm^2 ,生态赤字比预测值减少了 2.21% 。这在城市化发展的过程中已经是极大的突破。同时,徐州市各类用地的经济效益也有了一定的提高,实现了徐州市国民经济和社会发展战略目标,而且通过优化调

整,徐州市土地利用结构基本上可达到经济、社会和生态效益的有机统一。

[参 考 文 献]

- [1] Gottlieb D, Vigoda G E, Haim A, et al. The ecological footprint as an educational tool for sustainability: A case study analysis in an Israeli public high school[J]. *International Journal of Educational Development*, 2012, 32(1): 193-200.
- [2] Serafico M E, Espinoza M M, Perlas L A. Ecological footprint of the national capital region households: Bridging the gap between nutrition and environment[J]. *Philippine Journal of Science*, 2012, 141(1): 67-75.
- [3] 姚争,冯长春,阚俊杰. 基于生态足迹理论的低碳校园研究:以北京大学生态足迹为例[J]. *资源科学*, 2011(6): 1163-1170.
- [4] Wackernagel M, Rees W E. Perceptual and structural barriers to investing in natural capital: Economics from an ecological footprint perspective[J]. *Ecological Economics*, 1997, 20(1): 3-24.
- [5] Rees W, Wackernagel M. Urban ecological footprints: Why cities cannot be sustainable and why they are a key to sustainability[J]. *Environmental Impact Assessment Review*, 1996, 16(4): 223-248.
- [6] Costanza R, D'arce R, De G R, et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital[J]. *Ecological Economics*, 1998, 25(1): 3-15.
- [7] Domptail S, Nuppenau E A. The role of uncertainty and expectations in modeling(range) land use strategies: An application of dynamic optimization modeling with recursion[J]. *Ecological Economics*, 2010, 69(12): 2475-2485.
- [8] 冯广京,严金明. 土地利用总体规划修编的战略思路[J]. *中国土地科学*, 2002, 16(2): 4-7.
- [9] Sun Aiqing, Wu Kening. Optimization of land use structure applying grey linear programming and analytic hierarchy process[C]// *Proceedings of the Artificial Intelligence, Management Science and Electronic Commerce (AIMSEC)*, 2nd International Conference on, IEEE, 2011.
- [10] 尹科,王如松,姚亮,等. 生态足迹核算方法及其应用研究进展[J]. *生态环境学报*, 2012, 21(3): 584-589.
- [11] 刘东,封志明,杨艳昭. 基于生态足迹的中国生态承载力供需平衡分析[J]. *自然资源学报*, 2012, 27(4): 614-624.
- [12] 赵兴国,潘玉君,王爽,等. 云南省耕地资源利用的可持续性及其动态预测:基于“国家公顷”的生态足迹新方法[J]. *资源科学*, 2011, 33(3): 542-548.
- [13] Wang Ping, Wang Xinjun. Spatiotemporal change of ecological footprint and sustainability analysis for Yangtze Delta Region[J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2011, 21(5): 859-868.
- [14] Wackernagel M, Schulz N B, Deumling D, et al. Tracking the ecological overshoot of the human economy[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2002, 99(14): 9266-9271.
- [15] Ewing B, Reed A, Galli A, et al. Calculation methodology for the national footprint accounts[M]. Oakland: Global Footprint Network, 2010.
- [16] Gossling S, Hansson C B, Horstmeier O, et al. Ecological footprint analysis as a tool to assess tourism sustainability[J]. *Ecological Economics*, 2002, 43(2): 199-211.
- [17] 陈东景,张志强,程国栋,等. 中国 1999 年的生态足迹分析[J]. *土壤学报*, 2002, 39(3): 441-445.
- [18] Erb K H. Actual land demand of Austria 1926—2000: A variation on ecological footprint assessments [J]. *Land Use Policy*, 2004, 21(3): 247-259.
- [19] 赵文亮,贺振,贺俊平,等. 基于 MODIS—NDVI 的河南省冬小麦产量遥感估测[J]. *地理研究*, 2012, 31(12): 2310-2320.
- [20] Wang Ruimin, Wei Yong. Direct GreyGM(1,1) Model and its Optimization[J]. *Journal of Grey System*, 2012, 15(1): 14-17.
- [21] 魏光辉,胡清华,申莲,等. 灰色 GM(1,1) 模型在区域干旱预测中的应用[J]. *沙漠与绿洲气象*, 2012, 5(5): 20-23.
- [22] Liu Y, Cai Y, Huang G, et al. Interval-parameter chance-constrained fuzzy multi-objective programming for water pollution control with sustainable wetland management [J]. *Procedia Environmental Sciences*, 2012(13): 2316-2335.
- [23] 郑荣宝,董玉祥,陈梅英. 基于 GECM 与 CA+ANN 模型的土地资源优化配置与模拟[J]. *自然资源学报*, 2012, 27(3): 497-509.
- [24] 白钰. 基于生态足迹的天津市土地利用总体规划生态效用评价[J]. *经济地理*, 2012, 32(10): 127-132.
- [25] 李丽娜,石培基,李建豹. 基于 GIS 的可持续发展水平空间差异的实证分析[J]. *土壤*, 2012, 44(3): 492-497.