

DOI: 10.5846/stxb201710251911

李坦,王静,张庆国,崔玉环,姚佐文.合肥市生态足迹时空特征与脱钩效应变化及灰色预测分析.生态学报,2019,39(5): - .

Li T, Wang J, Zhang Q G, Cui Y H, Yao Z W. Spatiotemporal characteristics of an ecological footprint, decoupling effect tendency, and grey prediction in Hefei city. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(5): - .

合肥市生态足迹时空特征与脱钩效应变化及灰色预测分析

李 坦^{1,*}, 王 静^{1,2}, 张庆国¹, 崔玉环¹, 姚佐文³

1 安徽农业大学理学院, 合肥 230036

2 云南财经大学统计与数学学院, 昆明 650221

3 安徽农业大学经济管理学院, 合肥 230036

摘要:生态足迹与脱钩效应分析是衡量地区可持续发展状态的一种有效工具。以快速城镇化的科教名城合肥市为例,利用生态足迹法和脱钩效应分析对 2000—2014 年合肥市生态足迹与脱钩状态进行定量研究与动态分析,建立 GM(1,1)模型对 2015—2020 年合肥市生态状况进行预测。结果显示:2000—2014 年间,合肥市人均生态足迹与人均生态承载力波动上升且幅度较大,生态赤字波动较小,整体略有上升。从结构上看,化石燃料的生态足迹近年来比重较大。从空间上看,生态足迹与承载力均表现出中心区低,郊区高的特征。在环境压力与经济增长的脱钩关系中,强脱钩与弱脱钩出现的频率分别为:42.9%,28.6%。灰色预测结果表明,2015—2020 年合肥市人均生态足迹呈上升趋势,生态足迹与 GDP 增长呈持续弱脱钩的状态,脱钩指数较小且趋于稳定。本研究对优化合肥市产业结构、实行有差别土地利用方式与国土优化格局,适度控制人口增长具有重要的参考意义。

关键词:GM(1,1);生态足迹;脱钩分析;合肥市

Spatiotemporal characteristics of an ecological footprint, decoupling effect tendency, and grey prediction in Hefei city

LI Tan^{1,*}, WANG Jing^{1,2}, ZHANG Qingguo¹, CUI Yuhuan¹, YAO Zuowen³

1 School of Science, Anhui Agricultural University, Hefei 230036, China

2 School of Statistics and Mathematics, Yunnan University of Finance and Economics, Kunming 650221, China

3 College of economics and management, Anhui Agricultural University, Hefei 230036, China

Abstract: The methods of ecological footprint and decoupling effect analysis are effective tools for measuring the status of sustainable development in a region. Taking Hefei as an example of rapid development of urbanization, this article applied the analysis of an ecological footprint and decoupling effect to conduct the quantitative research and dynamic analysis of the ecological status from 2000 to 2014. Additionally, the GM (1, 1) model was established to predict the ecological status of Hefei from 2015 to 2020. The results show that from 2000 to 2014, the per capita ecological footprint of Hefei and the per capita ecological carrying capacity fluctuated. The fluctuation of the ecological deficit was small and increased slightly in general. The ecological footprint of fossil fuels was relatively large in recent years. The space distribution of the ecological footprint and carrying capacity is low in the urban district and high in the suburban district. In the decoupling relationship between environmental pressure and economic growth, the frequencies of strong decoupling and weak decoupling were 42.

基金项目:国家自然科学基金(71503004,71873003);安徽省省级环保项目(2015-5)

收稿日期:2017-10-25; **网络出版日期:**2018-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: litan@ahau.edu.cn

9% and 28.6%, respectively. The grey model predicts that the per capita ecological footprint from 2015 to 2020 will also increase. This finding is significant for optimizing the industrial structure of Hefei City, implementing different land use patterns, upgrading land patterns, and for controlling population growth moderately.

Key Words: GM (1, 1) model; ecological footprint; decoupling analysis; Hefei City

21 世纪以来,合肥市地区生产总值已由 2000 年全国省会城市排名第 26 名增长到 2014 年的全国前十,取得了省会城市增幅全国第一的瞩目成绩,经济的增长、城镇化进程的加快也必然会催化经济发展与生态环境建设之间的矛盾。怎样摆脱快速城镇化进程中对自然资源环境的过度依赖,脱钩经济增长与土地资源消耗、提升土地利用效率是合肥市城镇化进程中亟待解决的一个重要议题,也是合肥市实现新型城镇化的必经之路。因此,如何掌握合肥市资源环境需求量的变化,协调经济增长与自然资源环境承载力之间的关系,走新型城镇化道路,严守生态红线,是当前面临的主要问题。

生态足迹是评价资源消耗强度与生态承载力协调与否的有效手段,最初由 Rees^[1] 提出,后由 Wackernagel^[2] 于 1992 年进行了完善。自 1999 年“生态足迹”概念正式引入我国,李利锋^[3]、成升魁^[4-5]、陈东景^[6]、谢高地^[7] 等学者分别研究了生态足迹的理论、方法和计算模型,并利用此模型对我国及部分地区的生态状况进行实证分析^[8]。概括来看,近 20 年间,学术界研究主要集中于 3 个方面:一是理论方法的研究;二是不同研究对象、不同时空尺度的研究;三是不同领域的扩展研究,如能源、林业等领域及对生态安全评价的扩展研究等。目前来看,运用生态足迹可以测量区域的生态状况,但不能充分反映地区经济发展与资源利用效率之间的平衡关系,同时,从时空角度对区域内部的动态变化及差异的研究尚不多见。

“脱钩”一词源于 20 世纪 60 年代的物理学领域,指两个或多个物理量之间最初的相互关系降低或不复存在,脱钩理论因此产生。20 世纪末,OECD (Organization for economic co-operation and development, 经济合作与开发组织) 逐步将脱钩理论的概念引入到环境与经济等领域^[9];众多学者也开始利用脱钩理论来判断地区发展状态健康与否,如 Kovanda 等采集欧盟主要国家 1990—2002 年的相关数据,利用脱钩理论对各个国家的资源消耗与 GDP 脱钩情况进行分析和对比^[10];Tuomas^[11] 利用生态足迹与经济投入产出分析相关联的原理判断芬兰经济是否可持续脱钩。国内如盖美^[12] 等对长江三角洲地区 16 个城市的环境压力与经济发展脱钩程度进行定量评价和综合分析;钟太洋^[13] 等利用 IPAT 模型改进了环境领域的脱钩评价方法,并建立关于经济增长与建设用地扩张的脱钩分析方法。基于脱钩分析与效率变化之间存在的内部关联性,本研究试图将脱钩理论与合肥市的土地利用效率变化分析相结合,构建合肥市土地利用效率变化的脱钩分析范式。

综上所述,生态足迹能够定量分析当前区域生态承载力,而脱钩分析能够判断当前经济发展与生态承载力之间是否平衡,因此,将二者相结合能够较全面地分析地区发展状况,为区域的可持续发展政策提供建议。现有研究一般采用定量分析方法对生态承载力进行计算,较少结合具体区域对当前的经济环境协调发展效率做出综合评价,有必要通过生态足迹的空间化合理配置区域资源,指导并约束区域的空间发展。此外,对具体地区的生态状况进行动态分析与预测的研究尚不充分。基于此,本研究以合肥市为研究区域,合肥市是长三角城市群副中心城市,曾是全国首批国家园林城市,近年来,其经济快速发展,与此同时,生态与资源可持续利用问题也日益突出。研究构建生态足迹与脱钩分析模型,探究 2000—2014 年间合肥市生态足迹与脱钩情况的时空演变特征,并利用灰色预测方法对合肥市“十三五”期间的生态状况进行预测,对合肥市实施主体功能区划优化,推进新型城镇化与可持续发展战略,探求社会-经济-生态的协调发展意义深远。

1 研究区域概况

合肥市地处华东地区、江淮之间,巢湖之滨,范围为 30°57′—32°32′N, 116°41′—117°58′E (图 1)。合肥市总面积 11445 km² (包括巢湖水域面积 770 km²), 其中,市区面积 458 km², 主城区地势由西北向东南倾斜,以

丘陵岗地地貌为主。合肥作为安徽省省会,是长三角城市群副中心城市,也是“一带一路”和长江经济带战略双节点城市,已逐渐形成米字型全国交通枢纽,是全国第二个综合性国家科学中心,年科技研发投入占 GDP 比重远超全国平均水平。研究期间,合肥市下辖 9 区县,常住人口由 2000 年的 438.17 万增长到 2014 年的 712.81 万,增长率为 62.68%;能源消费总量也由 2000 年的 229.91 万 t 标准煤上升至 2014 年的 2035.15 万 t 标准煤,增长近 8 倍。2014 年《合肥市经济和社会发展统计公报》^[14]显示,2000 年以来,合肥市 GDP 增长率高达 13.57%,第一、二、三产业平均增长速度分别为 4.1%、16.7%、10.5%;2014 年,合肥市实现地区生产总值 5180.58 亿元,三次产业结构比为 5.0:55.7:39.3,人均 GDP 为 67394 元,全年居民人均可支配收入为 24272 元,城镇化率达到 69.1%,森林覆盖率 26.78%。同年,规模以上工业企业原煤消耗总量为 1208 万 t,废水排放量为 6919 万 t,SO₂、烟粉尘排放总量分别为 4.2 万 t、10.6 万 t。

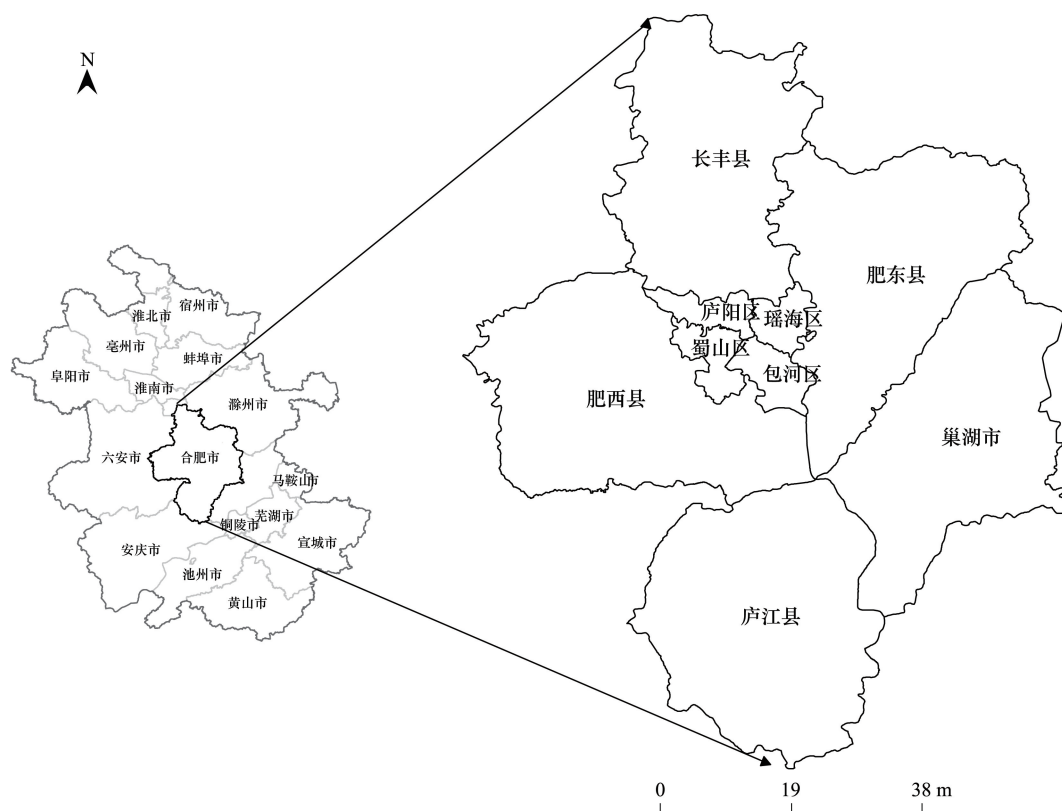


图 1 研究区域

Fig.1 Study area

2 研究方法数据来源

2.1 生态足迹分析法

生态足迹分析法是一种依据可持续发展的方式提供给定的人口消费所需要的生物生产型土地面积的综合评估方法,此方法能够估算维持人类的自然资源的消费量与既定数量下的人口规模需要消耗的物质生产型土地的面积,与既定区域内生态承载力(一个区域内能提供给人类的生物生产型土地的面积总和)的大小进行比较分析,综合衡量区域的可持续发展状态。基于此,本研究采用国际通用的公式计算生态足迹与生态承载力^[15]。先利用均衡因子将消费量转化成生产性土地(公式(1)),再利用公式(2)计算生态承载力。生态盈亏表示一个地区的生态状况,是生态足迹与生态承载力之间的差额(公式(3));若前者大于后者,则说明该城市生态赤字,反之,则为生态盈余。具体计算公式如下:

$$EF = N \times ef = N \times \sum \left(r_i \times \frac{c_i}{p_i} \right) \quad (1)$$

$$EC = N \times ec = N \times \sum (a_i \times r_i \times y_i) \quad (2)$$

$$ED = EC - EF \quad (3)$$

式中, EF 为总生态足迹; EC 为总生态承载力; ED 为总生态盈亏; ec 是人均生态承载力, ef 为人均生态足迹; i 为第 i 种消费商品, N 为人口, r_i 为均衡因子, p_i 为第 i 种消费商品的平均生产能力, a_i 为人均生物生产面积, y_i 为产量因子^[16-17], c_i 为第 i 种商品的人均消费量。

2.2 脱钩分析法

脱钩理论可以通过经济变量和环境变量等相关数据来表征变量间的阻断关系。为量化脱钩情况,增加度量便捷性,OECD 建立了反映脱钩情形的指标体系,它是数据分析的关键,一般基于驱动力-压力-状态-影响-反应的模式来设计。脱钩指数的测量方法有很多,本文运用的是 Tapio^[18] 在 OECD 基础上加以完善的指标构建形式,对脱钩类型的界定更为精确规范,可以计算合肥市土地资源消耗与经济增长脱钩的弹性系数。脱钩指标表示环境压力变量与经济驱动变量变化率的比值,其中, EP 为环境压力变量, DF 为经济驱动变量, ΔEP , ΔDF 表示其变化量,下标₀表示基期。

$$DI = \frac{\Delta EP}{EP_0} / \frac{\Delta DF}{DF_0} \quad (4)$$

本文用生态足迹衡量环境压力,用 GDP 表示经济驱动变量,以此测量二者间的脱钩弹性关系。

$$DI = \frac{(EF_t - EF_{t-1}) / EF_{t-1}}{(GDP_t - GDP_{t-1}) / GDP_{t-1}} = \frac{V_t}{K_t} \quad (5)$$

式中, DI 为脱钩弹性指数, EF_t 、 EF_{t-1} 表示合肥市在 t 、 $t-1$ 年份的生态足迹, GDP_t 、 GDP_{t-1} 表示 t 、 $t-1$ 年份的经济生产总值, V_t 为第 t 年的生态足迹增长率, K_t 为第 t 年的 GDP 增长率。

Tapio 以 0、0.8、1.2 为临界值把脱钩弹性指数分成如下 8 类,见表 1:

表 1 脱钩指数与脱钩状态
Table 1 Decoupling index and decoupling state

	状态 State	环境压力增长率 Environment pressure growth rate	经济驱动增长率 Economic growth	脱钩指数 DI Decoupling index
脱钩 Decoupling	衰弱脱钩	-	-	$DI > 1.2$
	强脱钩	-	+	$DI < 0$
	弱脱钩	+	+	$0 < DI < 0.8$
连接 Connection	扩张连接	+	+	$0.8 < DI < 1.2$
	衰退连接	-	-	$0.8 < DI < 1.2$
负脱钩	扩张负脱钩	+	+	$DI > 1.2$
Negative decoupling	强负脱钩	+	-	$DI < 0$
	弱负脱钩	-	-	$0 < DI < 0.8$

资料来源:根据 Tapio(2005)^[18] 整理

2.3 灰色预测模型 GM(1,1)

灰色预测方法^[19-21]由邓聚龙教授于 20 世纪 80 年代首次提出,近年来已发展为成熟的预测方法。与其他诸如回归分析等预测方法相比,GM(1,1)模型对样本量的要求低,建模所需信息少,是处理小样本预测问题的有效工具。

在本研究中,GM(1,1)模型的表达形式为:

$$\hat{X}^{(1)}(k+1) = \left[X^{(0)}(1) - \frac{\mu}{a} \right] e^{-ak} + \frac{\mu}{a} \quad (6)$$

式中, a 表示发展灰数, 反映累加序列与原始序列之间的发展趋势, μ 表示内生控制灰数, 反映数据间的变化关系, $X^{(0)}$ 为原始序列, $X^{(1)}$ 为一次累加后得到的序列, k 为时间序列, $\hat{X}^{(1)}(k+1)$ 为累加预测值。预测前需进行模型检验, 若达到标准, 直接预测, 否则修正模型。对本研究的计算结果进行累减, 即为预测值。

2.4 数据来源

为了客观统一反映合肥市近年来生态盈亏的时空特征及演变趋势, 依据资料的可获得性和实时性等条件, 筛选基础数据, 如 2000—2014 年合肥市 GDP、总人口、三次产业产品产量、各项能源消耗、各类型土地面积、农作物产量等均来自 (2001—2015 年)《合肥统计年鉴》^[22]、《合肥市经济和社会统计公报》^[14] 以及安徽省、合肥市统计局网站; 2000—2014 年污染物的排放量等数据, 来自《安徽省环境质量报告书》^[23]。同时, 为统一数据口径, 本研究利用平均化方法对原始数据进行无量纲处理; 因研究期间合肥市对行政区域划分进行多次调整, 为方便分析, 将蜀山区、包河区等 9 个固定的区县作为研究对象, 其中, 由于 2011 年原巢湖地级市变为县级巢湖市, 划归合肥市代管, 巢湖市下辖庐江县也划到合肥市, 本研究将 2011 年以前的巢湖原市区居巢区和庐江县与 2011 年以后的巢湖县级市与庐江县也作为统一的研究对象。

3 合肥市生态环境承载能力综合评价结果

3.1 生态足迹模型结果

利用各类型土地面积以及各商品产量, 结合当年全球数据, 计算产量因子和均衡因子, 因各年因子数值不同且相差较小, 为方便计算, 取 15 年的平均数为统一的因子值, 如表 2 所示:

表 2 合肥市生态足迹账户

Table 2 Ecological footprint account of Hefei city

生物生产土地类型 Land type	生态足迹 Ecological footprint		生态承载力 Capacity
	消费项目 Item	均衡因子 Balance factor	产量因子 Production factor
耕地 Farm land	粮食、油料、瓜果、蔬菜	2.56	1.56
林地 Forest land	茶叶、水果	1.25	0.81
草地 Grass land	猪牛羊、家禽、蛋类、奶类	0.49	0.38
建设用地 Construction land	热力、电力	2.6	1.56
化石燃料用地 Fuel land	原煤、焦炭、洗精煤、原油、汽油、煤油、柴油、燃料油、液化石油气	1.2	0

3.1.1 生态足迹时间演化分析

如图 2 所示, 2000—2014 年间, 人均生态足迹和人均生态承载力的波动上升趋势明显且相似, 但二者的波动幅度差异显著。其变化趋势大致分为 3 个阶段, 2000—2004 年为快速上升阶段, 增长率分别为 44.83% 与 105%, 此阶段合肥市贯彻大力发展经济的政策, 进行城镇化扩张, 导致人均生态足迹大幅度增加, 而人口的增加也带来了人均生物生产面积的大幅增加, 从而引起了生态承载力也大幅度提升; 2004—2010 年波动下降, 但下降幅度较小, 分别为 13.1% 和 19.5%, 说明在经历生态破坏后, 合肥市政府积极响应国家号召, 开始落实节能减排政策, 大力发展高科技企业, 提高科技研发投入, 人均生态足迹与人均生态承载力均有所降低; 2010—2014 年为波动上升阶段, 这一时期, 合肥市致力于经济与环境的协同发展, 孵化大量高新技术企业, 但由于工业污染仍然存在, 生态环境的恢复有一定的滞后性, 导致人均生态足迹、人均生态承载力均波动上升。在研究期间, 人均生态赤字小幅波动, 呈现出上升与下降交替进行的趋势; 与研究基期 2000 年相比, 2014 年人均生态赤字略有提高, 说明经济高速增长带来的城市建设用地大幅扩张及用地类型调整等问题, 导致耕地、林地及湖泊面积减少, 实现经济与环境的协同发展仍需要努力。

从结构上看, 如图 3 所示, 2000 年耕地的生态足迹所占比重最大 (65%), 从 2001 年开始化石能源燃料用地超过耕地, 成为生态足迹占比最大 (2001 年占 48%—2014 年占 70%) 的用地类型, 其次为耕地 (47%—

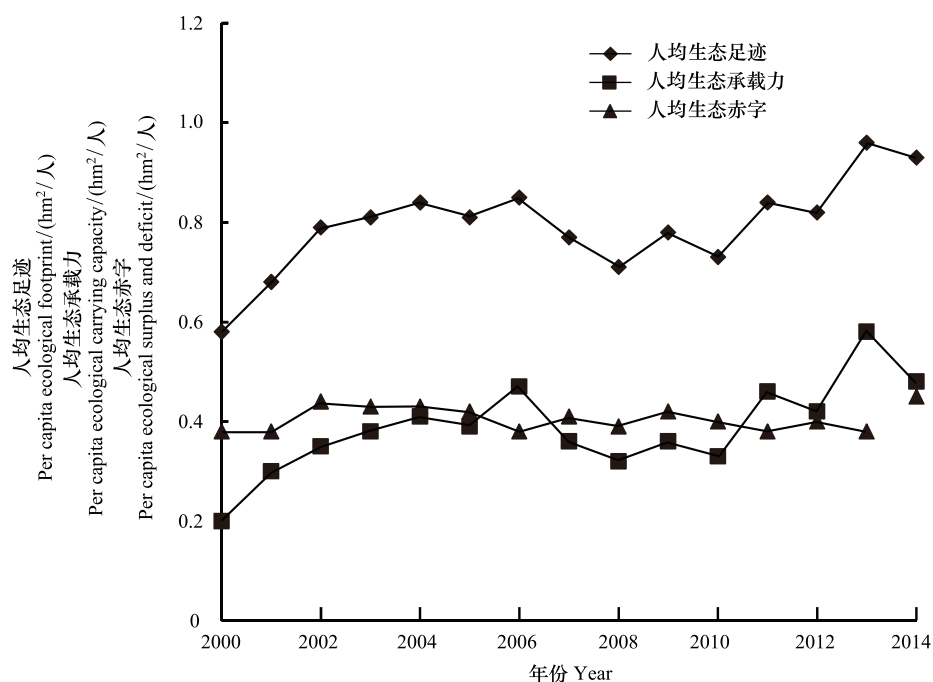


图2 2000—2014年合肥市人均生态足迹、生态承载力、生态赤字时间变化

Fig.2 Changes of ecological footprint, ecological capacity and ecological deficit in Hefei city

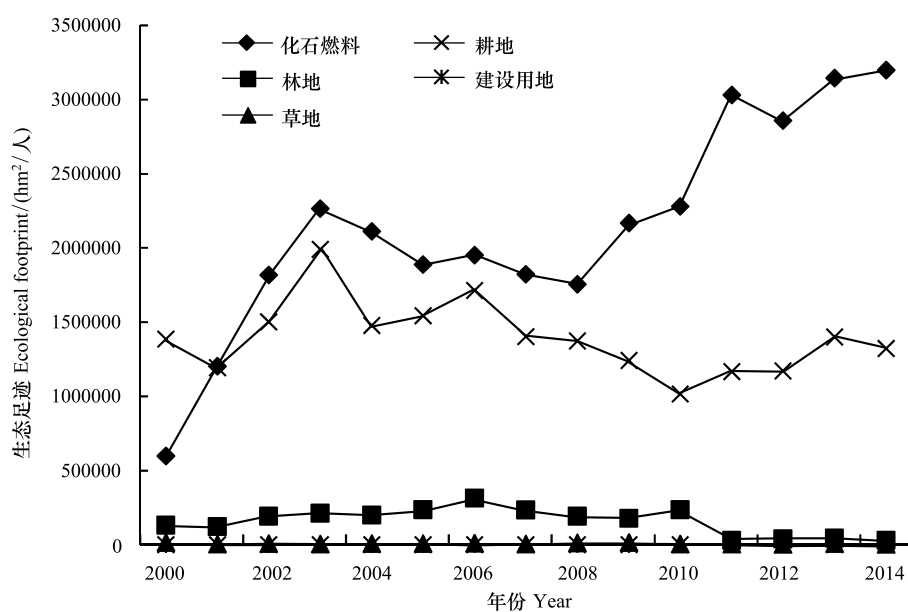


图3 合肥市生态足迹结构时间变化

Fig.3 Changes of ecological footprint structure in Hefei city

29%),林地、草地、建设用地所占比重较小(5%—1%)。原因在于,研究初期,合肥市经济发展速度较快,工业固体废弃物排放量呈逐年增长趋势,五年期间增长约5%,且城区扩建吞并周边耕地与草地;在城镇化与经济高速发展中,大量化石能源与增加的生物能源的消耗是促使化石燃料用地生态足迹不断增长的主要因素;2005年后,合肥市开始加大节能减排力度,并从资源消耗、废物产生、再生资源产生、社会消费等环节倡导发展循环经济,搬迁和治理了一批重点污染企业,对化石燃料用地生态足迹的继续增长有一定遏制作用;2010

年后,合肥市虽继续深入节能减排工作,通过植绿扩大森林覆盖率,但由于该时期加大城市建设力度,不断开发高速铁路与绕城高速、地铁建设周边的土地,同时缺乏一般工业固体废物集中处置场所,导致污染类型从常规污染物向复合型转变,污染范围从以城市和局部地区为主向涵盖区域和流域的尺度转变,生态资源被大量消耗和占用^[24],因此,2010年后化石燃料用地的生态足迹再次出现显著增幅。此外,该时期外来人口快速增加带来商品消费量的增加以及草地面积的减少与建设用地的增加,土地结构的变化也导致化石燃料用地的生态足迹波动上升。值得注意的是,由于合肥市近年来以发展高科技企业为主,因此建设用地的生态足迹较小,与草地生态足迹重合,为了更好的显现建设用地类型生态足迹的差异与趋势,建设用地的生态足迹如图4所示。

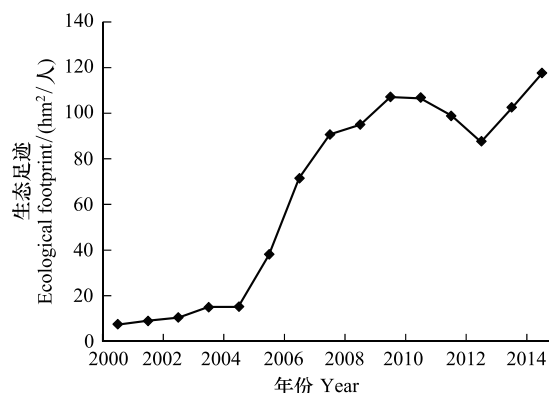


图4 合肥市建设用地生态足迹时间变化

Fig.4 Changes of ecological footprint of construction land in Hefei city

3.1.2 生态足迹空间演化特征

城市内部区域之间经济发展程度的参差会带来生态状况的差异。由于研究期间涉及年份较多,无法一一比较,根据资料的可获得性与实时性,选定2005年,2010年,2014年为研究节点。从合肥市各区域的人均生态足迹分布图(图5)可知:2005年人均生态足迹最高的是长丰县,最低区域是庐江县;2010年,瑶海区的人均生态足迹略高于蜀山区,另外,庐江县增长速度较为显著,增长率为58.71%,这一增长速度与合肥市各区域当年的经济发展情况相符,而相比2005年,长丰县有所降低,巢湖市、肥东县、肥西县、包河区和庐阳区均有不同程度的上升。2014年,蜀山区人均生态足迹变化较小,其他区域均有不同程度下降,肥西县下降速度最为显著。由图5可知,2005年,9区县人均生态足迹均呈现北高南低的特征;2005—2010年期间,合肥市的经济快速发展,人口大量迁入、城镇化率陡增,使9区县的人均生态足迹整体上均有不同程度的提高;2010—2014年,合肥市9区县呈现了不同程度的降低,但西南部地区人均生态足迹仍比东北部地区低,主要原因在于近年来,合肥市已经逐步将西南部地区发展为生态与高科技创新创业基地,因此人均生态足迹较低;而东北部地区发展为重工业基地,因此人均生态足迹较高。

合肥市人均生态承载力空间格局分布如图6所示。2005年人均生态承载力最高的是长丰县(0.9979 $\text{hm}^2/\text{人}$),最低是庐江县(0.4060 $\text{hm}^2/\text{人}$);2010年,除了庐阳区、包河区、庐江县、巢湖市略有上涨外,其他区域均处于下降状态,其中,草地面积的小幅下降以及耕地面积的大规模减少,导致长丰县成为降幅最大的区域(20.26%),但人均生态承载力依然最高;2014年,蜀山区由于外来人口的流入,人均生态承载力略有下降,而其他区域均在上涨,涨幅排名前三的为肥西县、庐江县和巢湖市,分别为36.08%、34.61%和20.18%,其人均生态承载力的增加说明合肥市管理部门近年来采取了积极的新型城镇化与适度人口、经济发展政策进行正面引导成效显著,同时,对于不同区县发展所采取的差异性定位也促进了人均生态承载力的回升。

3.1.3 生态足迹与经济增长之间脱钩分析

从效率利用角度来看,环境压力与经济增长的脱钩关系较为乐观。生态足迹与GDP之间出现强脱钩、弱脱钩、扩张连接、扩张负脱钩的频率分别为:42.9%、28.6%、7.1%、21.4%。由表3可知,2000—2002年是生态足迹的飞速扩张期,相比之下经济增长缓慢,出现短暂的扩张负脱钩。2002—2010年,节能减排政策的推广使生态足迹的逐年增长率呈现出波动性下降趋势;与此同时,合肥市经济发展进入绿灯期,GDP增速远超生态足迹,二者之间呈现出明显的趋势性脱钩状态;2010—2014年,过快的经济增长带来大规模的能源消耗和污染物排放,生态压力剧增,扩张负脱钩状态再次出现,随后出现了强脱钩现象,说明经济增长的边际效应小于生态环境的边际效应。

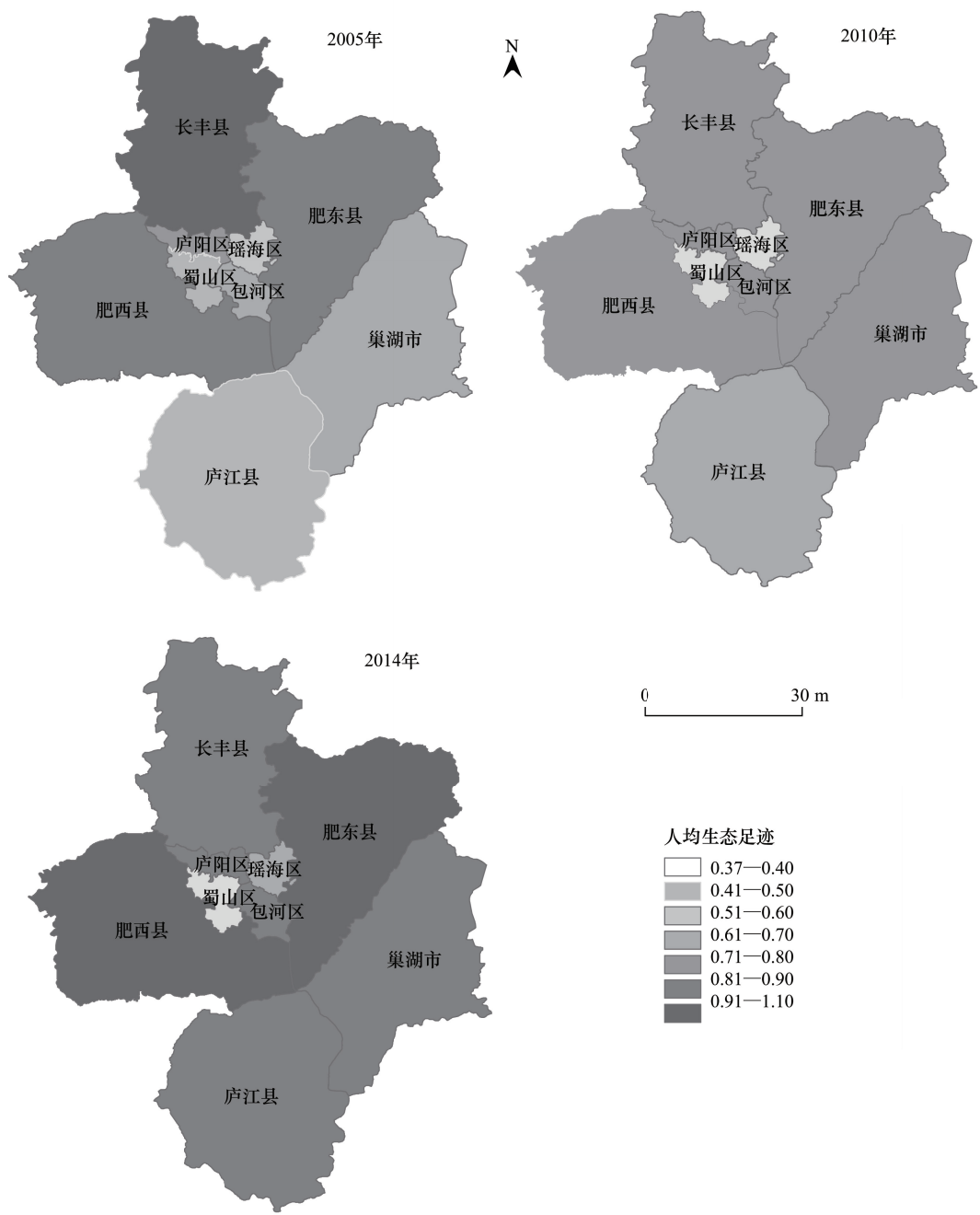


图5 合肥市各区县人均生态足迹波动情况
Fig.5 The fluctuation of ecological footprint in each county area

表3 2000—2014 年合肥市生态足迹与 GDP 增长的脱钩指数

Table 3 Decoupling index of ecological footprint and GDP growth in Hefei City from 2000 to 2014							
阶段 Period	脱钩指数 Decoupling index		脱钩类型 Decoupling type	阶段 Period	脱钩指数 Decoupling index		脱钩类型 Decoupling type
2000—2001	1.24227498	>1.2	扩张负脱钩	2007—2008	-0.1674436	<0	强脱钩
2001—2002	1.21762285	>1.2	扩张负脱钩	2008—2009	0.48781171	0—0.8	弱脱钩
2002—2003	0.41688378	0—0.8	弱脱钩	2009—2010	-0.0509867	<0	强脱钩
2003—2004	0.1181844	0—0.8	弱脱钩	2010—2011	2.02689928	>1.2	扩张负脱钩
2004—2005	-0.0801577	<0	强脱钩	2011—2012	-0.2705564	<0	强脱钩
2005—2006	0.45396745	0—0.8	弱脱钩	2012—2013	1.15795637	0.8—1.2	扩张连接
2006—2007	-0.4897215	<0	强脱钩	2013—2014	-0.1116831	<0	强脱钩

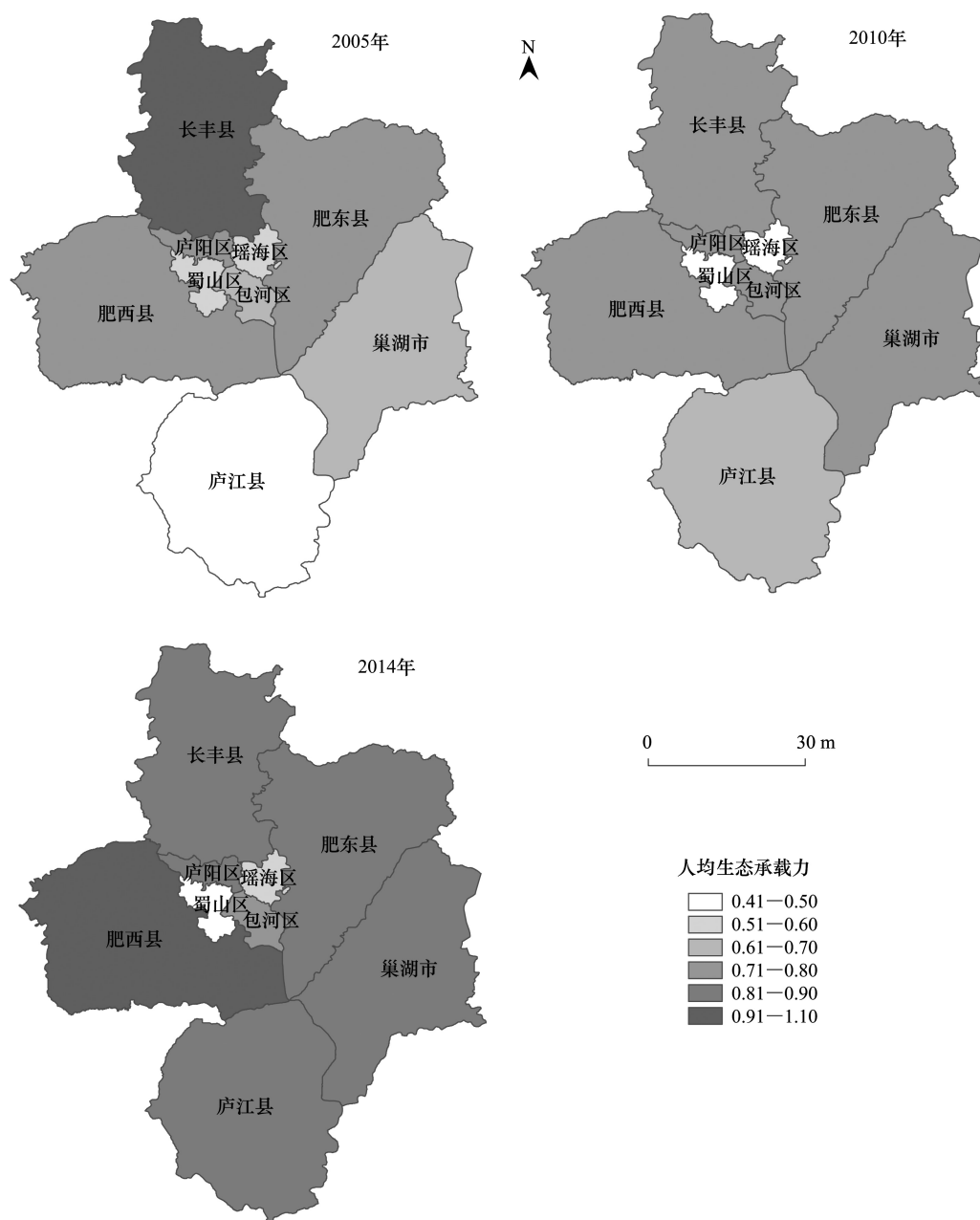


图6 合肥市各区县人均生态承载力波动情况

Fig.6 The fluctuation of ecological bearing capacity in each county area

从空间上看,各县区生态足迹与经济增长之间的脱钩状态较为乐观。由表4可知,脱钩状态最好的是地处远郊的肥西县和长丰县,这与郊区的经济发展程度及地域面积有关;近郊或是主城区内有2至3个年份出现扩张负脱钩或是扩张连接状态;值得注意的是,2012—2013年间,除肥西县外,其他区域均表现为扩张负脱钩或扩张连接状态。

从土地利用类型看(表5),耕地的生态足迹与经济增长之间的脱钩状态最好,稳定脱钩情形出现的频率为85.7%。由于“十一五”期间大力提倡节能减排政策,化石能源燃料用地出现了趋势性的脱钩状态。其他3种用地类型在脱钩状态上的波动都较为明显,表现为扩张负脱钩、扩张连接和弱脱钩交替出现,特别是建设用地,脱钩状态的交替出现,反映了合肥市经济发展政策在不同阶段的差异性。

3.2 灰色 GM(1,1)模型预测

为促进合肥市经济—社会—环境协调发展,建立灰色模型对2015—2020年合肥市的生态足迹进行预测。

根据公式(6),本研究的预测模型为:

$$\hat{X}^{(1)}(k+1) = 43.252e^{(0.0171k)} - 42.6964 \quad (k=0,1,\dots,20) \quad (7)$$

先根据该模型对研究期间的生态足迹进行拟合,由表6可知选定年份的拟合结果及残差情况:

表4 合肥市各区县生态足迹与GDP增长的脱钩指数

Table 4 Decoupling index of ecological footprint and GDP growth in each district county of Hefei City

年份 Year	瑶海区	庐阳区	包河区	长丰县	肥东县	肥西县	庐江县	巢湖市	蜀山区
2002—2003	0.363	0.537	-0.760	0.614	6.649	0.183	0.213	0.284	0.610
2003—2004	0.382	0.828	0.308	-0.555	-0.932	0.114	0.267	0.371	0.272
2004—2005	-0.085	-0.002	0.016	-0.280	-0.388	-0.161	0.387	0.389	0.034
2005—2006	0.542	0.460	1.625	0.272	0.330	-0.044	0.124	0.278	0.707
2006—2007	-0.566	-0.793	-0.554	-0.300	-0.435	-0.481	-0.123	0.290	-1.009
2007—2008	-0.115	-0.080	-0.149	-0.102	-0.399	-0.126	-0.134	0.265	0.182
2008—2009	1.797	0.486	0.448	0.389	0.274	0.276	0.212	0.281	0.213
2009—2010	0.233	-0.079	-0.102	-0.282	-0.063	-0.065	-0.098	-0.198	-0.070
2010—2011	1.032	0.843	0.782	0.652	0.593	0.793	0.189	0.198	1.044
2011—2012	-0.376	-0.410	-0.080	-0.195	-0.179	-0.189	-0.216	-0.403	-0.419
2012—2013	1.483	1.140	1.596	0.872	0.931	-0.271	0.971	1.204	3.199
2013—2014	-0.049	-0.087	0.128	-0.176	-0.267	-0.136	-0.109	-0.362	0.236

表5 不同土地利用类型生态足迹与GDP增长的脱钩指数

Table 5 The decoupling index of the ecological footprint of different land use types and GDP growth

年份 Year	林地 Forest land	耕地 Farm land	化石燃料用地 Fuel land	草地 Grass land	建设用地 Construction land
2000—2001	-0.528	-0.925	6.797	-4.409	1.301
2001—2002	2.065	0.557	1.786	1.713	0.167
2002—2003	-0.291	0.644	0.314	-1.950	1.034
2003—2004	0.671	-0.449	0.560	2.301	1.017
2004—2005	0.773	0.233	-0.381	-0.023	6.201
2005—2006	1.624	0.571	0.209	1.318	4.220
2006—2007	-1.008	-0.693	-0.223	-1.552	1.126
2007—2008	-0.663	-0.106	-0.167	5.133	0.148
2008—2009	-0.369	-0.481	1.337	0.871	0.743
2009—2010	1.139	-0.626	0.196	-2.311	0.008
2010—2011	-2.359	1.829	2.571	1.172	0.908
2011—2012	1.860	0.021	-0.403	-1.348	-0.780
2012—2013	1.414	1.681	0.933	6.063	1.487
2013—2014	-3.005	-0.549	0.134	-4.456	1.357

表6 预测与残差表

Table 6 Prediction and residual

年份 Year	2002	2005	2011	2012	2014	平均误差 Average error
实际人均生态足迹/(hm ² /人) Actual per capita ecological footprint	0.7857	0.81	0.84	0.83	0.93	
预测人均生态足迹/(hm ² /人) Predicting ecological footprint per capita	0.760	0.8	0.886	0.902	0.933	
相对误差 Relative error	0.033	0.012	0.055	0.086	0.003	0.0378
残差 Residual	0.0257	0.01	0.04	0.06	0.003	

预测模型的后验差、残差与关联度检验均合格,因此可进行预测。

确定各类土地类型的预测模型如下:

$$\begin{aligned}
 \text{耕地:} \quad & \hat{X}^{(1)}(k+1) = -14.922e^{-0.0242k} + 15.283 \\
 \text{化石燃料用地:} \quad & \hat{X}^{(1)}(k+1) = 6.352e^{0.0524k} - 6.196 \\
 \text{林地:} \quad & \hat{X}^{(1)}(k+1) = -0.879e^{-0.0617k} + 0.9137 \\
 \text{草地:} \quad & \hat{X}^{(1)}(k+1) = -0.107e^{-0.0168k} + 0.111 \\
 \text{建设用地:} \quad & \hat{X}^{(1)}(k+1) = 0.000068e^{0.1062k} - 0.000066
 \end{aligned} \tag{8}$$

以上模型均通过检验,精度合格,可进行预测。

利用灰色预测方法,结合 2000—2014 年的人均生态足迹,对 2015—2020 年的人均生态足迹进行估计,由于 2017 年以后的能源消费与用地类型等数据尚未公开,此处仅对 2015 年、2016 年的预测值与真实值进行对比,根据《合肥市国民经济和社会发展第十三个五年规划纲要》^[25],设定“十三五”期间合肥市 GDP 年增长率为 10%,常住人口年增长率为 7%,结合预测的生态足迹,可得“十三五”期间的脱钩情形。由表 7 可知:2015—2020 年间,合肥市人均生态足迹呈逐步上升趋势,增幅为 8.9%,生态足迹与 GDP 的增长保持持续的弱脱钩状态,脱钩指数较小且基本保持稳定。2015、2016 年的预测值与真实值之间误差较小,说明拟合效果较好,具有一定的参考价值。

表 7 2015—2020 年合肥市生态足迹及其与 GDP 增长的脱钩关系预测

Table 7 Ecological footprint of the 13th five-year plan and its decoupling relationship with GDP growth in 2015—2020

人均生态足迹/(hm ² /人) Per capita ecological footprint	2015 年		2016 年		2017 年	2018 年	2019 年	2020 年
	预测值	实际值	预测值	实际值	预测值	预测值	预测值	预测值
耕地 Farm land	0.255	0.237	0.248	0.263	0.242	0.237	0.231	0.225
草地 Grass land	0.00141	0.00142	0.001385	0.00114	0.001362	0.001339	0.001317	0.001295
林地 Forest land	0.022	0.035	0.021	0.033	0.02	0.018	0.017	0.016
化石燃料用地 Fuel land	0.712	0.629	0.750	0.578	0.791	0.833	0.878	0.925
建设用地 Construction land	0.000034	0.0000264	0.000037	0.0000238	0.0000416	0.0000462	0.0000514	0.0000572
人口 population	7177997	7177200	7228283	7298300	7278840	7329792	7381101	7432769
总体人均生态足迹 Per capita ecological footprint	0.949	0.903	0.966	0.875	0.982	0.999	1.016	1.034
总生态足迹 Total ecological footprint	6811919	6479740	6982521	6384380.198	7147820.88	7322462.21	7499198.62	7685483.15
GDP/亿元	5802.25	5660.27	6498.52	6274.38	7278.342	8151.743	9129.952	10225.55
脱钩指数 Decoupling index	-0.239	-0.24	0.209	0.136	0.197	0.203	0.201	0.207

4 结论

本研究将生态足迹与脱钩分析相结合,分析合肥市经济与生态发展之间平衡状态的时空变化,最后利用 GM(1,1) 模型对生态效率进行预测。主要结论如下:

人均生态足迹上升趋势明显。从时间上看,在 2000—2014 年间,人均生态足迹以上升为主,增长率高达 60.34%。人均生态承载力上升迅速,在研究期间整体上升 140%,可以看出,人均生态承载力总增长率高于人均生态足迹,主要原因在于人均生态承载力在 2000—2004 年期间五年增长率达到 105%,这一阶段的合肥市工业化与城市化水平都较低,且安徽省全面启动生态强省建设项目,合肥市作为省会,也大力开展了生态建设,同时,这一时期合肥市人口增长速度较慢,五年人口增长率仅为 1.48%,总体来看,较低的工业化水平、较快的产业结构调整、较慢的人口增长均是这一时期人均生态承载力增长迅速的原因。2004 年后,合肥市的人均生态承载力的增速放缓,从 2004 年的 0.43 到 2014 年 0.48,增长率仅为 12%,但由于前期的高速增长基础,

再加上近年来处于技术进步与产业结构调整加速期,因此人均生态承载力在 15 年间的总增幅超过人均生态足迹。然而,由于人均生态承载力总体基数较小,高速的增长并未改变生态状况,生态赤字依旧严重;人均生态赤字波动上升,幅度较小,在研究前期,人均生态赤字有上升趋势,中期上升与下降交替出现,但幅度均较小,后期略有上升,与研究基期 2000 年相比,总体上升 18.4%;

从结构上看,2001 年后,化石燃料用地生态足迹占总体生态足迹比重最大(2000 年时耕地占比最大)。2002 年开始,化石燃料用地的生态足迹远远超过其他土地类型,说明能源消耗对生态足迹影响显著;同时,由于合肥市科教投资比重较大,建设用地的生态足迹占比一直较低。

从空间上看,人均生态足迹与生态承载力均存在显著的空间差异,人均生态足迹与人均生态承载力大致呈现出中心城区低,郊区高的特征,这与合肥市目前的区位发展规划基本一致;

从土地利用类型来看,耕地的生态足迹与经济增长间的脱钩状态最好,其次是林地,在 2000—2014 年间,生态足迹与经济增长间的脱钩状态有 9 个年份出现脱钩,其中 7 个年份出现强脱钩,城市建设用地表现为扩张负脱钩,扩张连接、弱脱钩交替出现,说明了近年来合肥市经济发展政策不同时期侧重点的差异性;从区域空间来看,脱钩状态最好的是地处远郊的肥西县和长丰县,由于工业化发展较慢,生态足迹较小,所以脱钩状态最好;作为老城区的庐阳区,由于各类污染均较少,生态足迹与经济增长出现 6 次强脱钩;从时间上看,合肥市在 2006—2010 年生态足迹与经济增长的脱钩状态最好,只有 2008—2009 年出现了弱脱钩,其余年份均为强脱钩状态,原因在于:这一时期,合肥市大力推行节能减排政策,从各个环节提倡循环经济,大力发展高新技术产业,同时尚未开展高铁、地铁的建设,且对科技产业的研发投入、对生态环境的保护都提高了自然资源利用的效率,所以生态足迹在此期间得到缓解,与经济增长的脱钩状态以强脱钩为主;其余年份以弱脱钩和扩张负脱钩为主。

灰色预测结果显示,合肥市人均生态足迹在 2015—2020 年呈上升趋势,且生态足迹与经济增长表现为持续的弱脱钩。要实现“十三五”期间合肥市生态状况的大幅度提升以及与经济增长的持续脱钩,必须严格监督生态政策的实施,增加第三产业对 GDP 的贡献率,减少化石能源的大量消耗,进一步提高生态承载力。

5 建议

基于以上结论和存在的问题,本研究建议如下:

降低原煤等化石燃料在能源消费中的使用量,转变能源消费结构,适度削减原煤、原油等化石能源的使用;其次是相关部门应转变经济结构和增长方式,大力支持清洁能源的开发、低耗能与高新技术产业的发展,增加第三产业比重;最后要探索新技术,引进先进设备,加强节能减排力度,保证能源利用最大化,遏制化石燃料用地足迹的进一步增长^[26-28]。

保护耕地资源。合肥市要加大植树造林力度,扩大绿地面积;耕地面积的减少是导致生态承载力下降的主要原因,因此要严格禁止主城区的盲目扩张,保护耕地与农田,减少化肥使用量,提高土地的质量,对闲置或具备复垦条件的土地进行合理利用^[29-31]。

适度控制人口增长。人口增长必然增加商品的消费量,生活区域的扩张带来土地面积的削减,从而导致生态足迹的增加和生态承载力的减少。因此,合肥市可以通过提升产业结构等引导人口的合理流动,适度将人口数量控制在合理范围内,有利于可持续发展建设。

同时,合肥市可通过合理规划城乡之间的居住空间与交通网络,鼓励现有农村与郊区等区域就地进行城镇化建设,进而减少由交通、城市建设引起的生态足迹上升的问题。根据目前的土地利用情况,开展一系列的新型农业活动如生态农业、休闲观光等来延长生态链,从而提高合肥市的生态承载力。

本研究未来将进一步优化生态足迹计算方法,开展对于城市内部的生态足迹风险评价,为更科学细致的城市土地利用的研究工作提供参考。

参考文献 (References):

- [1] Rees W E. Ecological footprints and appropriated carrying capacity: what urban economics leaves out. *Environment and Urbanization*, 1992, 4(2): 121-130.
- [2] Wackernagel M, Rees W. *Our Ecological Footprint: Reducing Human Impact on the Earth*. Philadelphia: New Society Publishers, 1996.
- [3] 李利锋, 郑度. 区域可持续发展评价: 进展与展望. *地理科学进展*, 2002, 21(3): 237-248.
- [4] 闵庆文, 成升魁. 利用生态足迹方法分析不同国家的生态系统占用. *经济地理*, 2005, 25(1): 12-15.
- [5] 李利锋, 成升魁. 生态占用: 衡量可持续发展的新指标. *自然资源学报*, 2000, 15(4): 8-11.
- [6] 陈东景, 徐中民. 生态足迹理论在我国干旱区的应用与探讨—以新疆为例. *干旱区地理*, 2001, 24(4): 305-309.
- [7] 谢高地, 鲁春霞, 成升魁, 郑度. 中国的生态空间占用研究. *资源科学*, 2001, 23(6): 20-23.
- [8] 苏筠, 成升魁, 谢高地. 大城市居民生活消费的生态占用初探—对北京、上海的案例研究. *资源科学*, 2001, 23(6): 24-28.
- [9] OECD. *Indicators to Measure Decoupling of Environmental Pressures from Economic Growth*. Paris: OECD, 2002.
- [10] Kovanda J, Hak T. What are the possibilities for Graphical presentation of decoupling? An example of economy-wide material flow indicators in the Czech Republic. *Ecological Indicators*, 2007, 7(1): 123-132.
- [11] Mattila T. Any sustainable decoupling in the Finnish economy? A comparison of the pathways and sensitivities of GDP and ecological footprint 2002—2005. *Ecological Indicators*, 2012, 16: 128-134.
- [12] 盖美, 胡杭爱, 柯丽娜. 长江三角洲地区资源环境与经济增长脱钩分析. *自然资源学报*, 2013, 28(2): 185-198.
- [13] 钟太洋, 黄贤金, 王柏源. 经济增长与建设用地扩张的脱钩分析. *自然资源学报*, 2010, 25(1): 18-31.
- [14] 合肥市统计局. 2010-2014 年合肥市经济和社会统计公报. [2017-05-21]. <http://tjj.hefei.gov.cn/>.
- [15] Rees W, Wackernagel M. Urban ecological footprints: why cities cannot be sustainable-and why they are a key to sustainability. *Environmental Impact Assessment Review*, 1996, 16(4/6): 223-248.
- [16] 陈敏, 张丽君, 王如松, 怀保光. 1978 年—2003 年中国生态足迹动态分析. *资源科学*, 2005, 27(6): 132-139.
- [17] 王书华, 毛汉英, 王忠静. 生态足迹研究的国内外近期进展. *自然资源学报*, 2002, 17(6): 776-782.
- [18] Tapio P. Towards a theory of decoupling: degrees of decoupling in the EU and the case of road traffic in Finland between 1970 and 2001. *Transport Policy*, 2005, 12(2): 137-151.
- [19] 徐国祥. *统计预测和决策* (第五版). 上海: 上海财经大学出版社, 2016.
- [20] 邓聚龙. *灰色系统基本方法* (第二版). 武汉: 华中科技大学出版社, 2005.
- [21] 刘思峰. *灰色系统理论及其应用* (第三版). 北京: 科学出版社, 2004.
- [22] 合肥市统计局. 2001—2015 年《合肥统计年鉴》. [2017-05-21].
- [23] 安徽省环境保护厅. 合肥市环境质量报告书. [2017-05-21]. <http://www.aepb.gov.cn/pages/home.html>.
- [24] 合肥市环境保护局. 合肥市“十二五”生态城市建设规划. [2017-05-21]. <https://wenku.baidu.com/view/ef55ca69561252d380eb6eba.html>.
- [25] 合肥市统计局. 合肥市国民经济和社会发展第十三个五年规划纲要. [2017-05-21]. http://hfsjrb.hefei.gov.cn/12913/12914/201609/t20160920_2058879.html
- [26] 周涛, 王云鹏, 龚建周, 王芳, 冯艳芬. 生态足迹的模型修正与方法改进. *生态学报*, 2015, 35(14): 4592-4603.
- [27] 杨屹, 加涛. 21 世纪以来陕西生态足迹和承载力变化. *生态学报*, 2015, 35(24): 7987-7997.
- [28] 徐中民, 陈东景, 张志强, 程国栋. 中国 1999 年的生态足迹分析. *土壤学报*, 2002, 39(3): 441-445.
- [29] 周静, 管卫华. 基于生态足迹方法的南京可持续发展研究. *生态学报*, 2012, 32(20): 6471-6480.
- [30] 李锋, 王如松, 赵丹. 基于生态系统服务的城市生态基础设施: 现状、问题与展望. *生态学报*, 2014, 34(1): 190-200.
- [31] McDonald G W, Patterson M G. Ecological footprints and interdependencies of New Zealand Regions. *Ecological Economics*, 2004, 50(1/2): 49-67.