

宋艳华,王令超,王自威,等. 基于开放式生态足迹模型的土地生态承载力研究——以黄河河南段地区为例[J]. 江苏农业科学,2021,49(22):210-218.  
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2021.22.038

# 基于开放式生态足迹模型的土地生态承载力研究 ——以黄河河南段地区为例

宋艳华,王令超,王自威,田 燕,樊 鹏,杨青伟

(河南省科学院地理研究所,河南郑州 450052)

**摘要:**为了探索在有限用地规模前提下,提升区域土地生态承载力的技术方法,改进了传统生态足迹模型,建立了一个开放式生态足迹模型,并分别采用 2 种模型对河南省黄河沿岸 9 市 2017 年生态承载状况进行了评价。研究发现:(1)研究区各市耕地生态生产性足迹远大于生态承载力,但多市消费足迹低于生态承载力。(2)经消费系数和用地结构调整系数修正后,开放式生态足迹模型评价结果可明确区分生态足迹中区域内部消费足迹与承担的外部区域消费足迹,对研究区生产承载状况的评价结果更符合实际。(3)能源消费是研究区各市生态承载状况的决定性因素,是左右研究区可持续发展进程的关键。研究区在实现可持续发展过程中应重点关注能源消费,需在增加森林覆盖率的同时,调整产业结构和能源消费结构,以提升化石能源用地承载力、降低能源消费足迹。研究得出,开放式生态足迹模型可实现对不同土地利用结构、居民消费结构下区域生态承载状况的模拟。根据模拟结果,可提出在有限用地规模前提下,提升区域土地生态承载力的技术方法。研究成果可为河南省土地用地结构调整、土地利用规划、土地保护等工作提供参考,并为黄河流域生态保护与高质量发展提供科学依据。

**关键词:**生态足迹;生态承载力;开放式;消费调整系数;用地结构调整系数

**中图分类号:**X22;S181 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2021)22-0210-09

黄河流域河南段是我国重要的粮食生产核心区,也是中原经济区的核心地带,在我国经济社会发展和生态安全方面具有十分重要的地位。然而,农业增收、城市建设、经济发展、生态保护以及人口增长不断加大对有限土地资源的争夺,使区域土地生态承载能力受到严峻的考验。土地生态承载力问题关系到一个区域的生态安全,决定经济发展的后劲并影响区域高质量发展进程<sup>[1]</sup>,人类在资源和环境能够承受的范围内才能实现经济持续高效发展<sup>[2]</sup>。准确评价区域土地生态承载状况,是今后实现在经济持续发展的同时提升区域土地生态承载能力,实现区域高质量发展的核心和关键<sup>[3,4]</sup>。

生态足迹法是国内学者进行生态承载力评估

研究中较常用的方法<sup>[5-7]</sup>。生态足迹模型最早是由 William Rees(1992)创建,并与 Wackernagel 合作在 1996 年对模型进行了完善。该模型首先计算一定经济水平下区域人类生存和发展所消费的生物资源及废弃物吸收所需的生态生产性土地面积,再同区域现有的生态承载力进行比较,进而评价生态系统受人类影响的程度,衡量区域可持续发展水平<sup>[8]</sup>。该方法具有计算结果直观和区域可比的特性,因此很快成为了区域可持续发展生态评估的重要方法<sup>[9-11]</sup>。20 世纪 90 年代后期生态足迹模型引入中国,多位学者开展了基于生态足迹的生态承载力研究<sup>[12-14]</sup>,其中对河南省土地生态承载状况的评价结果多为严重超载的不可持续状态<sup>[15-17]</sup>。鉴于各类生物资源消费数据获取的难度较大,很多学者采用区域生物资源的生产数据来近似代替消费数据<sup>[15-17]</sup>。但依据生物生产数据计算的生物生产性足迹并不是真正的本地消费形成的生态足迹,同时传统的生态足迹评价方法具有相对静态封闭的特点,各地类之间生态功能单一无重叠,未能充分考虑人口、技术、消费等因素的变化性,忽视了用地结构调整等政策性因素及消费结构调整等市场性因素对生态承载力产生的重要作用,具有一定的生态

收稿日期:2021-04-20

基金项目:河南省软科学研究计划(编号:212400410263);河南省青年科学基金(编号:212300410168);河南省科学院基础科研项目(编号:200601028、200601078);河南省科学院科研智库项目(编号:210701004)。

作者简介:宋艳华(1979—),女,河南封丘人,硕士,助理研究员,主要从事土地资源调查与评价研究。E-mail:syhdata@126.com。

通信作者:田 燕,副研究员,主要研究方向为土地资源管理。E-mail:156987617@qq.com。

偏向性<sup>[18]</sup>。

本研究以黄河河南段沿岸的三门峡市、济源市、焦作市、洛阳市、郑州市、开封市、新乡市、安阳市、濮阳市 9 个市为研究区,在采用传统生态足迹模型对研究区 9 个市 2017 年生态足迹及生态承载力进行核算的基础上,通过引入消费调整系数、用地结构调整系数等因子,形成一套开放式生态足迹模型。该模型对传统生态足迹模型进行了改进,与传统生态足迹评价结果存在显著差异,评价结果可明确区分区域总生态足迹中,区域内部消费足迹与承担的外部区域消费足迹。由于研究区位于农业输出大省,农业的生态生产性足迹超过了生态承载力上限,但超载多由输出外区域的农产品引起,多市本地区消费的生态足迹远未达到生态承载力上限,耕地生态承载状态良好,但化石能源用地超载严重。模拟结果可为区域用地结构优化、消费结构调整、实现区域生态保护与高质量发展提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

黄河自西向东流经河南省北部的三门峡市、洛阳市、济源市、焦作市、郑州市、新乡市、开封市和濮阳市共 8 个市,因安阳市的滑县距黄河仅 10 km,故本研究将安阳市也纳入研究区共同研究。研究区位于黄河中下游地区,北部、西部环山,中部、东部为黄淮海冲积平原,是河南省和我国重要的农耕地。气候属大陆性季风气候,雨热同期、四季分明,年均气温 12.1 ~ 15.7 °C,年均降水量 800 mm,年均日照时数 1 468 ~ 2 246 h,全年无霜期 207.9 ~ 271.7 d,适宜多种农作物生长。研究区多种农作物、肉蛋奶、水果、蔬菜产量均居全国前列。2017 年底,研究区常住人口达 4 235 万人,虽然农产品总产较高,但因人口众多,随着人口的不断增长,人均耕地面积在持续减少,耕地压力逐渐增大。作为全国粮食生产核心区,河南省黄河两岸各市肩负着全国粮食供给的重任,在耕地压力持续增加的前提下,有限的耕地面积中经济作物的播种面积逐年减少,粮食作物播种面积持续增加。

2017 年年底,研究区各土地利用类型中,耕地面积最大,为 27 456.86 km<sup>2</sup>,占研究区总土地面积的 42.40%;其次是林地面积 16 228.98 km<sup>2</sup>,占总土地面积的 25.06%;再次是城镇村及工矿用地 9 346.92 km<sup>2</sup>,占总土地面积的 14.43%;草地面积

3 415.99 km<sup>2</sup>,占总土地面积的 5.27%,且以其他草地为主,天然牧草地和人工牧草地面积积极小,仅有 0.59 km<sup>2</sup>;水域及水利设施用地 3 068.36 km<sup>2</sup>,占总土地面积的 4.74%;园地面积最小,为 941.97 km<sup>2</sup>,占总土地面积的 1.45%,各类园地中以果园面积最大,占园地总面积的 92.00%。

研究区 2017 年能源消费总量折合标准煤为 15 012 万 t,其中原煤占到了 66%,其次是电力占 17%,再次是柴油、焦炭、原油和汽油均占 5% 左右。

### 1.2 研究方法与数据来源

1.2.1 传统生态足迹法 生态足迹模型可测度一定经济水平下维持区域人类生存和发展所消费的生物资源及废弃物吸收所需的生态生产性土地面积,包括耕地、林地、草地、水域、建设用地和化石能源用地面积。计算公式如下:

$$EF = N \times ef = N \times \sum_{i=1}^n \left( q_i \times \frac{c_i}{P_i} \right) \quad (1)$$

式中:EF 表示总生态足迹;ef 表示人均生态足迹;N 表示人口总数;i 为消费物质的类型;c<sub>i</sub> 表示第 i 种资源的人均消费量;P<sub>i</sub> 表示第 i 种资源的单位面积国家平均生产能力;q<sub>i</sub> 为 i 物质对应土地类型的均衡因子,由全国同一类生态生产性土地的平均生物生产力比全国所有生物生产性土地的平均生物生产力得到。

均衡因子的计算公式如下:

$$q_i = \frac{P_i}{p} = \frac{\sum_j p_j^i h_j^i / \sum_i \sum_j p_j^i h_j^i}{\sum_i S_i} \quad (2)$$

式中:p<sub>i</sub> 指全国第 i 类土地的平均生产力;p 指全国所有土地的平均生产力;S<sub>i</sub> 指全国第 i 种土地的生物生产面积;p<sub>j</sub><sup>i</sup> 为全国第 i 种土地上第 j 种生物产品的产量;h<sub>j</sub><sup>i</sup> 指第 i 种土地 j 种生物产品的单位热值。

1.2.2 生态承载力评价 生态承载力是指区域生态系统可以提供的最大生物资源和废物消化的量,用生物生产性土地的面积来表示,计算公式:

$$EC = (1 - 12\%) \times \sum_{i=1}^6 (a_i \times q_i \times y_i) \quad (3)$$

式中:EC 为区域生态承载力;12% 为扣除的生物多样性保护用地比例;本研究中 a<sub>i</sub> 表示河南省第 i 种生物生产土地面积;q<sub>i</sub> 为均衡因子;y<sub>i</sub> 为产量因子,其计算公式为:

$$y_i^n = \frac{p_i^n}{p_i} = \frac{\sum_j (p_j^i)^n x_j^i / \sum_j p_j^i x_j^i}{S_i^n} \quad (4)$$

式中:p<sub>i</sub><sup>n</sup> 为河南省第 i 类土地平均生物生产力;S<sub>i</sub><sup>n</sup> 为河南省第 i 种土地面积;(p<sub>j</sub><sup>i</sup>)<sup>n</sup> 为河南省第 i 种土

地第  $j$  种产品的年产量。

1.2.3 数据来源与处理 本研究计算了 2017 年度研究区 9 个市生态足迹及生态承载力,统一将生物产品分为农产品、畜牧业产品、林产品和渔产品四大类。其中全国各类生物资源产出和面积数据源自该年度的《中国统计年鉴》《全国渔业经济统计公报》及“土地调查成果共享应用服务平台”;各市各类生物资源和能源的产出和消费量数据均来自于该年度的《河南省统计年鉴》《河南省渔业经济发展情况公报》。

各类热值数据主要参照《农业技术经济手册(修订本)》,其中粮食作物热值用小麦、玉米、水稻和豆类的产量比,折合出粮食作物平均热值;河南省油料基本以花生为主,故油料热值采用花生热值计算;园林水果采用苹果、桃子、梨子平均值。

2 传统生态足迹模型评价结果

根据研究区的实际生产情况,本研究将源自耕地的生物产品分为粮食作物(小麦、水稻、玉米、大豆)、棉花、薯类、蔬菜、瓜果、油料。林地生物资源主要包括园林水果和木材。研究区渔业只涉及淡水渔业,因此渔业产品仅包含淡水鱼类。禽畜产品中,猪和禽类的饲养主要依靠农作物,因此对应生物生产性土地归耕地;研究区畜牧养殖业中牛、羊以圈养为主,饲料分为农作物加工品和牧草 2 类,其中饲料来源于农作物及加工品的部分,其生物生产性土地归耕地,饲料为牧草部分的生物生产性面积归草地。计算草地生物生产量时,由于中国畜牧业中圈养比例较高,在畜牧养殖的原料中粮食作物的比重较高,而牧草的原料比重相对较低,根据谢鸿宇等的研究<sup>[13]</sup>,通常在确定牧草地生物生产量时,按照牛肉 0.14、羊肉 0.43、奶类 0.28 的产量比例确定,但研究区草地面积较小,其中牧草地面积更小,牧草地占草地面积的比例仅为全国该比例的 15%,因此本研究在谢鸿宇等确定的牧草地生物产量比例的基础上进行了修正得到研究区牧草地生物生产量。化石能源用地涉及的能源资源包括:原煤、原油、焦炭、柴油、汽油、燃料油、煤油、天然气;建设用地所考虑的能源资源是电力。

本研究计算出的研究区各用地类型均衡因子和各市产量因子见表 1、表 2。

按照惯例化石能源用地采用林地的均衡因子,建设用地均衡因子与耕地等同。

表 1 研究区 2017 年各类土地均衡因子

地类	用地生产力 ( $\times 10^7$ J/hm <sup>2</sup> )	均衡因子
耕地	16 776.30	1.61
林地	778.32	0.07
草地	40.86	0.004
水域	592.53	0.06
合计	10 408.54	

表 2 研究区各市 2017 年各类土地产量因子

研究区	产量因子			
	耕地	林地	草地	水域
郑州市	0.61	1.09	0.31	2.06
开封市	1.10	3.72	0.30	0.96
洛阳市	0.60	0.46	0.27	0.84
安阳市	1.16	3.16	0.45	0.27
新乡市	1.11	2.77	4.86	0.77
焦作市	1.20	1.32	1.35	0.32
濮阳市	1.16	6.49	0.45	0.67
三门峡市	0.45	1.25	0.16	0.79
济源市	0.54	0.11	0.59	1.56

森林除了产出林产品外,更具有对温室气体的吸收功能,因此为了使计算结果更加合理,本研究在计算生态承载力时,将林地作为化石能源用地的承载用地,其产量因子与林地一致。建设用地的产量因子同耕地。

2.1 生态足迹

计算生态足迹时,由于贸易的复杂性以及各类生物资源的消耗总量数据搜集困难且搜集的数据差异较大,计算生态足迹时,多个对河南省的研究均采用各类生物资源的生产总量近似于它的消费总量<sup>[15-17]</sup>。为了对比研究的需要,本研究也首先采用该方法计算各市生物资源的生态足迹,该生态足迹实质为各市所有生物生产形成的生产型生态足迹。根据 2017 年河南省各市各类产品的生产、消费数据,利用公式(1)计算各市各土地类型的生态足迹(表 3)。

从表 3 可以看出,研究区为重要的农业生产区,多市耕地生态足迹最高;同时研究区能源消费较高,且能源产品以足迹最高的煤炭为主,多市化石能源用地足迹同样较高,其中郑州市、洛阳市、三门峡市和济源市能源足迹超过了耕地足迹;各市建设用地足迹也较高;由于河南省以牧草为主的畜牧养殖及水产养殖规模偏小,草地和水域生态足迹最小。

表 3 研究区 2017 人均生态足迹

研究区	人均生态足迹(hm <sup>2</sup> /人)					
	耕地	林地	草地	水域	建设用地	化石能源用地
郑州市	0.071 2	0.001 1	0.000 0	0.000 5	0.031 9	0.096 6
开封市	0.367 0	0.001 1	0.000 1	0.000 4	0.013 3	0.043 6
洛阳市	0.135 0	0.002 2	0.000 1	0.000 4	0.035 6	0.149 5
安阳市	0.314 3	0.002 4	0.000 0	0.000 1	0.023 9	0.147 9
新乡市	0.309 4	0.013 0	0.000 0	0.000 5	0.022 7	0.082 5
焦作市	0.220 2	0.004 5	0.000 0	0.000 1	0.037 0	0.148 7
濮阳市	0.319 3	0.004 5	0.000 1	0.000 3	0.014 2	0.052 3
三门峡市	0.129 7	0.007 0	0.000 1	0.000 4	0.028 8	0.282 5
济源市	0.136 0	0.000 1	0.000 1	0.001 5	0.069 0	0.463 4

2.2 生态承载力

根据 2017 年各市各用地类型实际面积数据,利

用公式(3) 计算出各市各土地类型的生态承载力(表 4)及生态赤字(盈余)(表 5)。

表 4 研究区 2017 人均生态承载力

研究区	人均生态承载力(hm <sup>2</sup> /人)					
	耕地	林地	草地	水域	建设用地	化石能源用地
郑州市	0.027 7	0.000 7	0.000 0	0.000 4	0.020 1	0.000 7
开封市	0.142 7	0.002 3	0.000 0	0.000 4	0.043 1	0.002 3
洛阳市	0.054 4	0.002 9	0.000 0	0.000 4	0.022 0	0.002 9
安阳市	0.130 2	0.002 9	0.000 0	0.000 1	0.043 6	0.002 9
新乡市	0.129 4	0.003 1	0.000 0	0.000 4	0.045 2	0.003 1
焦作市	0.093 3	0.001 5	0.000 0	0.000 1	0.044 6	0.001 5
濮阳市	0.126 9	0.002 3	0.000 0	0.000 3	0.042 0	0.002 3
三门峡市	0.049 4	0.021 3	0.000 0	0.000 4	0.020 8	0.021 3
济源市	0.047 7	0.000 9	0.000 0	0.001 3	0.025 8	0.000 9

从表 5 可以看出,2017 年研究区各市耕地和化石能源用地人均生态足迹均大于生态承载力,即均处于生态超载状态,但二者的空间分布并不一致,耕地超载最严重的是开封市、濮阳市、安阳市、新乡市,而化石能源用地超载最严重的是济源市,其次是三门峡市、焦作市和安阳市。林地中新乡市、焦作市、濮阳市和郑州市 4 个市生态超载,但各市超载幅度均较小;建设用地中济源市、洛阳市、郑州市和三门峡市 4 个市生态超载,超载幅度同样较低;各市草地和水域人均生态足迹和承载力均较小,基本处于持平状态。

表 5 研究区 2017 人均生态赤字(盈余)

研究区	人均生态赤字(盈余)(hm <sup>2</sup> /人)					
	耕地	林地	草地	水域	建设用地	化石能源用地
郑州市	-0.043 4	-0.000 4	0.000 0	-0.000 1	-0.011 8	-0.095 9
开封市	-0.224 3	0.001 1	-0.000 1	-0.000 1	0.029 8	-0.041 4
洛阳市	-0.080 5	0.000 7	0.000 0	0.000 0	-0.013 6	-0.146 6
安阳市	-0.184 2	0.000 5	0.000 0	0.000 0	0.019 7	-0.145 0
新乡市	-0.180 0	-0.009 9	0.000 0	-0.000 1	0.022 5	-0.079 4
焦作市	-0.127 0	-0.002 9	0.000 0	0.000 0	0.007 7	-0.147 1
濮阳市	-0.192 3	-0.002 2	-0.000 1	0.000 0	0.027 8	-0.050 0
三门峡市	-0.080 3	0.014 4	-0.000 1	0.000 0	-0.008 1	-0.261 1
济源市	-0.088 4	0.000 7	0.000 0	-0.000 2	-0.043 2	-0.462 5

3 开放式生态足迹模型及评价结果

3.1 基于开放式生态足迹模型的生态承载力评价方法

根据表 5 结果,传统生态足迹模型评价出研究区各市耕地和化石能源用地均处于超载状态,林地和建设用地也有近 50% 市域处于超载状态,反映出研究区存在较大生态压力。事实上,生态足迹模型主要评价维持本区域物质消费和废弃物消纳所必需的生物生产性土地面积,而将产量作为消费量计算出的生物生产性生态足迹可能会偏大,显然不能准确代表区域真实的生态足迹<sup>[19]</sup>。尤其对于河南省这样的农业大省来说,生物资源尤其是农作物的生产量与消费量之间存在巨大差异,如河南省 2017 年粮食总产量 6 524. 25 万 t,总人口 9 559 万人,折合人均 682. 52 kg,而人均粮食消费仅有 206. 54 kg,二者之间存在一定的差距。因此采用生产总量计算的生态足迹并非完全是河南省内部的生态足迹,而是包含了因粮食等生物产品输出而分担的其他区域的生态足迹部分。为了使评价结果更符合实际,本研究采用开放式生态足迹和生态承载力模型,通过对影响模型评价结果的消费系数和用地面积调整系数的确定,来评价研究区各用地类型的生态足迹和生态承载力。

生态理论中生态足迹通常会随着人均消费水平、人口、技术等的变化而改变,尤其是消费水平和结构的改变会显著影响区域生态足迹。同时,生态承载力也会受各类土地面积及生产能力的显著影响。因此,消费水平和用地结构是决定区域生态足迹、生态承载力大小及二者之间差距的最关键因素。而传统生态足迹法是一种静态分析法,具有一定的生态偏向性,没有考虑物质消费水平和用地结构的变化性,忽视了土地的多功能性。故本研究在原生态足迹模型中引入消费调整系数,在生态承载力模型中引入用地结构调整系数,形成一套开放型生态足迹、生态承载力评价模型,该模型可实现对不同消费水平和结构变化下土地生态足迹的模拟运算,以及不同用地结构情景下的生态承载力水平评价。

开放式生态足迹计算公式如下:

$$EF_k = N \times ef = N \times \sum_{i=1}^n \left( q_i \times \frac{KC_i \times c_i}{p_i} \right) \quad (5)$$

式中: $EF_k$  表示开放式生态足迹模型调整后的生态足迹( $\text{hm}^2$ ); $KC_i$  为第  $i$  种消费产品的消费调整系数。

开放式生态承载力计算公式:

$$EC_k = (1 - 12\%) \times \sum_{i=1}^6 (KL_i \times a_i \times q_i \times y_i) \quad (6)$$

式中: $EC_k$  表示调整后的生态承载力( $\text{hm}^2$ ); $KL_i$  表示第  $i$  种用地面积调整系数。

3.2 确定消费调整系数

本研究将区域内物质消费总量与产出总量的比值作为消费调整系数。其中区域内物质消费数据是实际发生的全部消费数据,包含区域内和区域外生产的生物产品,故不需进行贸易调整。化石能源用地足迹计算中,煤炭、石油等基础能源是按实际消费量计算的,因此不需要再对其进行消费调整。

将近 5 年来研究区统计年鉴中人均物质消费数据与人均物质生产数据的比值作为 2017 年消费调整系数(表 6)。其中源自耕地的消费品主要包括粮食、食用油、蔬菜及食用菌(包含耕地瓜果)、棉花,以及以粮食作物为饲料的肉蛋奶折合粮食的消费量,糖果糕点折粮食、食用油的消费量和酒类折粮食的消费量;林地的消费主要包括水果、木材、茶叶的消费量;草地的消费主要包括以牧草为饲料的牛羊肉、奶类的消费量;水域消费包括鱼虾等水产品的消费量。棉花的消费通过将纺织类产品折算得来,木材消费通过对家具及装饰品、文化办公用品及书报杂志类的消费折算得来。

表 6 研究区 2017 年各用地类型生物产品消费调整系数

研究区	生物产品消费调整系数			
	耕地	林地	草地	水域
郑州市	0.88	2.89	2.78	0.68
开封市	0.16	2.15	0.22	0.44
洛阳市	0.46	1.37	0.69	0.41
安阳市	0.24	0.75	1.17	2.05
新乡市	0.20	0.15	0.71	0.37
焦作市	0.31	0.57	0.99	1.12
濮阳市	0.22	0.41	0.60	0.70
三门峡市	0.45	0.25	0.41	0.25
济源市	0.52	18.95	0.85	0.12

3.3 用地面积调整系数

森林是吸纳化石能源燃烧后产生的  $\text{CO}_2$  和其他污染物的最重要地类,是应对气候变化的有效途径,是保证区域生态环境可持续发展的关键<sup>[20]</sup>。国际公认区域生态状况良好的标准之一是森林覆盖率达到 30%,而目前研究区多市这一指标则不足 20%。为了提升森林覆盖率,河南省制定了多种措

施,包括退耕还林、宜林荒山地造林、封山育林等,也取得了较好的成效,但森林覆盖率仍然处于较低水平。因此本研究假定通过多种措施实施后各市森林覆盖率达到 30%,并假定该状态时需增加林地的来源为闲置建设用地整治和低产能耕地退耕。根据 2018 年《中国农村发展报告》,2017 年全国农村闲置宅基地可用于整治的有  $6.67 \times 10^6 \text{ hm}^2$  左右,占全部农村宅基地面积的 1/3 左右。不仅是农村,我国城镇房屋空置率和开发区土地闲置率也居高不下,建设用地粗放利用现象突出<sup>[21]</sup>。因此本研究假定闲置和粗放利用的建设用地可用于整治退出或建设为园林绿地的比例为 20%;林地剩余增加面积来源为耕地退耕还林。各用地类型面积调整系数见表 7,洛阳市、三门峡市和济源市林地覆盖率本身就大于 30%,故不进行用地面积调整。

3.4 系数调整后土地承载状况评价

利用表 6、表 7 中各市各地类的消费调整系数

表 7 研究区用地结构调整系数

研究区	用地结构调整系数(%)		
	耕地	林地	建设用地
郑州市	-11.37	+18.67	-20
开封市	-19.25	+23.90	-20
洛阳市	—	—	—
安阳市	-16.58	+20.96	-20
新乡市	-14.24	+18.88	-20
焦作市	-9.44	+14.86	-20
濮阳市	-21.10	+25.84	-20
三门峡市	—	—	—
济源市	—	—	—

和用地结构调整系数,采用开放式生态足迹和生态承载力评价模型评价研究区经消费系数调整后的各地类生态足迹和经用地面积调整后的各地类生态承载力,并计算调整前后各市各用地土地承载状况的变化(表 8、表 9、表 10)。

表 8 研究区消费系数调整后市人均生态足迹

研究区	人均生态足迹(hm <sup>2</sup> /人)					
	耕地	林地	草地	水域	建设用地	化石能源用地
郑州市	0.062 7	0.003 1	0.000 0	0.000 3	0.031 9	0.096 6
开封市	0.058 4	0.002 5	0.000 0	0.000 2	0.013 3	0.043 6
洛阳市	0.062 4	0.003 0	0.000 0	0.000 2	0.035 6	0.149 5
安阳市	0.061 0	0.001 9	0.000 0	0.000 1	0.023 9	0.147 9
新乡市	0.074 1	0.001 8	0.000 0	0.000 2	0.022 7	0.082 5
焦作市	0.076 6	0.001 8	0.000 0	0.000 2	0.037 0	0.148 7
濮阳市	0.062 9	0.002 0	0.000 0	0.000 2	0.014 2	0.052 3
三门峡市	0.068 7	0.002 6	0.000 0	0.000 1	0.028 8	0.282 5
济源市	0.070 7	0.001 8	0.000 0	0.000 2	0.069 0	0.463 4

表 9 研究区用地结构调整后市人均生态承载力

研究区	人均生态承载力(hm <sup>2</sup> /人)					
	耕地	林地	草地	水域	建设用地	化石能源用地
郑州市	0.020 2	0.001 7	0.000 0	0.000 4	0.016 1	0.001 7
开封市	0.101 5	0.010 1	0.000 0	0.000 4	0.034 5	0.010 1
洛阳市	0.054 4	0.002 9	0.000 0	0.000 4	0.022 0	0.002 9
安阳市	0.091 2	0.008 9	0.000 0	0.000 1	0.034 9	0.008 9
新乡市	0.097 1	0.007 9	0.000 0	0.000 4	0.036 2	0.007 9
焦作市	0.075 4	0.002 9	0.000 0	0.000 1	0.035 7	0.002 9
濮阳市	0.086 3	0.015 0	0.000 0	0.000 3	0.033 6	0.015 0
三门峡市	0.049 4	0.021 3	0.000 0	0.000 4	0.020 8	0.021 3
济源市	0.047 7	0.000 9	0.000 0	0.001 3	0.025 8	0.000 9

从表 3、表 4、表 5、表 8、表 9、表 10 可以看出,与原生态足迹模型评价结果相比,系数调整后开放式生态足迹模型评价结果中,各市各类用地的生态承

载状况均发生了变化,尤其以耕地和林地变化最为显著。耕地和林地人均生态足迹、承载力和赤字的变化对比见图 1、图 2。

表 10 研究区系数调整后各市人均生态赤字(盈余)

研究区	人均生态赤字(盈余)( $\text{hm}^2/\text{人}$ )					
	耕地	林地	草地	水域	建设用地	化石能源用地
郑州市	-0.042 5	-0.001 4	0.000 0	0.000 1	-0.015 8	-0.095 0
开封市	0.043 1	0.007 6	0.000 0	0.000 2	0.021 2	-0.033 5
洛阳市	-0.007 9	-0.000 1	0.000 0	0.000 2	-0.013 6	-0.146 6
安阳市	0.017 1	0.007 1	0.000 0	-0.000 1	0.011 0	-0.139 0
新乡市	0.034 2	0.005 9	0.000 0	0.000 2	0.013 5	-0.074 6
焦作市	0.006 7	0.000 3	0.000 0	0.000 0	-0.001 3	-0.145 7
濮阳市	0.015 6	0.013 2	0.000 0	0.000 1	0.019 4	-0.037 2
三门峡市	-0.008 6	0.019 6	0.000 0	0.000 3	-0.008 1	-0.261 1
济源市	-0.022 8	-0.002 0	0.000 0	0.001 1	-0.043 2	-0.462 5

从图 1 可以看出,原生态足迹模型评价结果中研究区各市耕地人均生态足迹均大于人均生态承载力,各市耕地均处于生态超载状态,人均生态赤字平均  $0.133\ 4\ \text{hm}^2$ ,人均赤字最高的开封市达  $0.224\ 3\ \text{hm}^2$ ,人均赤字最小的郑州市为  $0.042\ 5\ \text{hm}^2$ 。开放式生态足迹模型经系数调整后,各市耕地人均生态足迹均发生了显著下降,由于本研究假定除洛阳市、三门峡市、济源市外其他 6 个市均有退耕还林,故 6 个市的生态承载力也出现了下降,但总体降幅小于生态足迹下降的幅度,使得各市耕地人均生态承载状况也发生了显著改变,其中开封市、安阳市、新乡市、焦作市、濮阳市 5 个市人均生态足迹小于人均生态承载力,出现了生态盈余,即这 5 个市的耕地生物产量,除了满足本市的消费需求外,还承担了部分外区域的耕地生态足迹,如开封市耕地总人均生态生产性足迹  $0.367\ 0\ \text{hm}^2$  中,本市的耕地

消费足迹仅占 16%,为  $0.058\ 4\ \text{hm}^2$ ,剩余 84% 的耕地生态生产性足迹均为分担外区域的耕地生态足迹。郑州市、洛阳市、三门峡市和济源市 4 个市虽然仍然存在生态赤字,但赤字水平也发生了显著下降,其中赤字最大的郑州市为  $0.042\ 5\ \text{hm}^2$ 。郑州市赤字较大的原因是人口众多,其余 3 个市均为山区市,耕地面积较小,且存在一定的低产能耕地,造成耕地产出小于耕地产品的消费。而研究区 9 个市总体而言从人均  $0.133\ 4\ \text{hm}^2$  的生态赤字,变为  $0.003\ 9\ \text{hm}^2$  的生态盈余,反映出研究区耕地总体产出大于消费。据统计,至 2020 年河南省粮食产量已实现“17 连增”,连续多年总产超 650 亿 kg,2020 年更是超 675 亿 kg,其中粮食及其制成品、生猪等外调份额达到 1/3 以上,说明河南省总体而言耕地产出有盈余,证明开放式生态足迹模型评价结果更符合研究区耕地的实际生态承载状况。

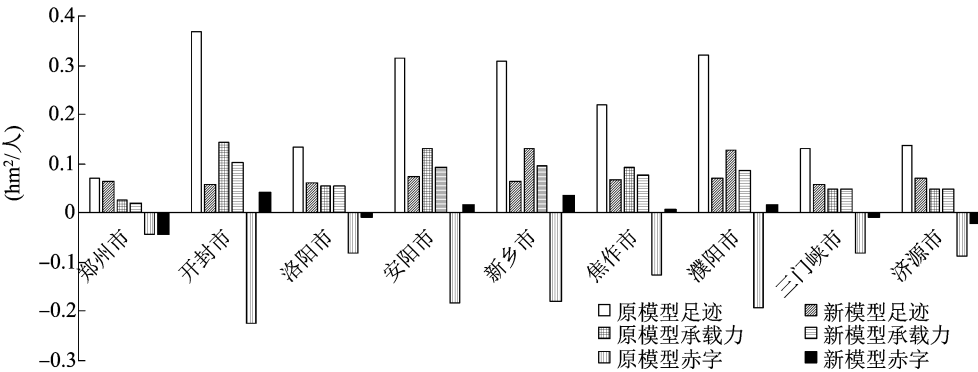


图1 系数调整前后研究区耕地人均生态足迹、承载力、赤字(盈余)对比

根据图 2 结果,郑州市、开封市、洛阳市和济源市系数调整后林地人均生态足迹大于原模型足迹,其他市则相反;由于除洛阳市、三门峡市和济源市林地面积无变化,其他 6 个市均假定了退耕还林,故 6 个市的林地生态承载力均出现了提升;原模型评

价结果中,郑州市、新乡市、焦作市和濮阳市林地存在生态赤字,而新模型评价结果中林地存在赤字的市分别是郑州市、洛阳市和济源市。郑州市和洛阳市人口众多加上工业发达,故林产品消费较高,济源市则是因为林产品产量小,造成原模型计算的生

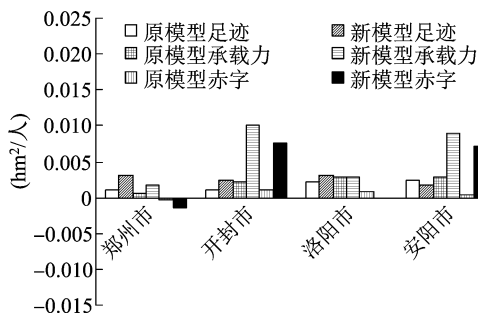


图2 系数调整前后研究区林地人均生态足迹、承载力、赤字(盈余)对比

产性足迹偏低,因而生产性足迹小于消费足迹。研究区 9 个市总体而言,系数调整后林地生态盈余从人均  $0.000\ 2\ \text{hm}^2$  上升到  $0.005\ 6\ \text{hm}^2$ 。

系数修正前后,2 种模型评价结果中,各市人均草地生态足迹、承载力均极小,变化也不明显,主要原因是研究区草地面积较小,仅占总土地面积的  $5.27\%$ ,且以其他草地为主,天然牧草地和人工牧草地面积极小,仅有  $0.59\ \text{km}^2$ ,因此河南省的畜牧养殖业基本以圈养为主。

原生态足迹模型评价出研究区郑州市、开封市、新乡市和济源市水域人均生态足迹大于人均生态承载力,水域处于生态超载状态,开放式生态足迹模型经相关系数修正后,仅安阳市水域用地人均生态足迹稍高于人均生态承载力,其他 8 个市水域处于生态盈余状态,研究区人均生态盈余为  $0.000\ 2\ \text{hm}^2$ 。研究区近年来水产养殖业发展迅速,多地养殖基地水产品单产均处于全国领先水平,根据《河南省统计年鉴》,2017 年河南省人均水产品生产量为  $10\ \text{kg}$ ,但人均消费量则不足  $5\ \text{kg}$ ,故水域用地处于生态盈余状态。

原生态足迹模型评价结果中,郑州市、洛阳市、三门峡市和济源市 4 个市人均建设用地存在赤字,其他 5 个市为生态盈余状态,即 5 个市建设用地存在规模偏大的情况;新模型中洛阳市、三门峡市、济

源市 3 个市建设用地无变化,其他 6 个市建设用地均调出了  $20\%$ ,造成 6 个市生态盈余均发生了下降,其中焦作市更是从生态盈余变为了生态赤字状态。

2 种模型评价出研究区各市化石能源用地人均生态足迹均大于人均生态承载力,处于生态赤字状态,修正后人均生态赤字出现了下降,但降幅较小,反映出研究区人均能源消费量巨大,仅靠增加森林覆盖率很难实现对现有能源消费污染物的吸收,还需从调整产业结构降低能源消费总量、调整能源消费结构提高清洁能源比例等多方面共同入手,才能从根本上缓解生态超载状态。

从图 3 可以看出,虽然研究区多市耕地、林地等用地类型存在生态盈余,但盈余远小于各市人均化石能源用地的生态赤字,造成研究区除开封市、濮阳市外,各用地类型的综合生态承载状况均为超载状态,因此研究区在实现可持续发展过程中应重点关注能源消费。

#### 4 结论与讨论

开放式生态足迹模型评价结果可明确区分区域总生态足迹中内部消费足迹与承担的外部区域消费足迹,评级结果更符合实际。

贸易交流的普遍性,决定了以生物生产量作为消费量计算的生态足迹不能代表区域真实的生态

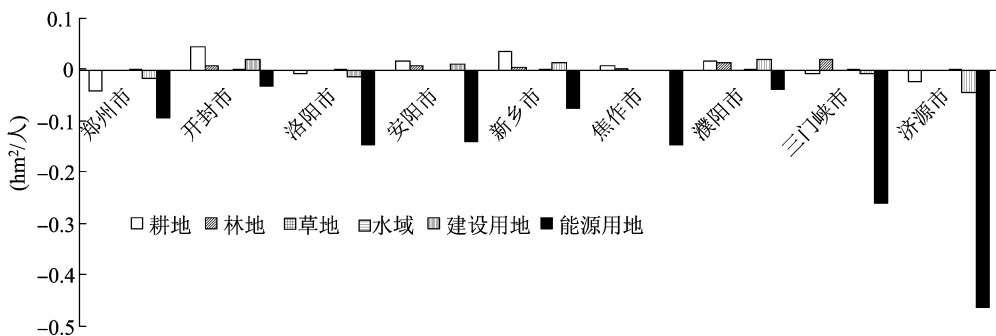


图3 系数调整后研究区各类用地人均生态赤字(盈余)



足迹。尤其是对于粮食等生物产品的输出地区,生产性足迹会大于当地真实的生态足迹,区域生态承载能力会被低估;同样对于生物产品的输入地区,其生产性足迹会小于当地的生态足迹,区域生态承载能力会被高估。

对研究区 2017 年的实证研究表明,2 种模型的评价结果间存在显著差异,新模型评价结果显示,研究区大部分市本市消费的耕地生态足迹远未达到生态承载力上限,耕地生态承载状态良好,但由于研究区多市均为粮食生产核心区,耕地产品除了满足区域内人民生活消费外,还有大比例的份额输出,这部分生物产品的消费足迹是研究区承担的外部区域生态足迹,如开封市耕地生产足迹中有 84% 均为承担外区域的生态足迹。

能源消费是研究区生态承载状况的决定性因素,是左右研究区可持续发展进程的关键。在增加林地面积的假设下,研究区林地生态承载状况有了显著提升,但化石能源用地的人均生态承载力却提升有限,原因是研究区人均能源消费量巨大,仅靠增加森林覆盖率很难实现对现有能源消费污染物的吸纳,还需从调整产业结构和能源消费结构等多方面共同入手,才能从根本上缓解能源用地生态超载状态。

开放式生态足迹模型可实现对不同土地利用结构、居民消费结构下区域生态承载状况的模拟。根据模拟结果,可提出在有限用地规模前提下,提升区域土地生态承载力的技术方法。研究成果可为河南省土地用地结构调整、土地利用规划、土地保护等工作提供参考,并为黄河流域生态保护与高质量发展提供科学依据。

生物生产性生态足迹不仅受到用地结构、消费系数的影响,还受居民消费结构、人口变化和科技发展水平的影响,下一步开放式生态足迹模型中将考虑加入这些因素,以实现更准确对区域生态足迹的评价及预测。

能源账户生态足迹应进行贸易修正。虽然能源足迹计算时直接使用的是本地区的能源消费数据,但区域内消耗的能源,其生产的产品却不完全由本地区消费的,能源消耗所产生的温室气体也不应该完全由本地区负责消纳。因此能源足迹也应进行贸易修正,扣除贸易输出产品所携带的能源消费量。

#### 参考文献:

[1] 刘纪远,匡文慧,张增祥,等. 20 世纪 80 年代末以来中国土地利

用变化的基本特征与空间格局[J]. 地理学报,2014,69(1):3-14.

[2] 张 颖. 北京市生态足迹变化和对可持续发展的影响研究[J]. 中国地质大学学报(社会科学版),2006,6(4):47-55.

[3] 靳相木,柳乾坤. 基于三维生态足迹模型扩展的土地承载力指数研究:以温州市为例[J]. 生态学报,2017,37(9):2982-2993.

[4] 江平平,陈银蓉,张 苗. 基于低碳经济的武汉市生态足迹与生态承载力时序特征分析[J]. 国土资源科技管理,2014,31(5):106-112.

[5] 安宝晟,程国栋. 西藏生态足迹与承载力动态分析[J]. 生态学报,2014,34(4):1002-1009.

[6] 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.

[7] 王淑新,何 红,李 双,等. 中国旅游足迹家族研究进展[J]. 自然资源学报,2019,34(2):424-436.

[8] 李明月,江 华. 生态足迹分析模型的假设条件缺陷及应用偏差[J]. 农业现代化研究,2005,26(1):6-9.

[9] Galli A, Halle M, Grunewald N. Physical limits to resource access and utilisation and their economic implications in Mediterranean economies[J]. Environmental Science & Policy, 2015, 51: 125-136.

[10] Salvo G, Simas M S, Pacca S A, et al. Estimating the human appropriation of land in Brazil by means of an Input - Output economic model and ecological footprint analysis[J]. Ecological Indicators, 2015, 53: 78-94.

[11] Cano - Orellana A, Delgado - Cabeza M. Local ecological footprint using principal component analysis: a case study of localities in Andalusia (Spain) [J]. Ecological Indicators, 2015, 57: 573-579.

[12] 刘某承,李文华. 基于净初级生产力的中国生态足迹均衡因子测算[J]. 自然资源学报,2009,24(9):1550-1559.

[13] 谢鸿宇,王羚娜,陈贤生. 生态足迹评价模型的改进与应用[M]. 北京:化学工业出版社,2008.

[14] 谢高地,鲁春霞,成升魁,等. 中国的生态空间占用研究[J]. 资源科学,2001,23(6):20-23.

[15] 薛选登,白茹冰. 基于生态足迹模型的耕地资源可持续利用研究——以河南省为例[J]. 江苏农业科学,2020,48(21):274-281.

[16] 张翠娟. 基于生态足迹模型的河南省农业生态承载力动态评价[J]. 中国农业资源与区划,2020,41(2):246-251.

[17] 白茹冰. 基于生态足迹模型的河南省耕地资源可持续利用研究[D]. 洛阳:河南科技大学,2019.

[18] 方 恺. 足迹家族:概念、类型、理论框架与整合模式[J]. 生态学报,2015,35(6):1647-1659.

[19] 张海莹. 基于生态足迹模型的河南省经济可持续发展研究[J]. 河南农业大学学报,2016,50(3):441-446.

[20] 孙 刚,王子凡,陈 杰,等. 三岭山国家森林公园大戟科植物资源及园林应用[J]. 江苏农业科学,2020,48(20):121-126.

[21] 陈 伟,吴 群. 开发区土地利用效率及影响因素研究——以江苏省为例[J]. 国土资源科技管理,2013,30(4):1-7.