

# 2000—2015年鄂尔多斯高原生态承载力时空变化特征

王瑞杰<sup>1</sup>, 闫峰<sup>2</sup>, 张学良<sup>3</sup>

(1. 东北大学秦皇岛分校 资源与材料学院, 河北 秦皇岛 066004;

2. 中国林业科学研究院 荒漠化研究所, 北京 100091; 3. 青海省格尔木市园林管理处, 青海 格尔木 816000)

**摘要:** [目的] 分析2000—2015年鄂尔多斯高原生态足迹和生态承载力时空变化特征, 为鄂尔多斯高原生态脆弱区经济和社会的可持续发展提供理论依据。[方法] 采用鄂尔多斯高原2000, 2005, 2010和2015年遥感数据, 在土地利用和覆被变化转移矩阵分析的基础上, 利用社会经济系统发展指数修正生态足迹模型研究生态承载力时空变化特征。[结果] ①2000—2015年鄂尔多斯高原土地覆被类型间转换以草地和未利用土地为主, 2000—2010年生态足迹增速较快, 2010年后增速相对放缓, 生态足迹多年平均递增速率为15.93%; ②鄂尔多斯市以准格尔旗总生态承载力最高, 达拉特旗和杭锦旗次之, 鄂托克前旗相对最低; 人均生态承载力以杭锦旗相对最高, 其次是鄂托克旗、准格尔旗, 东胜区除2000年相对较高外, 其他年份均较低。[结论] 2000—2005年鄂尔多斯高原处于生态盈余状态, 2005—2015年由生态盈余转为生态赤字, 生态承载力处于严重透支状态, 生态环境的可持续发展面临着较大的挑战。

**关键词:** 生态承载力; 生态足迹; 社会经济系统发展指数; 鄂尔多斯高原

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-288X(2020)01-0091-08

**中图分类号:** K903, F205

**文献参数:** 王瑞杰, 闫峰, 张学良. 2000—2015年鄂尔多斯高原生态承载力时空变化特征[J]. 水土保持通报, 2020, 40(1): 91-98. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2020.01.014; Wang Ruijie, Yan Feng, Zhang Xueliang. Spatiotemporal variations of ecological carrying capacity in Ordos Plateau during 2000—2015[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2020, 40(1): 91-98.

## Spatiotemporal Variations of Ecological Carrying Capacity in Ordos Plateau During 2000—2015

Wang Ruijie<sup>1</sup>, Yan Feng<sup>2</sup>, Zhang Xueliang<sup>3</sup>

(1. School of Resources and Materials, Northeastern University at Qinhuangdao Branch,

Qinhuangdao, Hebei 066004, China; 2. Institute of Desertification Studies, Chinese Academy of

Forestry, Beijing 100091, China; 3. Golmud Landscape Manage Department, Golmud, Qinghai 816000, China)

**Abstract:** [Objective] The ecological footprint and spatial and temporal characteristics of ecological carrying capacity during 2000—2015 in the Ordos Plateau were studied in order to provide a theoretical basis for the sustainable development of the local economy and society of an ecologically fragile area. [Methods] The Landsat images and social as well as economic statistical data in 2000, 2005, 2010, and 2015 were utilized. This data was based on the transfer matrix analysis of land use and cover change and was used to study the temporal and spatial variation characteristics of the ecological carrying capacity in the Ordos Plateau. This was achieved by employing the modified ecological footprint model with the development index of the social and economic system. [Results] ① Grassland and unused land were the primary land use types in the Ordos Plateau from 2000 to 2015. The ecological footprint was observed to increase rapidly from 2000 to 2010; subsequently, it relatively slowed down after 2010. From 2000 to 2015, the average annual ecological footprint showed a gradually increasing trend with an average speed of 15.93% per year. ② The total ecological carrying capacity in different locations was observed to be in the following decreasing order: Jungar Banner,

收稿日期: 2019-09-24

修回日期: 2019-11-21

资助项目: 国家重点研发计划项目“鄂尔多斯高原砒砂岩区生态综合治理技术”(2017YFC0504502)

第一作者: 王瑞杰(1974—), 女(汉族), 辽宁省朝阳市人, 博士, 讲师, 主要从事资源环境研究。Email: ruijiawang@163.com。

通讯作者: 闫峰(1973—), 男(汉族), 江苏省连云港市人, 博士, 副研究员, 主要从事环境遥感和干旱灾害研究。Email: njuyf@163.com。

Dalad, Hanggin Banner, and Otog Qian Banner. The per capita ecological carrying capacity of Hanggin Banner was the highest, followed by the Otog and Jungar Banner. Moreover, the values of the Dongsheng District were relatively the lowest for the period of 2000—2015, except 2000. [Conclusion] The Ordos Plateau demonstrated an ecological surplus status from 2000 to 2005. However, this status changed into an ecological deficit from 2005 to 2015. The ecological carrying capacity was seriously overdrawn in the Ordos Plateau, and the local sustainable development had to face increasingly significant challenges.

**Keywords:** ecological carrying capacity; ecological footprint; social-economical system development index; the Ordos Plateau

工业革命以来,随着经济发展、技术进步和人口激增,环境污染、土地退化、人口膨胀和资源枯竭等问题不断出现,生态环境不断恶化成为制约人类可持续发展的最严峻问题之一<sup>[1]</sup>。掌握生态环境承载力变化实况并提出科学发展之路具有强烈的必要性和迫切性。生态承载力是指生态系统的自我维持、自我调节能力,资源与环境子系统的供容能力及其可维育的社会经济活动强度和具有一定生活水平的人口数量,进而体现在生物生产性土地的供需平衡方面<sup>[2-3]</sup>。随着生态承载力研究的不断深入,在研究方法方面主要发展出生态足迹法<sup>[4]</sup>、净初级生产力估测法<sup>[5]</sup>、供需平衡法<sup>[6]</sup>、系统模型法<sup>[7]</sup>、综合指标评价法<sup>[3]</sup>和生态系统服务消耗评价法<sup>[8]</sup>等,其中生态足迹法由于具有较完善、科学的理论基础,并可用于定量分析可持续发展问题而被广泛应用。生态足迹分析法是由加拿大生态经济学家 William Rees<sup>[4]</sup>提出的一种度量可持续发展程度的方法,对生态足迹的解释是:一个国家范围内给定人口的消费负荷,该办法使人们知道自己对自然资源利用的状况,对测量人类对自然生态服务的需求与自然所能提供的生态服务之间的差距具有重要的意义<sup>[9-10]</sup>。在基于生态足迹方法的生态承载力研究方面,1997 年 Wackernagel 等<sup>[11]</sup>首先用生态足迹分析方法,对全球的生态足迹进行了计算,研究结果表明全球绝大部分国家处于生态赤字状态。Ewing 等<sup>[12]</sup>提出了将碳足迹、水足迹和生态足迹整合在一起的多区域建模模型,使生态承载力评价得到进一步提升。国内生态足迹研究方面,徐中民等<sup>[13]</sup>对甘肃省 1998 年生态足迹进行分析和计算,结果表明甘肃省 1998 年人均生态赤字为  $0.564 \text{ hm}^2$ 。张志强等<sup>[14]</sup>以中国西部 12 个省(区市)2000 年统计年鉴的数据为依据,对 1999 年的生态足迹进行了计算和分析。田玲玲等<sup>[15]</sup>以 2005,2010,2013 年统计数据为基础,应用生态足迹分析法核算湖北省生态足迹与生态承载力动态。潘洪义等<sup>[16]</sup>对成都市人均生态足迹和人均生态承载力空间分布差异进行了研究,得出成都市人均生态足迹平均值呈现逐年下降的趋势。已有基于生态足迹方法的生态承载力研究多使用静

态、统计的方法来进行定量评估,在经济增长和科技进步对区域生态承载力影响方面考虑较少,对于区域内部的空间差异性体现方面也存在一定的问题。遥感技术在一定程度上可以弥补传统基于统计年鉴进行生态足迹和生态承载力研究空间性方面的不足,针对传统生态足迹方法研究存在的问题,采用多时段遥感影像并综合考虑经济因素定量分析生态足迹的动态变化过程,对于拓展生态足迹应用以及科学评价国家和地区的生态足迹动态变化,及时采取应对措施具有重要意义。

鄂尔多斯高原地处中国农牧交错带上,是砒砂岩分布最典型地区,其砒砂岩区也是黄河粗泥沙主要来源,生态环境脆弱性问题十分突出。鄂尔多斯市处于鄂尔多斯高原的腹地,改革开放以来经济社会快速发展,特别是 2001 年撤盟改市以来,鄂尔多斯市经济社会创造了令人瞩目的“鄂尔多斯速度”,成为内蒙古自治区经济发展速度最快的地区,伴随着经济的快速发展,人类对当地地表覆被的干预和资源利用也达到了一个新的水平<sup>[17]</sup>。科学评价鄂尔多斯高原生态承载力时空变化特征,并因地制宜地提出当地经济社会发展的科学发展之路具有重要的现实意义。因此,本研究采用 2000—2015 年鄂尔多斯市 Landsat 数据并结合经济发展数据,对鄂尔多斯高原的生态承载力时空特征进行研究,以期为地区的经济发展和环境保护提供理论和技术支持。

## 1 研究区概况及研究数据

### 1.1 研究区概况

鄂尔多斯高原位于内蒙古自治区南部,西、北、东三面被黄河环绕,东南部以古长城为界和陕北黄土高原相接。位于  $37^{\circ}20'—40^{\circ}50' \text{ N}$ ,  $106^{\circ}24'—111^{\circ}28' \text{ E}$ ,地势中西部高,四周低,西部高于东南部。东部为准格尔黄土丘陵沟壑区,西部为桌子山低山缓坡和鄂托克高地,北部为库布其沙漠,南部为毛乌素沙漠和滩地。高原海拔大部为  $1\,300—1\,500 \text{ m}$ ,东部切割河谷部分可下降到  $1\,000 \text{ m}$  以下,高原顶面可达  $1\,600 \text{ m}$  以上。西北部桌子山自北向南伸延,东胜以西至杭锦

旗以东一带海拔较高(1 450~1 600 m)。鄂尔多斯市位于内蒙古自治区西南部,地处鄂尔多斯高原腹地。东部、北部和西部分别与呼和浩特市、山西省、包头、巴彦淖尔市,宁夏回族自治区、阿拉善盟隔河相望;南部与陕西省榆林市接壤。全市辖 7 旗 1 区和康巴什新区,总面积 86 882 km<sup>2</sup>。气候为典型的北温带半干旱大陆性气候区,植被自东向西分别为温暖型草原带、暖温带荒漠草原亚带和暖温带荒漠带;土壤类型主要有栗钙土、棕钙土、灰钙土、灰漠土和潮土等;2015 年总人口 1.57×10<sup>6</sup> 人。

## 1.2 研究数据

在生态承载力计算中,为客观反映不同土地类型的空间分布差异,通过 USGS 订购下载了 2000、2005、2010、2015 年共 40 幅 Landsat TM/ETM<sup>+</sup>/OIL 影像,影像主要成像于 6—9 月。对下载的 Landsat 数据以 2010 年遥感影像为基准对另外 3 期的遥感影像进行了几何校正,使遥感影像统一到相同的投影类型。采用决策树、非监督分类和专家知识相结合的方式对地物遥感分类,以 2010 年数据为例,首先采用 TM5>150&TM7>100 提取流动沙地;其次,采用光谱间关系(TM2+TM3)>(TM4+TM5)提取水体;第三,对剩下的遥感信息采用非监督分类 ISODATA 算法,指定最大分类数为 20,最大迭代数为 60 次,迭代次数大于分类数 1 倍以上,形成 1 类所需的最少像元数为 1,设定循环收敛阈值为 0.998<sup>[18]</sup>。在此基础上,参照生态足迹模型中土地利用类型分类方法,将 4 期的土地利用的分类结果进行合并为耕地、林地、草地、水域、建筑用地和未利用地共 6 大类。采用 2010 年鄂尔多斯市乌审旗 283 个和 2017 年准格尔旗 68 个野外地面覆被类型实测资料,分别对 2010 年和 2015 年地物分类结果进行验证,结果表明其总分类精度分别为 89.40%(253/283)和 91.18%(62/68)。

对 2000 年和 2005 年地物遥感分类结果进行目视验证体现出了较高的总分类精度(>86.21%)。此外,研究中还选用了 2000、2005、2010、2015 年的社会经济数据,数据主要来源于同期的《鄂尔多斯市统计年鉴》。

## 2 研究方法

生态足迹是指特定区域内一定人口的自然资源消费、能源消费和吸纳这些消费产生的废弃物所需要的生态生产性土地面积,表明了人类社会对环境造成的生态负荷是用生产性土地面积来度量一个确定人口或经济规模的资源消费和废物吸收水平的账

户工具。生态足迹模型的计算可以分为生态足迹和生态承载力两个部分,其中生态足迹可表示为:

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

式中:EF 为总的生态足迹;N 为人口数;ef 为人均生态足迹;*i* 为消费商品和投入的类型;*r<sub>j</sub>* 为均衡因子;*j* 为生物生产性土地类型;*c<sub>i</sub>* 为第 *i* 种商品的人均消费量;*p<sub>i</sub>* 为第 *i* 种消费商品的全球平均生产能力。生态足迹模型作为一个静态指标,其得出的结论具有一定的瞬时性<sup>[19-20]</sup>,为了合理反映研究区 2000—2015 年经济社会系统的动态变化,采用 2000、2005、2010 和 2015 年多个时间节点对比研究的方法。

生态承载力表示该地区生态容量,是一个地区所能提供给人类的生态生产性土地的面积总和。随着当地的经济发展和科技进步,人类对当地资源环境利用的广度和深度发生较大程度的改变,本研究在生态承载力计算时采用综合考虑社会经济系统发展的生态承载力修正模型<sup>[21]</sup>,表示为:

$$F = X \times Y \times Z \quad (2)$$

式中:*F* 为社会经济系统发展指数;*X* 为技术指数,用高新技术产业产值占工业总产值比重表示;*Y* 为人力资源指数,用劳动力资源占总人口比重表示;*Z* 为经济能力指数,用当年与前一年的国内生产总值比值表示,下同。

$$EC = N \times ec = (1 - 12\%)N(\sum a_j \times r_j \times y_j) \times e^F \quad (3)$$

式中:EC 为总的生态承载力;ec 为人均生态承载力;*a<sub>j</sub>* 为人均生物生产性面积;*y<sub>j</sub>* 为产量因子;*e<sup>F</sup>* 为社会经济系统对生态承载力的影响。均衡因子是某类生物生产性土地的单位面积生物产量与具有世界平均生产力的生物生产性土地的单位面积生物产量之比。产量因子表示不同国家或地区的某类生物生产面积所代表的局部产量与世界平均产量的差异,是其平均生产力与世界同类土地的平均生产力的比值。

Wackernagel 等<sup>[22]</sup>研究 1961—1999 年均衡因子变化表明全世界各类土地均衡因子变化较小,为了加强不同区域计算结果的可比性,本研究采用广泛应用的 William 等提出的均衡因子和产量因子。均衡因子为:耕地和建筑用地 2.8,林地和化石能源地 1.1,草地 0.5,水域 0.2;产量因子分别为:耕地和建筑用地 1.66,林地 0.91,草地 0.19,水域 1.00,化石能源地 0,对于未利用土地类型,由于其产出比较低取 0 值,在计算中总面积中扣除 12%生物多样性保护面积<sup>[23]</sup>。

生态赤字是消费所需的生物生产性土地面积超出生态承载力可提供的生态足迹量,表示为:

ED=EF-EC (4)

式中:ED 为生态赤字,如 ED>0,说明生态足迹大于生态承载力,存在生态赤字。如果 ED<0 生态足迹小于生态承载力,存在生态盈余。

根据遥感解译的 2000,2005,2010,2015 年 4 期的土地利用类型图,分别计算 2000—2005,2005—2010,2010—2015 年的土地利用转移矩阵和各类土地生态承载力。生态足迹计算时按生物资源消耗和能源消耗分为两类:生物资源主要生态产品为粮食、甜菜、蔬菜、油料、水果、奶类、蛋类、猪肉、牛肉、羊肉、山羊毛、绵羊毛、羊绒和水产;能源消耗主要包括原煤、焦炭、洗精煤、汽油、天然气、热力和电力。根据 2000,2005,2010,2015 年《鄂尔多斯市统计年鉴》数据,计算 4 个时期生物资源产量及能源消费量。

3 结果与分析

3.1 土地覆被变化

分析 2000—2005,2005—2010,2010—2015 年鄂尔多斯市 3 个时段的土地利用类型转移矩阵(见表 1—3)。2000 年到 2005 年,鄂尔多斯市草地转出和转入的面积较大,转出面积为 11 782 km<sup>2</sup>,主要转为未利用土地和耕地;转入面积为 12 931 km<sup>2</sup>,主要来自未利用土地和耕地,草地总面积不断增大。未利用土地的转换也比较明显,具体表现为转出面积 9 988 km<sup>2</sup>,主要转为草地、耕地和水域;转入面积为 9 149 km<sup>2</sup>,主要来自草地和耕地,总面积表现为转出大于转入。耕地面积相对稳定,转入和转出的数据相差不大。

表 1 2000—2005 年鄂尔多斯市土地利用类型转移矩阵 km<sup>2</sup>

土地类型	耕地	林地	草地	水域	建筑用地	未利用土地
耕 地	1 415	145	2 053	180	165	496
林 地	166	504	950	49	27	252
草 地	2 023	726	39 925	751	357	7 925
水 域	170	46	719	589	41	362
建筑用地	204	33	401	42	109	110
未利用土地	488	199	8 808	400	93	15 370

表 2 2005—2010 年鄂尔多斯市土地利用类型转移矩阵 km<sup>2</sup>

土地类型	耕地	林地	草地	水域	建筑用地	未利用土地
耕 地	4 478		4	11	4	2
林 地		1 969	8	1		
草 地	11		51 889	14	12	3
水 域	17		20	1 937		8
建筑用地				2	905	
未利用土地	3		123	30	1	25 323

表 3 2010—2015 年鄂尔多斯市土地利用类型转移矩阵 km<sup>2</sup>

土地类型	耕地	林地	草地	水域	建筑用地	未利用土地
耕 地	4 352	10	66	17	59	5
林 地	11	1 822	85	4	38	9
草 地	38	99	51 383	40	409	75
水 域	6	4	36	1 919	21	9
建筑用地	3	1	10	2	903	3
未利用土地	13	233	729	22	116	24 223

2005—2010 年,土地覆被变化空间转移矩阵对角线处数值最大,其他数值相对较小,土地利用类型相对稳定。转出的土地利用类型中,未利用土地类型

面积最大(157 km<sup>2</sup>),主要转为草地和水域;转入面积为 13 km<sup>2</sup>,主要来自水域,总面积增加。转入的土地利用类型中,草地转入面积最大,其中转入 155 km<sup>2</sup>,

转出为 40 km<sup>2</sup>,面积相对增加。建筑用地面积增加相对较多,其他土地利用类型整体上变化不大。

2010—2015 年,土地覆被变化空间转移矩阵面积变化不大,其中草地转出和转入的面积相对较多,分别为 661 km<sup>2</sup> 和 962 km<sup>2</sup>,草地面积相对增加。未利用土地转入为 101 km<sup>2</sup>,转出为 1 176 km<sup>2</sup>,主要转出为草地,其次是林地和建筑用地。建筑用地面积转入和转出分别为 643 km<sup>2</sup> 和 19 km<sup>2</sup>,转入部分主要来自草地和未利用土地。

3.2 生态足迹

根据生态足迹公式和鄂尔多斯市 2000—2015 年的统计年鉴数据,计算其生物资源和能源消费的生态总足迹及人均足迹(见表 4—5)。结果表明:2000,2005,2010 和 2015 年生物资源总足迹分别为 2.07×10<sup>6</sup>,3.76×10<sup>6</sup>,4.18×10<sup>6</sup>,4.43×10<sup>6</sup> hm<sup>2</sup>,人均生物资

源足迹分别为 1.579,2.727,2.744,2.816 hm<sup>2</sup>/人,2000—2015 年鄂尔多斯市生物资源总足迹和人均足迹均呈不断增加的趋势。2000,2005,2010 和 2015 年能源消费总足迹分别为 2.60×10<sup>6</sup>,7.50×10<sup>6</sup>,2.60×10<sup>7</sup>,3.84×10<sup>7</sup> hm<sup>2</sup>,人均能源消费足迹分别为 1.977,5.439,17.039,24.415 hm<sup>2</sup>/人,2000—2015 年能源消费总足迹和人均足迹也呈不断增加的趋势。

在能源消费足迹中主要以原煤需求为主,2000 年占总能源消费足迹的 94%,2005 年占比下降为 85%,2010 和 2015 年所占的比例相同为 82%。原煤的消费量远高于其他能源品种,这一方面说明鄂尔多斯市是一个以工业为主导产业的地区,对原煤需求量较大,同时也表明鄂尔多斯市作为中国的能源富集区,是煤炭资源的主要供应地之一。

表 4 2000—2015 年鄂尔多斯市生物资源消费账户

类 型	2000 年		2005 年		2010 年		2015 年	
	总足迹 (10 <sup>5</sup> hm <sup>2</sup> )	人均足迹 (hm <sup>2</sup> /人)	总足迹 (10 <sup>5</sup> hm <sup>2</sup> )	人均足迹 (hm <sup>2</sup> /人)	总足迹 (10 <sup>5</sup> hm <sup>2</sup> )	人均足迹 (hm <sup>2</sup> /人)	总足迹 (10 <sup>5</sup> hm <sup>2</sup> )	人均足迹 (hm <sup>2</sup> /人)
粮 食	6.810	0.519	11.990	0.870	14.388	0.944	15	0.953
甜 菜	0.135	0.010	0.218	0.016	0.134	0.009	0.135	0.009
油 料	1.767	0.135	1.190	0.086	1.051	0.069	1.791	0.114
蔬 菜	0.112	0.009	0.363	0.026	0.364	0.024	0.716	0.045
水 果	0.007	0.001	0.006	0.0005	0.005	0.0003	0.005	0.0003
奶 类	0.097	0.007	0.003	0.0002	2.844	0.187	1.357	0.086
蛋 类	0.076	0.006	2.591	0.188	0.129	0.008	0.091	0.006
猪 肉	3.620	0.276	0.118	0.009	3.489	0.229	3.721	0.237
牛 肉	0.301	0.023	5.508	0.400	2.164	0.142	2.246	0.143
羊 肉	4.538	0.346	1.551	0.112	11.814	0.775	12.68	0.806
山羊毛	0.196	0.015	10.076	0.731	0.673	0.044	0.508	0.032
绵羊毛	2.558	0.195	0.521	0.038	3.335	0.219	4.054	0.258
羊 绒	0.186	0.014	3.040	0.220	0.873	0.057	0.928	0.059
水 产	0.299	0.023	0.409	0.030	0.561	0.037	1.074	0.068
总 计	20.702	1.579	37.584	2.727	41.824	2.744	44.306	2.816

表 5 2000—2015 年鄂尔多斯市能源消费账户

类 型	2000 年		2005 年		2010 年		2015 年	
	总足迹 (10 <sup>5</sup> hm <sup>2</sup> )	人均足迹 (hm <sup>2</sup> /人)	总足迹 (10 <sup>5</sup> hm <sup>2</sup> )	人均足迹 (hm <sup>2</sup> /人)	总足迹 (10 <sup>5</sup> hm <sup>2</sup> )	人均足迹 (hm <sup>2</sup> /人)	总足迹 (10 <sup>5</sup> hm <sup>2</sup> )	人均足迹 (hm <sup>2</sup> /人)
原 煤	24.304	1.852	63.972	4.640	213.067	13.982	315.336	20.044
焦 炭	0.958	0.073	6.542	0.475	28.213	1.851	41.591	2.644
洗精煤	0.566	0.043	3.869	0.281	16.685	1.095	24.597	1.563
汽 油	0.026	0.002	0.016	0.001	0.027	0.002	0.020	0.001
天然气	0.000	0.000	4.7E-08	3.3 E-08	4.04E-06	2.6E-07	4.16E-06	2.6E-07
电 力	0.045	0.003	0.285	0.021	0.791	0.052	1.202	0.076
热 力	0.051	0.004	0.288	0.021	0.864	0.057	1.355	0.086
总 计	25.950	1.977	74.972	5.439	259.647	17.039	384.101	24.414

生物生产性土地面积以化石能源用地所占的比例最大,其后依次是草地、耕地、水域和建筑用地,林地所占比例最小。可见鄂尔多斯市的发展主要以消耗自然资源为主,属于资源型城市,草地是当地主要土地利用类型,生物资源消耗以草地产品为主。生物生产性土地面积生态足迹变化情况计算结果表明:耕地、林地、草地、水域、建筑用地和化石能源用地的总足迹和人均生态足迹均呈增加趋势。2000—2015 年总生态足迹表现为 21 世纪前 10 a 生态足迹增加十分迅速,2005 年生态足迹是 2000 年的 2.41 倍,2010 年则为 2005 年的 2.68 倍,2010 年后生态足迹增加速度相对放缓,2015 年生态足迹为 2010 年的 1.42 倍。纵观 2000—2015 年鄂尔多斯市生态足迹变化,2015 年生态足迹为 2000 年的 9.18 倍,2000—2015 年生态足迹年平均按 15.93% 的速率递增,其增长速度远高于当地的经济水平,对当地的生态环境产生较大压力。

### 3.3 生态承载力时空特征

根据土地利用类型、均衡因子和产量因子计算鄂尔多斯市 2000—2015 年的生态承载力。统计结果表明:2000,2005,2010 和 2015 年总生态承载力分别为: $1.140 \times 10^7$ ,  $2.349 \times 10^7$ ,  $1.168 \times 10^7$ , 和  $1.365 \times 10^7 \text{ hm}^2$ 。在生态承载力时间变化方面,生态承载力表现为以 2005 年最大,2015 年次之,再次为 2010 年和 2000 年,表现为先增加后降低,再缓慢升高的特征。生态承载力的变化较多地受到社会经济的影响,具体表现为:研究时段内随着时间的变化,人力资源指数由 2000 年的 0.55 增加到 2015 年的 0.68,处于不断增加的趋势;技术指数在 2005 年最大(0.79),之后开始下降,2010 年之后开始上升,2015 年达到 0.13;经济因素对社会经济系统发展指数影响较大,经济能力指数则 2005 年达到最大(1.50),2000 年和 2010 年基本相同为 1.22,2015 年相对最低为 1.04,说明 2000—2015 年初期经济增长速度较快,随着时间的推移其增长速度相对变缓,与经济能力指数相对应,鄂尔多斯市总生态承载力呈相对降低的趋势。

生态承载力绝对值表示图斑尺度上由于土地利用变化和社会经济的发展对区域空间上变化的影响。分析生态承载力绝对值分布(见封 2 附图 6—9)表明:2000—2015 年,鄂尔多斯市生态承载力绝对值表现为整体上逐渐上升的趋势,但其增加幅度存在一定的差异。2000—2005 年整个区域范围增加了近 1 倍,这主要是由于社会经济因素的发展而使其生态承载力提高,2010—2015 年虽然社会经济因素一直提高,但生态承载力绝对值反而降低。生态承载力绝对值在空间变化方面存在较大的差异,2000 年生态承载

力绝对值高值区主要分布在杭锦旗的东北、西北和东南部;达拉特旗北部分布面积较大,在西南和东南地区及准格尔旗、东胜区和伊金霍洛旗也有零散分布。2005 年生态承载力绝对值高值区主要分布在杭锦旗东北、西北和东南部、达拉特旗北部、西南和东南部、准格尔旗西部、东南部、东胜区和伊金霍洛旗中部,在乌审旗东部和东南部地区及鄂托克前旗中部和东南部也有零星的分布。2010 年杭锦旗东北部、达拉特旗北部、西南和东南部、东胜区和准格尔旗南部地区、伊金霍洛旗中部地区为生态承载力绝对值高值区。2015 年生态承载力绝对值高值区主要分布于杭锦旗东北、东南部和达拉特旗北部、东胜区、准格尔旗和伊金霍洛旗中部地区。总之,2000—2015 年生态承载力绝对值空间差异主要是基于土地利用类型差异的生态生产性土地面积不同,具体表现为同一时期耕地和建设用地集中区生态承载力绝对值相对较高,其次是林地、水域和草地,未利用土地相对最低。2000—2015 年,随着时间的推移,建筑用地和草地面积逐渐增加,而未利用土地面积逐渐减少,对应到空间分布上表现为草地在各个旗区分布较广,其生态承载力绝对值相对较低,鄂尔多斯东北和北部地区由于耕地和林地分布相对较多,其生态承载力绝对值相对较高。

利用生态承载力绝对值、人均生态生产面积和人口数量等数据,计算鄂尔多斯市 2000—2015 年各旗区的人均生态承载力(见图 1)和总生态承载力(见图 2)。结果表明:2000 年人均生态承载力以杭锦旗最高( $15.41 \text{ hm}^2/\text{人}$ ),东胜区次之( $12.74 \text{ hm}^2/\text{人}$ ),伊金霍洛旗相对最低( $6.77 \text{ hm}^2/\text{人}$ );2005 年除东胜区外其他旗均有所增加,其中以乌审旗增加幅度最大(为 2000 年的 2.13 倍),2005 年人均生态承载力在数值差异方面以杭锦旗最高( $29.63 \text{ hm}^2/\text{人}$ ),鄂托克旗次之( $21.95 \text{ hm}^2/\text{人}$ ),东胜区最低为  $7.31 \text{ hm}^2/\text{人}$ ;2010 年人均生态承载力和 2005 年相比均表现出大幅度下降,其中以准格尔旗下降最大,人均生态承载力以杭锦旗最高( $13.40 \text{ hm}^2/\text{人}$ ),鄂托克旗次之( $10.42 \text{ hm}^2/\text{人}$ ),东胜区最低( $3.23 \text{ hm}^2/\text{人}$ );2015 年各旗区人均生态承载力高于 2010 年,其中以伊金霍洛旗增加幅度最大(为 2010 年的 1.30 倍),准格尔旗增加幅度最小(为 2010 年的 1.09 倍),人均生态承载力以杭锦旗最高( $15.58 \text{ hm}^2/\text{人}$ ),鄂托克旗次之( $12.27 \text{ hm}^2/\text{人}$ ),东胜区最低( $3.76 \text{ hm}^2/\text{人}$ )。综观 2000—2015 年各旗区人均生态承载力变化,空间差异主要表现为杭锦旗相对最高,其次是鄂托克旗、准格尔旗,时间变化表现为先增加、后减少、再增加的特征。鄂尔多斯市各旗区人均生态承载力的变化主要由不同

利用类型土地面积和人口数量决定。不同土地利用类型中,耕地和建筑用地的均衡因子和产量因子相对较高,对应到不同旗区,杭锦旗耕地和建筑用地约占鄂尔多斯市总面积的 4.23%~4.52%,低于达拉特旗(6.62%~7.24%)和准格尔旗(7.16%~7.83%),但由于该旗人口密度较低(7~8 人/km<sup>2</sup>),使其人均生态承载力相对较高;鄂托克旗虽然耕地和建筑用地

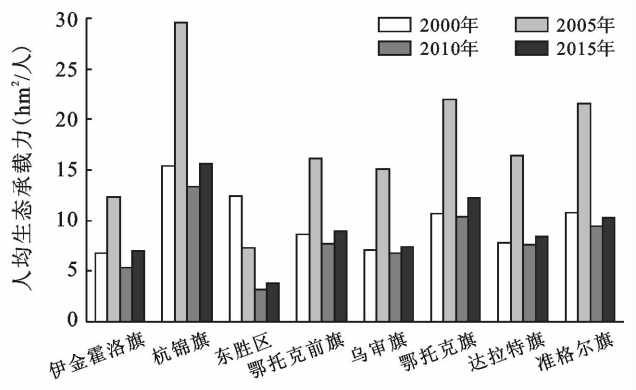


图 1 2000—2015 年鄂尔多斯市各旗(区)人均生态承载力

各旗区总生态承载力也存在较大差异,2000, 2005,2010,2015 年各旗区总生态承载力表现为:2005 年总生态承载力相对最高、2015 年次之,2005 年明显高于 2010 年和 2000 年;各旗区总生态承载力表现出升高—降低—升高的变化特征。2000 年各旗区总生态承载力相对较低,其数值仅为 2005 年的 48.93%,生态承载力提升潜力较大。在各旗区横向比较方面,2000—2015 年各旗区总生态承载力以准格尔旗相对最高,达拉特旗次之,再次为杭锦旗,鄂托克旗、伊金霍洛旗和东胜区总生态承载力相差不大,乌审旗的总生态承载力较低,鄂托克前旗则相对最低(仅相当于准格尔旗的 20.53%)。

3.4 生态盈亏

根据计算的生态足迹和总生态承载力,计算鄂尔多斯市 2000—2015 年生态盈亏情况(见表 6)。结果表明:鄂尔多斯市 2000 年到 2005 年处于生态盈余状态,2000 年生态承载力为生态足迹的 2.44 倍;2005 年到

面积占比仅大于鄂托克前旗,但由于其人口密度在全市相对最低(4~5 人/km<sup>2</sup>),使其人均生态承载力次于杭锦旗,在全市处于较高的水平。东胜区耕地和建筑用地面积占比为 2.11%~2.50%,是鄂尔多斯市经济、科技和文化中心,人口密度相对最高(75~111 人/km<sup>2</sup>),人口密度高在一定程度上对当地的生态环境产生压力较大,使人均生态承载力相对最低。

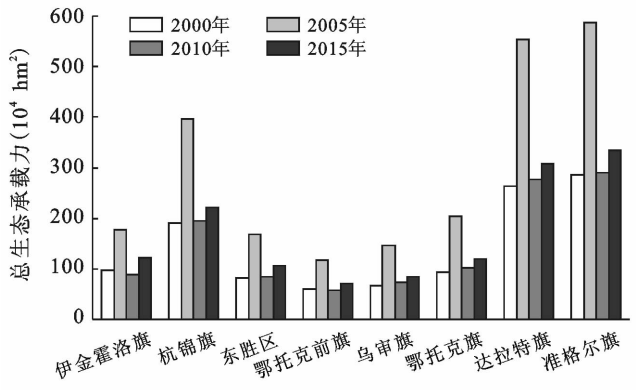


图 2 2000—2015 年鄂尔多斯市各旗(区)总生态承载力

2015 年由生态盈余转为生态赤字,随着经济的发展生态赤字逐渐增加,2015 年生态足迹是生态承载力的 3.12 倍。在人均生态足迹方面,2000 年人均足迹为 3.556 hm<sup>2</sup>/人,2005,2010,2015 年分别为 8.166, 19.783,27.23 hm<sup>2</sup>/人,2000,2005,2010,2015 年对应的人均生态承载力分别为 8.686,17.046,7.687, 8.645 hm<sup>2</sup>/人。人均生态足迹快速增加但人均生态承载力却呈现降低的趋势,2005 年后人口对环境的压力远大于生态承载力,对当地生态环境的健康发展施加了较多的不利影响。对应到当地人口和经济发展变化方面,2000—2015 年鄂尔多斯市总人口由 1.31×10<sup>6</sup> 人增加到 1.57×10<sup>6</sup> 人,人口增加率为 19.85%;GDP 从 2000 年 1.50×10<sup>10</sup> 元增加到 2015 年 1.80×10<sup>12</sup> 元,城镇居民家庭平均每人每年消费支出由 4 499 元增加到 22 918 元,分别增加了 120.00 倍和 5.09 倍,快速增加的人口以及经济高速发展、消费水平持续提高所带来的能耗和物耗增加可能是生态赤字产生的重要原因。

表 6 2000—2015 年鄂尔多斯市生态盈亏状况				hm <sup>2</sup>
类 别	2000 年	2005 年	2010 年	2015 年
总生态足迹	4.67×10 <sup>6</sup>	1.13×10 <sup>7</sup>	3.01×10 <sup>7</sup>	4.28×10 <sup>7</sup>
总生态承载力	1.14×10 <sup>7</sup>	2.35×10 <sup>7</sup>	1.17×10 <sup>7</sup>	1.36×10 <sup>7</sup>
总生态盈余/赤字	6.74×10 <sup>6</sup>	1.22×10 <sup>7</sup>	-1.85×10 <sup>7</sup>	-2.92×10 <sup>7</sup>

4 讨论与结论

基于 Landsat 影像和社会经济统计年鉴数据,采

用生态足迹法对 2000—2015 年鄂尔多斯高原腹地鄂尔多斯市的生态承载力时空特征进行研究,主要得出以下结论。

(1) 鄂尔多斯市土地利用类型中,以草地利用面积最大,其次是未利用土地和耕地。土地转移矩阵分析表明:2000—2005 年草地转换面积较大,总面积不断增加;未利用土地转换面积次之,面积趋于减少;耕地面积相对稳定。2005—2015 年土地利用类型相对稳定,土地类型转换变化较小,主要为未利用土地转出为草地和建筑用地。

(2) 2000—2010 年生态足迹迅速增加,2010 年后增加速度相对放缓,2000—2015 年总足迹和人均足迹均呈增加的趋势,总生态足迹多年平均递增速率为 15.93%;6 类生产性土地面积生态足迹中,以化石能源用地所占的比例最大,其后依次是草地、耕地、水域、建筑用地和林地。

(3) 生态承载力时间变化方面,以 2005 年最大、2015 年和 2010 年次之、2000 年相对最小,生态承载力呈先增加,后降低,再升高的特征。生态承载力空间变化方面,以准格尔旗总生态承载力最高,其次是达拉特旗和杭锦旗,鄂托克前旗相对最低。

(4) 2000—2005 年处于生态盈余状态,2000 年和 2005 年生态承载力分别为生态足迹的 2.44 和 2.08 倍;2005—2015 年由生态盈余转为生态赤字,且随着经济的发展生态赤字不断增加,2010 年和 2015 年生态足迹分别为生态承载力的 2.57 和 3.12 倍,生态承载力处于严重透支状态,生态环境的可持续发展面临着较大的挑战。

生态承载力变化是地球表层大气圈、水圈、岩石圈和生物圈综合作用的结果,鄂尔多斯高原承载力的大小既受到耕地资源、森林资源、草地资源、水资源、矿产资源等因素综合影响外,人口数量、社会经济结构、居民的消费习惯、环保意识以及科技进步等因素也会对生态承载力的变化起着重要作用。以社会经济系统发展指数为例,2005 年由于技术指数和经济能力指数相对较高,其经济发展指数对总生态承载力的影响增加了 1.068 倍,2000 年和 2010 年受到经济发展水平和国际金融危机大环境的影响,经济发展指数对总生态承载力的影响增加较低,分别为 0.023 和 0.024。本研究采用遥感数据结合社会经济系统发展指数对鄂尔多斯高原生态承载力时空特征,比传统仅依靠统计年鉴进行基于生态足迹法的生态承载力评价具有一定的进步性,生态足迹法虽然考虑了不同的土地利用类型之间的差异,但是相同的土地利用类型(如耕地)由于生产结构调整或者喷灌、滴灌等技术使用,其产出和消耗能力可能存在较大的差异。如何结合当地土地利用类型,从植被类型、气候资源、水资源、社会经济和技术进步等多角度入手,进一步验证

和修正承载力计算的均衡因子和产量因子,进而科学评价地区、国家乃至全球尺度水平的生态承载力将是本研究的进一步研究内容。

#### [参 考 文 献]

- [1] Yan Feng, Wu Bo, Wang Yanjiao. Estimating aboveground biomass in Mu Us Sandy Land using Landsat spectral derived vegetation indices over the past 30 years[J]. *Journal of Arid Land*, 2013, 5(4): 521-530.
- [2] 封志明,杨艳昭,闫慧敏,等.百年来的资源环境承载力研究:从理论到实践[J]. *资源科学*, 2017, 39(3): 379-395.
- [3] 高吉喜.可持续发展理论探索:生态承载力理论、方法与应用[M]. 北京:中国环境科学出版社,2001:12-28.
- [4] Rees W E. Ecological footprints and appropriated carrying capacity: What urban economics leaves out[J]. *Environment and Urbanization*, 1992, 4(2): 121-130.
- [5] Holling C S, Gunderson L H. Resilience and adaptive cycles[M]// *Panarchy: Understanding Transformations in Human and Natural Systems*. Holling C S, Gunderson L H. Washington (DC): Island Press, 2002.
- [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] 王开运.生态承载力复合模型系统与应用[M]. 北京:科学出版社, 2007.
- [8] 曹智,闵庆文,刘某承,等.基于生态系统服务的生态承载力:概念、内涵与评估模型及应用[J]. *自然资源学报*, 2015, 30(1): 1-11.
- [9] Rees W E, Wackernagel M. Ecological footprints and appropriated carrying capacity: Measuring the natural capital requirements of the human economy[J]. *Focus*, 1994, 6(2): 121-130.
- [10] 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.
- [11] Wackernagel M, Onisto L, Bello P, et al. Ecological footprints of Nations[R]. Toronto: International Council for Local Environmental initiatives, 1997: 10-21.
- [12] Ewing B R, Hawkins T R, Wiedmann T O, et al. Integrating ecological and water footprint accounting in a multi-regional input-output framework[J]. *Ecological Indicators*, 2012, 23: 1-8.
- [13] 徐中民,张志强,程国栋.甘肃省 1998 年生态足迹计算与分析[J]. *地理学报*, 2000, 55(5): 607-616.
- [14] 张志强,徐中民,程国栋,等.中国西部 12 省(区市)的生态足迹[J]. *地理学报*, 2001, 68(5): 599-610.



- [6] Qin Hongjie, Zhang Zhiyong, Liu Minhui, et al. Site test of phytoremediation of an open pond contaminated with domestic sewage using water hyacinth and water lettuce[J]. Ecological Engineering, 2016,95:753-762.
- [7] Putra R S, Cahyana F, Novarita D. Removal of lead and copper from contaminated water using EAPR system and uptake by water lettuce (*Pistia stratiotes* L.) [J]. Procedia Chemistry, 2015,14:381-386.
- [8] 胡长伟,孙占东,李建龙,等. 凤眼莲在城市重污染河道修复中的应用[J]. 环境工程学报,2007,1(12):51-56.
- [9] 秦红杰,张志勇,刘海琴,等. 两种漂浮植物的生长特性及其水质净化作用[J]. 中国环境科学,2016,36(8):2470-2479.
- [10] 刘利华,郭雪艳,达良俊,等. 不同富营养化水平对挺水植物生长及氮磷吸收能力的影响[J]. 华东师范大学学报(自然科学版),2012(6):39-45,72.
- [11] 曹开银,丁海涛,邓超,等. 湿地水生植物对富营养化水体的净化效果研究[J]. 生物学杂志,2019,36(1):39-42.
- [12] 刘盼,宋超,朱华,等. 3 种水生植物对富营养化水体的净化作用研究[J]. 水生态学杂志,2011,32(2):69-74.
- [13] 宋玉芝,朱广伟,秦伯强. 太湖康山湾示范区水生植物对水体氮、磷控制的适用性分析[J]. 湖泊科学,2013,25(2):259-265.
- [14] 吕金虎,钟艳霞,高鹏. 银川平原人工湿地水生植物去污能力研究[J]. 水土保持通报,2013,33(1):192-195.
- [15] 潘义宏,王宏宾,谷兆萍,等. 大型水生植物对重金属的富集与转移[J]. 生态学报,2010,30(23):6430-6441.
- [16] 方焰星,何池全,梁霞,等. 水生植物对污染水体氮磷的净化效果研究[J]. 水生态学杂志,2010,31(6):36-40.
- [17] Elshafai S, Elgohary F, Nasr F, et al. Nutrient recovery from domestic wastewater using a UASB-duckweed ponds system[J]. Bioresource Technology, 2007,98(4):798-807.
- [18] 相晨,卢剑波,刘芳,等. 水生植物对富营养化水体净化效果的初步研究[J]. 环境科学导刊,2016,35(5):32-37.
- [19] 李志刚,李素丽,梅利民,等. 美人蕉 (*Canna indica* Linn.) 和芦苇 (*Phragmites australis* L.) 人工湿地对含铬生活污水的净化效果及植物的生理生态变化[J]. 农业环境科学学报,2011,30(2):358-365.
- [20] 刘晓娜,丁爱中,程莉蓉,等. 潜流人工湿地除氮的生态动力学模拟[J]. 农业环境科学学报,2011,30(1):166-170.
- [21] 刘足根,张萌,李雄清,等. 沉水-挺水植物镶嵌组合的水体氮磷去除效果研究[J]. 长江流域资源与环境,2015,24(S1):171-181.
- [22] 王春景,杨海军,刘国经,等. 菰和菖蒲对富营养化水体净化效率的比较[J]. 植物资源与环境学报,2007,16(1):40-44.
- [23] 高岩,马涛,张振华,等. 不同生长阶段凤眼莲净化不同程度富营养化水体的效果研究[J]. 农业环境科学学报,2014,33(12):2427-2435.
- [24] 郑足红,胡超,王华伟,兰天翔,王立华. 3 种水生植物对富营养化水质的净化性能比较[J]. 环境污染与防治,2018,40(10):1147-1151.
- [25] 宗小香,闵梦月,孙广芳,等. 铁-碳内电解质下 4 种水生植物的净水效果[J]. 应用生态学报,2016,27(07):2084-2090.
- [26] 李淑英,周元清,胡承,等. 水生植物组合后根际微生物及水净化研究[J]. 环境科学与技术,2010,33(3):148-153.
- [27] 邱敏. 太湖氮磷大气沉降及水体自净模拟实验研究[D]. 广州:暨南大学,2017.

(上接第 98 页)

- [15] 田玲玲,罗静,董莹,等. 湖北省生态足迹和生态承载力时空动态研究[J]. 长江流域资源与环境,2016,25(2):316-325.
- [16] 潘洪义,朱晚秋,崔绿叶,等. 成都市人均生态足迹和人均生态承载力空间分布差异[J]. 生态学报,2017,37(19):6335-6345.
- [17] 闫峰,吴波,王艳姣. 2000—2011 年毛乌素沙地植被生长状况时空变化特征[J]. 地理科学,2013,33(5):602-608.
- [18] 闫峰,吴波. 近 40 a 毛乌素沙地荒漠化过程研究[J]. 干旱区地理,2013,36(6):987-996.
- [19] Wackernagel M, Monfreda C, Schulz N B, et al. Calculating national and global ecological footprint time series: Resolving conceptual challenges[J]. Land Use Policy, 2004,21(3):271-278.
- [20] 王录仓,高静. 高寒牧区村域生态足迹:以甘南州合作市为例[J]. 生态学报,2012,32(12):3795-3805.
- [21] 顾康康,刘景双. 基于生态足迹修正模型的矿业城市生态承载力研究[J]. 煤炭学报,2008,33(11):1314-1318.
- [22] Wackernagel M, Monfreda C, Erb K H, et al. Ecological footprint time series of Austria, the Philippines, and South Korea for 1961—1999: Comparing the conventional approach to an ‘actual land area’ approach[J]. Land Use Policy, 2004,21(3):261-269.
- [23] 岳东霞,马金辉,巩杰,等. 中国西北地区基于 GIS 的生态承载力定量评价与空间格局[J]. 兰州大学学报(自然科学版),2009,45(6):68-75.