

DOI: 10.11829/j.issn.1001-0629.2018-0269

苏文亮, 李文龙, 朱亚莉, 蔡栋, 余翠, 许静, 魏巍. 基于能值生态足迹模型的青海地区可持续发展评估. 草业科学, 2019, 36(5): 1445-1456.

SU W L, LI W L, ZHU Y L, CAI D, YU C, XU J, WEI W. Evaluation of sustainable development in Qinghai based on energy ecological footprint model. Pratacultural Science, 2019, 36(5): 1445-1456.

基于能值生态足迹模型的青海地区 可持续发展评估

苏文亮¹, 李文龙¹, 朱亚莉¹, 蔡栋¹, 余翠¹, 许静², 魏巍¹

(1. 草地农业生态系统国家重点实验室 / 兰州大学草地农业科技学院, 甘肃 兰州 730020;

2. 兰州财经大学经济管理学院, 甘肃 兰州 730020)

摘要: 生态足迹分析方法是生态经济学中测度人类社会资源消耗的经典方法之一, 基于能值的生态足迹模型是该领域研究的最新发展和改进。本研究采用区域标准计算生态承载力和生态足迹, 能够更好地体现区域的真实供给能力和人类对资源的实际消耗, 其方法和数据优于普遍采用的全球标准。研究基于能值生态足迹模型, 定量地分析了 2005–2014 年青海省的可持续发展状态; 结合万元 GDP 生态足迹、生态足迹多样性指数以及发展能力指数, 分析了青海省的总体经济发展状况; 同时利用 GIS 空间分析技术, 分析研究区可持续发展状态的空间分布差异。结果表明: 1) 2005–2014 年青海省区域生态足迹超出了生态承载力, 生态足迹指数小于 0 且不断下降。2) 青海省不可持续发展的区域在不断扩大, 主要集中在东部的市区及其周边的县域, 2011 年之后呈现由北向东的带状分布。3) 结合能值生态足迹和多因子耦合分析表明, 虽然青海省的资源利用效率有所提高, 发展能力也有较大的提升, 但主要是以大量的资源消耗为代价, 水土流失、生态功能恶化、地区承载力下降、自我调节能力降低等生态环境恶化问题依然严峻。该研究结果可为相关青藏高原地区的可持续发展提供有益的参考。

关键词: 能值生态足迹; 可持续发展; 青海省; GIS 空间分析技术

中图分类号: Q948

文献标志码: A

文章编号: 1001-0629(2019)05-1445-12

Evaluation of sustainable development in Qinghai based on energy ecological footprint model

SU Wenliang¹, LI Wenlong¹, ZHU Yali¹, CAI Dong¹, YU Cui¹, XU Jing², WEI Wei¹

(1. Key Laboratory of Grassland Farming Systems / College of Pastoral Agriculture Science and Technology,

Lanzhou University, Lanzhou 730020, Gansu, China;

2. School of Agriculture and Forestry Economic and Management, Lanzhou University of Finance and Economics, Lanzhou 730020, Gansu, China)

Abstract: The ecological footprint analysis method is one of the classical methods for measuring the consumption of human social resources in ecological economics. The emergy-based ecological footprint model is the latest development and improvement in this field. In this study, we used regional standards to calculate the ecological carrying capacity and ecological footprint, which can better reflect the real supply capacity of the region and the actual consumption of resources by humans. The methods and data are better than the universally adopted global standards. We quantitatively analyzed the

收稿日期: 2018-05-02 接受日期: 2018-09-20

基金项目: 国家自然科学基金(41471450); 国家社会科学基金(14CJY010); 中央高校基本科研业务费专项(lzujbky-2016-br05); 中央高校自由探索优秀研究生创新项目(lzujbky-2016-zr0185)

第一作者: 苏文亮(1993-), 男, 甘肃定西人, 在读硕士生, 主要从事草地遥感与地理信息系统研究。E-mail: 1585158126@qq.com

通信作者: 李文龙(1977-), 男, 甘肃兰州人, 教授, 博士, 主要从事草地遥感与地理信息系统研究。E-mail: wllee@lzu.edu.cn

state of sustainable development in Qinghai Province from 2005 to 2014 based on the emergy ecological footprint model, and combined with the ecological footprint of ten thousand yuan GDP, ecological footprint diversity index and development capability index to comprehensively analyze economic development situation of Qinghai Province, and the GIS spatial analysis technology was used to analyze the spatial differences and their changes in the sustainable development of the study area. The results showed 1) The ecological footprint of Qinghai Province exceeded the ecological carrying capacity from 2005 to 2014, the ecological footprint index was less than 0 and declining, and Qinghai Province was in an unsustainable state of development. 2) The areas of unsustainable development in the study area were continuously expanding from 2005 to 2014, which were mainly concentrated in the eastern urban area and their surrounding counties. After 2011, there was a strip distribution from north to east. 3) Ecological energy footprint and multi-factor coupling analysis showed that although the resource utilization efficiency and development capability in Qinghai Province had been greatly improved, it is mainly at the expense of a large amount of resource consumption. The deterioration of ecological environment such as soil erosion, deterioration of ecological functions, decline of regional carrying capacity, and reduction of self-regulation ability was still serious. The results of this study can provide a useful reference for the sustainable development of the Qinghai-Tibet Plateau.

Keywords: emergy ecological footprint; sustainable development; Qinghai Province; GIS spatial analysis technology

Corresponding author: LI Wenlong E-mail: wlee@lzu.edu.cn

可持续发展是人类社会追求的发展目标之一, 如何平衡自然资源、人类社会和经济发展之间的关系, 促进生态环境和社会经济的可持续发展逐渐成为生态经济学研究的热点问题。人类为追求经济的高速发展而进行高耗能、高污染的资源粗放式、掠夺式的产业发展, 对生态环境带来严重的破坏, 环境污染、水土流失、土壤沙化等问题制约着可持续发展。Rees 和 Wackernagel^[1] 在 1996 年提出了生态足迹模型方法, 该方法通过比较一定区域内自然资源的承载能力是否能够满足人类对自然资源消耗来度量区域可持续发展。但生态足迹模型基于全球尺度度量产量因子和均衡因子, 忽略了区域生态环境的复杂性和时空差异性。基于此, Zhao 等^[2] 将能值理论引入生态足迹模型, 提出了能值生态足迹模型。Siche 等^[3] 改进了能值生态足迹模型, 将地球能值密度转换成区域单位, 将土壤流失和水资源消耗纳入到生态足迹的计算中, 提高了生物多样性保护面积的比例。李文龙等^[4] 利用区域能值密度评估了甘南州高寒牧区的可持续发展。

青藏高原由于具有独特的地理区位和生态功能, 其可持续发展一直是生态领域研究的重点。刘同德^[5] 将 PRED 系统修正为 SRED 系统, 构建了青藏高原地区的可持续发展的理论框架, 提出了青藏高原区域可持续发展的模式; 付伟^[6] 利用生态足迹指数、万元 GDP 生态足迹指数和资源福利指

数三种指标进行了资源贡献力、资源利用效率、资源可持续利用状态与社会福利的实证分析, 对青藏高原地区的资源可持续利用进行分析; 余翠^[7] 利用能值生态足迹方法, 基于区域能值密度, 评价了青藏高原地区的区域可持续发展状况。

青海省是青藏高原地区的重要组成部分, 坐落于青藏高原东北部, 具有独特的资源优势, 是长江、黄河、澜沧江的源头区, 但生态环境较为脆弱。近年来, 虽然青海省的经济发展迅速加快^[8], 但其发展主要依赖于对自然资源的过度开发, 生态环境虽局部好转, 但整体恶化的趋势依然严重^[9-10]。本研究基于能值生态足迹方法分析了青海省生态承载力和生态足迹的变化, 耦合多种指标方法分析青海地区的资源利用效率以及发展能力, 揭示了青海省的经济发展的可持续性, 以期为提高青藏高原地区区域经济发展水平, 促进区域环境保护和可持续发展提供有益的参考。

1 研究区概况与数据来源

青海省位于青藏高原东北部 (31°39'–39°19' N, 89°35'–103°04' E)(图 1), 是中国丝绸之路经济带的重要枢纽, 总面积 $72.12 \times 10^4 \text{ km}^2$, 占全国陆地总面积的 1/13。全省平均海拔 3 500 m 以上, 属于典型的高原大陆性气候, 太阳辐射强, 寒冷干燥, 空气稀薄, 含氧量少 ($170 \sim 230 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$), 占标准大气状况含氧量 ($283.8 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$) 的 60%~80%^[11];

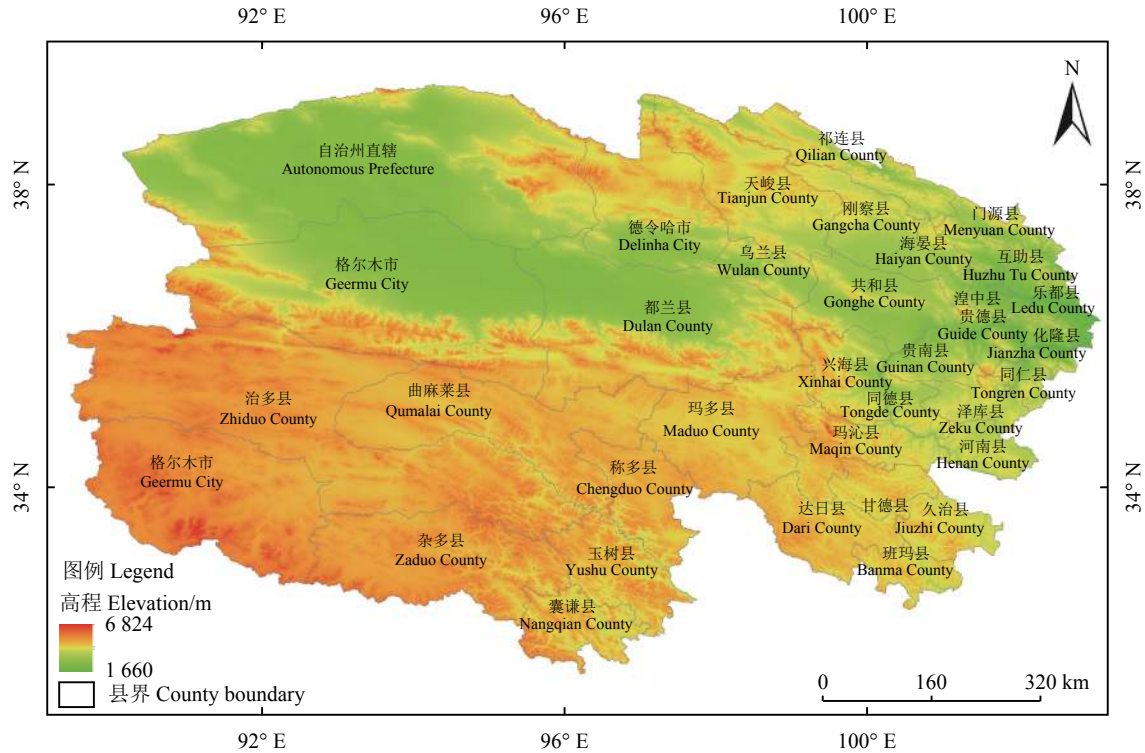


图 1 研究区概况

Figure 1 Overview of the research area

气温地区分布差异大，年平均气温 $-5.6\sim 8.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，降水量整体偏少，且由东南部向西部递减，年降水量 $17.6\sim 768.4\text{ mm}$ ^[12]；东部和东南部植被类型为森林草原植被，向西分别是草原、高山草甸、高山草原、荒漠^[13]；动植物资源丰富，特有物种多，如藏羚羊 (*Pantholops hodgsonii*)、雪豹 (*Panthera uncia*)、黑颈鹤 (*Grus nigricollis*)、冬虫夏草 (*Ophiocordyceps sinensis*)、沙棘 (*Hippophae rhamnoides*) 等^[14]；拥有盐湖资源、有色金属、贵金属资源和非金属矿产资源等^[13]。

2015 年全省常住人口 588.43 万人，其中城镇人口 295.98 万人，占总人口的 50.30%，主要居住着汉族、藏族、回族、土族、撒拉族、蒙古族等民族，其中汉族占全省常住人口的 52.29%。藏族、回族、土族、撒拉族和蒙古族分别占全省常住人口的 25.23%、14.78%、3.55%、1.93% 和 1.80%，形成了青海多元的民族文化。2015 年全省国内生产总值达 2 417.05 亿元，比 2014 年增长 8.2%；分产业看，第一产业增加值为 208.93 亿元，第二产业增加值为 1 207.31 亿元，第三产业增加值为 1 000.81 亿元；第一、第二、第三产业对 GDP 的贡献率分别为 4.90%、60.40%、34.70%，三大产业的产业结构转变为 8.6 : 50 : 41.4；全年人均国内生产总值

41 252 元，比 2014 年增长了 7.2%。

本研究所需的高程数据来源于“地理空间数据云 (<http://www.gscloud.cn>)”，空间分辨率为 30 m，用于提取研究区的平均海拔和估算研究区的太阳辐射能。统计资料主要来源于 2005–2014 年的《青海统计年鉴》和“青藏高原科学数据中心 (<http://www.tpdatabase.cn>)”。5 种可再生能源 (太阳能、风能、雨水化学能、雨水势能、地球旋转能) 的太阳能值转化率、各种资源的能值折算系数和太阳能值转换率来自于实际研究区背景的区域指标折算^[7,15-21]。气象数据来源于“中国气象局数据中心 (<http://www.cma.gov.cn>)”2005–2014 年青藏高原及周边 154 个气象台站的降水量和平均风速数据，利用专业气候数据插值软件 ANUSPLIN 进行处理，得到研究区降水数据和平均风速数据。

2 研究方法

本研究采用能值生态足迹模型，基于区域能值密度计算青海地区的生态承载力和生态足迹指数，分析青海地区的可持续发展状态；结合万元 GDP 生态足迹指数、生态足迹多样性指数、发展能力指数分析青海地区资源利用效率和土地利用

类型的变化,揭示了发展能力与生态足迹和生态足迹多样性之间的关系;运用 GIS 空间分析技术和 SLOPE 趋势分析,揭示研究区可持续发展的空间分布及其变化。

2.1 生态承载力的计算

自然资源包括可再生资源 and 不可再生资源,能值理论认为生态系统可持续发展真正依赖的是可再生资源,只有利用可再生资源,区域发展才具有可持续性。因此,本研究考虑了太阳能、风能、雨水化学能、雨水势能和地球旋转能 5 种可再生能源的计算,由于雨水势能、雨水化学能和风能其实质是由太阳能转化而来,在计算区域总能值时,这 3 种能量和太阳能只取其最大值与地球旋转能求和^[22-23]。可再生资源的能值计算公式^[21,24-26]如下:

$$WE = SA \times AD \times k \times WS^3 \times (365.25 \times 24 \times 3600); \quad (1)$$

$$RE = SA \times AR \times RD \times G; \quad (2)$$

$$RP = SA \times AR \times RD \times H \times g; \quad (3)$$

$$EE = SA \times HF. \quad (4)$$

式中: WE , 风能; SA , 研究区面积 (m^2); AD , 空气密度 ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$); k , 阻力系数; WS , 平均风速 ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$); RE , 雨水化学能; AR , 年降水量 ($\text{m} \cdot \text{a}^{-1}$); RD , 雨水密度 ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$); G , 吉布斯自由能 ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$); RP , 雨水势能; H , 云层平均海拔高度差 (m); g , 重力加速度 ($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$); EE , 地球旋转能; HF 代表热通量 [$\text{J} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$].

能值密度表征单位面积能值利用强度。能值生态足迹模型最初采用全球能值密度,全球能值密度反映的是全球平均能值利用强度,在测算区域生态承载力时,忽略了区域生态环境、社会经济发展的复杂性和空间差异性,无法反映区域生态系统的真实供给能力。区域能值密度能够反映特定地区的能值利用强度以及区域内生态系统的实际供给能力^[4,7]。故本研究计算生态承载力和生态足迹采用了区域能值密度以使生态承载力和生态足迹更具可比性。能值生态承载力模型计算公式为:

$$EC = N \times ec = (e/p) \times (1 - 12\%); \quad (5)$$

$$p = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{E_i}{S_i}}{n}; \quad (6)$$

$$e = E/N. \quad (7)$$

式中: EC , 生态承载力; ec , 人均生态承载力; e , 人均可再生资源能值 (sej); E_i , 第 i 年研究区区域总能值 (sej); S_i , 第 i 年研究区区域土地总面积; N , 区域总人口; p , 区域能值密度 [$\text{sej} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$]; 12%, 扣除的生物多样性保护面积; i 取值为 $1, \dots, 10$ 。

2.2 能值生态足迹的计算

在计算能值生态足迹时,将可再生资源归为生物资源账户,包括耕地、林地、草地以及水域;不可再生资源划分为能源账户和建筑账户,能源账户包括原煤、原油、天然气等、建筑账户包括水电。本研究将废弃物纳入生态足迹的计算中,将能源用地账户和建筑用地账户合为能源账户。因此,本研究计算的生态足迹包括生物资源账户,能源账户和废弃物 3 种账户。生态足迹计算模型为:

$$EF = N \times ef = N \times \sum a_i = N \times \sum (c_i/p). \quad (8)$$

式中: EF , 生态足迹; ef , 人均生态足迹; N , 区域总人口; c_i , 第 i 种资源的人均能值 (sej); a_i , 第 i 种资源的人均生态足迹; p , 区域能值密度 [$\text{sej} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$].

2.3 生态足迹指数

在生态足迹模型中,最初利用生态盈亏(赤字、盈余)衡量一个区域的可持续发展,吴隆杰^[27]提出用生态足迹指数(ecological footprint index, EFI)衡量某一区域的可持续发展,解决了生态盈亏指数在横向比较的不合理性,使得不同地区之间具有可比性。生态足迹指数是指生态承载力与生态足迹的差值占生态承载力的百分比,度量某一区域可持续发展状态,具体计算公式如下:

$$EFI = \frac{EC - EF}{EC} \times 100\%. \quad (9)$$

式中: EC , 生态承载力; EF , 生态足迹。当 $EFI = 0$ 时,代表不可持续与可持续的分界点;当 $EFI < 0$ 时,值越小,代表不可持续性越强;当 $EFI > 0$ 时,值越大,代表可持续性越强。可持续发展程度分级^[27-28]如表 1 所列。

2.4 万元 GDP 生态足迹

万元 GDP 生态足迹 (Ecological Footprint of Ten Thousand Yuan GDP, WEF) 指数能够反映资源利用效率,是指一个地区创造 1 万元 GDP 所需要的生态

表 1 可持续性分级
Table 1 Level of sustainability

生态足迹指数 Ecological footprint index	可持续性状态 Sustainability status
$50\% < EFI \leq 100\%$	强可持续 Strongly sustainable
$0 < EFI \leq 50\%$	弱可持续 Weakly sustainable
$-100\% < EFI \leq 0$	不可持续 Unsustainable
$EFI \leq -100\%$	严重不可持续 Seriously unsustainable

足迹，其值越大，资源利用效率越低^[29-30]，一定程度上可以反映区域内经济发展水平与土地利用程度的关系以及经济发展程度、方式对土地资源利用率和生物量消费的影响^[31]，其计算公式如下：

$$WEF = ef / GDP. \quad (10)$$

式中：WEF，万元 GDP 生态足迹；ef，区域人均生态足迹；GDP，区域人均 GDP(万元)。

2.5 生态足迹多样性指数

生态足迹多样性指数可以用来评价生态系统的可持续性。生态足迹多样性指数由丰富度和公平度构成，丰富度是指不同土地利用类型的生态足迹分别占总生态足迹的比例，即生态足迹对不同土地的利用情况；公平度是指测量生态足迹在不同土地类型的分配情况。采用 Shannon-Weaver 公式^[32] 计算生态足迹多样性指数：

$$H = - \sum (P_i \times \ln P_i). \quad (11)$$

式中：H，生态足迹多样性指数； p_i ，第 i 种土地类型足迹在总生态足迹中所占的比例。

在特定的区域生态系统中，土地覆盖类型越丰富，生态足迹在各种土地类型中分布越均等，生态足迹多样性指数就越高，生态系统的可持续性也就越强^[33-34]。

2.6 发展能力指数

发展能力指数采用 Ulanowicz^[35] 公式计算，即生态足迹多样性指数乘以人均生态足迹。由公式可知，发展能力指数揭示了区域内生态足迹多样性指数和人均生态足迹之间的相关性^[33]。

$$D = ef \times \left[- \sum (P_i \times \ln P_i) \right]. \quad (12)$$

式中：D，发展能力指数；ef，某一区域的人均生态足迹。

2.7 趋势分析

SLOPE 趋势分析可直观反映空间等时间序列的变化趋势。本研究利用 SLOPE 公式分析了 2005–2014 年青海地区可持续发展状态的空间变化趋势。SLOPE 趋势分析公式如下：

$$S = \frac{n \sum_i^n i \times S_i - \sum_i^n i \sum_i^n S_i}{n \sum_i^n i^2 - (\sum_i^n i)^2}. \quad (13)$$

式中：S 为 SLOPE 值， S_i 为可持续发展状态值(强可持续 = 1，弱可持续 = 2，不可持续 = 3，严重不可持续 = 4)， i 为 1, ..., 10 年。

3 结果分析

3.1 生态承载力和生态足迹

2005–2014 年青海省人均生态承载力维持在 10.26~12.25 hm^2 ，基本保持稳定；人均生态足迹呈现上升趋势，从 2005 年的 14.05 hm^2 上升到 2013 年的 42.15 hm^2 ，2014 年人均生态足迹又减少至 37.96 hm^2 。研究时间尺度内青海省人均生态承载力不足以支撑人均生态足迹，且人均生态足迹远超出人均生态承载力范畴(图 2)。

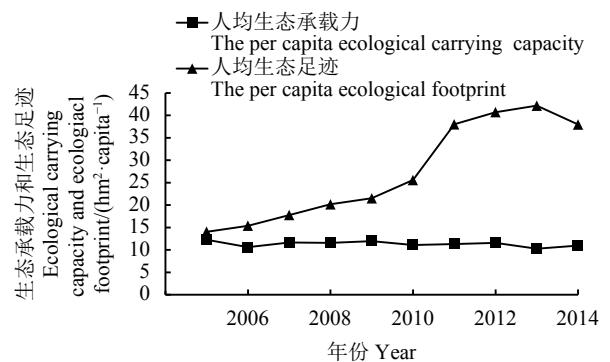


图 2 青海省人均生态承载力和人均生态足迹
Figure 2 The per capita ecological carrying capacity and the per capita ecological footprint of Qinghai Province

3.2 生态足迹指数

2005–2014 年青海省生态足迹指数均小于 0，且呈现下降趋势，表明可持续性在逐年减弱(图 3)。根据可持续性分级(表 1)可知，2005–2014 年青海省均处于不可持续状态，其中 2010–2014 年处于

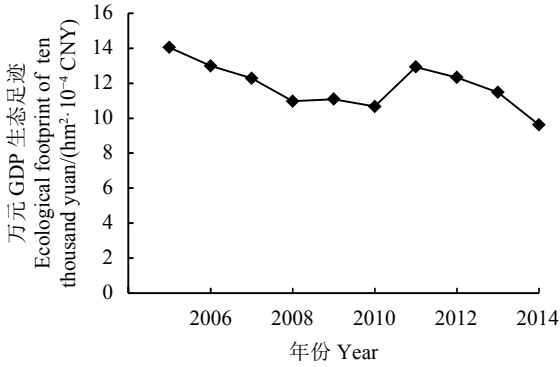


图 3 青海省万元 GDP 生态足迹

Figure 3 Ecological Footprint of ten thousand GDP in Qinghai Province

严重不可持续状态。进一步说明了生态足迹的增长已经严重超出了生态承载力的范畴。

3.3 万元 GDP 生态足迹

2005–2014 年青海省万元 GDP 生态足迹呈现波动下降趋势 (图 4), 由 2005 年的 14.04 hm² 下降到 2010 年的 10.67 hm², 2011 年又回升到 12.93 hm², 之后一直下降到 2014 年的 9.61 hm², 年均下降 0.44 hm²; 而青海省国内生产总值持续增长, 从 2005 年的 543.32 亿元增加到 2014 年的 2 303.32 亿元, 年均增长 176 亿元。反映出青海省经济发展速度加快, 资源利用效率在不断提升, 单位土地面积上的生产效率不断提高 (图 4)。

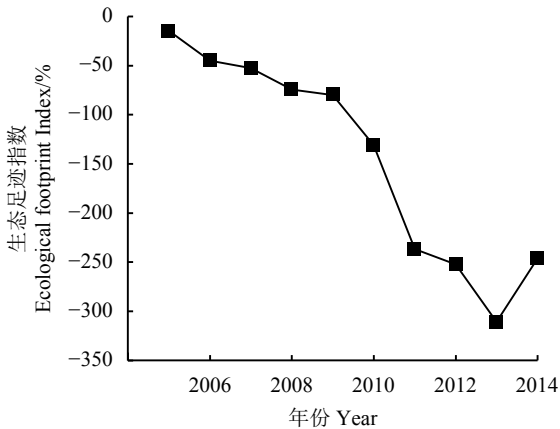


图 4 青海省生态足迹指数

Figure 4 Ecological Footprint Index of Qinghai Province

3.4 生态足迹多样性指数

青海省生态足迹多样性指数 10 年内呈下降趋势, 从 2005 年的 1.34 下降到 2014 年的 0.97, 表明生态足迹的多样性减少; 其中 2005–2010 年下降

趋势比较缓慢, 2010–2011 年有一个迅速下降的过程, 2011 年之后下降趋势再次变缓 (图 5)。

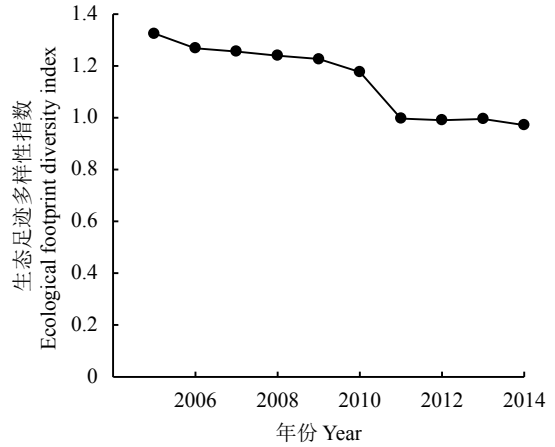


图 5 青海省生态足迹多样性

Figure 5 Ecological footprint diversity of Qinghai Province

3.5 发展能力指数

2005–2014 年青海省的发展能力指数呈上升的趋势 (图 6), 由 2005 年的 18.77 上升到 2013 年的 41.92, 2014 年下降为 36.81。单一的发展能力指数说明青海省经济发展能力逐渐增强, 但结合青海省目前处于严重不可持续状态 (图 1), 综合反映出青海省的经济发展主要依赖于对各种自然资源和能源的过度开发和消耗, 其经济发展模式不可持续。

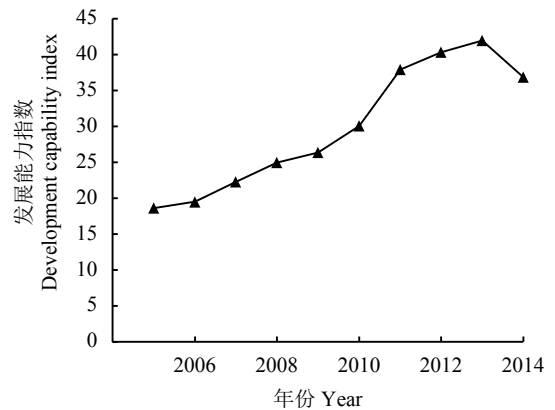


图 6 青海省发展能力

Figure 6 Development capability of Qinghai Province

3.6 研究区可持续发展状态空间变化

为了进一步分析研究区可持续发展的空间差异性及其变化, 分别计算了 2005–2014 年青海省各县的生态足迹指数, 根据可持续性分级标准 (表 1),

确定各县的可持续发展状态，通过 ARCGIS 分析其空间变化，总体来说，研究区处于不可持续的区域主要集中在东部的市区及其周边县域，且范围区域在不断扩大(图 7)；2011 年之后不可持续发展区域主要呈现由北向东的带状分布。时空分布上，2005 年研究区绝大部分区域处于强可持续发展状态，其中西宁市、门源县、化隆县、大通县、互助县、湟源县、湟中县、贵德县、尖扎县、乐都县、平安县、民和县、循化县处于严重不可持续状态，共和县、贵南县、同仁县和同德县处于不可持续发展状态，其余县域处于弱可持续发展状态；2006 年自治州直辖市和同仁县转变为严重不可持续发展状态，泽库县和海晏县转变为不可持续发展状态；2007 年没有发生变化；2008 年海晏县变为严重不可持续发展状态，兴海县、刚

察县和河南县转变为不可持续发展状态；2009 年格尔木市转变为不可持续发展状态；2010 年贵南县和同德县转变为严重不可持续发展状态，德令哈市转变为不可持续发展状态；2011 年刚察县、共和县、兴海县和泽库县转变为严重不可持续发展状态，祁连县、天峻县、乌兰县、玛沁县、班玛县、囊谦县和玉树县转变为不可持续发展状态；2012 年乌兰县转变为严重不可持续发展状态，称多县转变为不可持续发展状态；2013 年都兰县、甘德县转变为不可持续发展状态，格尔木市、河南县转变为严重不可持续发展状态；2014 年青海省的生态足迹指数有所回升，对应的县域的可持续发展状态有所好转，格尔木市、乌兰县和刚察县由严重不可持续发展状态转变为不可持续发展状态，都兰县、天峻县、甘德县和班玛县

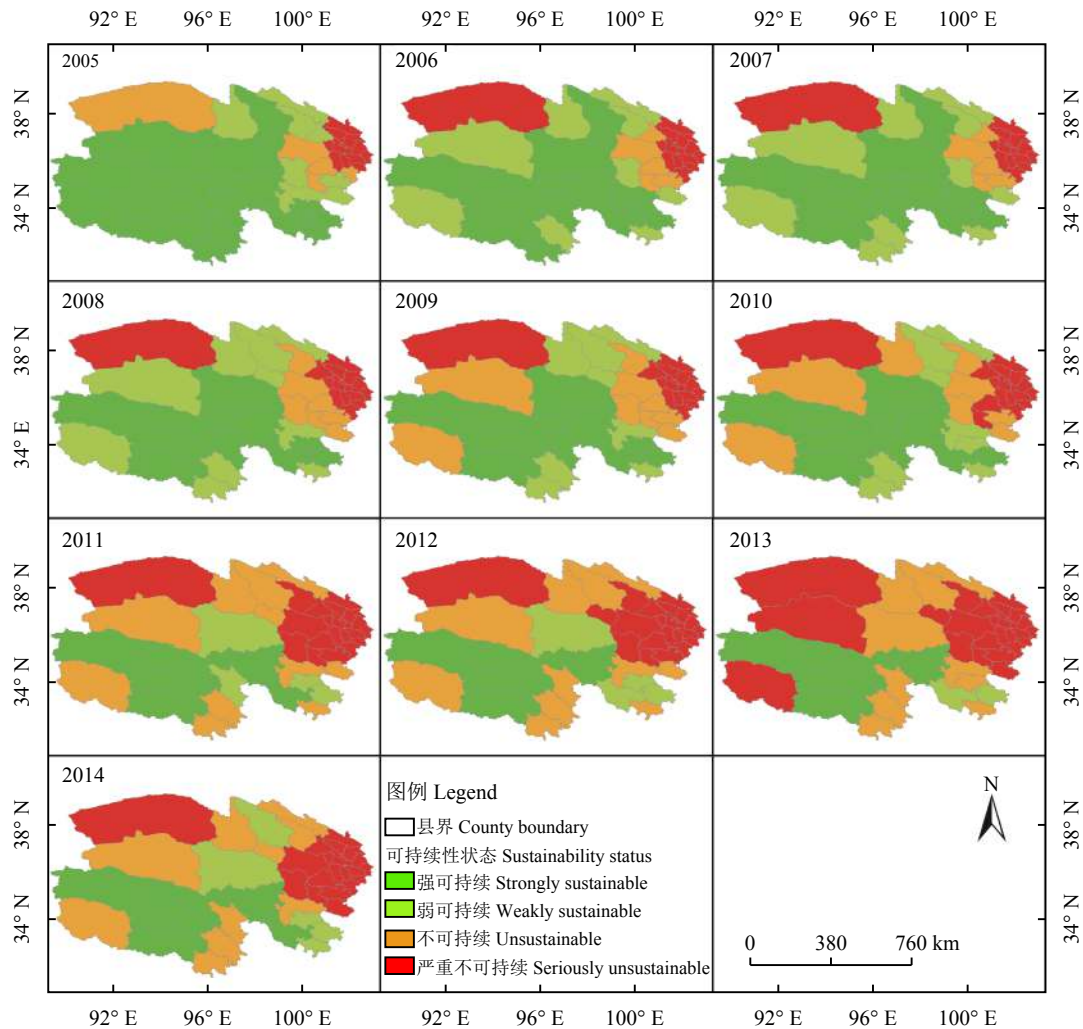


图 7 青海省各县可持续发展状态

Figure 7 Sustainable development of the state by county

转变为弱可持续发展状态。

当 $SLOPE < 0$ 时，表明可持续状态出现恶化，值越大，恶化趋势越严重；当 $SLOPE = 0$ ，表明可持续状态未改变；当 $SLOPE > 0$ 时，表明可持续状态有所好转。2014–2015 年青海地区的 $SLOPE \geq 0$ ，反映出青海地区可持续发展压力增大，可持续发展状态的恶化趋势逐渐加剧 (图 8)。10 年内青海西南部 (除格尔木市外) 和东部地区的西宁市及其周边县域可持续发展状态基本未发生改变，其中西南部长处于强可持续状态，东部地区长期处于严重不可持续发展状态；北部和东南大部分地区可持续发展状态持续恶化，经历了由强可持续–弱可持续–不可持续–严重不可持续的发展状态的变化 (图 7、图 8)。

4 讨论

生态足迹指数由生态承载力和生态足迹决定，研究结果发现青海省的生态承载力基本不变，其生态足迹指数的下降是由生态足迹增长引起的，表明青海省的经济、社会等发展对资源消耗量较大且快速增加，对环境的压力日益加剧。

青海省的万元 GDP 生态足迹呈现下降趋势，说明青海省的资源利用率在不断提高，但是与国内其他相对发达地区相比，如山西^[30]、福建^[29]，青海省的万元 GDP 生态足迹仍然处于较高水平，资源利用率还有待提高。

青海省的生态足迹多样性呈现减少的趋势，表明生态足迹在土地利用类型分配中不均匀性加强，在某一类或多类土地类型中的分配相对集中，2005–2010 年青海省在发展过程中对土地利用主要趋向于建筑用地和能源用地，草地和耕地所占的比例逐渐减小 (表 2)；2011 年以后土地利用更加集中于建筑用地，草地和耕地的比例逐渐趋于稳定，土地分布的不均匀性加强，因此，2010–2011 年生态足迹多样性指数出现迅速下降的趋势，2011 年之后下降速度有所减缓。

发展能力指数计算公式反映出发展能力与生态足迹以及生态足迹多样性指数均呈正相关的关系。青海省的发展能力指数的增加是由人均生态足迹上升引起的，说明青海省是以大量的消耗资源来提高经济发展的 (图 2)。青海省的生态足迹已严重超出了生态承载力范围，为了保护人类赖以

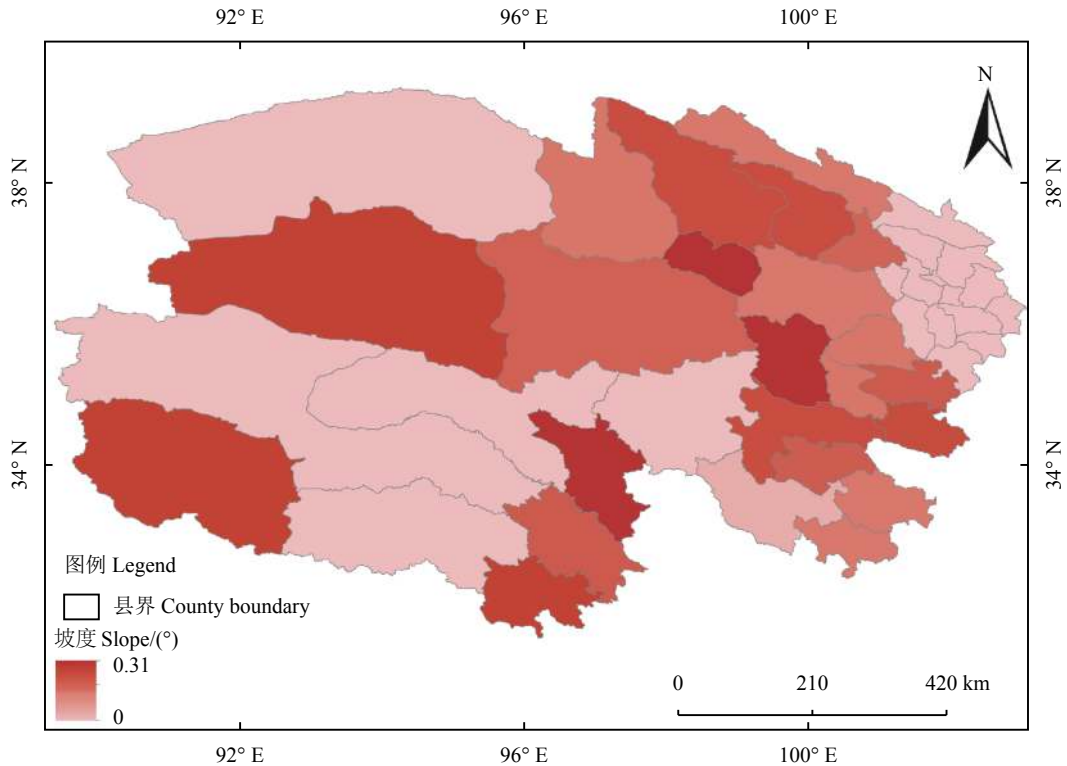


图 8 青海地区 2005–2014 年可持续发展状态变化趋势
Figure 8 Trends of Sustainable Development in Qinghai Region change from 2005 to 2014

表 2 生态足迹在各土地利用类型中的分配比例
Table 2 Distribution ratio of ecological footprint among land use types

年份 Year	耕地 Cultivated Land/%	林地 Woodland/%	草地 Grassland/%	水域 Watersh/%	能源用地 Energy land/%	建筑用地 Building land/%
2005	18.73	0.08	14.33	0.02	28.37	38.47
2006	15.16	0.07	12.54	0.04	27.10	45.08
2007	14.69	0.06	10.77	0.03	31.54	42.91
2008	13.77	0.05	9.83	0.03	34.47	41.84
2009	13.12	0.05	9.49	0.01	34.80	42.52
2010	12.70	0.04	8.15	0.02	34.29	44.80
2011	9.95	0.02	6.69	0.03	32.34	50.96
2012	9.39	0.02	6.50	0.04	31.48	52.57
2013	9.71	0.02	6.43	0.04	30.29	53.50
2014	9.18	0.02	6.26	0.07	30.76	53.70

生存和发展的生态系统，应该控制生态足迹的增加，尽量减少对资源的消耗和浪费；因此，应通过增加青海省土地利用类型的种类，均等利用各种类型的土地资源，提高青海省的发展能力。

青海省东部是以西宁市为中心的农业区，人口和城镇化密集，发展条件更加便利，是工业化和城镇化的核心地区；西部的柴达木盆地矿产资源丰富，是青海省主要的工矿区，经济发展迅速。有研究表明，以西宁市为中心的东部地区和以格尔木为中心的柴达木盆地经济发展水平高^[36]；快速发展带来的人口聚集、资源消耗以及环境压力必然导致东部地区不可持续发展状态的出现。西部和南部均为牧业区，南部是全省降水量最大的地区，也是长江、黄河、澜沧江的发源地，经济发展相对落后，且自然条件恶劣，大部分地区处于海拔 4 000 m 以上的高寒地区，资源开发难度大^[36]。这些地区大部分目前仍处于可持续发展状态，但囊谦、玉树、称多等部分县已经处于不可持续发展状态。

相关研究表明，国内其他地区也处于严重的不可持续发展状态，王志杰和高洁^[37]利用能值生态足迹对华东地区、华中地区及西南地区区域可持续发展状态进行了比较，研究发现华东地区生态超载最为严重，其次是华中地区和西南地区。张海莹^[38]、乔卫芳和肖春艳^[39]研究发现河南省经济发展超过了自然资源的可承载能力，经济发展速度较快的中部和北部地区不可持续发展状态更为严重。许

静和孙钰^[40]研究结果为天津市处于严重的生态赤字状态，2006–2015 年生态环境处于不可持续发展状态。赵正等^[41]研究发现北京市具有严重的生态赤字，生态负荷严重超标，经济发展处于严重的不可持续状态。郭文等^[42]研究发现江苏省生态压力指数增大，超出了极不安全边界，生态环境和经济的可持续发展受到了严重的影响。

青海省依托资源优势，主要以粗放的、掠夺式的资源消耗为主的工业实现了经济的增长，但高污染、高耗能的工业发展导致生态环境进一步恶化，使得青海省的生态承载力远低于生态足迹，处于不可持续发展状态。为使青海地区维持可持续发展可以通过建立生态补偿机制对生态受损区进行补偿。对西部和南部牧业欠发达地区和重要生态功能区实施政策补偿，通过政策倾斜和制定优惠措施，以生态产业带动地区经济发展，激发该地区保护环境积极性和主动性，支持欠发达地区发展生态型产业。对于西部的柴达木盆地，矿产丰富，可以通过技术补偿，政府组织开展技术服务，提供技术指导，培训技术人才和管理人才，鼓励技术创新，依靠科技进步提高资源利用效率，遏制资源浪费，最大限度的发挥资源优势及其生态效益。对于以西宁为中心的东部地区，由于城市发展对生态的破坏严重，可以实施资金补偿，由政府购买生态效益，财政部门可以设立专项生态补偿资金，对于生态建设和生态恢复以及环境治理

项目提供资金支持和奖励, 改善生态环境。

5 结论

研究表明, 2005–2014 年青海省整体上处于不可持续发展状态, 且处于不可持续发展的区域面积在不断扩大, 主要集中在市区及其周边的县域。

基于能值的生态足迹模型中考虑了区域能值密

度, 可定量反映地区内资源的实际供给能力和对资源的实际消耗, 能够更有效地定量评估区域可持续发展状态。

青海省处于不可持续的经济发展模式, 因此通过调整土地利用结构, 建立生态补偿机制, 平衡生态环境和经济发展之间的关系, 促进该地区自然–生态–社会经济可持续发展。

参考文献 References:

- [1] 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.
- [2] ZHAO S, LI Z, LI W. A modified method of ecological footprint calculation and its application. *Ecological Modelling*, 2005, 185(1): 65-75.
- [3] SICHE R, PEREIRA L, AGOSTINHO F, ORTEGA E. Convergence of ecological footprint and emergy analysis as a sustainability indicator of countries: Peru as case study. *Communications in Nonlinear Science & Numerical Simulation*, 2010, 15(10): 3182-3192.
- [4] 李文龙, 余翠, 赵新来, 梁天刚, 张金林, 许静. 基于能值生态足迹模型的青藏高原东部高寒牧区可持续发展研究. *草业学报*, 2017, 26(4): 1-14.
- LI W L, YU C, ZHAO X L, LIANG T G, ZHANG J L, XU J. Sustainable development of the alpine pastoral region in the eastern Tibetan plateau based on the emergy ecological footprint model. *Acta Prataculturae Sinica*, 2017, 26(4): 1-14.
- [5] 刘同德. 青藏高原区域可持续发展研究. 天津: 天津大学博士学位论文, 2009.
- LIU T D. Study on sustainable development in Qinhai-Tibet plateau. PhD Thesis. Tianjin: Tianjin University, 2009.
- [6] 付伟. 青藏高原地区资源可持续利用初步研究. 兰州: 兰州大学博士学位论文, 2014.
- FU W. A preliminary study on the resource sustainable utilization of Qinhai-Tibet plateau region. PhD Thesis. Lanzhou: Lanzhou University, 2014.
- [7] 余翠. 基于能值生态足迹模型的青藏高原地区可持续发展研究. 兰州: 兰州大学博士学位论文, 2017.
- YU C. Sustainable development of the Tibetan plateau based on the emergy ecological footprint model: Taking Qinghai and Tibet as an example. Master Thesis. Lanzhou: Lanzhou University, 2017.
- [8] 马彪. 青藏高原牧区农业优势产业发展研究. 兰州: 西北民族大学硕士学位论文, 2009.
- MA B. Research on developing agriculture superiority industries in Qinghai-Tibet pastoral area. Master Thesis. Lanzhou: Northwest University for Nationalities, 2009.
- [9] 李杰兰, 陈兴鹏, 王雨, 张子龙. 基于系统动力学的青海省可持续发展评价. *资源科学*, 2009, 31(9): 1624-1631.
- LI J L, CHEN X P, WANG Y, ZHANG Z L. Research on the sustainable development in Qinghai Province based on system dynamics. *Resources Science*, 2009, 31(9): 1624-1631.
- [10] 赵莺燕, 于法稳. 青海省经济与生态环境协调发展评价研究. *生态经济*, 2015, 31(8): 63-66.
- ZHAO Y Y, YU F W. The evaluation of coordinated development of economic and eco-environment in Qinghai Province. *Ecological Economy*, 2015, 31(8): 63-66.
- [11] 周陆生, 刘蓓. 青海省含氧量分布的基本特征. *青海气象*, 1999, 4(4): 2-4.
- ZHOU L S, LIU B. Basic characteristics of oxygen content distribution in Qinghai Province. *Journal of Qinghai Meteorology*, 1999, 4(4): 2-4.
- [12] 司慧娟, 付梅臣, 袁春, 周伟. 青海省土地利用结构信息熵时空分异规律及驱动因素分析. *干旱区资源与环境*, 2016, 30(6): 38-42.
- SI H J, FU M C, YUAN C, ZHOU W. Temporal-spatial variation of information entropy of land use structure and its driving forces

- in Qinghai province from 1999 to 2013. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2016, 30(6): 38-42.
- [13] 辛学磊. 基于生态足迹模型的青海省土地利用总体规划研究. 北京: 中国地质大学硕士学位论文, 2012.
XIN X L. Research of the general land use planning of Qinghai Province based on the ecological footprint model. Master Thesis. Beijing: China University of Geosciences, 2012.
- [14] 钟荣凤. 青海省生态足迹演变动态及驱动力研究. 西宁: 青海师范大学硕士学位论文, 2014.
ZHONG R F. Analysis on dynamic evolution of the ecological footprint and driving force in Qinghai Province. Master Thesis. Xining: Qinghai Normal University, 2014.
- [15] ODUM H T. *Environmental accounting-emergy and environmental decision making*. New York: John Wiley, 1996.
- [16] 马进, 陈克龙, 曹生奎, 刘志杰, 赵志强, 韩艳莉, 苏茂新. 青海湖湿地生态系统能值分析研究. *湿地科学与管理*, 2011, 7(2): 22-25.
MA J, CHEN K L, CAO S K, LIU Z J, ZHAO Z Q, HAN Y L, SU M X. An emergy analysis of the wetland ecosystem in Qinghai lake. *Wetland Science & Management*, 2011, 7(2): 22-25.
- [17] 刘志杰, 陈克龙, 赵志强, 苏茂新, 韩艳莉. 基于能值分析的区域循环经济研究-以柴达木盆地为例. *水土保持研究*, 2011, 18(1): 141-145.
LIU Z J, CHEN K L, ZHAO Z Q, SU M X, HAN Y L. Evaluation of circular economy based on emergy theory: A case of Qaidam basin. *Research of Soil and Water Conservation*, 2011, 18(1): 141-145.
- [18] 马进. 基于能值分析的西宁市 2001-2011 年生态足迹研究. 西宁: 青海师范大学硕士学位论文, 2013.
MA J. Evaluation of ecological footprint to Xining City based on emergy analysis. Master Thesis. Xining: Qinghai Normal University, 2013.
- [19] HE J, WAN Y, FENG L, AI J Y, Wang Y. An integrated data envelopment analysis and emergy-based ecological footprint methodology in evaluating sustainable development: A case study of Jiangsu Province, China. *Ecological Indicators*, 2016, 70: 23-34.
- [20] 赵桂慎. *生态经济学*. 北京: 化学工业出版社, 2008: 93.
ZHAO G S. *Ecological Economics*. Beijing: Chemical Industry Press, 2006: 93.
- [21] 蓝盛芳, 钦佩, 陆宏芳. *生态经济系统能值分析*. 北京: 化学工业出版社, 2002.
LAN S F, QIN P, LU H F. *Emergy Analysis of Ecological Economic System*. Beijing: Chemical Industry Press, 2002: 62-76.
- [22] 王闰平. 基于能值的山西省农业生态系统动态分析. 长沙: 湖南农业大学硕士学位论文, 2009.
WANG R P. Emery-based analysis for the development of agro-ecosystem in Shanxi Province. Master Thesis. Changsha: Hunan Agricultural University, 2009.
- [23] 袁欢. 基于能值理论和生态足迹模型的区域可持续发展研究. 重庆: 西南大学硕士学位论文, 2011.
YUAN H. Research of regional sustainable development based on the emergy theory and ecological footprint model. Master Thesis. Chongqing: Southwest University, 2011.
- [24] 赵雪雁, 刘霜, 赵海莉. 基于能值分析理论的生态足迹在区域可持续发展评价中的应用: 以甘肃省为例. *干旱区研究*, 2011, 28(3): 524-531.
ZHAOX Y, LIU S, ZHAO H L. Application of ecological footprint in evaluating regional sustainable development based on energy analysis theory: A case study in Gansu province. *Arid Zone Research*, 2011, 28(3): 524-531.
- [25] CHEN B, CHEN Z M, ZHOU Y, CHEN G Q. Emergy as embodied energy based assessment for local sustainability of a constructed wetland in Beijing. *Communications in Nonlinear Science & Numerical Simulation*, 2009, 14(2): 622-635.
- [26] 孙东林, 刘圣, 姚成, 钦佩. 用能值分析理论修改生物承载力的计算方法-以苏北互花米草生态系统为例. *南京大学学报(自然科学)*, 2007, 43(5): 501-508.
SUN D L, LIU S, YAO C, QIN P. Improving the computation of bio-capacity by emergy theory: A case study of spartina al ternif lora Ecosystem. *Journal of Nanjing University(Natural Sciences)*, 2007, 43(5): 501-508.
- [27] 吴隆杰. 基于生态足迹指数的中国可持续发展动态评估. *中国农业大学学报*, 2005, 10(6): 94-99.
WU L J. Dynamic evaluation of China sustainable development based on the ecological footprint index. *Journal of China Agricultural University*, 2005, 10(6): 94-99.

- [28] 陈成忠, 林振山, 贾敦新. 基于生态足迹指数的全球生态可持续性时空分析. *地理与地理信息科学*, 2007, 23(6): 68-72.
CHEN C Z, LIN Z S, JIA D X. Spatiotemporal analysis on sustainable ecosystem in world based on ecological footprint index. *Geography and Geo-Information Science*, 2007, 23(6): 68-72.
- [29] 翁伯琦, 王义祥, 黄毅斌, 应朝阳, 黄勤楼. 福建省生态足迹和生态承载力的动态变化. *应用生态学报*, 2006, 17(11): 2153-2157.
WENG B Q, WANG Y X, HUANG Y B, YING Z Y, HUANG Q L. Dynamic changes of ecological footprint and ecological capacity in Fujian Province. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2006, 17(11): 2153-2157.
- [30] 秦奇. 基于生态足迹模型的山西省生态可持续性研究. 太原: 山西大学硕士学位论文, 2013.
QIN Q. The study of sustainable development of ecological in Shanxi Province based on the model of ecological footprint. Master Thesis. Taiyuan: Shanxi University, 2013.
- [31] 孙嘉平. 基于生态足迹法的玉树市土地生态承载力分析. 西宁: 青海民族大学硕士学位论文, 2016.
SUN J P. Analysis on land ecological capacity based on ecological footprint method in Yushu City. Master Thesis. Xining: Qinghai Nationalities University, 2016.
- [32] SHANNON C E, WEAVER W. The mathematical theory of communication. *Philosophical Review*, 1949, 60(3): 647-658.
- [33] 徐中民, 张志强, 程国栋, 陈东景. 中国 1999 年生态足迹计算与发展能力分析. *应用生态学报*, 2003, 14(2): 280-285.
XU Z M, ZHANG Z Q, CHENG G D, CHEN D J. Ecological footprint calculation and development capacity analysis of China in 1999. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2003, 14(2): 280-285.
- [34] 李龙男. 基于生态足迹的中国省级可持续发展能力比较研究. 长春: 吉林大学硕士学位论文, 2013.
LI L N. The Evaluation of sustainable development ability in Chinese regional level based on the ecological footprint. Master Thesis. Changchun: Jilin University, 2013.
- [35] ULANOWICZ R E. Growth and development: Ecosystem Phenomenology. *Estuaries*, 1986.
- [36] 鲍琴莲. 青海省社会经济发 展的实证分析. *青海师范大学学报(自然科学版)*, 2007(1): 19-22.
BAO Q L. Analysis on social-economic development of Qinghai Province. *Journal of Qinghai Normal University(Natural Science)*, 2007(1): 19-22.
- [37] 王志杰, 高洁. 能值生态足迹对我国区域可持续发展状态比较研究. *西南师范大学学报(自然科学版)*, 2013, 38(2): 54-60.
WANG Z J, GAO J. Comparative studies on regional sustainable development in China based on ecological footprint model. *Journal of Southwest China Normal University(Natural Science Edition)*, 2013, 38(2): 54-60.
- [38] 张海莹. 基于生态足迹模型的河南省经济可持续发展研究. *河南农业大学学报*, 2016(3): 441-446.
ZHANG H Y. Study of sustainable development evaluation of Henan Province based on ecological footprint model. *Journal of Henan Agricultural University*, 2016(3): 441-446.
- [39] 乔卫芳, 肖春艳. 基于生态足迹模型的河南省生态承载力评价研究. *生态经济(学术版)*, 2013(2): 52-54.
QIAO W F, XIAO C Y. Study on evaluation of ecological capacity in Henan Province based on ecological footprint model. *Ecological Economy*, 2013(2): 52-54.
- [40] 许静, 孙钰. 基于生态足迹的天津市可持续发展动态研究. *科技和产业*, 2017, 17(11): 17-23.
XU J, SUN Y. Dynamic analysis of sustainable development in Tianjin on ecological footprint. *Science Technology and Industry*, 2017, 17(11): 17-23.
- [41] 赵正, 高阳, 温亚利. 基于生态足迹模型的北京市可持续发展研究. *科技管理研究*, 2014(13): 205-208.
ZHAO Z, GAO Y, WEN Y L. Research on the sustainable development of Beijing: Based on ecological footprint model. *Science and Technology Management Research*, 2014(13): 205-208.
- [42] 郭文, 孙涛, 高明美. 基于生态足迹改进模型的生态安全及其预测研究. *环境科学与技术*, 2013(6): 172-176.
GUO W, SUN T, GAO M M. Ecological security and its prediction based on improved ecological footprint model. *Environmental Science & Technology*, 2013(6): 172-176.

(执行编辑 苟燕妮)