

## 基于能值生态足迹模型的西藏可持续发展评价

程丽<sup>1,2,3,4</sup> 方江平<sup>1,2,3,4\*</sup> 李超逸<sup>1,2,3,4</sup>

(1.西藏农牧学院 高原生态研究所; 2.西藏林芝高山森林生态系统国家野外科学观测研究站; 3.西藏高原森林生态教育部重点实验室; 4.西藏自治区生态安全联合实验室, 西藏林芝 860000)

**摘要** 经济社会快速发展导致了对资源快速消耗, 资源的快速消耗则导致了对于环境自身的压力与日俱增。运用能值生态足迹模型定量评价西藏能值生态足迹与承载力, 评价西藏生态系统的可持续发展性能。通过对西藏能值生态足迹与承载力及发展趋势进行测算、分析。结果发现: 2007~2017年 *EEF* 的变幅在 6.1955~7.26 hm<sup>2</sup> 之间, 持平缓上升趋势。*EEC* 变幅在 8.8017~6.5927 hm<sup>2</sup>。自 2016 年, 西藏生态承载力低于生态足迹, 呈不可持续发展状态; 在此基础上, 对调整生态环境与经济发展, 实施可持续发展战略提出有益意见。

**关键词** 能值; 生态足迹; 可持续发展

中图分类号: X821 文献标识码: A 文章编号: 2096-4781 (2019) 06-0642-08

DOI: 10.19707/j.cnki.jpa.2019.06.007

## Evaluation of Sustainable Development in Tibet Based on Emergy Ecological Footprint Theory

CHENG Li<sup>1,2,3,4</sup>, FANG Jiangping<sup>1,2,3,4\*</sup>, LI Chaoyi<sup>1,2,3,4</sup>

(1. Res. Institute of Tibet Plateau Ecology, Tibet Agriculture & Animal Husbandry University; 2. National Key Station of Field Scientific Observation & Experiment of Alpine Forest Ecology System in Nyingchi Tibet; 3. Key Laboratory of Forest Ecology of Tibet plateau, Ministry of Education; 4. United Key Laboratories of Ecological Security, Tibet Autonomous Region; Nyingchi Tibet, 860000, China)

**Abstract:** The rapid development of economy and society leads to the rapid consumption of sub-resources, and the rapid consumption of resources leads to the increasing pressure on environment itself. The emergy ecological footprint model was used to quantitatively evaluate the ecological footprint and carrying capacity of Tibet, and to evaluate the sustainable development performance of Tibet ecosystem in this paper. The ecological footprint, carrying capacity and development trend of energy value in Tibet were calculated and analyzed. The results showed that the range of *EEF* from 2007 to 2017 was 6.1955 to 7.26 hm<sup>2</sup>, and the trend of *EEF* increased slowly. *EEC* ranged from 8.8017 to 6.5927 hm<sup>2</sup>. Since 2016, the ecological carrying capacity of Tibet has been below its ecological footprint and is in an unsustainable state of development. On this basis, useful suggestions are put forward for adjusting the ecological environment and economic development and implementing the strategy of sustainable development.

**Key words:** Energy value, ecological footprint, sustainable development

收稿日期: 2019-08-08

作者简介: 程丽 (1994-) 女, 汉族, 山西运城人, 在读研究生, 主要从事可持续发展生态学的研究。

通讯作者: 方江平 (1967-), 男, 汉族, 安徽安庆人, 教授, 博士, 博士生导师。研究方向: 现主要从事高原区域生态规划教学与科研等工作。

基金项目: 国家重点研发计划 (2016YFC0502006); 西藏自治区重大科技专项 (Z2016C01G01/02); 西藏农牧学院研究生创新项目 (YJS2019—17)。

西藏自治区是“一带一路”战略赋予的国家重要生态屏障，且西藏自治区是青藏高原主体，高寒干旱，地势险峻，野生动植物资源丰富，是我国资源富集和生物多样性保护的重要区域<sup>[1]</sup>。目前，国内对西藏自治区的可持续发展状态定量研究成果较少，测算西藏自治区能值生态足迹和承载力，分析西藏自治区资源环境承载力水平，评价系统的可持续发展性能，有助于改善区域生态环境质量，提高区域生态经济发展水平。

能值生态足迹是对传统生态足迹模型的改进，克服了传统模型存在的部分缺陷<sup>[2]</sup>。可以将研究区域内生态足迹指数转化为统一的太阳能值进行比较计算<sup>[3]</sup>，同时可展现一定时间段内动态演化进程，计算结果更加接近真实的反应研究区域概况<sup>[4,5]</sup>。

21世纪以来，国内相继出现了许多基于这种方法的实证研究文献，吴景辉等<sup>[6]</sup>对齐齐哈尔市可持续发展进行研究，利用能值生态足迹模型对20世纪以来的十六年间的能值足迹变化进行计算分析，在得出齐齐哈尔市赤字趋势明显结论的基础上，通过分析能值生态足迹数据，发现齐齐哈尔市近几年的发展资源利用率明显提高，其经济发展对生态环境的压力逐年减小，为今后的可持续发展道路提供了可行措施。赵晟在2009年，首次站在国家生态安全层面上，评估生态现状。将能值理论与生态足迹法相结合，分析长时间内的生态足迹变化。结果表明中国已不能满足基本可持续性的要求，而韩国能够满足这一要求<sup>[7]</sup>。同时国内评价主要有周斌<sup>[8]</sup>以2008年开始近5年的阶段评估，分析我国的可持续发展程度。本文对西藏全区的可持续发展水平进行研究，利用能值生态足迹方模型对能值生态足迹与承载力变化进行计算分析，结合西藏的实际情况和现状，为提高西藏自治区可持续发展水平提供参考建议。

## 1 研究区域概况

西藏自治区在我国西南部，面积约122万 $\text{km}^2$ <sup>[9]</sup>。平均海拔在4000m以上，有着独特的自然生态和地理环境。在地形、地貌等的共同作用和影响下，造就了西藏自治区独特并且复杂的气候条件。在大体上，按多年观测的规律来说，西藏自治区的气候自东南向西北由暖热湿润向寒冷干旱呈递次过渡，呈西北严寒干燥、东南温暖湿润的特点<sup>[11]</sup>。尤其是藏南和藏北的气候差异巨大，藏南谷地温和多雨，年平均气温8℃；藏北高原为典型的大陆性气候，年平均气温0℃以下<sup>[12]</sup>。此外，各地降水量及季节不同，干季和雨季的分界非常明显，年降水量自东南低地的5000mm逐渐递减到西北的50mm<sup>[13]</sup>。

## 2 研究方法

### 2.1 能值生态足迹法

#### 2.1.1 EEF 测算方法

EEF的测算包括三大账户，分别是生物产品、能源和污染账户。在这三个账户中，生物账户包含的大多为我们日常可以接触到的农林牧副渔业等；能源账户包括水电、火电、地热等；污染账户包含废水、废气和固体废弃物<sup>[14]</sup>。基本公式为：

$$EEF = \sum_{i=1}^n \frac{Eef_i}{N} = \sum_{i=1}^n \frac{(eci/p_2)}{N} \quad (1)$$

在这个基本公式中，EEF所表示的是人均能值生态足迹，N所表示的是所在区域的常住总人口数， $Eef_i$ 为第*i*类消费项目的能值生态足迹， $eci$ 为第*i*类消费项目能值(emergy of consumption)， $p_2$ 为区域能值密度<sup>[16]</sup>。测算公式为： $p_2 = \text{区域总能值} / \text{区域总面积}$ 。

对于在区域总能值的计算中，因西藏位于内陆地区，不可能出现潮汐，故在计算中不可包含潮汐能。主要包括以下五种可再生资源，他们分别是太

阳辐射能、雨水化学能、雨水势能、风能和地球旋转能。在能值理论中，在区域的能值之中，如果他们都同属一种性质，则在他们其中去其中最大的那个值的能值，因此计算时只取前4者的最大值与地球旋转能之和<sup>[17,18]</sup>。

可再生资源的计算公式如下：

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

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

$$WE = SA \times AD \times k \times WS^3 \times (365.25 \times 24 \times 3600s) \quad (4)$$

$$EE = SA \times HF \quad (5)$$

以上公式中： $RE$  代表的是雨水化学能， $SA$  所表示的是研究区面积（ $m^2$ ）， $AR$  表示为年降雨量（ $m/yr$ ）， $RD$  在公式中为雨水密度（ $kg/m^3$ ）<sup>[16]</sup>， $G$  表示为吉布斯自由能（ $J/kg$ ）， $RP$  所表示的是雨水势能， $H$  在公式中的专属含义是云层平均海拔高度差（ $m$ ）， $g$  是众所周知的重力加速度（ $m/s^2$ ）， $WE$  表示的是风能， $AD$  所表示的是空气密度（ $kg/m^3$ ）， $k$  则为阻力系数， $WS$  是为平均风速（ $m/s$ ）， $EE$  表示的是地球旋转能， $HF$  表示的是热通量（ $J/(m^2 \cdot a)$ ）<sup>[18,19]</sup>。

从目前情况来看，西藏全区对于能源的消耗，品种相对较少，但是对于资源相对不足的西藏来说，大多数能源都需要从藏区以外的各地进行调运<sup>[20]</sup>，但是不再此之列的是电力资源。西藏的电力资源是可以做到自给自足的。且一些学者认为用地存在多元性<sup>[21]</sup>，在生态足迹账户中，耕、林、湿三种地形之间基本不存在重复，而且区域内的林和化石能源用地也是如此，不具有空间互斥性<sup>[22]</sup>，因此为了避免重复计算，在计算西藏能值生态足迹时，不计算煤炭、焦炭等化石能源的消耗。

### 2.1.2 EEC 测算方法

EEC 测算法表示的是人均能值生态承载力，而其计算只需要对可再生资源进行考虑即可，但是在

计算时还需要对生物多样性保护面积的 12% 进行扣除，它的计算公式为：

$$ec = \left( \frac{e}{p_1} \right) \times 0.88 \quad (6)$$

在这个公式当中： $ec$  在公式中所蕴含的含义是人均生态承载力； $e$  所表示的则为人均可再生资源能值（ $sej$ ）<sup>[16]</sup>； $p_1$  是地球能值密度（ $sej/(m^2 \cdot a)$ ）的表示字母；而根据我们的经验，我们的可再生能值应当与区域总能值保持一致。

### 2.2 生态足迹指数

在某一生态环境几乎相同的情况下，这一区域的生态承载力与足迹的差值在生态承载力中所占的比重便叫做生态足迹指数。也可以认为是以后可持续发展占现有生态承载力的比重。下列为其计算公式：

$$EFI = \frac{EC - EF}{EC} * 100\% \quad (7)$$

参考文献中多用生态足迹指数这一指标来评估区域可持续发展的大体情形。生态足迹指数能够在所谓客观的程度上很直接的说明人与自然，供给与需求的平衡发展的状况。

表 1 可持续发展程度划分

Tab. 1 Division of sustainable development

EFI	可持续性
$0 < EFI \leq 50\%$	弱可持续性
$50\% < EFI \leq 100\%$	强可持续性
$0 < EFI < 100\%$	不可持续性
$EFI \leq -100\%$	严重不可持续

为了研究方便，根据  $EFI$  将区域可持续发展程度分为 4 个等级<sup>[25]</sup>。当  $EFI > 0$  时，当它的指数越来越大时，则表明我们的可持续发展性也越来越强，他们是一种正向的关系；当  $EFI < 0$  时，则恰好与上述  $> 0$  时的状况刚好相反。

### 2.3 万元 GDP 生态足迹

它所指的是在具有一定限定条件的一个特定区域内，需要使用多少的生态足迹才能创造出 1 万元的 GDP。万元 GDP 生态足迹是一个对资源利用

效率进行反映的指标<sup>[18,26]</sup>，它的数值越大则成反比的表明资源利用效率越低<sup>[18]</sup>。下面所列的是万元GDP公式：

$$WEF = \text{区域人均生态足迹} / \text{区域人均GDP (万元)} \text{ ⑧}$$

## 2.4 数据来源

研究测算生态足迹所需的常住人口、土地利用、各类项目的生产、消费等数据来源于2008~2018年的《西藏统计年鉴》和《中国能源年鉴》，从国家

数据中心得到有关于藏区污染物排放与处理数据。能值折算系数、太阳能值转换率和生态承载力计算中的可再生资源数据来参考相关文献<sup>[26-30]</sup>。数据处理运用 SPASS 和 R 语言软件。

## 3 结果与分析

### 3.1 能值生态足迹供需情况分析

表2 2007~2017年西藏可再生资源能值

Tab. 2 Energy Value of Renewable Resources in Tibet 2007 to 2017

年份	太阳能辐射能/10 <sup>21</sup> J	雨水化学能/10 <sup>22</sup> J	雨水势能/10 <sup>22</sup> J	风能/10 <sup>21</sup> J	地球旋转能/10 <sup>22</sup> J	人均能值/10 <sup>21</sup> J
2007	5.03	4.57	1.20	1.01	3.56	7.969
2008	5.03	4.98	1.31	0.93	3.56	7.912
2009	5.03	3.61	0.95	1.01	3.56	7.808
2010	5.03	4.64	1.22	0.83	3.56	7.694
2011	5.03	4.55	1.20	0.79	3.56	7.618
2012	5.03	4.22	1.11	1.02	3.56	7.449
2013	5.03	4.69	1.23	0.98	3.56	7.389
2014	5.03	3.97	1.05	1.46	3.56	7.263
2015	5.03	4.66	1.21	1.17	3.56	7.132
2016	5.03	4.32	1.12	1.09	3.56	6.985
2017	5.03	4.64	1.19	0.99	3.56	6.453

测算能值生态承载力时，考虑到西藏自治区近30年的气候一直是保持稳定的，多年平均值设置为地球旋转和太阳辐射所产生的能量，这对测算结果没有实质性影响。依据式(2)~(5)，测算得到可再生资源能值(表2)。

通过分析计算数据(如表2)，最后我们的到的结果是：在西藏，可再生资源能值最高的是雨水化学能，除此之外顺序排列下来是：地球旋转能、太阳能辐射能、雨水势能、风能。且计算出2007~2017年人均能值呈持续下降趋势，10年间减少了 $1.516 \times 10^{21}$  sej，平均递减率为1.91%，表明西藏粗放式的发展模式及生产经营活动对资源的消耗快速增加，对生态环境的胁迫日益增强。

如图1所示，通过比较和分析各类消费账户的能值生态足迹，结果表明：各账户2007~2017年人均能值生态足迹中生物产品账户占比最大；能源账户呈波动式上升趋势，且较其他账户增幅明显，增幅为336%。其原因在于，随着西藏社会经济的快速发展，第二产业所占的比重越来越大，工业发展所消耗的资源越来越多，造成能源足迹显著上升，但能源账户人均能值较全国其他发达地区，仍处于较低水平，说明可再生能源的开发利用不充分。污染账户有增长趋势，但始终处于低位状态，原因在于自十八大以来，政府重视西藏的生态环境保护，严格管控污染物排放，使污染账户能值生态足迹处于可控状态。

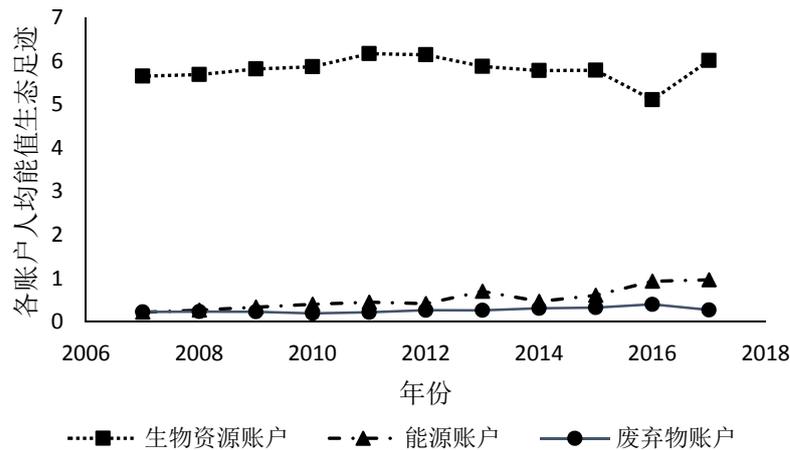


图1 西藏各类型账户人均能值生态足迹变化

Fig.1 Changes in the per capita energy value of various types of accounts in Tibet

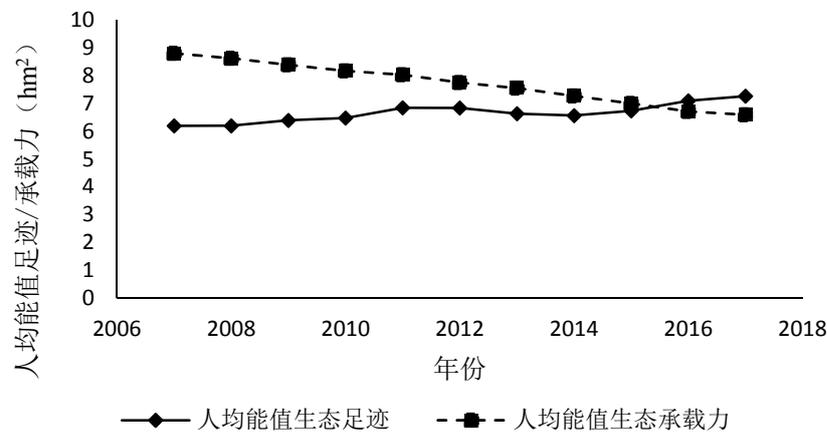


图2 2007~2017年西藏人均生态承载力和人均生态足迹变化

Fig.2 Per Capita Ecological Carrying Capacity and Per Capita Ecological Footprint Changes in Tibet from 2007 to 2017

如图2所示,10年间,西藏人均生态足迹呈波动上升趋势,由2007年的 $6.11 \text{ hm}^2/\text{人}$ 增加到2017年的 $7.09 \text{ hm}^2/\text{人}$ 。增加速率稳定缓慢;人均生态足迹增长速率呈下降趋势。由2007年的 $8.8017 \text{ hm}^2/\text{人}$ 下降到 $6.5927 \text{ hm}^2/\text{人}$ 。2016年出现负值,系统呈生态赤字,说明人类社会经济活动已经超过自然生态系统的负荷。

$EEF$ 的下降速度高于 $EEF$ 的增长率。2011~2015年 $EEF$ 增长速率明显降低,原因是国家重视推进西藏生态安全建设工作,自2011年,国家推进实施

“退耕还林”“退牧还草”,加强生态文明发展建设,生态环境得以修复;另一方面,从生态承载力的角度分析,西藏蕴藏的太阳能和水能资源丰富,但人均承载力却逐年缓慢降低,反映出研究区对可更新自然资源开发有限,未能实现效益最大化。

### 3.2 生态足迹指数结果分析

2007~2017年,10年间西藏生态足迹指数变化趋势如图3所示,生态足迹指数与生态可持续性成正向关系,生态足迹指数呈连续且持续下降趋势,这说明西藏的生态可持续性已经在逐渐减弱了,使

得其不可持续性发展逐渐增强。西藏的可持续发展状态变化可分为两个阶段：2007~2015 年，生态足迹指数大于 0 但小于 50%，处于弱可持续状态；2016

年至 2017 年；生态足迹指数小于 0 但小于 50%，处于不可持续发展状态。

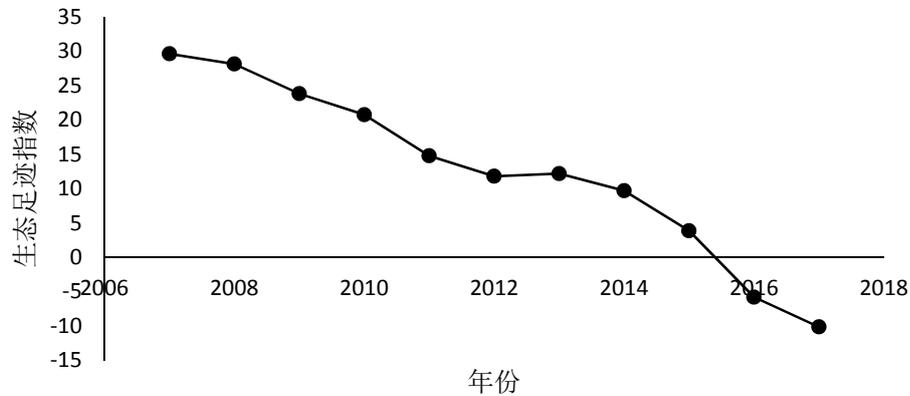


图 3 2007~2017 年西藏生态足迹指数变化趋势

Fig. 3 Trends in Tibet's Ecological Footprint Index from 2007 to 2017

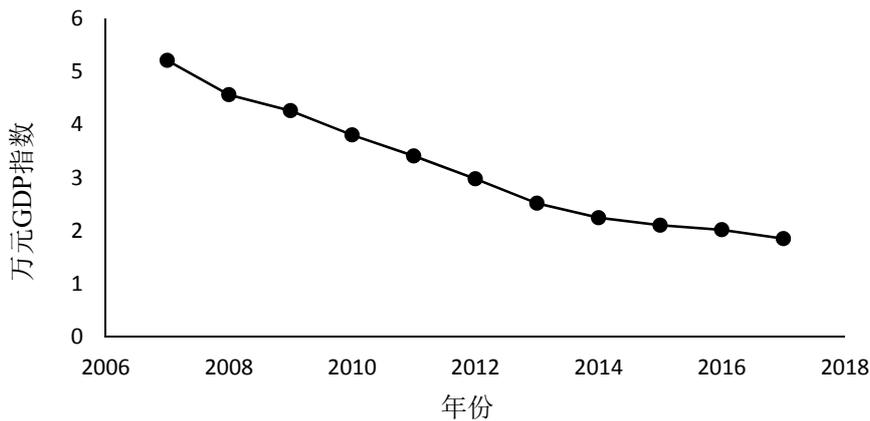


图 4 2007~2017 年万元 GDP 变化趋势

Fig. 4 Trends in the GDP of RMB 10,000 in Tibet from 2007 to 2017

### 3.3 万元 GDP 生态足迹结果分析

如图 4 所示，2007~2017 年间，西藏万元 GDP 呈下降趋势，自 2007 年的 5.2 hm<sup>2</sup>/万元下降至 2017 年的 1.84 hm<sup>2</sup>/万元。表明资源利用率不断提高。资源利用方式有所改善，经济发展造成的生态代价在逐渐减小。但与国内其他地区如齐齐哈尔市 2017 年的 1.75 hm<sup>2</sup>/万元<sup>[6]</sup>，及山东省 2016 年的 0.75 hm<sup>2</sup>/万元<sup>[30]</sup>相比，西藏的万元 GDP 仍处于较高水平，资源利用率和发展水平有待进一步提高。

## 4 西藏可持续发展评估及对策

### 4.1 评估

根据上述情况以及计算的结果所得出的评估：从生态足迹的构成来看（图 1），2007~2017 年人均能值生态足迹中生物产品账户占比最大；能源账户呈波动式上升趋势，且较其他账户增幅明显，增幅为 336%。但能源账户人均能值较全国其他发达地区，仍处于较低水平，说明可再生能源的开发利用不充分。污染账户有增长趋势，但始终处于低位

状态。

生态足迹指数的研究表明,生态足迹指数不断下降,不可持续性增强,2016年之前,研究区处于弱可持续发展状态,但在2016年之后,生态足迹指数出现负值,处于不可可持续发展状态。

西藏自治区的万元GDP生态足迹呈现下降趋势,2007~2017年间,由5.2 hm<sup>2</sup>/万元下降至1.84 hm<sup>2</sup>/万元。表明资源利用率不断提高。资源利用方式有所改善,经济发展造成的生态代价在逐渐减小。但是与国内其他相对发达地区相比,西藏的万元GDP生态足迹还是在较高水平的,这说明西藏的资源利用率还在在一个较低的水平上,我们可以通过技术进步,来提高其资源利用率。

通过对2007~2017年10年间的人均能值生态足迹与生态承载力的计算,研究区开始出现生态赤字,并呈现赤字增长趋势,为了避免对生态环境的进一步消耗和破坏,应尽快采取有效措施,遏制资源过度消耗的现状。

#### 4.2 对策

根据以上所得数据,西藏自2016年出现生态负增长化,透支生态环境,使其总体表现出来的都是不可持续的发展状况,怎么样才能将产业与生态结合在一起的可持续生态产业发展壮大,将成为西藏下一步经济发展的新增长点以及保护脆弱的生态环境的下一步重要举措,现提出如下建议:

提高资源利用率,近几年生态足迹中废弃物的数据所占比重越来越大,为了满足西藏生态可持续发展的需要,应合理处理生产生活中产生的废弃物,将之转移到另外的系统中循环使用,加强整体功能。

着重开发清洁资源,西藏蕴藏着丰富的资源,在未来的发展中,加大对丰富的水力资源和地热资源的开发和利用,进一步减少社会经济发展对化石能源及其他不可再生能源的依赖和消耗,实现当地经济发展与环境保护并重。

调整产业结构。当地畜牧业占据主导地位,应在传统畜牧业的基础上,结合本土特色产业,创造出具有创造力和生产力的特色产业,扩大品牌优势,增强经济活力。此外也要注重林下资源的培育和特色农产品种植,整体提高生产力水平,促进该地区自然-生态-社会经济可持续发展。

#### 参考文献:

- [1] 严茂超, HTODUM. 西藏生态经济系统的能值分析与可持续发展研究[J]. 自然资源学报, 1998(02): 20-29.
- [2] 倪瑛, 王伟. 基于能值分析的生态足迹模型改进及应用——以我国西南地区为例[J]. 云南财经大学学报, 2013, 29(02): 129-135.
- [3] 范玮, 张丽, 李惠芳, 等. 生态足迹研究现状及展望[J]. 四川林业科技, 2019, 40(01): 87-91.
- [4] 章锦河, 张捷. 国外生态足迹模型修正与前沿研究进展[J]. 资源科学, 2006(06): 196-203.
- [5] 方恺. 环境足迹的指标分类与整合范式. 生态经济, 2015, 31(7): 22-26.
- [6] 吴景辉, 王耕, 于大海, 等. 基于能值-生态足迹模型的齐齐哈尔市可持续发展水平分析[J/OL]. 资源与产业: 1-10[2019-04-03].
- [7] 赵晟, 吴常文. 中国、韩国1980~2006年能值足迹与能值承载力[J]. 环境科学学报, 2009, 29(10): 2231-2240.
- [8] 周斌, 陈虎. 基于能值足迹模型的我国生态经济可持续发展分析[J]. 商业时代, 2014(05): 15-16.
- [9] 西藏的生态建设与环境保护[J]. 中国农村科技, 2012(01): 60-67.
- [10] 德宗姬, 强久卓玛. 西藏自治区冬小麦栽培技术要点[J]. 乡村科技, 2018(34): 74-75.
- [11] 郑度, 李炳元. 青藏高原自然环境的演化与分异[J]. 地理研究, 1990(02): 1-10.
- [12] 李海东. 雅鲁藏布江流域风沙化土地遥感监测与植被恢复研究[D]. 南京林业大学, 2012.
- [13] 贺桂芹. 西藏高寒湿地生态系统服务功能价值评估及湿地保护对策研究[D]. 西北农林科技大学, 2007.
- [14] 尚海龙, 潘玉君. 西藏牧区能值生态足迹测度与互动分析[J]. 科学技术与工程, 2019, 19(02): 51-58.
- [15] 李萌. 煤矿区土地复垦与生态承载力分析[D]. 中国地质大学(北京), 2012.
- [16] 曹威威, 孙才志. 能值生态足迹模型的改进——以海

- 南为例[J]. 生态学报, 2019, 39(01): 216-227.
- [17] 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[D]. 兰州大学, 2017.
- [18] 李文龙, 魏巍, 宋瑜, 等. 基于能值生态足迹与灰色预测模型的西藏可持续性评价[J]. 草地学报, 2019, 27(03): 702-710.
- [19] 李文龙, 余翠, 赵新来, 等. 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[J]. 草业学报, 2017, 26(04): 1-14.
- [20] 鄧海杰. 资源环境约束下的西藏能源产业发展战略研究[D]. 北京理工大学, 2016.
- [21] 宫盛男, 张玉坤, 张睿, 等. 基于打破“空间互斥性”假设的既有城市生态足迹分析研究. 城市发展研究, 2018, 25(1): 7-14.
- [22] 方恺, 段峥. 全球主要国家环境可持续性综合评估--基于碳、水、土地的足迹-边界整合分析. 自然资源学报, 2015, 30(4): 539-548.
- [23] 宁伟. 黑龙江省生态足迹动态变化与预测研究[D]. 山东师范大学, 2010.
- [24] 许静. 基于能值生态足迹方法的青藏高原地区可持续发展评价——以青海省为例[A]. 中国草学会. 2018 中  
 .....
- (上接第 631 页)
- [29] 董东平, 叶永忠. 河南外来入侵植物区系成分与成灾机制[J]. 河南科学, 2007(5): 765-769.
- [30] 胡仁勇, 丁炳扬, 陈贤兴, 等. 温州地区外来入侵植物的种类组成及区系特点[J]. 温州大学学报(自然科学版), 2011, 32(3): 18-25.
- [31] 闫小玲, 寿海洋, 马金双. 浙江省外来入侵植物研究[J]. 植物分类与资源学报, 2014, 36(1): 77-88.
- [32] 寿海洋, 闫小玲, 叶康, 等. 江苏省外来入侵植物的初步研究[J]. 植物分类与资源学报, 2014, 36(6): 793-807.
- [33] 吴征镒. 中国植被[M]. 北京: 科学出版社, 1980.
- [34] 严岳鸿, 邢福武, 黄向旭, 等. 深圳的外来植物[J]. 广西植物, 2004, 24(3): 232-238.
- [25] 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[J]. 地理与地理信息科学, 2007, 23(6): 68-72.
- [26] 冀冰. 基于生态足迹模型的山西省森林资源可持续发展评价[D]. 内蒙古农业大学, 2014.
- [27] 蓝盛芳, 钦佩. 生态系统的能值分析[J]. 应用生态学报, 2001, 12(1): 129-131.
- [28] 高新才, 马丽. 能值生态足迹模型应用: 以甘肃省武威市为例[J]. 西北民族大学学报: 哲学社会科学版, 2014, 2: 104-110.
- [29] He J, Wan Y, Feng L, et al. An integrated data envelopment analysis and emergy-based ecological footprint methodology in evaluating sustainable development, a case study of Jiangsu Province, China [J]. Ecological Indicators, 2016, 70: 23-34.
- [30] 宋善允, 王鹏祥. 西藏气候 [M]. 北京: 气象出版社, 2014.
- [31] 王建事, 程钰. 基于生态足迹的山东省可持续发展研究[J]. 中国环境管理干部学院学报, 2018, 28(03): 34-37.
- [35] 耿宇鹏, 张文驹, 李博, 等. 表型可塑性与外来植物的入侵能力[J]. 生物多样性, 2004, 12(4): 447-455.
- [36] 刘建, 李钧敏, 余华, 等. 植物功能性状与外来植物入侵[J]. 生物多样性, 2010, 18(6): 569-576.
- [37] 邹奎, 黄胜君. 东北地区植物花色类别与传粉者之间的相关性[J]. 辽东学院学报(自然科学版), 2014, 21(2): 112-114.
- [38] Machado I C, Lopes A V. Floral traits and pollination systems in the Caatinga, a Brazilian tropical dry forest [J]. Annals of Botany, 2004. 94: 365-376.
- [39] 梁颖怡, 庞学群, 王艇. 果实类型多样性的形成机制和进化[J]. 植物科学学报, 2017, 35(6): 912-924.

审稿人：潘刚