

基于能值生态足迹的干旱农牧交错带山丹县 2009—2018 年可持续发展特征

申海宁, 罗永忠*

(甘肃农业大学 林学院, 甘肃 兰州 730070)

摘要:为研究气候变化和人类活动对山丹县近 10 a 社会经济可持续发展状态的影响,利用能值生态足迹模型计算分析相关指标。结果表明,10 a 间该县人均能值生态足迹显著增加,以 20.57% 的增幅由 2009 年的 3.84 hm² 上升为 2018 年的 4.63 hm²,可耕地组分占比最大,为 78.15%;人均能值生态承载力从 2009 年的 3.15 hm² 持续下降到 2018 年的 2.77 hm²,10 a 间降幅达到 11.90%;该县 10 a 间均呈生态赤字,可持续发展指数始终<0.5,10 a 间下降了 16.84%。不可持续状态在 10 a 间不断恶化,生态环境压力逐渐加重,因此调整其产业结构和加大生态保护力度非常重要。该结果为促进山丹县生态环境和经济协调发展提供了科学决策支持及参考。

关键词:山丹县;生态赤字;可持续发展;生态安全

中图分类号:F307.2

文献标志码:A

文章编号:1001-7461(2023)04-0295-09

Sustainable Development Characteristics of Shandan County in Arid Farming-Pastoral Ecotone from 2009 to 2018 Based on Energy Ecological Footprint

SHEN Hai-ning, LUO Yong-zhong*

(College of Forestry, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, Gansu, China)

Abstract: In order to study the impact of climate change and human activities on social and economic sustainable development in Shandan County from 2009 to 2018, this study calculated and analyzed related indicators using energy ecological footprint model. The results showed that the per capita ecological footprint of the county increased significantly during the study period, with an increase of 20.57% from 3.84 hm² in 2009 to 4.63 hm² in 2018. The proportion of cultivated land (78.15%) in the total per capita ecological footprint was the largest. The per capita ecological capacity decreased from 3.15 hm² in 2009 to 2.77 hm² in 2018, a decline of 11.90% in 10 years. The county had been in ecological deficit for 10 years, and the sustainable development index was always less than 0.5, decreased by 16.84% in 10 years. The unsustainable state had been deteriorating in the past 10 years, and the pressure on the ecological environment had been increasing gradually. Therefore, it is very important to adjust the industrial structure and strengthen the ecological protection. The results provide scientific decision support and reference for promoting the coordinated development of ecological environment and economy in Shandan County.

Key words: Shandan County; ecological deficit; sustainable development; ecological security

生态环境为人类社会的生存和发展提供了保障^[1],人类必须生存于生态系统的承载力范围内,才能实现可持续发展^[2]。人口迅速增长对资源与社会

的需求急剧上升,人与自然能否和谐相处,生态安全能否保证,是可持续发展的研究热点^[3-5]。生态足迹(ecological footprint)最早由加拿大学者 William

收稿日期:2022-05-04 修回日期:2022-06-08

基金项目:甘肃省林业和草原局科技项目(XZ20190205)。

第一作者:申海宁。研究方向:水土保持与荒漠化防治。E-mail:2577459061@qq.com

*通信作者:罗永忠,教授,博士。研究方向:水土保持与荒漠化防治。E-mail:493517987@qq.com

Rees 于 1992 年提出,是指某地区人口生产生活所需要的生产性土地和水域的面积,以及吸纳这些人口所产生的废弃物所需要的土地面积之和^[6]。该模型被用于商业^[7]、旅游业^[8]、农业^[9-12]。但该模型在考察不同国家与地区的生态状况时用的是全球平均生产力,忽略了各地区间真正的生态比较优势,无法反映各地区真实的生物生产性面积需求的大小,并且在计算时采用波动较大的均衡因子和产量因子。能值生态足迹(emergetic ecological footprint)是指某一国家或地区人口所能获得的自然资源与消耗的各种资源以及消耗这些资源时所产生的废弃物对应的能值面积^[13]。该方法将自然资源转换成能值进行比较,更真实地描述了生态足迹的情况,反映了生物生产性面积的大小,同时,在计算中采用了更稳定的能值转换率、能值密度等参数,结合可持续发展指数,更能反映区域特征以进行可持续发展的研究^[14-16],填补了生态足迹模型的不足。张芳怡等^[17]、赵雪雁等^[18]学者分别用传统生态足迹模型和能值生态足迹模型分析了研究区的生态足迹,发现 2 种生态足迹模型差异较小,而能值生态足迹模型能更真实地反映研究区域生态安全状况。

山丹县位于河西走廊中部最细长地带,素有“甘凉咽喉,走廊蜂腰”之称,北邻巴丹吉林沙漠,南毗祁连山,决定着受荒漠化侵袭最为严重的武威及拥有大面积绿洲的张掖的生态质量,对甘肃省、我国北方地区乃至全国的土地荒漠化防治发挥着至关重要的作用。同时山丹县为我国重要的干旱区农牧交错带,自然条件恶劣,降雨少,年均降雨量仅 187.7 mm,风大沙多,过度放牧及垦荒等造成的土地人为破坏极严重。近年来,随着人类活动的加剧,进一步加大了环境冲突,自然灾害频发,林、草植被不断退化,荒漠化风险日增,生态极为脆弱^[19],导致该地区社会经济可持续发展状态极不稳定。近 10 a 间该地区社会经济发展可持续状态发生了较大的改变,而涉及该变化特征的研究还较少。如何保护当地生态环境,实现经济、社会的可持续发展是该县面临的重大难题。本研究基于能值生态足迹模型,分析 2009—2018 年山丹县的能值生态足迹、能值生态承载力和能值生态盈亏,结合可持续发展指数,综合评估了山丹县生态的可持续发展能力。该结果为促进山丹县生态环境和经济协调发展提供了科学决策支持,为探索干旱区绿色发展的新路径提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

山丹县地处甘肃西部河西走廊中段,东邻永昌,

西靠民乐,南以祁连山与青海省为界,北与内蒙古自治区阿拉善右旗接壤。位于 $100^{\circ}41' - 101^{\circ}42' E$, $37^{\circ}50' - 39^{\circ}03' N$,东西宽 89 km,南北长 136 km,平均海拔 2 300 m,总面积 5 402.43 km²。该县地处高原高寒地带,全境属大陆性高寒干旱气候,太阳辐射强,日照时数长,气温低,昼夜温差大,降水量少而集中,蒸发量大,湿度小,无霜期短。年平均气温为 8.5℃,年均降水量为 187.7 mm,经济以农业和畜牧业为主,是一个半农半牧的县区^[20]。

1.2 研究方法

根据能值生态足迹理论将生产性土地分为 6 个组分:可耕地、牧草地、森林地、淡水域、化石能源地和建成地^[17],各组分对应不同的消费项目。生物资源和能源资源的能值生态足迹分别采用消费项目的生产量和消费量来进行。因此,有两部分数据来计算该县能值生态足迹:生物资源生产量和能源消费量。该区域生物资源主要包括农产品、动物产品、水果产品和水产品等,能源消费主要有 3 种代表性能源。每一类项目中都有对应的详细分类,总共 15 个消费项目(表 1)。

表 1 山丹县各组分所对应消费项目

Table 1 The consumption items corresponding to each sub-branch Shandan County

组分类型	资源类型	消费项目
可耕地	农产品	小麦、玉米、谷物、油料、蔬菜
牧草地	动物产品	牛肉、羊肉、绵羊毛、禽蛋、牛奶
森林地	水果产品	苹果梨
淡水域	水产品	水产品
化石能源地	化石能源	煤炭、原油
建成地	电力	电力

注:苹果梨为山丹县的特色水果,由苹果树的枝芽嫁接到梨树上培育得到。

1.2.1 人均能值生态足迹 首先计算 6 个组分对应各消费项目的能量,再通过“能值转换率”将能量换算成研究区的能值。公式如下

$$\text{能量}(J) = \text{生产量}(t) \times \text{能量折算系数}(J \cdot t^{-1})$$

$$\text{太阳能值}(sej) = \text{能量}(J) \times \text{能值转换率}(sej \cdot J^{-1})$$

然后将算得的各消费项目能值划分到 6 个组分中,得到各组分的能值。再计算各组分人均能值和人均能值生态足迹。最后对各组分的人均能值生态足迹汇总求和,得到研究区域人均能值生态足迹。公式如下

$$e_f = \sum a_i \sum \left(\frac{c_i}{p} \right) \quad (1)$$

式中: e_f 为该县人均能值生态足迹(hm²); i 为各消

费类型; a_i 为第*i*项资源的人均能值生态足迹(hm^2); c_i 为第*i*项资源的人均能值(sej); p 是区域能值密度($\text{sej} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$),即区域总能值/区域总面积。

自然资源包括不可再生资源 and 可再生资源^[21],由于不可再生资源的消耗速度要快于其再生速度,随着人类的不断利用,会日益枯竭,只有利用可再生资源,区域的发展才具有连续性^[22]。因此计算区域总能值时,主要考虑以下5种可再生资源:太阳辐射能、雨水化学能、雨水势能、风能和地球旋转能,但是同一性质的能量在计算时只取最大值^[17]。前四者均是太阳能的转化形式,故以前四者之中的最大值与地球旋转能之和作为区域总能值。

$$S_E = S_A \times A \quad (2)$$

$$R_E = S_A \times B \times C \quad (3)$$

$$R_P = S_A \times B \times D \times E \times g \quad (4)$$

$$W_E = S_A \times F \times G \times H \times I^2 \times J \quad (5)$$

$$E_F = S_A \times K \quad (6)$$

式中: S_E 代表太阳辐射能, S_A 代表研究区面积(m^2), A 代表该区域太阳年均辐射量; R_E 表示雨水化学能, B 是该区域年降雨量($\text{m} \cdot \text{a}^{-1}$), C 代表吉布斯自由能; R_P 代表雨水势能, D 代表雨水密度, E 是平均海拔高度(m), g 是重力加速度($\text{m} \cdot \text{g}^{-2}$); W_E 代表风能, F 是空气密度($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$), G 代表空气层高度, H 代表涡流扩散系数, I 代表风速梯度, J 为常数; E_F 代表地球旋转能, K 是热通量($\text{J} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)^[23-24]。各参数值除了年降雨量外,均为定值。具体数值参照表2。

1.2.2 人均能值生态承载力

$$e_c = \left(\frac{e}{p}\right) \times 0.88 \quad (7)$$

式中: e_c 代表人均能值生态承载力(hm^2); e 是人均可再生资源能值(sej); p 是区域能值密度($\text{sej} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)^[14]。

1.2.3 能值生态盈亏 当 $e_f > e_c$ 时,称为生态赤字;当 $e_f < e_c$ 时,称为生态盈余。

1.2.4 可持续发展指数(sustainable development index,SDI,公式中用 S_{DI} 表示)

$$S_{DI} = \frac{e_c}{e_c + e_f} \quad (8)$$

S_{DI} 在0~1。 $S_{DI}=0.5$ 是判定研究区生态系统可持续或不可持续发展的重要界限。 S_{DI} 越接近1,说明自然环境承载能力越强;该值等于0.5时,表明区域生态环境处于可持续发展状态; S_{DI} 越接近于0,表明该区生态压力越大。

1.3 数据来源与计算

根据能值生态足迹的计算方法,本研究中需要

的统计数据主要源于《山丹统计年鉴2009—2018》以及对应年份的《国民经济和社会发展统计公报》。各指标的计算公式参考杨瑾^[23]、胡孟娜^[24]和马自坤^[31]的方法。各消费项目及可再生资源的能量折算系数和能值转换率借鉴胡孟娜^[24]、隋春花等^[25]和马自坤^[31]的研究成果。区域总能值的计算主要考虑太阳辐射能、雨水化学能、雨水势能、风能及地球旋转能5种可再生资源的能值,为避免重复计算,同一性质的能量只取最大值,山丹县可再生资源能值为雨水势能与地球旋转能之和^[14]。可再生资源计算公式中所需参数值如表2所示。

表2 式(2)~式(6)计算相关参数值

Table 2 Values of relevant parameters in formulas (2) to (6)

各参数符号	参数	参数值
SA	研究区面积/ m^2	5.40E+09
A	太阳年均辐射量/ $(\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2})$	1.80E+03
C	吉布斯自由能	4.94E+03
D	雨水密度	1.00E+03
E	平均海拔高度/ m	2.30E+03
g	重力加速度/ $(\text{m} \cdot \text{g}^{-2})$	9.80E+00
F	空气密度/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	1.23E+00
G	空气层高度	1.00E+03
H	涡流扩散系数	1.30E+01
I	风速梯度	3.93E-03
J	常数	3.15E+07
K	热通量/ $(\text{J} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1})$	1.45E+06

2 结果与分析

2.1 各消费项目人均能值和可再生资源能值

按照公式,计算山丹县2009—2018年各组分所对应的消费项目人均能值,计算结果如表3。

依据式(2)~式(6)对山丹县2009—2018年可再生资源能值进行了计算。雨水势能成为该县最大的可再生资源(表4),因此可再生资源总能值是雨水势能与地球旋转能之和。以此计算山丹县的区域能值密度,进一步计算人均能值生态足迹与人均能值生态承载力。

由表4计算结果可知,太阳辐射能、风能及地球旋转能在研究期间其值基本一致,而雨水化学能和雨水势能在不同年份有一定的差异。这样的现象是由山丹县不同年份降雨量的不同导致的。10 a间降雨量的值见表5。

2.2 人均能值生态足迹分析

近10 a间,山丹县人均能值生态足迹总体呈上升状态,但期间波动较大(图1)。2010年比2009年下降了8.50%;2010—2014年该值从3.51 hm^2 持续上升到4.53 hm^2 ,增幅28.96%;2014—2018

表3 山丹县 2009—2018 年各消费项目人均能值(sej)

Table 3 Per capita solar energy value of each consumption item in Shandan County from 2009 to 2018(sej)

年份		2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
可耕地	小麦	1.19E+15	1.09E+15	1.12E+15	1.16E+15	1.20E+15	1.30E+15	1.34E+15	1.35E+15	1.30E+15	1.23E+15
	玉米	7.70E+12	1.25E+13	3.29E+13	4.09E+13	4.80E+13	4.14E+13	4.95E+13	4.38E+13	6.45E+13	1.30E+14
	谷物	1.03E+16	8.98E+15	9.32E+15	9.22E+15	9.86E+15	1.03E+16	1.06E+16	1.06E+16	1.07E+16	8.51E+14
	油料	1.51E+15	1.43E+15	1.38E+15	1.62E+15	1.72E+15	1.87E+15	1.95E+15	2.30E+15	2.07E+15	2.08E+15
	蔬菜	5.80E+13	1.22E+14	1.70E+14	3.83E+13	2.29E+14	1.93E+14	2.58E+14	3.21E+14	4.10E+14	2.76E+14
牧草地	牛肉	2.90E+13	2.89E+13	3.24E+13	3.23E+13	3.31E+13	3.52E+13	3.66E+13	3.88E+13	4.03E+13	2.87E+13
	羊肉	3.66E+14	3.77E+14	4.09E+14	4.22E+14	4.40E+14	4.81E+14	5.13E+14	5.52E+14	5.88E+14	6.79E+14
	绵羊毛	3.09E+12	3.60E+12	3.86E+12	3.85E+12	4.02E+12	4.40E+12	4.26E+12	4.08E+12	4.40E+12	4.40E+12
	禽蛋	6.67E+13	6.81E+13	7.36E+13	7.73E+13	7.85E+13	8.11E+13	7.82E+13	7.33E+13	7.70E+13	7.44E+13
	牛奶	7.99E+13	7.54E+13	7.68E+13	7.66E+13	7.64E+13	1.00E+14	9.59E+13	9.26E+13	9.63E+13	8.86E+13
森林地	苹果梨	7.32E+13	6.84E+13	4.03E+13	3.29E+13	5.53E+13	5.73E+13	5.80E+13	5.80E+13	8.50E+13	7.45E+13
淡水域	水产品	2.62E+12	2.74E+12	2.75E+12	2.77E+12	2.82E+12	2.84E+12	3.00E+12	3.12E+12	3.10E+12	3.11E+12
化石能源地	煤炭	1.15E+15	1.10E+15	1.34E+15	1.43E+15	1.46E+15	1.54E+15	1.53E+15	1.38E+15	8.74E+14	1.01E+15
	原油	1.59E+15	1.45E+15	1.58E+15	1.63E+15	1.73E+15	1.83E+15	1.86E+15	1.92E+15	1.76E+15	1.63E+15
建成地	电力	1.71E+11	1.76E+11	1.79E+11	1.88E+11	2.02E+11	2.04E+11	2.06E+11	2.14E+11	1.89E+11	2.14E+11

表4 山丹县 2009—2018 年可再生资源能值(sej)

Table 4 Renewable resource energy value in Shandan County from 2009 to 2018(sej)

年份	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
太阳辐射能	5.40E+19	5.40E+19	5.40E+19	5.40E+19	5.40E+19	5.40E+19	5.40E+19	5.40E+19	5.40E+19	5.40E+19
雨水化学能	9.38E+17	9.21E+17	8.91E+17	8.43E+17	8.36E+17	8.51E+17	8.82E+17	9.49E+17	9.01E+17	8.43E+17
雨水势能	2.09E+21	2.05E+21	1.98E+21	1.88E+21	1.86E+21	1.90E+21	1.96E+21	2.11E+21	2.01E+21	1.88E+21
风能	2.78E+19	2.78E+19	2.78E+19	2.78E+19	2.78E+19	2.78E+19	2.78E+19	2.78E+19	2.78E+19	2.78E+19
地球旋转能	2.27E+20	2.27E+20	2.27E+20	2.27E+20	2.27E+20	2.27E+20	2.27E+20	2.27E+20	2.27E+20	2.27E+20

表5 山丹县 2009—2018 年降雨量

Table 5 Annual rainfall from 2009 to 2018 in Shandan County

mm

年份	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
年降雨量	193.20	189.70	183.40	173.50	172.10	175.30	181.50	195.30	185.40	173.60

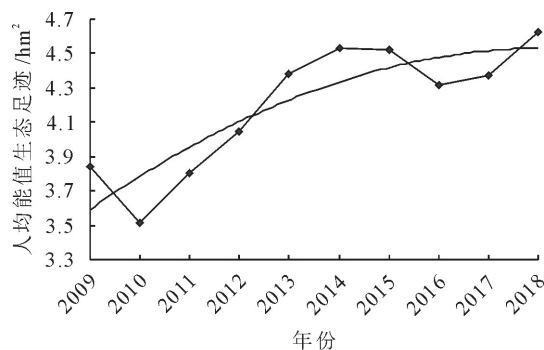


图1 山丹县 2009—2018 年人均能值生态足迹

Fig. 1 The per capita ecological footprint of Shandan County from 2009 to 2018

年在经历了小幅度下降之后以 7.18% 的增幅上升到了 4.63 hm²。

山丹县属于内陆城镇,其水产品消耗较少,仅占人均能值生态足迹的 0.02%;建成地消耗所占比例不足 0.01%,两者可忽略不计,因此人均能值生态

足迹主要包括可耕地、森林地、牧草地和化石能源这 4 个指标。人均能值生态足迹各组分计算结果见图 2。

山丹县可耕地人均能值生态足迹总体呈上升趋势(图 2a),从 2009 年的 3.05 hm² 上升到 2018 年的 3.70 hm²,10 a 间上升了 0.65 hm²,增幅达 21.30%。森林地的值呈先下降后上升的趋势。2009—2012 年持续下降,降幅达 55.09%;2012—2017 年该值保持在 0.008~0.021 hm²,上升幅度为 158.83%;2017—2018 年该值出现回落(图 2b)。牧草地的人均能值生态足迹呈现持续上升的趋势,从 2009 年的 0.127 hm² 上升到 2018 年的 0.225 hm²,10 a 间上升了 0.098 hm²,增幅达到 76.86%(图 2c)。化石能源的值在 10 a 间呈现先上升后下降的趋势,2010—2014 年该值连续上升,上升幅度达 41.35%,2014—2017 年该值以 25.68% 的幅度呈下降状态,之后出现回升(图 2d)。

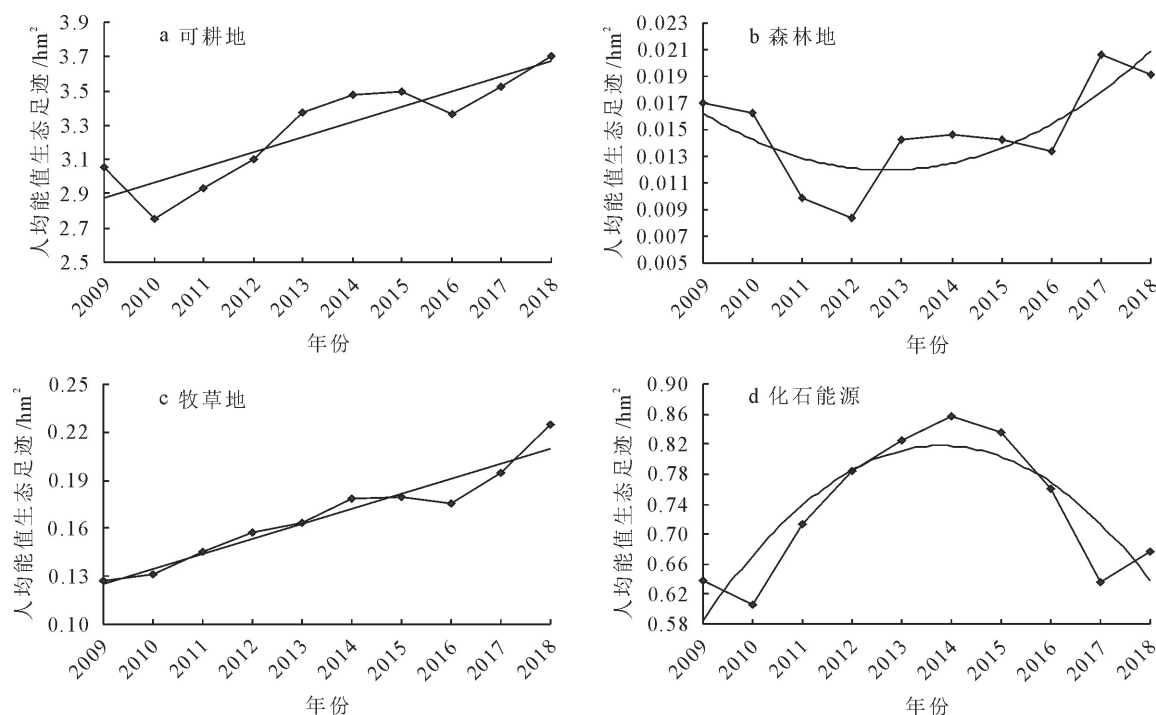


图2 山丹县2009—2018年各组分人均能值生态足迹

Fig. 2 The per capita ecological footprint of each component in Shandan County from 2009 to 2018

从人均能值生态足迹的构成组分来看(图3), 可耕地>化石能源>牧草地>森林地。10 a间可耕地的人均能值生态足迹为 3.28 hm^2 , 占总值的78.15%;化石能源的人均能值生态足迹在总人均能值生态足迹中占17.50%,为 0.73 hm^2 ;牧草地的人均能值生态足迹占总值的3.98%;森林地的人均能值生态足迹最小,仅占总值的0.35%。

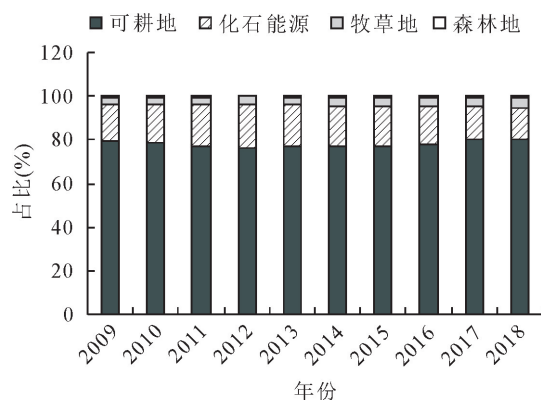


图3 山丹县2009—2018年各组分人均能值生态足迹比例

Fig. 3 The proportion of ecological footprint per capita energy value of each component in Shandan County from 2009 to 2018

2.3 人均能值生态承载力分析

山丹县人均能值生态承载力持续下降(图4),从2009年的 3.15 hm^2 下降到2018年的 2.77 hm^2 ,降幅达11.90%。其中,2009—2010年和2014—2015年下降幅度较大,降幅分别为6.32%和2.33%。

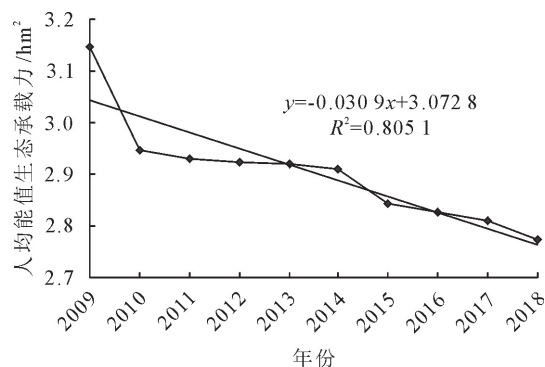


图4 山丹县2009—2018年人均能值生态承载力

Fig. 4 Per capita ecological carrying capacity of Shandan County from 2009 to 2018

2.4 能值生态盈亏与可持续发展分析

山丹县能值生态盈亏计算结果均为负值,该县在10 a间均呈现生态赤字状态(表6)。可持续发展指数始终 <0.5 ,山丹县近10 a间始终处于不可持续发展状况。同时该值不断减小,表明其可持续状态在不断恶化。

山丹县生态赤字总体呈上升状态(图5),从2009年的 0.691 hm^2 上升到2018年的 1.854 hm^2 ,10 a间上升了 1.164 hm^2 ,增幅达到了168.45%。可持续发展指数从2009年的0.451下降到2018年的0.375,10 a间下降了0.076,降幅达到了16.84%。

表 6 山丹县 2009—2018 年生态盈亏与可持续发展指数

Table 6 Ecological profit and loss and sustainable development index of Shandan County from 2009 to 2018

年份	人均能值 生态足迹/ hm^2	人均能值 生态承载力/ hm^2	生态盈亏/ hm^2	可持续 发展指数	可持续 发展状态
2009	3.837	3.146	-0.691	0.451	弱不可持续
2010	3.511	2.947	-0.564	0.456	弱不可持续
2011	3.806	2.931	-0.875	0.435	弱不可持续
2012	4.051	2.924	-1.127	0.419	弱不可持续
2013	4.381	2.918	-1.462	0.400	弱不可持续
2014	4.528	2.910	-1.618	0.391	弱不可持续
2015	4.522	2.842	-1.680	0.386	弱不可持续
2016	4.317	2.826	-1.490	0.396	弱不可持续
2017	4.375	2.811	-1.564	0.391	弱不可持续
2018	4.627	2.772	-1.854	0.375	弱不可持续

注:SDI 值将可持续发展水平划分为 6 个等级,强不可持续(<0.20)、中等不可持续($0.20\sim0.34$)、弱不可持续($0.35\sim0.49$)、弱可持
($0.50\sim0.64$)中等可持($0.65\sim0.85$)和强可持(>0.80)^[24]。

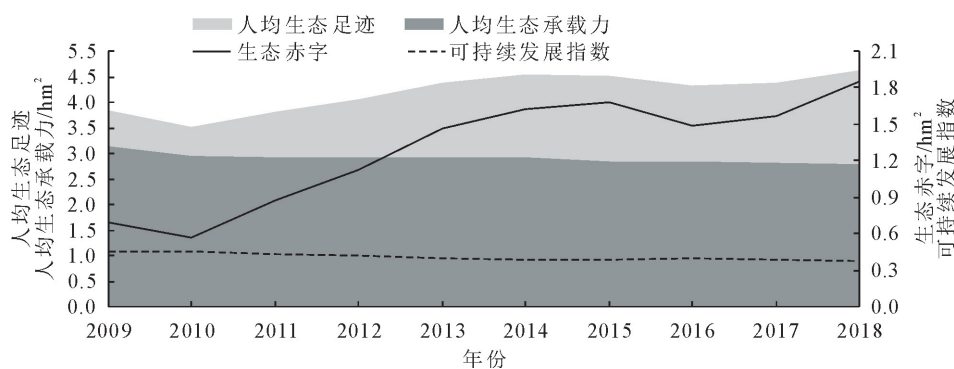


图 5 山丹县 2009—2018 年人均能值生态足迹、生态承载力、生态赤字和可持续发展指数

Fig. 5 Per capita ecological footprint, ecological carrying capacity, ecological deficit and sustainable development index of Shandan County from 2009 to 2018

3 讨论与结论

3.1 讨论

能值生态足迹、能值生态承载力、能值生态盈亏和可持续发展指数是体现区域可持续发展和生态安全状况的重要指标。在前人的研究中,影响能值生态足迹的因素有:人口数量、作物产量、种植结构、能源消耗量及人类活动的影响等^[15-16,27]。能值生态承载力主要受区域能值密度、当地气候条件和人为活动的影响,区域能值密度主要与年降雨量等因素有关^[28-29]。能值生态盈亏是对这两个指标进行比较,如果能值生态足迹小于能值生态承载力,则为生态赤字,呈不可持续发展状态;反之则呈现可持续发展状态^[30]。可持续发展指数的大小也是由能值生态足迹和能值生态承载力决定的,该值越接近 1,说明区域可持续发展状态越稳定,越接近 0,可持续状态越差。

山丹是农业大县,10 a 间可耕地的总产量从 29 万 t 增加至 32 万 t,根据公式,其人均能值的值相应增加,同时年降雨量从 2009 年的 193.2 mm 减少为

2018 年的 173.6 mm,导致区域能值密度的值减小,因此可耕地的人均能值生态足迹呈上升趋势。可耕地是山丹县能值生态足迹的最主要组分,人均能值生态足迹占比达到 78.15%,是人均能值生态足迹总值增加的主要原因^[31]。能源人均能值生态足迹在 2010—2014 年从 0.606 hm^2 上升到了 0.856 hm^2 ,人们对能源的需求量从 22 万 t 增加到了 31 万 t。一方面是由于人民生活水平的不断提高,能源需求增长迅速;另一方面该县三产占比由 2010 年的 23:39:38 转变为 2014 年的 21:33:46,服务业占比大幅提升,社会服务产业发展迅速,体现了该县社会经济的快速转型发展,导致区域能源消耗增加。

牧草地人均能值生态足迹虽然占比较少,但其值在逐年上升,增幅达到了 76.86%,对于总的人均能值生态足迹影响也较大。山丹县干旱少雨,年均降雨量为 187.7 mm,且多集中在 8—10 月,而牧草生长的旺盛季节一般在 6、7 月,牧草在生长旺季得不到充分降雨,导致生长量无法达到最优。此外,该县 10 a 间年降水量下降,年蒸发量却从 1 602.1 mm 上升到了 1 839.9 mm,降水减少加剧了土壤干

旱,蒸发进一步加速了牧草地沙化,草场的恢复生长受到较大影响。再加上过度放牧、采药等人为破坏行为^[32],导致该地区草原面积减少,严重影响了该县牧草地生态健康。森林地人均能值生态足迹在10 a间波动较大,2009—2012年呈下降状态,主要是由于期间山丹县林果业发展缓慢,该县特色林果苹果梨品质退化,导致林果产量由2009年的6 320 t下降到2012年的3 054.5 t。之后,随着“三北”防护林、生态公益林等国家林业政策的倾斜,该县林果产业不断壮大,果木种植面积增加,产量提高造成了期间森林地人均能值生态足迹上升。

近10 a来山丹县年降雨量下降,导致人均可再生资源能值降低,使得人均能值生态承载力持续减小,同时,居民对耕地的不合理利用、过度放牧使得草场退化,以及对于能源的过度使用都直接导致了自然承载能力的降低,使得该县生态承载力不断下降。山丹县近10 a间人均能值生态足迹远大于人均能值生态承载力,始终处于生态赤字状况,同时生态赤字的值在逐年增加,这说明该地区经济社会的发展是以牺牲其生态环境为代价的。

郑重等^[33]对以新疆生产建设兵团45团灌区为例的农区进行了生态足迹分析,发现该区域1995—2005年生态盈余的年份多于生态赤字的年份。该区域通过优化农区农业结构,促进了可耕地资源生态多样性,构建了更突出的可耕地利用保障体系。在李文龙等^[34]对同处于甘肃省的高寒牧区甘南州的可持续发展研究中,发现该地区在研究期内可持续状态趋于稳定。该地区在国家的大力帮扶下积极调整畜牧业生产条件,使得当地畜牧业得以稳定发展。同时,甘南州由之前落后的一元经济结构转变为多元开放的现代经济时代,产业结构逐渐趋向合理化与多样化,使得该地区能够多年保持可持续发展状态。刘钦普等^[35]将能值生态足迹模型应用于处在湿润区的江苏省1961—2007年可耕地可持续性动态分析中,结果表明,研究期内多数时段该省可耕地利用都处于可持续发展状态。该省属于湿润季风气候,有较好的自然地理环境,生态安全容易维持在可持续发展状态。而处于干旱区农牧交错带的内蒙古化德县^[36]、武川县^[37]和辽宁省彰武县^[38]都有着脆弱的生态环境,研究期内均处于不可可持续发展状态。说明我国农牧交错带长期处于生态不安全状况,且总体有恶化趋势,应更重视生态安全与经济社会发展之间的矛盾,维护干旱区生态安全稳定。

山丹县作为生态系统脆弱而功能重要的农牧交错带的典型代表,其明显上升的能值生态足迹、逐年下降的能值生态承载力和较高的生态赤字,反映出

该区域的生态健康状况并未达到可持续发展的状况,该地区环境的生态容量不足以容纳当地现阶段经济发展所需生态空间。该县10 a间受到的气候变化和人为破坏都造成了其生态状况的进一步恶化,长期处在不可可持续发展状态,如果不加以治理,生态健康的恶化程度将会进一步加剧,势必威胁到整个西北地区的生态安全。基于此,山丹县目前应保护现有的耕种土地面积,通过改良农作物品种与农业技术措施来增加农产品产值、提高可耕地产出率,同时优化农业结构,走农林牧复合型农业发展模式,促进可耕地资源生态多样性;使用绿色环保可替代能源,减少化石能源的使用,降低能源消耗;减少放牧面积和次数,加大舍饲养殖,做好轮封轮牧,保护牧草地生态;落实国家林业政策,加大生态公益林、封禁保护区的宣传与建设,提高森林地覆盖率,加强对森林资源的保护。大力推广科技,努力把当地单一经济结构转变为多元开放的现代经济结构,促进产业结构趋向合理化与多样化,保持社会经济的可持续发展。

3.2 结论

1)2009—2018年山丹县人均能值生态足迹呈上升趋势,其中对该县10 a间人均能值生态足迹影响最大的是可耕地,其次为能源,占比分别为78.15%和17.50%。因此山丹县要优化农业结构,促进可耕地资源生态多样性;多使用绿色环保可替代能源,降低能源消耗。

2)2009—2018年山丹县人均能值生态承载力呈下降趋势,10 a间下降了11.90%。该县10 a间生态赤字以168.45%的幅度上升,可持续发展指数始终 <0.5 ,期间均处于不可可持续发展状态,10 a间下降16.84%。

3)山丹县生态环境压力逐渐加重,不可可持续发展状态恶化,需要重视其社会经济可持续发展状态。因此调整该县产业结构和加大生态保护力度非常重要。一方面,大力推广科技,努力把当地单一经济结构转变为多元开放的现代经济结构,促进产业结构趋向合理化与多样化;另一方面,加强保护该县森林资源,落实国家林业政策,缓解生态环境压力,保护区域资源,实现社会经济的可持续发展。

参考文献:

- [1] 陈新云,王甜,李宝健.北京市西北部生态涵养区未来土地利用及生态系统服务变化情景模拟[J].西北林学院学报,2021,36(1):86-95.
CHEN X Y, WANG T, LI B J. Simulation of the future land use and ecosystem services in the ecological conservation area in Northwestern Beijing[J]. Journal of Northwest Forestry U-

- niversity, 201, 36(1): 86-95. (in Chinese)
- [2] 王业宁, 周强, 王豪伟. 中国 34 个省级行政区三维生态足迹动态研究[J]. 生态学报, 2020, 40(18): 6434-6444.
WANG Y N, ZHOU Q, WANG H W. Assessing three-dimensional ecological footprint of 34 provinces in China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(18): 6434-6444. (in Chinese)
- [3] YUAN T, YUAN S A, YU S Q, *et al.* A probe into the sustainable development of the Japanese talent cultivation by the cooperation between private universities and enterprises[J]. *Lifelong Education*, 2020, 9(6): 45-47.
- [4] CAO M, LI H, SUN D, *et al.* Cancer burden of major cancers in China: a need for sustainable actions[J]. *Cancer Communications*, 2020, 40(5): 205-210.
- [5] 刘利, 韩海荣, 张丽谦, 等. 基于环境态度和脆弱性理论的居民森林意识调查分析——以北京百花山保护区为例[J]. 西北林学院学报, 2011, 26(5): 219-223, 240.
LIU L, HAN H R, ZHANG L Q, *et al.* Investigation and analysis of wood land awareness on environmental attitude and vulnerability theory——a case study of Baihuashan nature reserve in Beijing[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2011, 26(5): 219-223, 240. (in Chinese)
- [6] 谢霞, 王宏卫, 塔西甫拉提·特依拜. 基于能值理论的艾比湖地区生态足迹分析[J]. 干旱区资源与环境, 2010, 24(6): 21-25.
XIE X, WANG H W, TEYIBAI T. Ecological footprint of Ebinur Lake region based on analysis theory[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2010, 24(6): 21-25. (in Chinese)
- [7] HELMUT H, KARL-HEINZ E, FRIDOLIN K A. How to calculate and interpret ecological footprints for long periods of time: the case of Austria 1926—1995[J]. *Ecological Economics*, 2001, 38(1): 25-45.
- [8] GÖSSLING S, HANSSON C B, HÖRSTMEIER O, *et al.* Ecological footprint analysis as a tool to assess tourism sustainability[J]. *Ecological Economics*, 2002, 43(2).
- [9] WACKERNAGEL M, WILLIAM R. Our ecological footprint: reducing human impact on the earth[M]. Gabriola Island Canada: New Society Publishers, 1996: 1-83.
- [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.
- [11] 刘钰, 马延吉. 农业生态足迹研究进展与展望[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2019, 27(7): 1115-1123.
LIU Y, MA Y J. Research progress and prospect of agricultural ecological footprint[J]. *Chinese Journal of Eco-agriculture*, 2019, 27(7): 1115-1123. (in Chinese)
- [12] 程曼, 解文艳, 杨振兴, 等. 基于能值理论的山西省农作物秸秆生态足迹研究[J]. 山西大学学报: 自然科学版, 2019, 42(3): 682-690.
CHENG M, XIE W Y, YANG Z X, *et al.* Ecological footprint of crop straw in Shanxi Province based on emergy theory[J]. *Journal of Shanxi University: Natural Science Edition*, 2019, 42(3): 682-690. (in Chinese)
- [13] ZHAO S, LI Z Z, LI W L. A modified method of ecological footprint calculation and its application[J]. *Ecological Modelling*, 2004, 185(1): 65-75.
- [14] 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(3): 702-710.
LI W L, WEI W, SONG Y, *et al.* Sustainable development of Tibet based on emergy ecological footprint model[J]. *Acta Agrescia Sinica*, 2019, 27(3): 702-710. (in Chinese)
- [15] 苏文亮, 李文龙, 朱亚莉, 等. 基于能值生态足迹模型的青海地区可持续发展评估[J]. 草业科学, 2019, 36(5): 1445-1456.
SU W L, LI W L, ZHU Y L, *et al.* Evaluation of sustainable development in Qinghai based on energy ecological footprint model[J]. *Pratacultural Science*, 2019, 36(5): 1445-1456. (in Chinese)
- [16] 吕越, 陈忠清. 能值生态足迹改进模型研究——以新疆为例[J]. 干旱区地理, 2016, 39(5): 1120-1127.
LÜ Y, CHEN Z Q. Improved model of emergy ecological footprint: a case study of Xinjiang[J]. *Arid Land Geography*, 2016, 39(5): 1120-1127. (in Chinese)
- [17] 张芳怡, 濮励杰, 张健. 基于能值分析理论的生态足迹模型及应用——以江苏省为例[J]. 自然资源学报, 2006(4): 653-660.
ZHANG F Y, PU L J, ZHANG J. A modified model of ecological footprint calculation based on the theory of emergy analysis——taking Jiangsu Province as an example[J]. *Journal of Natural Resources*, 2006(4): 653-660. (in Chinese)
- [18] 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[J]. 干旱区研究, 2011, 28(3): 524-531.
ZHAO X Y, LIU S, ZHAO H L. Ecological footprint evaluation based on emergy analysis: a case study of Gansu Province[J]. *Arid Zone Research*, 2011, 28(3): 524-531. (in Chinese)
- [19] 马利邦, 田亚亚, 郭晓东, 等. 基于格网的河西绿洲乡村聚落时空演变及其与水土资源的空间耦合关系[J]. 自然资源学报, 2018, 33(5): 775-787.
MA L B, TIAN Y Y, GUO X D, *et al.* Spatial-temporal change of rural settlements and its spatial coupling relationship with water and soil resources based on grid in the Hexi oasis[J]. *Journal of Natural Resources*, 2018, 33(5): 775-787. (in Chinese)
- [20] 王立选, 黄汉爱. 山丹县宜森林地资源适宜性分析与评价[J]. 防护林科技, 2019(9): 51-52, 57.
WANG L X, HUANG H A. Suitability evaluation of resources of suitable land for wood land in Shandan county[J]. *Protection Forestry Science and Technology*, 2019(9): 51-52, 57. (in Chinese)
- [21] 王耕, 王嘉丽, 王彦双. 基于能值——生态足迹模型的辽河流域生态安全演变趋势[J]. 地域研究与开发, 2014, 33(1): 122-128.
WANG G, WANG J L, WANG Y S. Research on ecological security of Liaohe River basin based on the emergy-ecological footprint model[J]. *Areal Research and Development*, 2014, 33(1): 122-128. (in Chinese)
- [22] 马赫, 张天海, 罗宏森, 等. 沿海快速城市化地区能值生态足迹变化分析[J]. 生态学报, 2018, 38(18): 6465-6472.
MA H, ZHANG T H, LUO H S, *et al.* Analysis of emergy ecological footprint change of coastal rapid urbanization areas

- [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(18): 6465-6472. (in Chinese)
- [23] 杨瑾. 基于能值生态足迹的甘肃省生态安全状况研究[D]. 兰州: 兰州财经大学, 2018.
- [24] 胡孟娜. 基于能值生态足迹的甘肃省生态经济系统的特征分析[D]. 兰州: 兰州财经大学, 2016.
- [25] 隋春花, 蓝盛芳. 广州城市生态系统能值分析研究[J]. *重庆环境科学*, 2001(5): 4-6, 23.
SUI C H, LAN S F. Emergy analysis of Guangzhou urban ecosystem[J]. *Chongqing Environmental Science*, 2001(5): 4-6, 23. (in Chinese)
- [26] 刘钦普, 林振山. 江苏省可耕地利用可持续性动态分析及预测[J]. *自然资源学报*, 2009, 24(4): 594-601.
LIU Q P, LIN Z S. Dynamic analysis and prediction on ecological footprint of Jiangsu's cropland[J]. *Journal of Natural Resources*, 2009, 24(4): 594-601. (in Chinese)
- [27] 杨青, 逯承鹏, 周锋, 等. 基于能值-生态足迹模型的东北老工业基地生态安全评价——以辽宁省为例[J]. *应用生态学报*, 2016, 27(5): 1594-1602.
YANG Q, LU C P, ZHOU F, *et al.* An emergy-ecological footprint model based evaluation security at the old industrial area in Northeast China: a case study of Liaoning Province[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2016, 27(5): 1594-1602. (in Chinese)
- [28] 魏巍. 基于能值生态足迹方法与生态系统生产总值的青海省生态补偿量化研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2020.
- [29] 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(1): 216-227.
CAO W W, SUN C Z. Improvement of the emergy ecological footprint model: a case study of Hainan Province[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(1): 216-227. (in Chinese)
- [30] 马赫, 张天海, 罗宏森, 等. 沿海快速城市化地区能值生态足迹变化分析[J]. *生态学报*, 2018, 38(18): 6465-6472.
MA H, ZHANG T H, LUO H S, *et al.* Analysis of emergy ecological footprint change of coastal rapid urbanization areas[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(18): 6465-6472. (in Chinese)
- [31] 马自坤. 基于能值-生态足迹模型的区域可持续发展研究[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2018.
- [32] 杜自强, 王建, 陈正华, 等. 黑河中上游典型地区牧草地植被变化及其生态功能损失分析——以山丹县为例[J]. *西北植物学报*, 2006, 26(4): 798-804.
DU Z Q, WANG J, CHEN Z H, *et al.* Variation and ecological function loss of grassland vegetations in typical regions in the upper reaches of Heihe river: a case of Shandan county[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2006, 26(4): 798-804. (in Chinese)
- [33] 郑重, 张凤荣. 集约化农区可耕地资源多样性及其发展模式——以新疆生产建设兵团45团灌区为例[J]. *资源科学*, 2009, 31(10): 1800-1804.
ZHENG Z, ZHANG F R. Diversity and development pattern of arable land resources over intensively agricultural region[J]. *Resources Science*, 2009, 31(10): 1800-1804. (in Chinese)
- [34] 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(4): 1-14.
LI W L, YU C, ZHAO X L, *et al.* Sustainable development of the alpine pastoral region in the eastern Tibet Plateau based on the emergy ecological footprint model[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2017, 26(4): 1-14. (in Chinese)
- [35] 刘钦普, 林振山. 江苏省可耕地利用可持续性动态分析及预测[J]. *自然资源学报*, 2009, 24(4): 594-601.
LIU Q P, LIN Z S. Dynamic analysis and prediction on ecological footprint of Jiangsu's cropland[J]. *Journal of Natural Resources*, 2009, 24(4): 594-601. (in Chinese)
- [36] 刘志颐, 马亚圣. 基于生态足迹模型的农牧交错带生态经济系统可持续发展评价——以化德县为例[J]. *开发研究*, 2012(5): 115-118.
LIU Z Y, MA Y S. Evaluation of sustainable development of eco-economic system in agro-pastoral ecotone based on ecological footprint model: a case study of Huade county[J]. *Development research*, 2012(5): 115-118. (in Chinese)
- [37] 紫檀, 潘志华. 内蒙古武川县生态足迹分析[J]. *中国农业大学学报*, 2005, 10(1): 64-68.
ZI T, PAN Z H. Ecological footprint analysis of Wuchuan county[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2005, 10(1): 64-68. (in Chinese)
- [38] 贾树海, 幸丽君. 农牧交错带典型区生态足迹动态研究[J]. *生态经济: 学术版*, 2012(2): 24-27.
JIA S H, XING L J. Based on the ecotone between agriculture and animal husbandry in Zhangwu county ecological footprint dynamics study[J]. *Ecological Economy: Academic Edition*, 2012(2): 24-27. (in Chinese)