

基于NPP的青海省草地生态足迹以及生态承载力估算——以海晏县为例

赵彤^{1,2} 刘洁³ 孙玮婕^{1,2}

(1 青海省气象科学研究所, 西宁 810001; 2 青海省防灾减灾重点实验室, 西宁 810001;
3 青海省海北牧业气象试验站, 海北 812200)

摘要: 基于NPP (植被净初级生产力) 数据以及统计数据, 通过生态足迹以及生态承载力计算模型, 对2000—2020年海晏县草地生态足迹以及生态承载力进行了估算。结果表明: 海晏县草地NPP多年平均值为 $368.96 \text{ gC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$; 空间分布具有一定的垂直地带性, 具体表现为随海拔升高, NPP逐渐降低; 21 a间海晏县草地人均生态足迹呈缓慢上升的趋势, 平均生态足迹为 $0.24 \text{ hm}^2\cdot\text{cap}^{-1}$, 2020年海晏县草地生态足迹较2000年增长了 $0.16 \text{ hm}^2\cdot\text{cap}^{-1}$; 草地人均生态足迹最小的区域分布于草地生产力较强的中部区域, 最大的区域主要分布于环湖北部以及北部高海拔的部分区域; 草地人均生态承载力呈微弱降低的趋势, 空间分布特征表现为北部以及中部减少, 西南以及东南部增加, 草地生态承载力较大的区域分布于甘子河乡、金滩乡以及青海湖乡, 面积占比约为67.93%; 全县草地生态赤字/盈余的平均值为 $2.87 \text{ hm}^2\cdot\text{cap}^{-1}$, 呈由四周向中部逐渐增加的分布格局, 总体上每年的数值均 >0 , 表明区域草地生态系统处于盈余的状态, 未出现较大环境危机。

关键词: 生态足迹, 生态承载力, 草地, 植被净初级生产力

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2023.04.010

Estimation of Grassland Ecological Footprint and Ecological Carrying Capacity Based on NPP in Haiyan County, Qinghai Province

Zhao Tong^{1,2}, Liu Jie³, Sun Weijie^{1,2}

(1 Qinghai Institute of Meteorological Science, Xining 810001; 2 Key Laboratory of Disaster Prevention and Mitigation in Qinghai Province, Xining 810001; 3 Haibei Animal Husbandry Meteorological Experiment Station of Qinghai Province, Haibei 812200)

Abstract: Based on NPP data and statistical data, this paper estimated the ecological footprint and ecological carrying capacity of grassland in Haiyan County from 2000 to 2020 through ecological footprint and ecological carrying capacity calculation model. The results show that the average annual NPP of grassland in Haiyan County is $368.96 \text{ gC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$. NPP decreases with the increase of altitude, exhibiting a certain level of vertical zonality. In recent 21 years, the per capita ecological footprint of grassland in Haiyan County has increased slowly, and the average ecological footprint is $0.24 \text{ hm}^2\cdot\text{Cap}^{-1}$. Compared with the figure in 2000, the ecological footprint of grassland in Haiyan County increased by $0.16 \text{ hm}^2\cdot\text{Cap}^{-1}$ in 2020. The smallest grassland ecological footprint is distributed in the central region with strong grassland productivity, while the largest grassland ecological footprint is mainly distributed to the north of Qinghai Lake and some areas of high altitude in the north. The ecological carrying capacity shows a slightly decreasing trend, falling in the northern and central regions but rising in the southwest and southeast regions. Higher grassland ecological carrying capacity is identified in Ganzihe town, Jintan town and Qinghai Lake town, accounting for 67.93% of the total area. The average value of grassland ecological deficit/surplus is $2.87 \text{ hm}^2\cdot\text{Cap}^{-1}$, increasing gradually from the periphery to the middle of the county. In general, the annual values are all greater than 0, indicating that the regional grassland ecosystem is in surplus and there is no major environmental crisis.

Keywords: ecological footprint, ecological carrying capacity, grassland, net primary productivity of vegetation

收稿日期: 2022年5月13日; 修回日期: 2023年5月10日
第一作者: 赵彤(1993—), Email: taytaycma@163.com
通信作者: 孙玮婕(1995—), Email: 429014977@qq.com
资助信息: 青海省人民政府三江源国家公园联合研究专项 (LHZX-2020-08)

0 引言

自1987年以来, 可持续发展作为一种新的发展理念和模式已经从定性的描述逐渐走向定量的测定和评价。定量研究可持续发展的程度、人类对资源的利用情况以及人类对生态环境产生的影响以及压力已经

成为目前研究的重要内容^[1-4]。生态足迹 (ecological footprint, EF) 概念是生态学教授William Rees在20世纪90年代提出的, 并同Mathis Wackernagel一起将生态足迹概念发展为生态足迹模型^[4]。所谓生态足迹就是能够持续地提供资源或消纳废物的、具有生物生产力的地域空间, 其含义就是要维持一个人、地区、国家的生存所需要的或者指能够容纳人类所排放的废物的、具有生物生产力的地域面积。该值的大小反映着区域人口对环境的破坏程度^[5-8]。随着生态模型的不断研究与广泛应用, 生态承载力评价是生态足迹模型应用的重要方面^[9-11]。生态承载力则是指在某一特定环境条件下 (主要指生存空间、营养物质、阳光等生态因子的组合), 某种个体存在数量的最高极限^[12-13]。生态盈余或赤字是用来表征区域生态承载力情况的两个要素, 是生态承载力与生态足迹两者之间做差值后所得, 若两者之间的差值 <0 , 则被定义为生态赤字, 即该区域社会经济发展处于不可持续状态; 差值 >0 则被定义为生态盈余, 即该区域生产消费活动未超出生态系统承载力^[14-17]。

在探索生态足迹模型前期, 国内学者主要针对部分省份或区域进行基于生态足迹的生态承载力评价研究。张志强等^[18]对中国西部12个省份的生态足迹进行研究计算, 进而评价当地的可持续发展状况, 研究表明, 除云南和西藏2个省 (区) 生态足迹较小外, 其余10个省 (区、市) 生态足迹均出现赤字, 表明区域的生活强度超过了生态系统的承载能力。徐中民等^[19]对国内部分省 (区、市) 1999年的生态足迹进行了计算, 大部分省 (区、市) 的生态足迹超过了当地的生态承载力, 区域经济社会发展处于一种不可持续的发展状态。随着生态足迹模型的不断应用, 针对区域的某一类土地利用类型的生态足迹以及生态承载力的测算研

究不断增多, 具体在草地以及耕地两类土地类型的研究比较突出。任彩凤等^[20]从人均生态足迹广度和人均生态足迹深度着手, 定量分析了淮北市的生态系统发展能力, 结果显示, 在7 a间, 人均生态足迹整体呈增加趋势, 人均生态承载力保持在 $0.2100 \text{ hm} \cdot \text{cap}^{-1}$ 的水平, 7 a间一直消耗资本存量, 生态系统处于极不安全状态。王瑞杰等^[21]利用土地利用数据结合生态足迹模型计算鄂尔多斯高原覆被的生态承载力, 2000—2005年鄂尔多斯高原处于生态盈余状态, 2005年以后区域由生态盈余转为生态赤字, 生态承载力处于严重透支状态。杨荣荣^[22]对祁连山南坡草地的生态足迹与生态承载力进行了评估, 发现2001—2018年祁连山南坡草地人均生态赤字/生态盈余的时间分布呈现逐年降低的趋势。

青海省海晏县作为全省的畜牧业重点发展区域, 定量的评价区域可持续发展程度对合理利用草地、改善草地生态有着重要的意义。本文以植被净初级生产力为基础, 对海晏县草地人均生态足迹与人均生态承载力进行估算与研究, 同时揭示其时空变化特征, 为区域生态环境健康发展提供一定的科学支撑。

1 数据与方法

1.1 研究区概况

海晏县 (图1) 位于青海省东北部, 湟水河的发源地, 北接祁连县、门源县, 东邻大通县、湟中县, 南接湟源县、共和县, 西邻刚察县。全县总面积 4853 km^2 。区域平均海拔在 $3000 \sim 3400 \text{ m}$; 海晏县属于高原亚干旱气候, 年平均气温为 $1.5 \text{ }^\circ\text{C}$, 年日照时数在 $2750 \sim 2580 \text{ h}$, 年降水量在 $270 \sim 500 \text{ mm}$ 。海晏县草地资源丰富, 是青海省重要的生态畜牧业示范区, 区域有草场 362.5 万亩, 夏秋草场 153.2 万亩, 畜均占有草场 9.8 亩, 主要的草地类型为高寒草地。2020年, 海晏县人口为 37729 人。

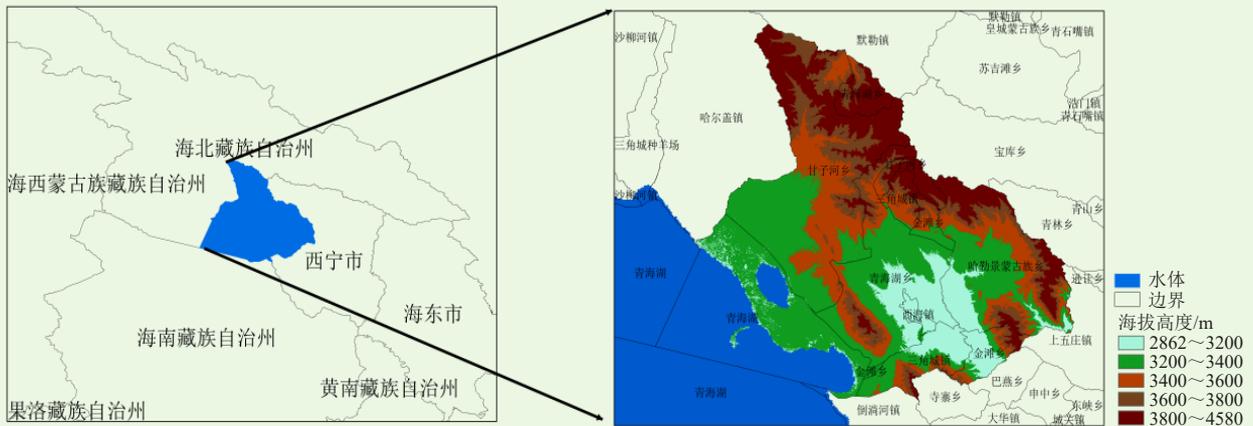


图1 研究区概况

Fig. 1 Location of the study area

1.2 数据来源与预处理

本文的源数据包括用于计算植被净初级生产力的MODIS NDVI数据 (MOD13A1)、气象数据、植被类型数据以及用于评估CASA模型估算NPP结果精度的MODIS NPP数据 (MOD17A3)。

遥感数据来自于NASA, 其中MOD13A1数据空间分辨率为500 m, 时间分辨率为16 d; MOD17A3空间分辨率为500 m, 时间分辨率为1 a。气象数据来自于国家青藏高原科学数据中心研发的中国区域地面气象要素驱动数据集 (CMFD), 该数据集以Princeton、GLDAS、GEWEX-SRB与TRMM作为数据基础, 融合了中国气象局常规气象观测数据制作而成, 其精度优于国际上已有的再分析数据^[23-24]; 数据空间分辨率为1 km, 时间分辨率为3 h。植被类型数据来源于中国科学院资源环境科学数据中心, 数据空间分辨率为1 km。综合利用上述数据, 结合CASA模型计算插件计算海晏县草地NPP, 插件中的静态参数文件引用了以往研究结果, 配置9类植被类型的参数^[25-27]。

2000—2020年的统计数据主要来源于青海省统计年鉴、中国县域统计年鉴、青海省海晏县人民政府官方网站。DEM数据来源于中国科学院计算机网络信息中心地理空间数据云平台。

1.3 研究方法

1.3.1 CASA模型计算NPP

CASA模型是由遥感数据、温度、降水、太阳辐射以及植被类型和土壤类型共同驱动的光能利用率模型, 主要通过光合有效辐射 (APAR) 和光能转化率 (ε) 来计算NPP, 计算公式为:

$$NPP = APAR \times \varepsilon \quad (1)$$

光合有效辐射计算公式如下:

$$APAR = SOL \times FPAR \times 0.5, \quad (2)$$

式中, SOL为太阳总辐射量 ($MJ \cdot m^{-2}$); FPAR为植被冠层对入射光合有效辐射的吸收; 常数0.5表示植被所能利用的太阳有效辐射占太阳总辐射的比例。SOL、FPAR具体计算方法见参考文献^[28]。

利用2000—2020年计算的NPP数据, 结合海晏县草地分类结果, 裁剪出海晏县草地NPP数据, 经过计算输出相应的统计数据, 裁剪与统计方法均采用ArcGIS软件实现。草地NPP年际变化采用线性趋势斜率方法^[29]计算。

1.3.2 生态足迹模型

基于NPP, 对海晏县草地人均生态足迹进行计算, 计算公式为^[30]:

$$ef = r_i \times aa_i = r_i \times \frac{c_i}{p_i}, \quad (3)$$

$$c_i = \frac{Y_i}{P_i}, \quad (4)$$

式中, ef 为海晏县草地人均生态足迹; r_i 为海晏县草地的均衡因子, 为研究区某类土地的年平均生产力与所有土地类型总年平均生产力之比, 根据文献^[31], $r_i=0.49$; aa_i 为海晏县草地人均生物生产面积; c_i 为海晏县草地的人均消费量, Y_i 为海晏县年产草量, P_i 为海晏县年人口数, 年产草量和年人口数均由统计年鉴获取; p_i 为海晏县草地的年均NPP; i 代表特定的土地类型, 在研究中代表草地。

1.3.3 生态承载力计算模型

基于草地均衡因子与产量因子, 对研究区域的草地人均生态承载力进行计算, 计算公式为:

$$ec = a_i \times r_i \times y_i, \quad (5)$$

$$y_i = \frac{P_i}{p_{i-China}}, \quad (6)$$

式中, ec 表示草地人均生态承载力; a_i 表示某类土地面积, 在本研究中代表海晏县草地面积; r_i 同式(3); y_i 表示区域草地的产量因子; p_i 为海晏县草地年均NPP; $p_{i-China}$ 为全国草地年均NPP; i 同式(3)。

1.3.4 生态赤字/盈余计算模型

生态赤字/盈余 (es) 利用生态承载力与生态足迹之间的差值表征, 差值 <0 表征区域处于可持续发展的生态赤字阶段, 反之表征区域处于可持续发展的生态盈余阶段^[31]:

$$es = ec - ef. \quad (7)$$

2 结果与分析

2.1 海晏县草地NPP估算及时空变化

2.1.1 MOD17A3产品与CASA模型估算NPP精度评估

利用MOD17A3产品, 与CASA模型计算得到的NPP结果进行精度检验, 利用ArcGIS按点提取值工具分别提取了两套栅格数据上1000个检验样本值, 从两套数据的精度检验结果可以看出两套产品之间的相关性较高 (图2), 且两套数据之间的偏差较小。

2.1.2 海晏县草地NPP时间分布格局

2000—2020年海晏县草地NPP多年平均值为 $368.96 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。整体来看, 草地NPP值呈波动上升趋势, 波动范围在 $271.06 \sim 418.55 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。其中, 草地NPP的峰值出现在2017年, 为 $418.55 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$; 谷值出现在2000年, 为 $271.06 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。2000—2005年, 海晏县草地NPP均低于平均值, 且呈逐年上升趋势; 2005年后大部分年份草地NPP高于平均值, 除部分年份 (2008、2011、2015年) 低于平均值以外, 其余年份均呈波动上升的趋势。多年平均值结果表明, 自

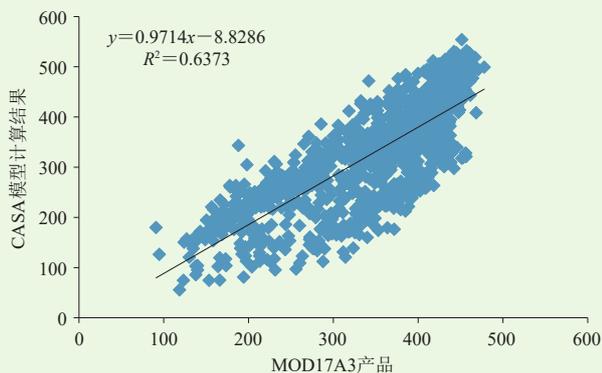


图2 2015年海晏县MOD17A3产品与CASA模型NPP (单位: $\text{gC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$) 对比

Fig. 2 Comparison of NPP (Unit: $\text{gC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$) between MOD17A3 and CASA model in Haiyan County in 2015

2005年后,海晏县草地的生产力逐年增强,草地生态环境整体趋好。

2000—2020年海晏县草地的NPP值呈逐年缓慢增加的趋势,增加速率为 $5.50 \text{ gC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ (图3)。根据多年变化趋势结合显著性检验结果,研究区域草地NPP大部表现出显著增加趋势,且通过0.05水平的显著性检验,只有部分地区呈略微减少的趋势。其中,草地NPP减少的区域主要集中在环湖地区以北以及县域北部零星地区,NPP平均减少 $0.50 \text{ gC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$;其余地区NPP由北至南呈增加的趋势,趋势斜率范围在 $3.0\sim 7.8$ (图4)。

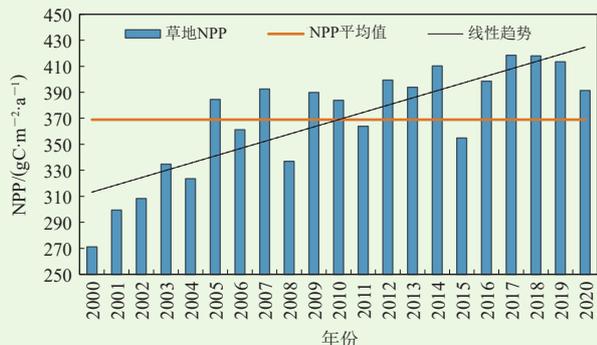


图3 2000—2020年海晏县草地NPP时间分布特征

Fig. 3 Temporal distribution of grassland NPP in Haiyan County from 2000 to 2020

2.1.3 海晏县草地NPP空间分布格局

海晏县草地NPP多年平均值的空间分布特征为中部向西部以及北部高山地区逐渐减少的趋势,且高值区和低值区的分布界限比较明显。其中,中部低海拔地区的青海湖乡、三角城金滩乡以及哈勒景的草地生产力较强,区域草地的NPP值在 $400\sim 450 \text{ gC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 。环湖以北沙地区域以及北部海拔较高的青海湖乡以及甘子河等区域的草地整体NPP值较低,在

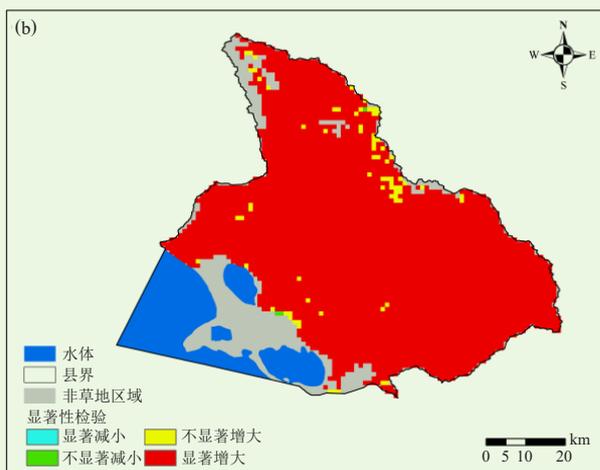
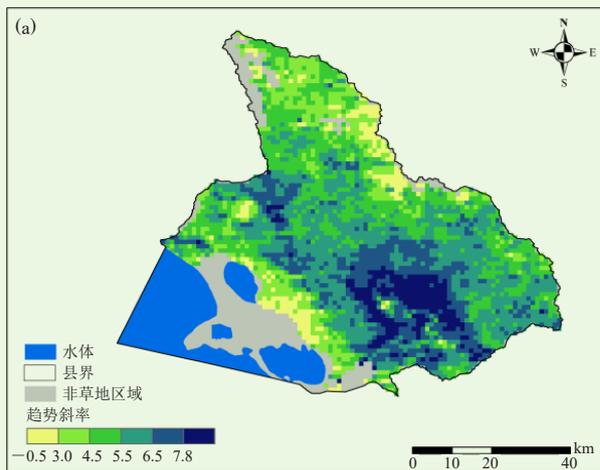


图4 2000—2020年海晏县草地NPP年际变化趋势(a)和显著性检验结果(b)

Fig. 4 Interannual variation trend (a) of grassland NPP in Haiyan County from 2000 to 2020 and its significance analysis (b)

$200\sim 300 \text{ gC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 。从分布结果来看,海晏县草地NPP的分布具有一定的垂直地带性,具体表现为随海拔升高,NPP逐渐降低(图5)。

2.2 海晏县草地生态足迹估算及时空变化

2.2.1 海晏县草地生态足迹时间分布

在草地NPP计算结果的基础上,根据式(3)对2000—2020年的草地人均生态足迹进行定量化估算。由于文章中只涉及草地一种土地利用类型,因此生态足迹模型中的均衡因子为草地均衡因子,取 $0.49^{[31]}$ 。最终海晏县草地人均生态足迹估算结果如图6所示:21 a间,海晏县草地人均生态足迹呈缓慢上升的趋势,平均生态足迹为 $0.24 \text{ hm}^2\cdot\text{cap}^{-1}$,同时在2007、2009和2017年出现了3次下降。2020年海晏县草地生态足迹为 $0.34 \text{ hm}^2\cdot\text{cap}^{-1}$,相较于2000年增长了 $0.16 \text{ hm}^2\cdot\text{cap}^{-1}$ 。整体来看,2000—2013年草地人均生态足迹均低于平

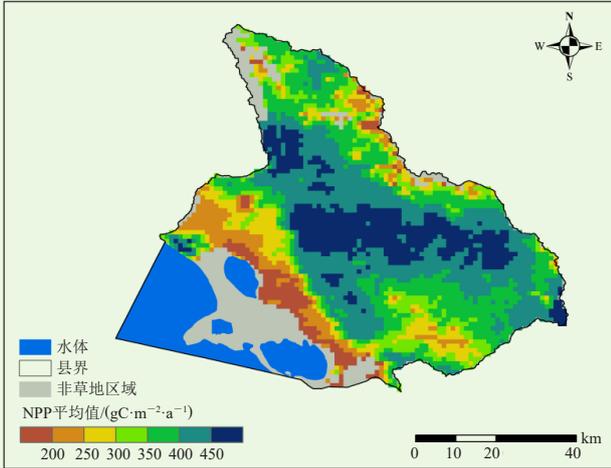


图5 2000—2020年海晏县草地年均NPP空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of the annual grassland NPP in Haiyan County from 2000 to 2020



图6 2000—2020年海晏县草地人均生态足迹时间分布特征
Fig. 6 Temporal distribution of ecological footprint per capita in Haiyan County from 2000 to 2020

均值,表明该时段草地生态系统态势趋稳,未出现较大的生态环境危机。

2000—2020年海晏县人均草地生态足迹年际变化趋势平均值为0.010,表现出显著增加的趋势($P<0.05$),仅部分地区呈略微减少的趋势。其中,中部大部区域生态足迹每年增长速率在0.008~0.011;甘子河乡南部以及东北部、青海湖乡南部以及北部部分地区和西海镇生态足迹每年增长速率在0.015~0.018。可以看出,增长速率较大区域也是草地长势较差退化严重、以及海拔偏高区域,区域整体情况对有限的草地资源的负面影响较大(图7)。

2.2.2 海晏县草地生态足迹空间分布

图8为草地人均生态足迹空间分布结果,分布特征为中部偏低环湖以北以及北部高山地区偏高。其中,草地人均生态足迹最小的区域分布在草地生产力较强的中部区域,区域值范围为0.17~0.21 $\text{hm}^2 \cdot \text{cap}^{-1}$,面积占整个研究区草地面积的42.85%;草地生态足迹最小的区域分布在草地生产力较强的中部大部以及北部

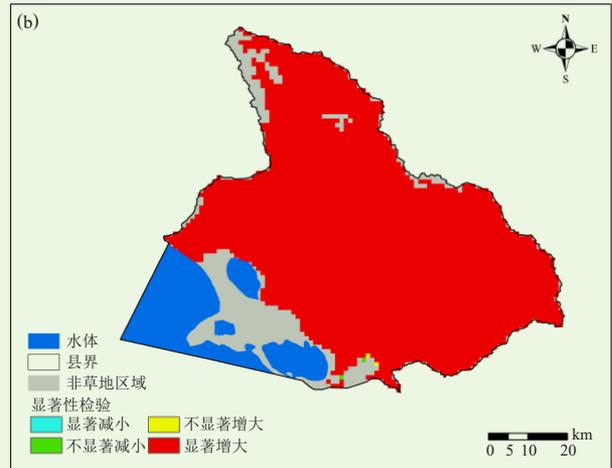
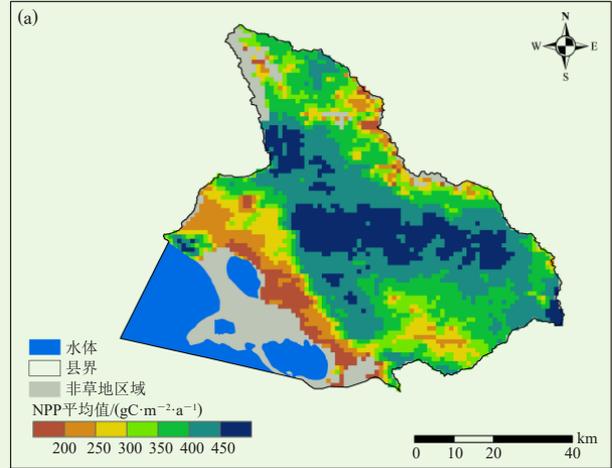


图7 2000—2020年海晏县草地人均生态足迹年际变化趋势(a)和显著性检验结果(b)

Fig. 7 Interannual variation trend (a) of grassland ecological footprint per capita from 2000 to 2020 in Haiyan County and its significance analysis (b)

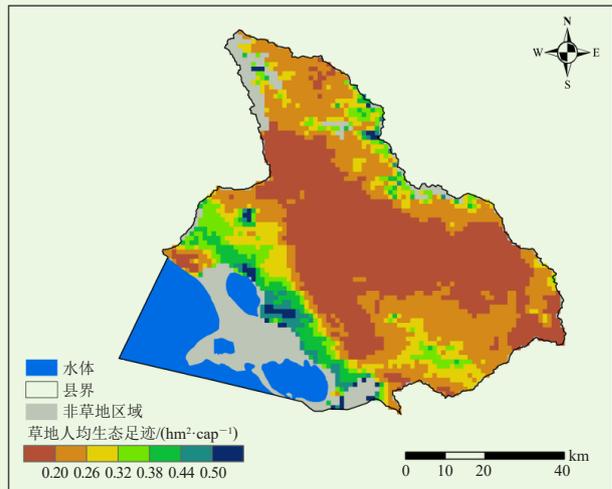


图8 2000—2020年海晏县草地人均生态足迹空间分布
Fig. 8 Spatial distribution of grassland ecological footprint per capita in Haiyan County from 2000 to 2020

和东南部部分区域，其值范围为 $0.17\sim 0.21\text{ hm}^2\cdot\text{cap}^{-1}$ ，面积占比约为42.85%；草地人均生态足迹最大的区域主要分布于环湖北部以及研究区北部高海拔的部分区域，其值范围为 $0.44\sim 1.06\text{ hm}^2\cdot\text{cap}^{-1}$ ，面积占比约为8.09%。

2.3 海晏县草地生态承载力估算及时空分布

2.3.1 海晏县草地生态承载力时间分布

根据生态承载力计算模型，结合确定的草地均衡因子、产量因子、海晏县草地面积以及人口数量等要素，对海晏县2000—2020年草地人均生态承载力进行估算。由于文章主要涉及草地一种土地利用类型，所以产量因子主要以草地为主，产量因子是根据海晏县草地NPP与全国草地NPP平均值的比值计算得出。2000—2020年海晏县草地人均生态承载力呈微弱降低的趋势，最高值出现在2005年，为 $3.57\text{ hm}^2\cdot\text{cap}^{-1}$ ，最低值出现在2015年，为 $2.77\text{ hm}^2\cdot\text{cap}^{-1}$ （图9）。图10为海晏县21 a间草地人均生态承载力年际变化趋势与显著性检验结果（ $P<0.05$ ），空间分布特征表现为北部以及中部显著减少，西南以及东南部显著增加的趋势。其中减少的区域主要集中在甘子河乡中北部、三角城以及哈勒景大部，其变化范围在 $-0.037\sim 0.041\text{ hm}^2\cdot\text{cap}^{-1}$ ；草地人均生态承载力增加的区域主要集中在环湖以北的甘子河乡、青海湖乡以及西海镇，生态承载力增加范围在 $0.135\sim 0.561\text{ hm}^2\cdot\text{cap}^{-1}$ 。



图9 2000—2020年海晏县草地人均生态承载力时间分布特征
Fig. 9 Temporal distribution of grassland ecological carrying capacity per capita in Haiyan County from 2000 to 2020

2.3.2 海晏县草地生态承载力空间分布

海晏县2000—2020年草地人均生态承载力空间分布结果如图11所示。草地人均生态承载力空间分布呈由四周向中部逐渐增大的趋势。其中，草地生态承载力最小的区域分布于研究区中海拔较高区域以及存在土地沙化的区域，区域值范围为 $1.5\sim 2.5\text{ hm}^2\cdot\text{cap}^{-1}$ ，

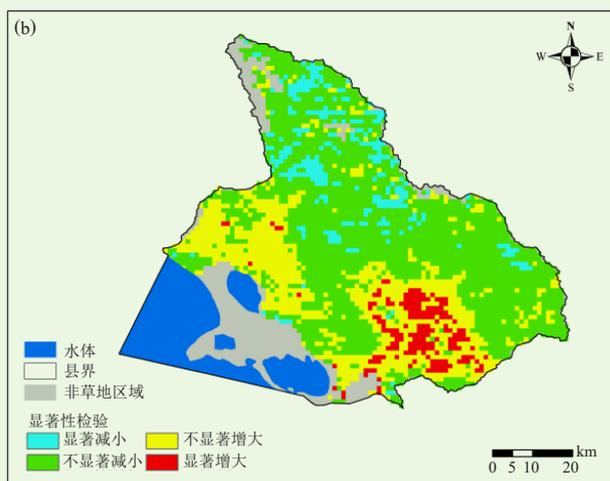
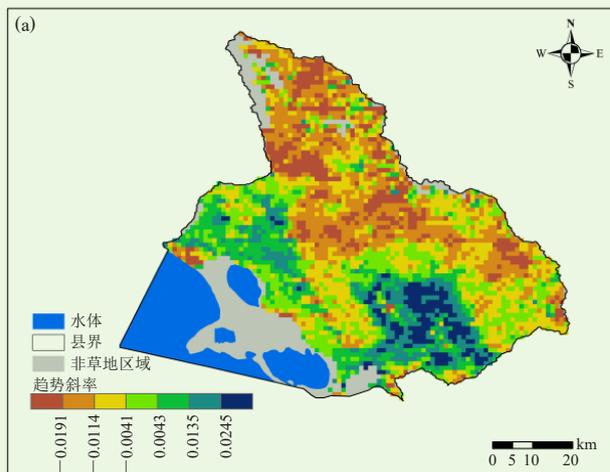


图10 2000—2020年海晏县草地人均生态承载力年际变化趋势 (a) 和显著性检验结果 (b)

Fig. 10 Interannual variation trend (a) of grassland ecological carrying capacity per capita in Haiyan County from 2000 to 2020 and its significance analysis (b)

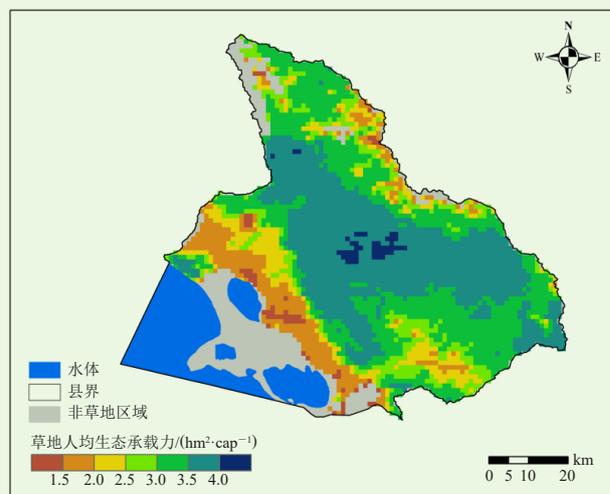


图11 2000—2020年海晏县草地人均生态承载力空间分布
Fig. 11 Spatial distribution of grassland ecological carrying capacity per capita in Haiyan County from 2000 to 2020

约占整个研究区草地面积的32.07%；草地生态承载力较大的区域分布于研究区的中部地带，其值范围在2.9~4.1 $\text{hm}^2 \cdot \text{cap}^{-1}$ ，在甘子河乡、金滩乡以及青海湖乡分布比较多，面积占比约为67.93%。结果显示，海晏县草地人均生态承载力与区域的草地生产力以及畜牧业的发展存在着密切的关系，青海湖乡北部以及甘子河乡等地区海拔较高，草地的生产能力较弱，牛羊等牲畜的数量较少，进而草地生态承载力偏低。

2.4 海晏县草地生态赤字/盈余时空分布

基于生态承载力与生态足迹的计算结果，对海晏县2000—2020年草地人均生态赤字/盈余的年际变化情况进行估算，结果如表1所示。2000—2020年海晏县草地人均生态赤字/盈余的年际变化呈现逐年波动降低的趋势，总体上每年的数值均 >0 ，草地生态系统处于生态盈余的状态，未出现较大环境危机。21 a间草地人均生态赤字/盈余的平均值约为2.87 $\text{hm}^2 \cdot \text{cap}^{-1}$ ，其中，低于平均值的年份有9个，最低值出现在2020年，为2.51 $\text{hm}^2 \cdot \text{cap}^{-1}$ ，这是由于2020年的草地生产力较低且生态承载力较低的原因。在2005年海晏县草地生态赤字/盈余达到了2000—2020年的峰值，为

表1 2000—2020年海晏县人均生态足迹、人均生态承载力以及生态赤字/盈余情况

Table 1 Per capita ecological footprint, ecological carrying capacity and ecological deficit/surplus in Haiyan County from 2000 to 2020

年份	NPP/ ($\text{gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)	人均生态足迹/ ($\text{hm}^2 \cdot \text{cap}^{-1}$)	人均生态承载力/ ($\text{hm}^2 \cdot \text{cap}^{-1}$)	生态赤字/盈余/ ($\text{hm}^2 \cdot \text{cap}^{-1}$)
2000	271.06	0.18	2.85	2.67
2001	299.43	0.17	3.08	2.91
2002	308.35	0.17	2.97	2.79
2003	334.71	0.18	3.14	2.96
2004	323.53	0.17	2.94	2.77
2005	384.51	0.18	3.57	3.39
2006	361.21	0.24	3.32	3.09
2007	392.56	0.22	3.48	3.26
2008	336.93	0.25	2.83	2.59
2009	389.86	0.20	3.39	3.19
2010	383.88	0.19	3.31	3.12
2011	363.85	0.21	3.10	2.89
2012	399.39	0.23	3.15	2.91
2013	393.82	0.25	2.92	2.67
2014	410.28	0.27	3.22	2.95
2015	354.91	0.38	2.77	2.39
2016	398.59	0.33	2.97	2.65
2017	418.55	0.30	3.19	2.89
2018	417.92	0.32	3.12	2.81
2019	413.46	0.34	3.22	2.87
2020	391.34	0.34	2.85	2.51

3.39 $\text{hm}^2 \cdot \text{cap}^{-1}$ ，主要是2005年海晏县草地NPP较大且人均生态足迹较低，使得该年份的草地生态环境状况较好。

从多年平均的空间分布情况来看，2000—2020年全县草地生态赤字/盈余呈由四周向中部逐渐增加的分布格局。其中生态赤字/盈余较低的区域仍处于环湖以北以及海晏县北部高海拔地区，区域的生态赤字/盈余值范围在1.0~2.5 $\text{hm}^2 \cdot \text{cap}^{-1}$ ；高值区在研究区中部，中部地区处于生态盈余的状态，区域值的范围在3.0~4.0 $\text{hm}^2 \cdot \text{cap}^{-1}$ （图12）。

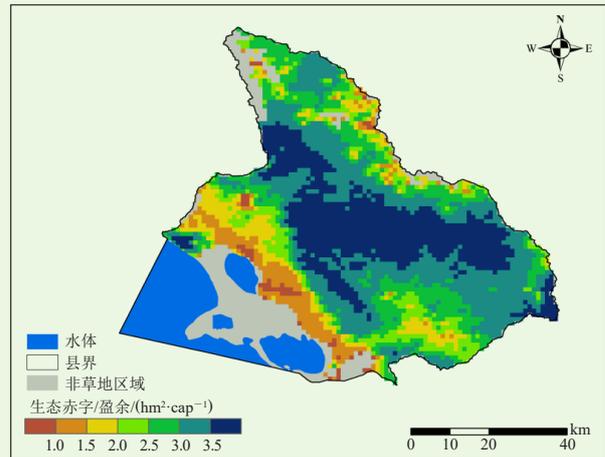


图12 2000—2020年海晏县草地生态赤字/盈余空间分布
Fig. 12 Spatial distribution of grassland ecological deficit/surplus in Haiyan County from 2000 to 2020

3 结论

本文基于NPP数据，结合生态足迹以及生态承载力计算模型，对2000—2020年海晏县草地生态足迹以及生态承载力进行了估算，同时揭示其时空分布特征。最终得出以下结论。

1) 海晏县2000—2020年草地NPP多年平均值为368.96 $\text{gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。草地NPP值呈波动上升趋势，波动范围在271.06~418.55 $\text{gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。其中，草地NPP的峰值出现在2017年，为418.55 $\text{gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ，谷值出现在2000年，值为271.06 $\text{gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。同时，海晏县草地NPP的分布具有一定的垂直地带性，具体表现为随海拔升高，NPP逐渐降低。

2) 21 a间海晏县草地人均生态足迹呈缓慢上升的趋势，平均生态足迹为0.24 $\text{hm}^2 \cdot \text{cap}^{-1}$ 。2020年海晏县草地生态足迹为0.34 $\text{hm}^2 \cdot \text{cap}^{-1}$ ，相较于2000年增长了0.16 $\text{hm}^2 \cdot \text{cap}^{-1}$ 。草地人均生态足迹最小的区域分布于草地生产力较强的中部区域，面积占整个研究区草地面积的42.85%；草地人均生态足迹最大的区域主要分布于环湖北部以及研究区北部高海拔的部分区域，其

值范围为 $0.44 \sim 1.06 \text{ hm}^2 \cdot \text{cap}^{-1}$ ，约占整个研究区面积的8.09%。

3) 2000—2020年海晏县草地人均生态承载力呈微弱降低的趋势，最高值出现在2005年，为 $3.57 \text{ hm}^2 \cdot \text{cap}^{-1}$ ，最低值出现在2015年，为 $2.77 \text{ hm}^2 \cdot \text{cap}^{-1}$ 。空间分布特征表现为北部以及中部减少，西南以及东南部增加。其中，草地生态承载力最小的区域分布于研究区中海拔较高区域以及存在土地沙化的区域，约占整个研究区草地面积的32.07%；草地生态承载力较大的区域分布于研究区甘子河乡、金滩乡以及青海湖乡，面积占比约为67.93%。

4) 2000—2020年全县草地生态赤字/盈余的平均值为 $2.87 \text{ hm}^2 \cdot \text{cap}^{-1}$ ，呈由四周向中部逐渐增加的分布格局。总体上每年的数值均 >0 ，草地生态系统处于生态盈余的状态，未出现较大环境危机。

参考文献

- [1] 张志强, 孙成权, 程国栋, 等. 可持续发展研究: 进展与趋向. 地球科学进展, 1999, 14(6): 589-595.
- [2] 孙兆敏, 刘世新, 任世春, 等. 区域可持续发展的一种定量评价方法——对生态足迹研究方法的一点认识. 西北农业学报, 2004, 13(1): 140-144.
- [3] 郭晗. 黄河流域高质量发展中的可持续发展与生态环境保护. 人文杂志, 2020, (1): 17-21.
- [4] Wackernagel M, Rees W. Perceptual and structural barriers to investing in natural capital: Economics from an ecological footprint perspective. *Ecological Economics*, 1997, 20(1): 3-24.
- [5] Wackernagel M, Yount J D. The ecological footprint: An indicator of progress toward regional sustainability. *Environmental Monitoring & Assessment*, 1998, 51(1-2): 511-529.
- [6] 牟格格, 陈建成. 基于生态足迹模型的安徽省可持续发展状况分析. 林业经济, 2014, 36(11): 63-66.
- [7] 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.
- [8] 赖力, 黄贤金. 全国土地利用总体规划目标的生态足迹评价研究. 农业工程学报, 2005, 21(2): 66-71.
- [9] 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. 中国农业资源与区划, 2020, 41(2): 246-251.
- [10] 许月卿. 基于生态足迹的北京市土地生态承载力评价. 资源科学, 2007, 29(5): 37-42.
- [11] 苏子龙, 袁国华, 周伟. 基于改进三维生态足迹模型的安徽省土地生态承载力评价. 水土保持研究, 2020, 27(3): 256-262.
- [12] 李永峰. 可持续发展概论. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2013.
- [13] 谷祎璐, 丁疆辉, 李奥梦. 保定市生产性生态承载力与生态功能耦合协调度时空分异. 生态学报, 2020, 40(20): 7175-7186.
- [14] 杨洁, 李忠德, 杨萍, 等. 基于生态足迹模型的山东省农业资源可持续发展分析. 中国农业资源与区划, 2016, 37(11): 56-64.
- [15] 於嘉闻, 龙爱华, 邓晓雅, 等. 湄公河流域生态系统服务与利益补偿机制. 农业工程学报, 2020, 36(13): 280-290.
- [16] 蒋依依, 王仰麟, 卜心国, 等. 国内外生态足迹模型应用的回顾与展望. 地理科学进展, 2005, 24(2): 13-23.
- [17] 李菲, 张小平. 甘肃省水资源生态足迹和生态承载力时空特征. 干旱区地理, 2020, 43(6): 1486-1495.
- [18] 张志强, 徐中民, 程国栋, 等. 中国西部12省(区市)的生态足迹. 地理学报, 2001, 56(5): 598-609.
- [19] 徐中民, 张志强, 程国栋, 等. 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.
- [20] 任彩凤, 程艳妹, 郑欣, 等. 基于生态足迹模型的淮北市自然资本利用研究. 生态科学, 2019, 38(6): 106-114.
- [21] 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. 水土保持通报, 2020, 40(1): 91-98, 107.
- [22] 杨荣荣. 基于NPP的祁连山南坡草地生态足迹与生态承载力估算及影响因素分析. 西宁: 青海师范大学, 2020.
- [23] Yang K, He J, Tang W, et al. China Meteorological Forcing Dataset (1979—2018). Beijing: National Tibetan Plateau Data Center, 2019.
- [24] He J, Yang K, Tang W, et al. The first high-resolution meteorological forcing dataset for land process studies over China. *Scientific Data*, 2020, 7(1): 1-11.
- [25] 李传华, 曹红娟, 范也平, 等. 基于校正的CASA模型NPP遥感估算及分析——以河西走廊为例. 生态学报, 2019, 39(5): 1616-1626.
- [26] 刘洁, 孟宝平, 葛静, 等. 基于CASA模型和MODIS数据的甘南草地NPP时空动态变化研究. 草业学报, 2019, 28(6): 19-32.
- [27] 高清竹, 万运帆, 李玉娥, 等. 基于CASA模型的藏北地区草地植被净第一性生产力及其时空格局. 应用生态学报, 2007, 18(11): 2526-2532.
- [28] 朱文泉, 潘耀忠, 张锦水. 中国陆地植被净初级生产力遥感估算. 植物生态学报, 2007, 31(3): 413-424.
- [29] 陈舒婷, 郭兵, 杨飞, 等. 2000—2015年青藏高原植被NPP时空变化格局及其对气候变化的响应. 自然资源学报, 2020, 35(10): 2511-2527.
- [30] 韩文文, 刘小鹏, 裴银宝, 等. 基于生态足迹的宁夏生态环境可持续发展研究. 水土保持研究, 2016, 23(5): 285-290, 297.
- [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, 2016.