

中国畜牧业环境约束的量化分析——基于土地环境承载力和生态足迹

熊学振, 杨春, 于琳

引用本文:

熊学振, 杨春, 于琳. 中国畜牧业环境约束的量化分析——基于土地环境承载力和生态足迹[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(8): 1799–1807.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-0136>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

山西省畜禽粪污土地承载力及粪尿替代化肥潜力分析

郭彩霞, 杨子森, 马文奇, 焦光月, 张建杰

农业环境科学学报. 2020, 39(7): 1548–1557 <https://doi.org/10.11654/jaes.2019-1431>

中国畜牧业温室气体排放现状及峰值预测

郭娇, 齐德生, 张妮娅, 孙铝辉, 胡荣桂

农业环境科学学报. 2017, 36(10): 2106–2113 <https://doi.org/10.11654/jaes.2017-0132>

山东省畜禽粪污土地承载力时空分异特征分析

郑莉, 张晴雯, 张爱平, 刘杏认, 刘士清, 韩聪

农业环境科学学报. 2019, 38(4): 882–891 <https://doi.org/10.11654/jaes.2018-0863>

海南省畜禽养殖环境承载力及有机肥替代化肥潜力分析

杨旭, 黄艳艳, 刘海林, 茶正早, 罗微, 林清火

农业环境科学学报. 2019, 38(11): 2609–2618 <https://doi.org/10.11654/jaes.2019-0669>

陕西关中地区冬小麦-夏玉米轮作系统生命周期评价

彭小瑜, 吴喜慧, 吴发启, 王效琴, 佟小刚

农业环境科学学报. 2015(4): 809–817 <https://doi.org/10.11654/jaes.2015.04.029>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

熊学振, 杨春, 于琳. 中国畜牧业环境约束的量化分析——基于土地环境承载力和生态足迹[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(8): 1799–1807.

XIONG X Z, YANG C, YU L. Quantitative analysis of environmental constraints in China's animal husbandry industry based on land environmental carrying capacity and ecological footprint[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2021, 40(8): 1799–1807.



开放科学 OSID

中国畜牧业环境约束的量化分析 ——基于土地环境承载力和生态足迹

熊学振, 杨春*, 于琳

(中国农业科学院农业经济与发展研究所, 北京 100081)

摘要: 聚焦高质量发展背景下畜牧业环境约束主题, 从土地环境承载力和生态环境承载力两个方面量化分析畜牧业环境约束水平, 明确中国畜牧业环境约束的时空分异特征以及养殖、需求规模分别同土地、生态环境的匹配程度。采用养分平衡法和三维生态足迹模型分别测算了畜牧业土地环境承载力和生态环境承载力, 并进行时空特征分析。结果显示: 2001—2018年, 土地环境可载猪当量增长 45.21%, 土地环境承载力指数下降 36.07%, 畜牧业土地环境承载状况明显好转; 人均畜牧业生态足迹和生态承载力分别提升 22.81% 和 42.96%, 生态承载强度呈缓和趋势, 但截至 2018 年, 畜牧业生态足迹仍高达承载力的 2.46 倍, 生态赤字为 $2.08 \times 10^8 \text{ hm}^2$; 综合两维度来看, 中国畜牧业仍面临严峻的生态环境压力, 区域间环境约束不平衡现象显著, 土地环境约束“南重北轻”、生态环境约束“东重西轻”, 东南沿海地区土地、生态环境承载压力最重。研究表明, 中国畜牧业环境约束严峻, 但正在趋向缓和状态, 特别是土地环境约束明显好转, 但生态环境约束形势依然不容乐观, 生态环境约束总体要重于土地环境约束且长期未得到足够重视。

关键词: 畜牧业; 环境约束; 土地承载力; 生态足迹; 量化分析

中图分类号: X713 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2021)08-1799-09 doi:10.11654/jaes.2021-0136

Quantitative analysis of environmental constraints in China's animal husbandry industry based on land environmental carrying capacity and ecological footprint

XIONG Xuezheng, YANG Chun*, YU Lin

(Institute of Agricultural Economics and Development, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China)

Abstract: The purpose of this study is to determine the environmental constraints of animal husbandry in the context of high-quality development and to quantitatively analyze these constraints based on two aspects: land environmental carrying capacity and ecological environmental carrying capacity, and further clarify the environmental constraints in China's animal husbandry industry over time and space using differentiation characteristics and the matching degree of scale of breeding and demand with the land and ecological environment. This study used the nutrient balance method and the three-dimensional ecological footprint model to calculate the land environmental carrying capacity and the ecological environmental carrying capacity of the animal husbandry industry, and analyzed the temporal and spatial characteristics, respectively. The results showed that from 2001 to 2018, the land environmental carrying capacity of pigs increased by 45.21%, the land environmental carrying capacity index decreased by 36.07%, and the land environmental carrying capacity for the animal husbandry industry improved significantly. The per capita ecological footprint of animal husbandry industry and the

收稿日期: 2021-02-01 录用日期: 2021-04-01

作者简介: 熊学振(1995—), 男, 山东德州人, 硕士研究生, 从事畜牧业经济研究。E-mail: xiongcas2019@163.com

*通信作者: 杨春 E-mail: yangchun@caas.cn

基金项目: 中国农业科学院科技创新工程项目(ASTIP-IAED-2021-01); 国家自然科学基金项目(71503251); 国家牧草产业技术体系专项资金项目(CARS-34-22)

Project supported: Science and Technology Innovation Project of Chinese Academy of Agricultural Sciences (ASTIP-IAED-2021-01); The National Natural Science Foundation of China (71503251); National Pasture Industry Technology System Special Fund (CARS-34-22)

ecological carrying capacity increased by 22.81% and 42.96% respectively, and the ecological carrying capacity showed a trend of relaxation. However, as of 2018, the ecological footprint was still as high as 2.46 times the carrying capacity, and the ecological deficit was $2.08 \times 10^8 \text{ hm}^2$. From a comprehensive two-dimensional perspective, China's animal husbandry industry was still exerting severe pressure on the ecological environment, and the imbalance of environmental constraints between regions was highly significant. Land environmental constraints were low for southern and northern areas, ecological environment constraints were low for eastern and western areas, and the ecological environment exerted the highest pressure in the southeast coastal areas. The results show that the environmental constraints associated with the animal husbandry industry in China are severe but easing, the land environmental constraints are notably improved, but the ecological environmental constraints are still poor and these are generally more important than the land environmental constraints and have been neglected for a long time.

Keywords: animal husbandry; environmental constraints; land carrying capacity; ecological footprint; quantitative analysis

环境约束趋紧已成为中国畜牧业发展所面临的不争事实。畜禽生产规模扩大既加剧粪污环境污染,也带来自然资源存量的持续过度消耗。2020年《第二次全国污染物普查公报》显示,畜禽养殖业已成为环境污染的主要来源之一,畜禽养殖业排放的化学需氧量(COD)达到 $1.00 \times 10^7 \text{ t}$,占全国所有污染物排放的COD的46.67%,占农业源污染物排放的COD的93.76%;氮、磷污染的排放量分别为 $5.96 \times 10^5 \text{ t}$ 、 $1.20 \times 10^5 \text{ t}$,分别占全国所有污染物氮、磷排放总量的19.61%、37.95%,分别占农业源污染物氮、磷排放总量的42.14%、56.46%^[1]。污染物直接排放量超过自然环境消纳能力将会引发水体、土壤等生态污染,破坏种植业生产环境,造成粮食减产等一系列问题,最终危及畜禽生产系统和人类食物营养系统^[2-3]。

中国畜牧业发展面临怎样的土地、生态环境约束?已有学者对畜牧业污染和土地环境承载状况开展了广泛研究^[4-9]。李靖等^[10]基于土壤养分平衡原理,以氮、磷作为代表性养分测度出畜禽养殖环境负荷系数的区域差异,并将全国划分为超载区、平衡区和潜力区;潘瑜春等^[11]通过估算北京市平谷区畜禽氮、磷产生量及耕地、果园的畜禽承载力,得出平谷区畜禽粪便负荷和畜禽承载潜力;邱乐丰等^[12]通过土壤有效氮、磷实测数据计算得到土壤供肥量,结合种植和养殖业年度统计数据,采用修正后的养分平衡法测算了浙江杭州的畜禽合理承载量和污染风险指数;仇焕广等^[13]测算了各省区不同畜禽粪污的排放量与污染量,着重分析了不同规模养殖户的粪污处理方式和环境污染程度,并采用农业空间均衡模型系统地对中国畜禽污染空间特征进行了预测分析。此外,也有学者采用排污系数法^[14]、层次分析法^[15]、系统分析法^[16]、数据包络法^[17]、状态空间模型^[18]等方法测算了畜牧业环境承载力。生态足迹是评估人类活动对自然生态环境

影响的有效方法^[19],在众多产业部门^[20-21]、微观产品^[19,22]及地域生态研究^[23-27]中被广泛应用,但就畜牧业生态足迹的相关研究仍然较少。谢鸿宇等^[28]以分析畜禽口粮为切入点,根据中国畜牧业生产实际测算了单位畜产品的生态足迹,发现猪肉、禽肉、禽蛋的足迹主要来自饲料粮,牛肉、羊肉、牛奶的足迹主要来自草料;郑晶等^[29]为探讨广东省生猪养殖业对生态环境的影响,运用生态足迹方法测度对比了广东省生猪养殖的生态足迹和生物承载力。

已有研究主要分析畜禽粪污排放量与土地承载量的协调关系,但缺乏全国层面的研究。畜禽粪污土地环境承载力存在怎样的区域差异和变动趋势?区域畜牧业系统内的生态环境能否支撑畜产品消费的生态足迹?现有研究对这些问题未做出系统回答,难以掌握中国畜牧业环境约束的具体尺度。基于此,本文旨在通过对全国及各省域不同畜禽粪污养分需求量、供给量的测定计算出土地环境承载容量,以此量化分析畜禽粪污的土地环境约束水平;通过三维生态足迹模型测算畜牧业生态足迹、生态承载力、生态承载强度和盈亏状况,以此量化分析畜牧业发展的生态环境约束水平。

1 材料与方法

1.1 土地环境承载力测算方法

1.1.1 作物粪污养分需求量

(1) 作物养分总需求量

$$A = \sum (P_i \times X_i) + \sum (G \times Y) \quad (1)$$

式中: A 表示区域内作物养分总需求量; P_i 表示区域内第 i 种农作物或牧草年产量; X_i 表示区域内第 i 种农作物或牧草实现单位产量所需的氮(磷)量; G 表示人工林地的面积; Y 表示人工林地单位面积年生长量所需的氮(磷)量。

(2) 作物粪污养分需求量

$$D=A \times FP \times MP / MR \quad (2)$$

式中: D 表示区域内作物粪污养分需求量; FP 表示作物总养分需求中施肥养分占比,由各区域土壤养分分级确定; MP 表示畜禽粪污养分(有机肥)需求量占施肥养分总量的比例,由各区域施肥情况测算得到; MR 表示粪污当季利用率,氮、磷素分别取30%、35%^[30]。

1.1.2 畜禽粪污养分供给量

(1) 畜禽粪污养分产生量

$$E=\sum AP_n \times DP_n \times t \quad (3)$$

式中: E 表示区域内畜禽粪污养分产生量; AP_n 表示第 n 种畜禽年均存栏量,此处猪、牛、羊取年末存栏量,禽类取出栏量和年末存栏量之和; DP_n 表示第 n 种畜禽日排泄的氮(磷)量; t 表示养殖周期,一般按照365 d计算^[30],但考虑家禽出栏周期过短,结合主要畜禽的实际出栏时间和专家意见将家禽养殖周期调整为42 d。

(2) 畜禽粪污养分收集量

$$C=\sum E_n \times PC_{n,k} \times PL_k \quad (4)$$

式中: C 表示畜禽粪污养分收集量; E_n 表示第 n 种畜禽粪污养分产生量; $PC_{n,k}$ 表示第 n 种畜禽粪在第 k 种清粪方式中所占比例,此处干清粪、水冲清粪的比例分别取72%、28%^[30]; PL_k 表示第 k 种清粪方式的氮(磷)养分收集率。

(3) 畜禽粪污养分供给量

$$S=\sum C_n \times HD_{n,m} \times SA_m \quad (5)$$

式中: S 表示畜禽粪污养分供给量; C_n 表示第 n 种畜禽的粪污养分收集量; $HD_{n,m}$ 表示第 n 种畜禽在第 m 种粪污处理方式中所占比例,此处厌氧发酵、固体贮存、堆肥3种处理方式的比例分别取7%、92%、1%^[30]; SA_m 表示第 m 种处理方式的氮(磷)养分留存率。

1.1.3 畜禽粪污土地环境承载容量与承载力指数

(1) 单位猪当量粪污养分供给量

$$PD=S / RE \quad (6)$$

式中: PD 表示单位猪当量粪污养分供给量; RE 表示区域内折算为猪当量的畜禽存栏量,100头猪相当于15头奶牛、30头肉牛、259只羊、2 500只家禽的存栏量^[30],家禽出栏量根据出栏周期进行相应折算。

(2) 畜禽粪污土地环境承载容量

$$CA=D / PD \quad (7)$$

式中: CA 表示区域畜禽粪污土地环境承载容量。

(3) 畜禽粪污土地环境承载力指数

$$I=RE / CA \quad (8)$$

式中: I 表示区域畜禽粪污土地环境承载力指数。

1.2 畜牧业生态足迹测算方法

1.2.1 畜牧业生态足迹测算

(1) 畜牧业用地生物资源足迹

$$ef_1=\sum_{i=1}^n rG_i+\sum_{i=1}^n rA_i=\sum_{i=1}^n r\left(\frac{C_i}{P_i}\right)+\sum_{i=1}^n r\left(\frac{C_i \times F_i}{P_f}\right) \quad (9)$$

$$EF_1=ef_1 \times N \quad (10)$$

式中: ef_1 为人均畜牧业用地生物资源足迹; r 为均衡因子; i 为消费项目类型,包括牛肉、羊肉、牛奶(消耗饲料粮和牧草)、猪肉、禽肉、禽蛋(消耗饲料粮); G_i 、 A_i 分别为第 i 种消费项目折算的人均生物生产性草地面积和耕地面积; C_i 为第 i 种消费项目的人均消费量,指人均表观消费量, $C_i=(\text{生产量}+\text{进口量}-\text{出口量})/\text{总人口}$; P_i 为第 i 种消费项目的全球平均生产力; F_i 为第 i 种消费项目的饲料粮转换系数; P_f 为第 f 种饲料粮的全球平均生产力; EF_1 为畜牧业用地生物资源足迹; N 为人口数量。

(2) 畜牧业生产活动碳足迹

$$ef_2=\sum_{i=1}^n M_{i,k} \times E_{i,k} \times w \quad (11)$$

$$EF_2=ef_2 \times N \quad (12)$$

式中: ef_2 为人均畜牧业生产活动碳足迹; $M_{i,k}$ 为第 i 种消费项目第 k 项物质流的发生系数; $E_{i,k}$ 为第 i 种消费项目第 k 项物质流的排放系数; w 为考虑海洋碳吸收贡献情况下,中和单位 CO_2 排放所需的生物生产性土地面积,本文参考已有研究^[19],每吨 CO_2 排放所需的生物生产性土地面积为 0.2563 hm^2 ; EF_2 为畜牧业生产活动碳足迹。

(3) 畜牧业生态足迹

$$EF=EF_1+EF_2 \quad (13)$$

$$ef=ef_1+ef_2 \quad (14)$$

式中: EF 为畜牧业生态足迹; ef 为人均畜牧业生态足迹。

1.2.2 畜牧业生态承载力测算

$$EC=\sum r \times y \times L \quad (15)$$

$$ec=EC / N \quad (16)$$

式中: EC 为畜牧业生态承载力; y 为耕地/草地的产量因子; L 为畜牧业占用的耕地/草地面积。

1.2.3 三维生态足迹

$$EF_{\text{depth}}=EF / EC=eflec \quad (17)$$

$$ER=(1-EF_{\text{depth}}) \times EC=EC-EF \quad (18)$$

$$er=ER / N \quad (19)$$

$$ED = (EF_{\text{depth}} - 1) \times EC = EF - EC \quad (20)$$

$$ed = ED / N \quad (21)$$

式中: EF_{depth} 为足迹深度, 代表人类畜牧业生产活动对自然资本存量的消耗程度; ER 为生态盈余量, 当 $0 < EF_{\text{depth}} < 1$ 时, 畜牧业用地呈生态盈余状况; er 为人均生态盈余量; ED 为生态赤字量, 当 $EF_{\text{depth}} > 1$ 时, 畜牧业用地呈生态赤字状况; ed 为人均生态赤字量。

1.3 数据来源

作物生长养分需求参数、畜禽日排泄氮磷量、不同清粪及处理方式的氮磷收集(留存)率来自《土地承载力测算技术指南》, 由于人工林地养分需求参数仅列出了桉树、杨树两类, 本文参照已有研究^[31]以这两类树种的养分需求参数表征人工林地; 不同地区土壤养分及施肥特征数据来源于《国家耕地质量长期定位监测评价报告》^[32]。农作物产量及面积数据来自《中国农村统计年鉴》; 可利用草地、牧草产量数据来自《中国草业统计》; 人工林地面积来自《中国统计年鉴》; 畜禽存出栏量数据来自《中国畜牧兽医年鉴》和《中国农村统计年鉴》; 各类畜产品和饲料粮的全球平均生产力、畜产品贸易数据来自FAO; 饲料粮转换系数、畜产品生产的物质流信息依据《全国农产品成本收益资料汇编》核算得到; 人口数据来自《中国人口和就业统计年鉴》; 由于国家统计局公布的居民畜产品消费数据仅指户内消费数据, 而户内消费数据远小于实际消费数据, 故本文在测算过程中综合户内消费数据、产量数据和进出口数据进行推导; 测算碳足迹的基础投入物包括柴油、原煤、电力、化肥、农膜、农药, 均衡因子及各投入物的碳排放系数结合相关研究确定^[19]。

2 中国畜禽粪污土地承载力的测度分析

2.1 作物养分需求量与土地承载容量

2.1.1 作物养分需求量

2018年, 全国(不含港澳台, 下同)基本农作物、

牧草与人工林地的氮养分总需求为 2.89×10^7 t, 磷养分总需求为 1.11×10^7 t。考虑不同地区土壤养分结构、施肥结构及养分利用率等因素后, 测得全国对畜禽粪污的氮养分需求为 9.42×10^6 t, 磷养分需求为 3.11×10^6 t。分省份来看, 氮需求最高的前五位分别为河南、新疆、山东、四川、内蒙古, 主要集聚区是粮食主产省份和北方牧区, 需求最低的前五位分别为上海、北京、海南、天津、福建, 主要分布在东南地区和经济发达城市群。区域地表作物密度和结构是影响养分需求的主导因素, 粮食主产省区因主要农作物生产密集使得种植业养分需求较高, 而新疆、内蒙古则因草地面积广阔而同样成为重要的氮、磷养分需求区。从时间分布特征来看, 2001年全国各种作物生长的畜禽粪污氮养分需求量为 6.55×10^6 t, 并保持以每年 1.68×10^5 t的速度增长; 磷养分需求量为 2.17×10^6 t, 保持以每年 5.50×10^4 t的速度增长(图1)。与此同时, 2018年的粮食、油料、棉花产量分别较2000年增长42.35%、16.20%、38.17%, 水果、蔬菜产量分别增长3.13倍和58.20%, 各类作物种植生产规模扩大和单产提升都带动了畜禽养分需求的增长。

2.1.2 土地环境承载容量

土地环境承载容量是一个地区在现有养分需求结构、需求水平的基础上所能承受的最大猪当量, 以作物粪污养分需求量与单位猪当量粪污养分供给量的比值表示。由于区域氮养分可承载猪当量低于磷养分可承载猪当量, 因此取氮养分承载容量进行分析。2018年, 全国土地环境承载容量(猪当量)为 1.47×10^9 头, 承载容量格局与作物养分需求格局基本重合。各省份中, 土地环境承载容量最高为河南, 可载猪当量 1.26×10^8 头; 承载容量最低为上海, 仅能承载猪当量 1.21×10^6 头。各省份单位猪当量粪污养分供给差异不显著, 因此土地环境承载容量主要由作物粪污养分需求量决定, 且二者存在明显的正向相关。

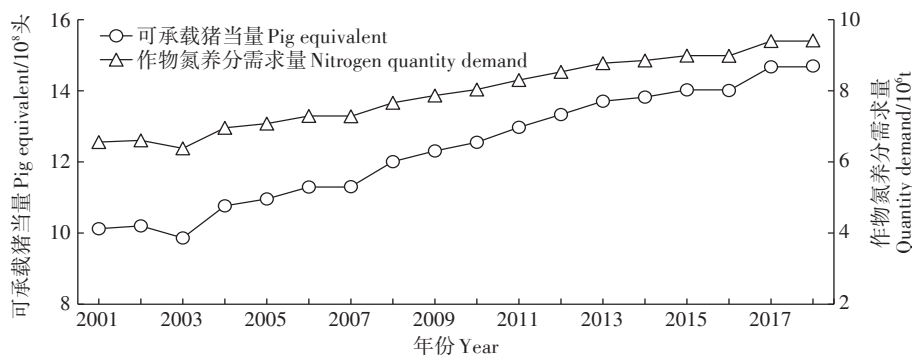


图1 2001—2018年全国作物氮养分需求量与土地可承载猪当量

Figure 1 National crop nitrogen demand and land carrying pig equivalent from 2001 to 2018

时间演进方面,可承载猪当量在研究期呈稳步增长态势(图1),2018年较2001年增长 4.58×10^8 头,并且除北京、天津、上海、浙江以外的省份均有增长。

2.2 畜禽粪污养分供给量与土地承载力

2.2.1 畜禽粪污养分供给量

2018年,全国畜禽共排放氮养分 1.27×10^7 t、磷养分 1.83×10^6 t,经不同清粪工艺、粪污处理工艺处理后,可实现氮供给 7.30×10^6 t、磷供给 1.38×10^6 t。分省份看,山东、河南、四川、云南、湖南5省的畜禽粪污养分供给量位居前列,5省氮养分供给量占全国供给总量的35.50%;上海、北京、天津、海南、宁夏的养分供给量最低,这是因为养殖规模较小。从全国情况看,畜禽粪污排放集聚区集中分布在北方的山东、河南及南方的湖南、四川,这些均属重要畜牧大省,面临较大的粪污排放处理压力。纵向来看,2001—2018年全国畜禽粪污排放量及粪污养分供给量波动明显,氮养分供给量由2001年的 7.98×10^6 t上升至2005年的 9.01×10^6 t后有所下降,至2018年波动下降至 7.30×10^6 t,磷养分波动情况与氮养分一致(图2)。分析认为,这种波动与畜禽养殖规模波动有关,同时畜种结构调整也是影响畜禽粪污排放规模和养分供给规模的重要因素。

2.2.2 土地环境承载力

承载力指数为实际畜禽养殖规模与可承载规模的比值,当指数等于1时,实际承载规模恰好符合理论可承载规模;指数大于1和小于1分别为超载和可载状态。以氮养分供需测得的指数高于以磷测得的指数,取由氮养分供需测算的结果进行分析。

(1)全国土地环境承载力

从全国畜禽养殖的总体规模来看,土地环境承载力指数呈明显递减趋势,由2001年的1.22波动递减至2018年的0.78,表明我国畜禽养殖由土地环境超

载转向可载范围,且仍有较大的可载空间,继续扩大畜禽养殖规模可通过现有土地环境消纳解决粪污问题(表1)。

(2)分省土地环境承载力

从分省情况来看,2018年处于严重超载状态的省份有福建、广东、海南,处于一般超载的有北京、天津、上海、吉林、辽宁、湖北、湖南、江西、云南、广西10省市,超载省区占全国(不含港澳台)全部省份的41.9%,且主要集中在南方,尤其是东南沿海地区土地超载状况最为严重。相比2001年,多数省份土地超载状况均有明显好转,广东省的土地环境承载指数由4.66降至3.21,海南省的土地环境承载指数由6.25降至3.67,并有黑龙江、河北、山东、四川等11个省份由超载转为可载,土地环境承载能力明显增强、畜禽粪污污染压力有所减弱。总体来看,东部和北方地区的土地环境承载力指数显著下降,土地环境对畜禽粪污的承载能力得以增强。

3 中国畜牧业生态足迹的时空分异

3.1 生态足迹分析

畜牧业生态足迹包括饲料粮生产和畜禽养殖两大环节,涵盖投入生产资料生产饲料粮和开展畜禽生产过程两方面的耕地足迹、草地足迹和碳足迹,各省区畜牧业生态足迹依据畜产品消费需求测算得到。2001—2018年,全国人均畜牧业生态足迹由 $0.2043 \text{ hm}^2 \cdot \text{人}^{-1}$ 上升至 $0.2509 \text{ hm}^2 \cdot \text{人}^{-1}$ (表2),总畜牧业生态足迹由 $2.61 \times 10^8 \text{ hm}^2$ 上升至 $3.50 \times 10^8 \text{ hm}^2$,分别增长了22.81%和34.28%(表2)。居民畜产品消费对土地资源的生态足迹需求主要来自耕地与草地两个方面:牛羊等草食家畜能量来源包括草地与耕地,因此居民牛羊肉和奶类消费需要耕地和草地两类足迹;猪、禽等食粮类畜禽能量来源主要是耕地,因此居民猪肉、

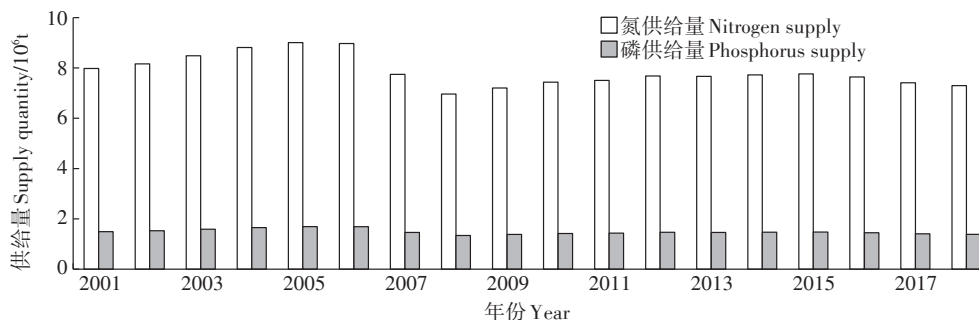


图2 2001—2018年全国畜禽粪污氮、磷养分供给变化

Figure 2 Changes in the supply of nitrogen and phosphorus in livestock manure across the country from 2001 to 2018

禽肉和禽蛋消费主要需要耕地足迹。整体来看,2010年后,畜牧业生态足迹增速明显放缓,与居民肉类消费的变动趋势基本一致。

2018年,人均畜牧业生态足迹最高的5个省份为 青海、西藏、内蒙古、新疆、宁夏,恰好分布在我国四大牧区,这同牧区居民饮食习惯和消费结构密切相关;人均畜牧业生态足迹仅次于上述牧区的省份有天津、北京、上海、辽宁、广东、江苏、浙江,这些省份均处东部经

表1 全国及分省区土地环境承载力指数

Table 1 National and sub-provincial land environmental carrying capacity index

地区 Region	土地环境承载力指数 Land environmental carrying capacity index			地区 Region	土地环境承载力指数 Land environmental carrying capacity index		
	2001年	2010年	2018年		2001年	2010年	2018年
全国	1.22	0.92	0.78	河南	1.51	1.03	0.72
北京	2.05	1.68	1.04	湖北	1.68	1.54	1.38
天津	1.12	1.40	1.35	湖南	2.37	2.03	1.92
河北	1.67	0.91	0.87	广东	4.66	3.83	3.21
山西	1.29	0.64	0.72	广西	5.51	3.01	2.56
内蒙古	0.99	1.15	0.67	海南	6.25	4.26	3.67
辽宁	1.92	2.32	1.89	重庆	1.47	1.11	0.88
吉林	1.91	1.50	1.06	四川	1.63	1.18	0.96
黑龙江	1.24	1.05	0.70	贵州	1.66	1.06	0.96
上海	2.83	2.01	1.40	云南	1.66	1.33	1.16
江苏	1.39	1.17	0.91	西藏	0.28	0.51	0.46
浙江	1.43	1.64	0.93	陕西	0.97	0.72	0.63
安徽	1.17	0.62	0.51	甘肃	0.94	1.00	0.86
福建	3.06	2.67	3.30	青海	0.85	0.85	0.87
江西	1.95	1.50	1.33	宁夏	0.79	0.74	0.78
山东	1.29	0.89	0.93	新疆	0.68	0.36	0.38

表2 2001—2018年全国畜牧业生态足迹核算项目及变化情况

Table 2 National animal husbandry ecological footprint accounting projects and changes in 2001—2018

年份 Year	生物资源足迹 Biological resource footprint		碳足迹 Carbon footprint		生态足迹 Ecological footprint	
	$ef_1/(\text{hm}^2 \cdot \text{人}^{-1})$	$EF_1/(10^8 \text{ hm}^2)$	$ef_2/(\text{hm}^2 \cdot \text{人}^{-1})$	$EF_2/(10^7 \text{ hm}^2)$	$ef/(\text{hm}^2 \cdot \text{人}^{-1})$	$EF/(10^8 \text{ hm}^2)$
2001年	0.191 9	2.45	0.012 4	1.58	0.204 3	2.61
2002年	0.199 9	2.57	0.013 8	1.77	0.213 6	2.74
2003年	0.205 4	2.65	0.015 9	2.05	0.221 3	2.86
2004年	0.202 6	2.63	0.014 4	1.87	0.217 1	2.82
2005年	0.211 4	2.76	0.014 4	1.88	0.225 8	2.95
2006年	0.216 4	2.84	0.015 9	2.10	0.232 4	3.05
2007年	0.212 3	2.81	0.016 8	2.22	0.229 1	3.03
2008年	0.216 5	2.88	0.016 4	2.18	0.233 0	3.09
2009年	0.221 6	2.96	0.019 1	2.55	0.240 7	3.21
2010年	0.225 3	3.02	0.020 0	2.69	0.245 3	3.29
2011年	0.222 5	3.00	0.019 3	2.61	0.241 8	3.26
2012年	0.234 6	3.18	0.020 2	2.74	0.254 8	3.45
2013年	0.228 4	3.11	0.020 7	2.81	0.249 0	3.39
2014年	0.228 7	3.13	0.022 6	3.08	0.251 3	3.44
2015年	0.226 5	3.11	0.022 1	3.04	0.248 6	3.42
2016年	0.223 7	3.09	0.022 4	3.10	0.246 1	3.40
2017年	0.225 0	3.13	0.022 2	3.09	0.247 3	3.44
2018年	0.228 3	3.19	0.022 7	3.16	0.250 9	3.50

济发达地带,主要是经济发展的结果;总畜牧业生态足迹最高5个省份是广东、四川、江苏、山东、河南,而同年人口数量最多的省份是广东、山东、河南、四川、江苏,表明人口规模直接影响区域畜牧业生态足迹规模,人口密集区一般具有更高的畜牧业生态足迹需求。总体来说,饮食习惯、人口数量及经济发展水平都是影响一个地区畜牧业生态足迹的主要因素。

3.2 生态承载力分析

生态承载力是一个地区的生态足迹供给量,实质是区域内的资源环境要素对生态足迹需求的支撑能力。人类社会经济活动的生态足迹需求多种多样,农田、水网、森林等自然环境所能提供的生态足迹供给与需求之间存在复杂联系。畜牧业生态承载力属于一个农业产业部门内的生态足迹问题,因此,研究采用与畜牧业相关的草地和农田进行测算。

总体来看,畜牧业生态承载力呈现一定波动上升态势,由2001年的 $9.10 \times 10^7 \text{ hm}^2$ 增长至2018年的 $1.42 \times 10^8 \text{ hm}^2$ 。促进畜牧业生态承载力增长的因素有:全国草地面积与草地综合植被盖度总体呈上升趋势,天然草原产草量明显增加;以玉米为代表的饲料粮播种面积逐步扩大,饲料粮产量稳步增长。受草地和饲料粮生产面积影响,不同省区畜牧业生态承载力具有明显差异,2018年生态承载力最高值为内蒙古的 $1.85 \times 10^7 \text{ hm}^2$,最低值为上海的 $9.00 \times 10^3 \text{ hm}^2$ 。畜牧业生态承载力较高的地区主要分布在内蒙古、新疆等草地面积广阔的牧区和黑龙江、山东、河南等粮食产量较高的农区,北京、上海等大中城市群和东南沿海地带等草地或耕地资源禀赋不佳地区通常表现出较低的生态承载力。我国人口总量呈现一定稳定增长态势,因此人均畜牧业生态承载力的变化趋势与总承载力的变化趋势基本一致。2001年,全国人均畜牧业生态承载力为 0.0713 hm^2 ,2018年较之增长42.96%,达到 0.1019 hm^2 。东北三省和牧区的人均生态承载力都较高,这与其人口偏少、草地或农作物植被丰茂等因素有关;大中城市群和东南沿海地带本就具有较低的畜牧业生态承载力,加之其共有的人口稠密特征,不可避免成为人均畜牧业生态承载力最低的地区。

3.3 生态承载强度与盈亏分析

生态足迹深度可反映生态足迹与生态承载力之间的关系,畜牧业生态足迹深度可表征区域畜产品消费对自然资本的依赖情况。分析畜牧业生态足迹与生态承载力的关系,当生态足迹深度大于1时,居民畜产品消费超过生态承载能力,且值越大说明畜产品

消费造成的生态环境压力越大。2001—2018年,全国畜牧业生态足迹深度长期大于1(图3),表明畜牧业长期处于生态赤字状态,生态需求超过自然生态供给。从生态承载强度来看,2001年畜牧业所需的生态足迹高达生态承载力的2.87倍,尽管此后波动下降,但2018年仍高达2.46倍。全国不同地区畜牧业生态足迹深度及变化趋势差异显著:东部地区畜牧业生态超载最为严重,且长期处于生态超载恶化阶段,表明东部地区生态超载问题仍未得到根本扭转;中部、西部、东北部的畜牧业生态承载压力依次降低,全国畜牧业生态超载呈“东重西轻、东北最轻”的格局,同时,除东部外的其他地区畜牧业生态足迹深度均呈不同程度波动下降态势,说明中西部和东北部已处于畜牧业生态超载压力缓解期,特别是东北部已率先实现生态超载向生态可载的转变。

尽管生态超载问题有一定缓解趋势,但全国生态赤字量仍在扩大,畜牧业生态超载问题不容忽视。2001年,全国畜牧业生态赤字为 $1.70 \times 10^8 \text{ hm}^2$,到2018年赤字量已扩大至 $2.08 \times 10^8 \text{ hm}^2$,2014年赤字峰值一度达到 $2.18 \times 10^8 \text{ hm}^2$ 。分省区来看,仅有西藏、吉林两省区在整个研究期内一直处于生态盈余状态;黑龙江、内蒙古均在2008年前后由生态赤字转为生态盈余且盈余量波动上升,畜牧业生态环境正在积极向好转变;青海在2009年由生态盈余转为生态赤字,且生态赤字有加速扩大趋势,生态需求增速明显快于生态承载力的增速,畜牧业生态压力依然严峻。

过高的生态承载强度和持续的生态赤字表明居民畜产品消费对畜牧业系统内的自然资源存量存在严重的过度消耗。我国畜牧业生态环境虽已显露恢复势头,但仍存在以下问题:一是畜牧业系统内的草地和农田系统仍不足以消纳其生态足迹,畜牧业长期依赖畜牧业系统以外的生物资源消纳其过剩的生态足迹;二是生态承载强度具有十分显著的地域差异,上海、海南、广东、福建、北京、浙江等大中城市群及东南沿海地区因草地和耕地资源禀赋不佳、人口稠密而成为生态承载强度最大的地区,东西部地区生态足迹深度差距不断拉大,2018年东部地区生态足迹深度达西部地区的3.52倍,伴随畜禽养殖业和人口在东部集聚,预计东部地区畜牧业生态赤字和承载强度将进一步加剧。

4 结论

(1)土地环境对畜禽粪污的承载能力有显著提

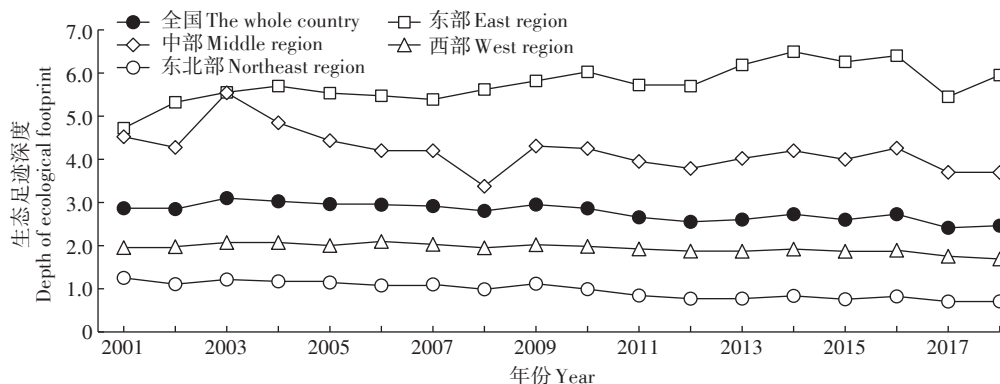


图3 全国及各地区畜牧业生态足迹深度变化趋势

Figure 3 Changes in the depth of the ecological footprint of animal husbandry in across the country and various regions

升,可承载猪当量增长45.21%,土地环境承载力指数下降36.07%,畜牧业土地环境由超载转向可载范围。在全国多数省区土地环境承载状况好转的同时,南方特别是东南沿海仍处于严重超载状态。

(2)畜牧业生态足迹呈上升趋势,人均足迹和总足迹分别增长22.81%和34.28%,与此同时,畜牧业生态承载力也有显著提升,人均承载力和总承载力分别增长42.96%和56.30%,生态承载强度长期处于超载状态但有缓和趋势,全国整体呈现“东重西轻、东北最轻”的超载格局。

(3)综合两维度来看,中国畜牧业环境约束严峻但正在趋向缓和状态,特别是土地环境约束明显好转,但生态环境约束形势依然不容乐观,生态环境约束总体要重于土地环境约束且长期未得到足够重视。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国生态环境部,国家统计局,中华人民共和国农业农村部. 第二次全国污染源普查公报[R]. 北京:中华人民共和国生态环境部,国家统计局,中华人民共和国农业农村部,2020. Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China, National Bureau of Statistics, Ministry of Agriculture and Rural Affairs of the People's Republic of China. Communique on the Second National Pollution Source Survey[R]. Beijing: Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China, National Bureau of Statistics, Ministry of Agriculture and Rural Affairs of the People's Republic of China, 2020.
- [2] 宋大平,左强,刘本生,等. 农业面源污染中氮排放时空变化及其健康风险评价研究——以淮河流域为例[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(6):1219-1231. SONG D P, ZUO Q, LIU B S, et al. Estimation of spatio-temporal variability and health risks of nitrogen emissions from agricultural non-point source pollution: A case study of the Huaihe River Basin, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, 37(6):1219-1231.
- [3] 孔祥才,王桂霞. 我国畜牧业污染治理政策及实施效果评价[J]. 西北农林科技大学学报(社会科学版), 2017, 17(6):75-80. KONG

X C, WANG G X. Environmental management policy and effect evaluation of animal husbandry in China[J]. *Journal of Northwest A&F University (Social Science Edition)*, 2017, 17(6):75-80.

- [4] EVANS P O, WESTERMAN P W, OVERCASH M R. Subsurface drainage water quality from land application of seine lagoon effluent[J]. *Transactions of the American Society of Agricultural and Biological Engineers*, 1984, 27(2):473-480.
- [5] MALLIN M A, CAHOON L B. Industrialized animal reduction: A major source of nutrient and microbial pollution to aquatic ecosystems[J]. *Population and Environment*, 2003, 24(5):369-385.
- [6] TARA G. Livestock-related greenhouse gas emissions: Impacts and options for policy makers[J]. *Environmental Science & Policy*, 2009, 12: 491-503.
- [7] 张晖. 中国畜牧业面源污染研究——基于长三角地区生猪养殖户的调查[D]. 南京:南京农业大学, 2010. ZHANG H. A study on non-point source pollution of livestock husbandry in China: Based on the surveys of pig breeding farmers in the Yang River delta[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2010.
- [8] 刘培芳,陈振楼,许世远,等. 长江三角洲城郊畜禽粪便的污染负荷及其防治对策[J]. 长江流域资源与环境, 2002, 11(5):456-460. LIU P F, CHEN Z L, XU S Y, et al. Waste loading and treatment strategies on the excreta of domestic animals in the Yangtze Delta[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2002, 11(5):456-460.
- [9] 孟祥海. 中国畜牧业环境污染防治问题研究[D]. 武汉:华中农业大学, 2014. MENG X H. Study on prevention problem of China livestock environmental pollution[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2014.
- [10] 李靖,张正尧,毛翔飞,等. 我国农业生产布局评价及优化建议——基于资源环境承载力的分析[J]. 农业经济问题, 2016, 37(3): 26-33, 110. LI J, ZHANG Z Y, MAO X F, et al. Evaluation and optimizing suggestions of agricultural productivity layout in China: Based on the analysis of resources and environment bearing capacity [J]. *Issues in Agricultural Economy*, 2016, 37(3):26-33, 110.
- [11] 潘瑜春,孙超,刘玉,等. 基于土地消纳粪便能力的畜禽养殖承载力[J]. 农业工程学报, 2015, 31(4):232-239. PAN Y C, SUN C, LIU Y, et al. Carrying capacity of livestock and poultry breeding based on faces disposal volume of land[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31(4):232-239.
- [12] 邱乐丰,龙文莉,方豪,等. 基于种养平衡的杭州市畜禽养殖环境

- 承载力研究[J]. 自然资源学报, 2016, 31(8): 1410-1419. QIU L F, LONG W L, FANG H, et al. Regional environmental carrying capacity for livestock and poultry breeding based on planting-breeding balance in Hangzhou City[J]. *Journal of Natural Resources*, 2016, 31(8): 1410-1419.
- [13] 仇焕广, 廖绍攀, 井月, 等. 我国畜禽粪便污染的区域差异与发展趋势分析[J]. 环境科学, 2013, 34(7): 2766-2774. QIU H G, LIAO S P, JING Y, et al. Regional differences and development tendency of livestock manure pollution in China[J]. *Environmental Science*, 2013, 34(7): 2766-2774.
- [14] 史瑞祥. 基于耕地消纳的山东省畜禽粪污环境承载力研究[D]. 西安: 西北大学, 2018. SHI R X. Research based on arable land consumptive environmental carrying capacity of livestock and poultry excrement in Shandong Province[D]. Xi'an: Northwest University, 2018.
- [15] 安晶潭. 畜禽养殖资源环境承载力分析、预测及预警研究——以大理白族自治州为例[D]. 北京: 中国农业科学院, 2015. AN J T. Analysis, predication and warning on carrying capacity of resources and environments for livestock and poultry: A case study of Dali Prefecture[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2015.
- [16] 潘雪莲, 杨小毛, 陈小刚, 等. 深圳市畜禽养殖环境承载力研究[C]//中国环境科学学会. 2014 中国环境科学学会学术年会(第四章), 2014: 1260-1265. PAN X L, YANG X M, CHEN X G, et al. Study on the environmental carrying capacity of livestock and poultry breeding in Shenzhen[C]//Chinese Society for Environmental Sciences. 2014 Annual Conference of Chinese Society for Environmental Sciences (Chapter 4), 2014: 1260-1265.
- [17] 黄成. 基于超效率DEA和人工神经网络模型的天津市畜禽养殖资源环境承载力综合研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2016. HUANG C. Comprehensive research of Tianjin livestock and poultry breeding resource environmental bearing capacity based on the couple model of super efficiency DEA and artificial neural network[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2016.
- [18] 宋福忠. 畜禽养殖环境系统承载力及预警研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2011. SONG F Z. Study on the carrying capacity of resional environmental system for livestock-poultry raising and it's precaution [D]. Chongqing: Chongqing University, 2011.
- [19] 曹淑艳, 谢高地, 陈文辉, 等. 中国主要农产品生产的生态足迹研究[J]. 自然资源学报, 2014, 29(8): 1336-1344. CAO S Y, XIE G D, CHEN W H, et al. Ecological footprint of raw and derived agricultural products[J]. *Journal of Natural Resources*, 2014, 29(8): 1336-1344.
- [20] FORTUNY M, SOLER R, CANOVAS C, et al. Technical approach for a sustainable tourism development: Case study in the Balearic Islands [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2008, 16: 860-869.
- [21] 曹淑艳, 谢高地. 中国产业部门碳足迹流追踪分析[J]. 资源科学, 2010, 32(11): 2046-2052. CAO S Y, XIE G D. Tracking analysis of carbon footprint flow of China's industrial sectors[J]. *Resources Science*, 2010, 32(11): 2046-2052.
- [22] PARKER R, TYEDMERS P. Life cycle environmental impacts of three products derived from wild-caught Antarctic Krill (*Euphausia superba*) [J]. *Environmental Science & Technology*, 2012, 46(9): 4958-4965.
- [23] 靳亚亚, 柳乾坤, 李陈. 基于改进三维生态足迹模型的耕地承载力评价——以江苏省为例[J]. 中国土地科学, 2020, 34(9): 96-104. JIN Y Y, LIU Q K, LI C. Evaluation of cultivated land carrying capacity based on an improved three-dimension ecological footprint model: A case study of Jiangsu Province[J]. *China Land Science*, 2020, 34(9): 96-104.
- [24] 向秀容, 潘韬, 吴绍洪, 等. 基于生态足迹的天山北坡经济带生态承载力评价与预测[J]. 地理研究, 2016, 35(5): 875-884. XIANG X R, PAN T, WU S H, et al. Assessment and prediction of ecological carrying capacity for the northern slope economic belt of Tianshan Mountains[J]. *Geographical Research*, 2016, 35(5): 875-884.
- [25] 史丹, 王俊杰. 基于生态足迹的中国生态压力与生态效率测度与评价[J]. 中国工业经济, 2016(5): 5-21. SHI D, WANG J J. Measurement and evaluation of China's ecological pressure and ecological efficiency based on ecological footprint[J]. *China Industrial Economics*, 2016(5): 5-21.
- [26] 杨灿, 朱玉林. 基于能值生态足迹改进模型的湖南省生态赤字研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2016, 26(7): 37-45. YANG C, ZHU Y L. Ecological deficit based on new energy-based ecological footprint model in Hunan Province[J]. *China Population, Resources and Environment*, 2016, 26(7): 37-45.
- [27] 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. XU Z M, ZHANG Z Q, CHENG G D. The calculation and analysis of ecological footprints of Gansu Province[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2000, 55(5): 607-616.
- [28] 谢鸿宇, 陈贤生, 杨木壮, 等. 中国单位畜牧产品生态足迹分析[J]. 生态学报, 2009, 29(6): 3264-3270. XIE H Y, CHEN X S, YANG M Z, et al. The ecological footprint analysis of 1kg livestock product of China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(6): 3264-3270.
- [29] 郑晶, 蔡金琼, 林瑜. 广东省生猪养殖的生态足迹研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2012, 22(增刊2): 166-169. ZHENG J, CAI J Q, LIN Y. A study on the ecological footprint of pig feeding in Guangdong Province[J]. *China Population, Resources and Environment*, 2012, 22(Suppl 2): 166-169.
- [30] 全国畜牧总站, 中国饲料工业协会, 国家畜禽养殖废弃物资源化利用科技创新联盟. 土地承载力测算技术指南[M]. 北京: 中国农业出版社, 2017. National Animal Husbandry General Station, China Feed Industry Association, National Livestock Farming Waste Resource Utilization Technology Innovation Alliance. Technical guide for land carrying capacity measurement[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2017.
- [31] 郑莉, 张晴雯, 张爱平, 等. 山东省畜禽粪污土地承载力时空分异特征分析[J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(4): 882-891. ZHENG L, ZHANG Q W, ZHANG A P, et al. The spatial and temporal distribution features of the land bearing capacity for livestock manure in Shandong Province, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, 38(4): 882-891.
- [32] 农业农村部耕地质量监测保护中心. 国家耕地质量长期定位监测评价报告(2018年度)[M]. 北京: 中国农业出版社, 2019. Cultivated Land Quality Monitoring and Protection Center of the Ministry of Agriculture and Rural Affairs. National cultivated land quality long-term positioning monitoring evaluation report (2018)[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2019.