

中国畜牧业与资源环境承载力的 时空耦合协调关系

熊学振 孙雨萌 杨春¹

(中国农业科学院农业经济与发展研究所, 中国 北京 100081)

【摘要】: 高质量发展背景下, 探究畜牧业生产布局与资源环境承载力的时空耦合关系是破解畜牧业资源环境约束的关键。以肉蛋奶蛋白当量度量畜牧业生产布局, 构建涵盖资源供给、环境消纳、社会支持三大系统的畜牧业资源环境承载力评价体系, 分别采用状态空间模型、耦合协调指数测算全国省域畜牧业资源环境承载力及其与畜牧业布局的时空耦合协调关系, 并采用 GWR 模型分析耦合协调关系的驱动因素及空间异质性特征。结果表明: (1) 全国畜牧业资源环境承载力现实值小幅增长, 多数省区超载状态有一定改善。(2) 承载力提升拉近实际承载状态与最优承载状态的距离, 全国平均协调度已稳定在 0.920 上下, 畜牧业布局与资源环境承载力由低度协调提升并稳定于中度协调水平。(3) 耕地资源配置、畜牧业集聚度、环境治理力度、草地资源配置是影响协调关系的主要因素且影响效果存在地理空间非平稳性。

【关键词】: 畜牧业布局 资源环境承载力 状态空间模型 耦合协调 耕地资源 环境治

【中图分类号】: F307.3 **【文献标志码】:** A **【文章编号】:** 1000-8462 (2022) 02-0153-10

现代畜牧业发展面临气候变化、资源短缺和环境污染三大挑战, 国外对此积极构建涵盖生态、经济功能并兼顾动物福利和公共卫生的多标准可持续性畜牧业生产系统^[1,2,3,4], 高度关注协调资源环境关系并转型牧业发展方式。改革开放以来中国畜牧业取得辉煌成就, 生产规模快速扩张、总体布局逐步稳定, 但资源结构性供给不足、环境区域性污染严峻等问题日益突出, 不仅威胁畜牧业绿色、可持续发展, 更难以保障“十四五”阶段畜产品稳产保供目标, 区域畜牧业发展与资源环境保护矛盾愈演愈烈。只有深入探究畜牧业布局与资源环境的时空耦合协调关系, 明确影响协调关系的主导因素, 才能“对症下药”构建资源环境协调型现代畜牧业高质量发展体系。

环境污染和承载力评价一直是国内外学者在畜牧业资源环境领域的热点研究内容。学者对畜牧业环境污染问题关注颇多, 国外学者测算了畜禽粪污和温室气体排放对水体^[5,6]、土壤^[7]、大气^[8]的具体影响, 并关注如何解决畜牧业资源环境问题^[9], 国内学者也开展了畜禽粪便污染负荷当量估算等研究^[10,11]。承载力研究主要始于《增长的极限》一书对人口增长、工业化发展与不可再生资源枯竭、生态环境恶化和粮食生产关系的探讨^[12], 而在畜牧业资源环境承载力领域, 学者多关注饲料供给和粪污还田角度的养殖承载力及牧场合理载畜量^[13,14]、气候变化效应和资源环境效率^[15,16,17], 我国自 1990 年代开始区域承载力评估和资源环境承载力协调关系研究^[18,19,20,21,22], 现已逐步形成单项指标性评价^[23,24]和综合系统性评价^[25,26]两类畜牧业资源环境承载力评价方法, 尤其是畜牧业空间布局^[27,28]、资源环境协调关系^[29,30,31]等方面的研究为本文提供了有益借鉴。在动物蛋白消费需求持续增长、畜牧

¹**作者简介:** 熊学振 (1995—), 男, 山东德州人, 硕士研究生, 研究方向为畜牧业经济与资源环境经济学。E-mail:1694216077@qq.com; 杨春 (1979—), 女, 山西晋中人, 博士, 研究员, 研究方向为畜牧业经济与区域经济。E-mail:yangchun@caas.cn

基金项目: 国家自然科学基金重点项目 (72033009); 中国农业科学院科技创新工程项目 (ASTIP-IAED-2021-01); 财政部和农业农村部: 国家现代农业产业技术体系 (CARS-34)

业资源环境约束趋紧背景下，畜牧业资源环境承载力评价体系仍很不健全，对畜牧业生产布局和资源环境承载力协调关系及影响因素的研究几乎空白，这不利于统筹粮草水土资源和环境，建立营养、可持续的现代农业食物系统。

基于相关背景和研究认知，本文选择 2001—2019 年数据，以中国 31 个省级行政区（不含港澳台）为研究对象，以蛋白当量度量畜牧业布局并构建畜牧业资源环境承载力综合评价体系，分别采用状态空间模型、耦合协调指数测算畜牧业资源环境承载力、分析畜牧业布局与资源环境承载力的时空耦合协调关系，在此基础上，进一步运用地理加权回归模型探讨耦合协调关系的影响因素及空间异质性特征，以期为促进中国畜牧业与资源环境的协调发展提供决策参考。

1 概念界定

1.1 畜牧业生产布局

因目标导向不同，畜牧业布局存在多样的界定方式，常见的畜牧业布局包括以牧业产值划分的经济布局、以主导畜禽品种划分的优势品种布局、以饲喂习惯和方式划分的农牧区畜牧业布局等。现代畜牧业的主要功能和产业目标是通过人工饲养、繁殖的方式把饲料、牧草等植物能转变为动物能，以满足人类社会对肉蛋奶等动物产品和动物蛋白的消费需要。中国特色食物供给体系和膳食结构建设正在加快推进，满足居民美好生活向往和推动现代食物营养健康升级的现代畜牧业发展目标日趋明确。在此背景下，本文以畜牧业的产业目标为导向，以畜产品的蛋白当量为依据度量和分析畜牧业空间布局，其具体方式是把肉蛋奶产量按照单位产量的蛋白质含量转换为蛋白当量，可以较为系统、客观地衡量畜牧业产出布局特征，并与畜牧业生产所需投入的资源环境要素相呼应，便于进一步探究畜牧业“资源环境投入—动物蛋白产出”的协调性关系问题。蛋白当量计算公式：

$$P = \sum_{i=1}^n \beta_i q_i \quad (1)$$

式中：P 为区域畜产品总蛋白当量； β_i 为 i 畜产品蛋白当量折算系数； q_i 为 i 畜产品产量。畜产品计算范围包括猪肉、牛肉、羊肉、禽肉、禽蛋、奶类。

1.2 畜牧业资源环境承载力

“自然—经济—社会”复合系统学说认为资源环境系统不仅包含对社会经济系统的支持能力，还涵盖人类价值选择、社会目标对资源环境的反馈影响，提出区域“自然—经济—社会”复合生态协调系统的观点，现有资源环境承载力研究已经把社会经济承载力作为一个重要的子系统^[32]。基于现代资源环境承载力理论框架，本文把畜牧业资源环境承载力定义为“畜牧业生产所依赖的资源和环境系统能够支持、保障畜牧业可持续发展的能力和水平”，其实质是资源环境系统对畜牧业生产的支撑能力和支持强度，具体表征为资源环境系统能够承载的畜禽容量。

现代畜牧业发展无法脱离与人的联系，社会技术干预、环境干预是畜牧业资源环境系统的重要组成。畜牧业资源环境承载力是一个包含资源供给、环境消纳、社会支持三个子系统的复杂系统，各系统交互作用，共同决定畜牧业资源环境承载水平。其中，资源供给系统满足畜牧业生产的饲料粮、牧草等资源需求，环境消纳系统用以消纳、处理畜禽粪污、碳等排泄物，人类活动可以在不同层面和不同方向干预畜牧业生产技术和环境秩序，对承载力水平具有重要影响。因此，本文从畜牧业生产系统及其所依赖的资源环境系统出发，引入人类生产活动组成的社会支持系统，构建畜牧业资源环境承载系统结构（图 1）。

1.3 畜牧业生产布局与资源环境承载力的内在联系

资源环境系统是畜牧业的依托，在牧草、饲料粮等资源供给碳水化合物、脂肪、蛋白质等营养物质支持下，畜牧业把植物能

转化为动物能，并向土壤、水体、空气等环境排放畜禽粪污、废气等污染物。畜牧业是加快资源环境系统物质循环和能量流动的重要部门，动物在摄食植物满足自身能量需求的基础上分解、释放能量及CO₂、无机盐，使其返还资源环境系统满足植物生长需要，构成完整的“植物—动物”能量链条。畜牧业布局与资源环境承载力的联系由“资源环境系统—畜牧业生产系统”的内在关系演化而来，区域资源环境承载力是影响畜牧业生产布局的初始决定因素，但市场等外在因素往往会诱致畜牧业生产规模扩大和生产方式转变，迫使“可载”状态转向“超载”，弱化资源环境系统对畜牧业的承载能力，压缩区域资源环境承载容量（图2）。

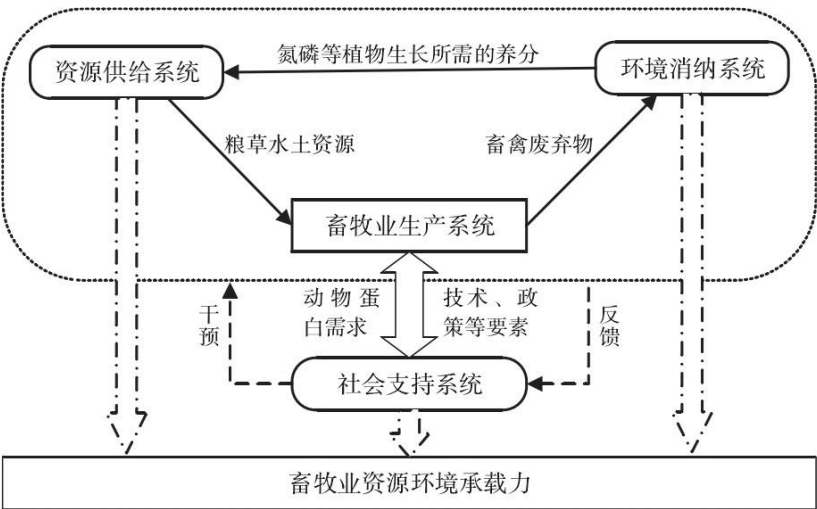


图1 畜牧业资源环境承载系统结构

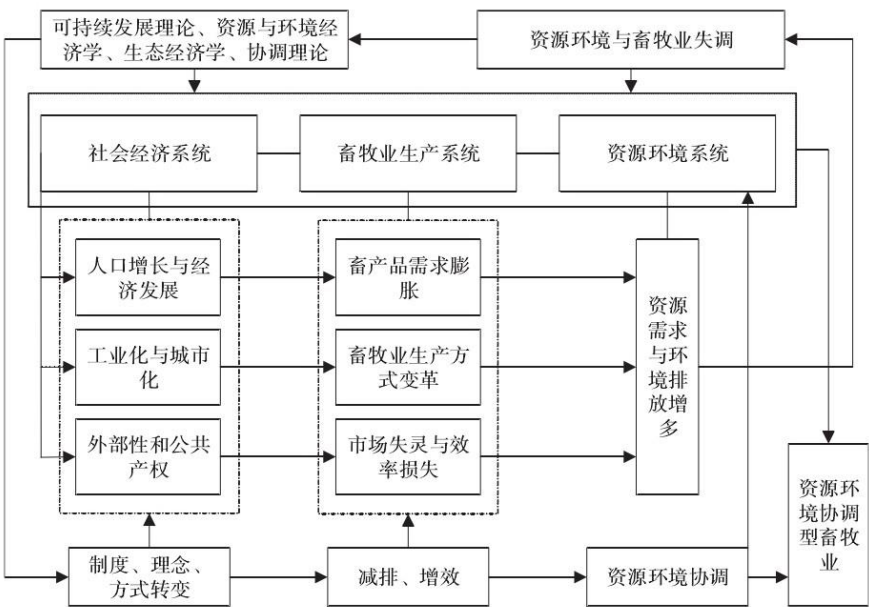


图2 畜牧业生产与资源环境承载力的逻辑关系

2 模型构建与数据来源

2.1 评价指标体系构建

坚持动物蛋白生产需求与资源环境特征相协调原则，以肉蛋奶蛋白当量布局表征畜牧业生产空间布局，对蛋白当量产量和满足此产量的资源环境进行空间均衡分析。根据畜牧业资源环境承载力的内涵特征，构建涵盖资源供给、环境消纳、社会支持三个系统的评价指标体系，资源供给系统用以衡量区域粮、草、水资源产量或储量对畜牧业生产所需资源的支撑能力，环境消纳系统用以衡量区域土壤、水体、生态环境对畜禽粪污排泄物及生态足迹的消纳能力，社会支持系统用以衡量畜牧业技术进步、养殖污染处理增强等社会环境对畜牧业发展的支持能力。各指标权重由综合熵值法和层次分析法（AHP）确定。

2.2 状态空间模型

状态空间是欧氏几何空间用于定量描述系统状态的一种有效方法，应用状态空间模型可定量测度、描述区域承载力与承载状态^[33]。以资源供给系统、环境消纳系统、社会支持系统三个维度构建状态空间模型，分别测算理想和现实状态承载力值，进而得出资源环境承载力指数和资源环境承载容量。理想值方面，指标 1~6 参照有关文献资料、国际标准和发展规划，基于资源环境供需平衡原则确定，指标 7、8 参照当年中国东部沿海发达地区的平均水平确定。

①函数表达。构建由资源供给系统承载力（RSSCC）、环境消纳系统承载力（EASCC）、社会支持系统承载力（SSSCC）组成的畜牧业资源环境承载力（AHRECC）三维状态空间。

$$AHRECC = F(RSSCC, EASCC, SSSCC) \quad (2)$$

②承载力数值量化。考虑状态轴权重情况下畜牧业资源环境理想和现实承载力分别为：

$$AHRECC_{理想} = |M| = \sqrt{\sum_{i=1}^n w_i x_{i_{理想}}^2} \quad (3)$$

$$AHRECC_{现实} = |M| = \sqrt{\sum_{i=1}^n w_i x_{i_{现实}}^2} \quad (4)$$

式中：|M|为承载力矢量的模； w_i 为指标 i 的权重； x_i 为承载力在状态空间中的坐标值（ $i=1, 2, \dots, n$ ）。

③承载力状况判定。尽管前面的计算已经得出现实承载力值和理想承载力值，但不同年份的理想承载力均在变动，现实承载力值的增长并不代表实际承载状态的改善，如何判断承载力的实际大小缺乏一个具体、明确的参照。因此，有必要采用某种方法使得区际、年际承载力值具有可比性，本文借鉴已有研究^[34]采用畜牧业资源环境承载力指数判断畜牧业资源环境承载状态：

$$\omega = AHRECC_{理想} (opr) AHRECC_{现实} \quad (5)$$

式中：(opr)为运算符及运算过程，可表示 $\omega > 1$ 、 $\omega = 1$ 、 $\omega < 1$ 时，向量 ω 相对理想承载力的所处状态。随着 ω 的扩大，承载力上升、承载状态改善。依据 ω ，划分出 4 个畜牧业资源环境承载区间。

2.3 耦合协调指数

传统测算协调关系的方法多为耦合协调度模型，且已广泛应用于社会科学领域评判系统耦合关系和协调程度，但这一方法在权重界定和经济释义等方面有较大争议^[35]。在本文中，畜牧业资源环境承载力的测算过程已经考虑了区域畜牧业生产规模问题，畜牧业资源环境可载、超载等状态均是畜牧业生产与资源环境协调关系的表现，为进一步量化协调水平，本文以资源环境承载力指数为基础构建畜牧业生产布局与资源环境承载力耦合协调关系指数，其原理为现实承载力值越接近理想承载力值，则畜牧业布局与资源环境承载力越趋向协调。当资源环境承载力指数为 1 时，表现为最优承载状态。耦合协调指数计算公式：

$$\rho = 1 - |1 - \omega| \quad (6)$$

式中： ρ 为协调度， $\rho \in [0, 1]$ ， ρ 值越高，表明畜牧业与资源环境的关系越趋向协调，反之趋向失调。

2.4 地理加权回归模型

区域经济发展水平等因素或对畜牧业生产与资源环境承载力的协调关系产生影响，但同一因素在不同地区可能会表现出差异化的影响效果^[36]，为了考虑这种空间异质性问题，本研究引入地理加权回归模型（GWR），在全局回归模型基础上对各参数进行局域回归估计，进一步分析参数在不同地区的非平稳性现象。GWR 模型结构^[37]为：

$$y_i = \beta_0(u_i, v_i) + \sum_k \beta_k(u_i, v_i) x_{ik} + \varepsilon_i \quad (7)$$

式中： y_i 为 i 点因变量值； (u_i, v_i) 为 i 点空间位置； $\beta_0(u_i, v_i)$ 为常数项； $\beta_k(u_i, v_i)$ 为变量 k 在 i 点的回归系数； x_{ik} 为解释变量； ε_i 为随机误差。

本文探究畜牧业布局与资源环境承载力协调关系的影响因素，以协调度作为被解释变量，基于资源环境经济学、生态经济学和发展经济学的理论分析，初步从宏观经济、产业结构、人口特征、资源配置、技术进步、环境治理 6 个方面选取 11 个变量，应用 SPSS 对初始变量进行相关分析后，确定处理后的变量包括经济发展水平（GDP）、畜牧业集聚度（PRO）、耕地资源配置（ARL）、草地资源配置（GRC）、科技创新能力（TEC）、环境治理力度（ENG）6 项。由此，构建的 GWR 模型结构为：

$$\begin{aligned} y_i = & \beta_0(u_i, v_i) + \beta_1(u_i, v_i) GDP_i + \\ & \beta_2(u_i, v_i) PRO_i + \beta_3(u_i, v_i) ARL_i + \\ & \beta_4(u_i, v_i) GRC_i + \beta_5(u_i, v_i) TEC_i + \\ & \beta_6(u_i, v_i) ENG_i + \varepsilon_i \end{aligned} \quad (8)$$

2.5 数据来源

本文所用数据主要来源于官方统计年鉴和其他权威统计资料。其中，饲料粮产量、畜产品产量、畜牧业产值等数据来自《中国统计年鉴》《中国农村统计年鉴》，饲料粮转化率由《全国农产品成本收益资料汇编》中的耗粮数量、仔畜重、主产品产量等数据计算得到，可利用草地面积来自《中国草业统计》，畜禽存出栏数据来自《中国畜牧兽医年鉴》《中国农村统计年鉴》，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》，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，畜产品的蛋白质含量代表值来自《中国食物成分表（第 6 版）》。

3 结果与分析

3.1 畜牧业布局与资源环境承载力时空特征

3.1.1 畜牧业布局的时空特征

全国肉蛋奶蛋白当量由 2001 年的 1381.41 万 t 上升至 2018 年的 1948.66 万 t, 2019 年受非洲猪瘟冲击, 生猪产能受到影响, 蛋白当量回落至 1859.75 万 t。冀鲁豫三省一直是全国最主要的动物蛋白产区, 2001 和 2019 年三省动物蛋白产量占全国的比重分别为 29.38%、26.42%。2001—2019 年, 动物蛋白产量占全国比重扩大的省区有内蒙古、宁夏、新疆、西藏、云南等 18 个省区, 主要分布在中西部地区; 动物蛋白产量占全国比重缩小的省区有北京、天津、上海、江苏、浙江等 13 个省区, 主要分布在东部地区(图 3)。全国畜牧业布局有向中西部地区转移的趋势, 东部经济发达地带和城市群的高压环保措施对畜牧业布局转移构成了一定影响, 但当前的畜牧业生产重心仍为北方冀鲁豫三省和南方“川—湘”一带。

3.1.2 畜牧业资源环境承载力时空特征

畜牧业资源环境承载力现实值小幅提升, 资源环境系统对畜牧业生产的支撑能力有所增强(图 4)。全国方面, 畜牧业资源环境现实承载力值由 2001 年的 0.5638 跌至 2004 年的 0.5515 后开始反弹, 至 2019 年增至 0.5851; 分省来看, 2019 年 83.87% 的省区现实承载力值较 2001 年提升, 北京、河北、广东升幅均超过 20%, 仅内蒙古、西藏、青海、宁夏、新疆等牧区承载力下滑。综合分析认为, 连年粮食增产促进饲料粮保障能力改善、总体农作物生产规模扩张带动粪污消纳吸收空间扩大, 促使中东部广大地带资源环境系统有能力支撑更大规模的畜牧业生产, 但就西部牧区来看, 草原生态系统恢复与增产慢于粮食生产, 叠加超载放牧、技术滞后等因素使得牧区承载力衰退。截至 2019 年, 承载力在全国平均水平以上的省区为 12 个, 位居前列的北京、上海、西藏现实承载力均超过 0.7, 东北、西北地区承载力高于其他地区, 说明这些区域单位畜产品生产可获得的资源环境要素具有数量优势, 中东部地区承载力虽有提升但仍处低位, 说明资源环境供给增速已超过需求增速, 但现有畜牧业生产规模的资源环境供给能力仍处劣势。

畜牧业资源环境承载力指数在 0.94~0.98 间, 呈小幅振动, 全国畜牧业一直处于轻度超载状态(图 4)。从总体变化来看, 天津、内蒙古、山东、西藏、青海、宁夏、新疆承载力指数下降, 且除天津、山东外的其他省区与现实承载力下降省区范围一致, 而承载力指数升高的省区仍主要分布在中东部, 尤其是北京、河北、福建、广东、广西承载力指数增幅均超过 10%, 这与承载力提升、生产重心转移等因素密切相关。放眼整个研究期的平均水平, 分别有 16.13%、9.68%、48.39%、25.81% 的省区处完全可载、濒临超载、轻度超载、严重超载状态, 仅有北京、天津、上海、西藏、宁夏长处完全可载区间, 外加处于濒临超载区间的吉林、黑龙江、新疆, 总可载省区数量仅占全国 1/4 左右。其中, 吉林、黑龙江已由轻度超载转入濒临超载, 福建、河南、广东已由严重超载转入轻度超载, 这些省区种植业生产能力增强、畜禽生产规模变迁及环境治理能力的增强为改善承载状态发挥了重要作用。

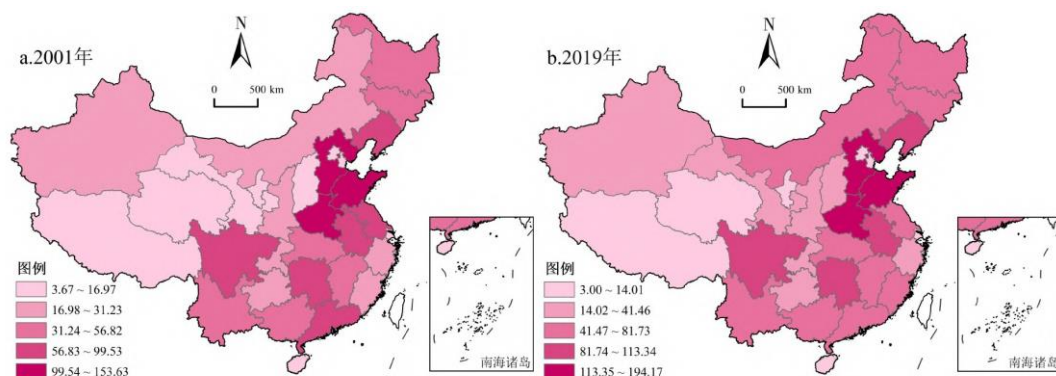


图3 畜牧业蛋白当量生产布局(万 t)

注：该图基于国家测绘地理信息局标准地图服务网站下载的审图号为（）号标准地图制作，底图无修改。下同。

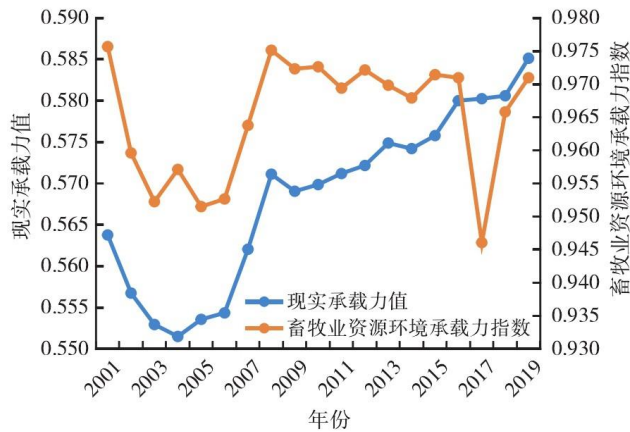


图4 中国畜牧业资源环境现实承载力值和承载力指数

总体来看，全国畜牧业资源环境承载力现实值缓慢提升，多数省区承载状态有向好发展趋势，但全国总体和 74.17%的省区仍处于资源环境超载状态，山东、河南、湖南等重要农牧大省依然处在严重超载阶段，资源环境承载状态显现出明显的区域异质性特征（图5）。

3.2 畜牧业生产布局与资源环境承载力的耦合协调关系

3.2.1 耦合协调关系

从全国平均水平来看，畜牧业与资源环境承载力的协调度在研究期内有明显升高，说明我国畜牧业发展趋向资源环境协调，这符合全国资源环境承载力提升、多数省区承载状态改善的事实（图6）。协调度最低值出现在 2001 年，最高值出现在 2012 和 2016 年，总体呈现波动增长态势，特别是 2006—2008 年增幅最明显，此后长期在 0.920 上下小幅振动。2019 年协调度较 2001 年增长 3.67%，在研究期初的六年，除 2004 年外的其他年份均为低度协调，但 2007 年后协调度一直居 0.910 之上，维持中度协调状态。总体来看，我国畜牧业与资源环境具有协调发展趋势，但在近十年的协调度增长不明显，仍有较大的协调发展空间。

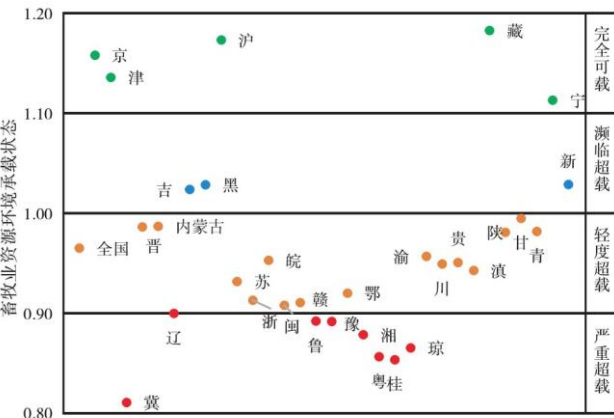


图 5 全国及各省份畜牧业资源环境承载状态

注：横轴数据分布位置无意义，限于空间，各省份名称采用简称表示。

分省区来看，多数省区承载状态好转的同时，畜牧业生产与资源环境的协调度也在上升。仅有北京、天津、吉林、黑龙江、上海 5 省（市）协调度明显下降，分析发现这些省区的承载力指数均有一定提升，现实承载力值超过理想值且两者差距拉大，从而导致协调度降低。其他省区协调度呈不同程度改善，尤以西藏、河北改善效果最明显，但两省区改善诱因相反，西藏源于从承载大幅盈余趋向接近承载饱和，河北则源于超载强度趋缓，使得两者都在逐步接近最优承载状态。由 2017—2019 年平均承载力可看出，分别有 29.03%、41.94% 的省区处于高度、中度协调状态，中高协调总比重较研究期初 3 年提高 9.68 个百分点，协调度较高的地区主要分布在北方尤其是新疆、甘肃等西北地区，说明这些地区畜禽生产规模和资源环境供给规模匹配程度较好。协调度最低的地区主要为北京、上海、天津等经济发达地区及湖南、山东、河南等农牧大省。经济发达地区的畜牧业资源环境失调主要受当地趋紧的环保政策和第三产业为主的经济结构影响，畜牧业发展空间受到政策等因素的多方限制，而农牧大省的不协调主要来自畜牧业生产规模超载，资源环境系统无力满足畜牧业发展需求，不同地区的协调因素和不协调来源具有明显差异（图 7）。

3.2.2 空间自相关分析

研究发现，尽管各地区畜牧业与资源环境协调度水平有明显差异，但总会显露出区域性协调度接近的现象，如云贵川、陕甘宁青、黑吉辽等区域内协调度差异较小。畜牧业生产规模具有区域集聚特征，资源环境条件也具备在一定范围内接近的特点，两者共同作用形成的畜牧业与资源环境协调度是否存在空间关联？为此，本研究采用全局 Moran's I 测算协调度的空间自相关性。测算发现，畜牧业生产与区域资源环境协调度的空间相关性呈现“由强变弱”的趋势。2001—2019 年 Moran's I > 0 且在 5% 的水平上通过了显著性检验，说明这一时期我国畜牧业生产与资源环境承载力具有明显的空间正相关关系。值得注意的是，研究期内的 Moran's I 有下降趋势，从期初的 0.146 降至 2019 年的 0.082，说明协调度的空间相关性逐步走弱。

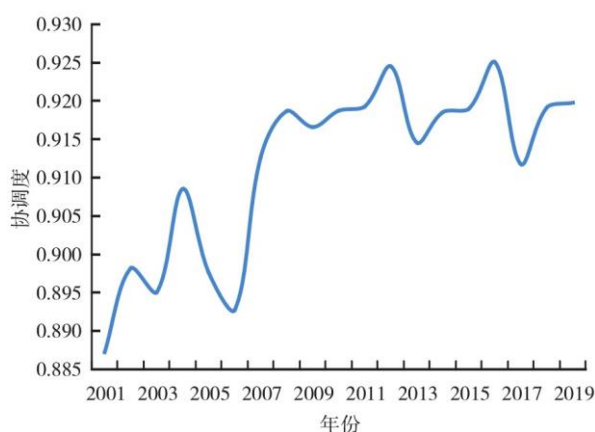


图 6 全国畜牧业生产与资源环境承载力的协调度

对协调度的空间相关性及变化趋势分析发现，空间相关性主要来自一定地理范围资源环境组成、结构和空间分布的相似性，同时也受趋近的社会经济发展条件等因素影响，这是导致区域畜牧业生产与资源环境承载协调度空间自相关的主要原因。然而，畜牧业生产具有强资源禀赋导向性到强市场经济导向性转变的特征，现代畜牧业通过资源调配等方式日益摆脱原有的资源环境条件约束，这就使得一个省区的畜牧业生产规模不再服从本省区的资源条件，即使距离相近、条件相似的省区在畜牧业生产方面也可能出现较大差距，所带来的畜牧业与资源环境协调度差异随之变大，空间自相关性逐步走弱。但总体来看，资源导向型畜牧

业并未完全转型市场导向型畜牧业，畜牧业生产兼具资源、市场导向特征，当前全国范围的协调度仍具有一定空间自相关性。

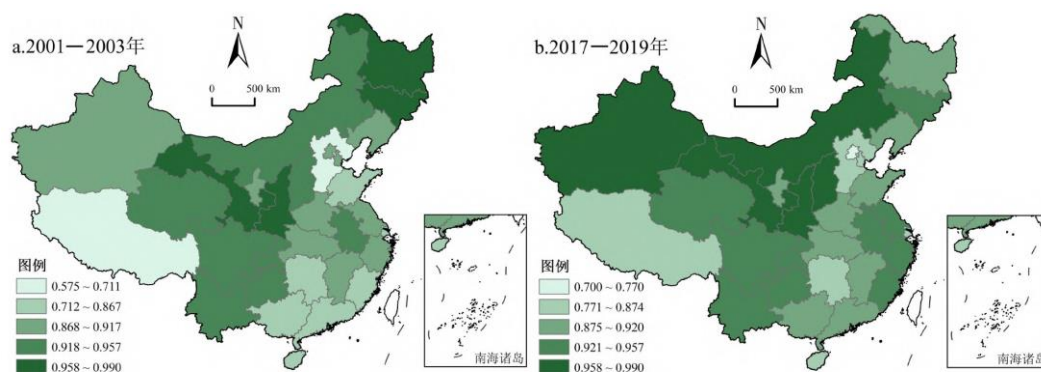


图 7 各省份畜牧业生产与资源环境承载力的协调度

3.3 畜牧业布局与资源环境承载力协调关系的影响因素

分别对 2001、2005、2010、2015 和 2019 年畜牧业布局与资源环境承载力协调关系的影响因素进行地理加权回归分析，AIC 值和调整后的拟合系数总体优于 OLS 模型。

各因素对畜牧业布局与资源环境承载力协调度具有正向或负向影响，表明影响效果不稳定性与空间异质性明显。系数均值可以说明各变量对协调度的平均影响程度，在影响效果比较显著的 4 个自变量中，总体呈现耕地资源配置>畜牧业集聚度>环境治理力度>草地资源配置。①畜牧业集聚度在整个研究期内发挥负向影响，说明畜牧业专业化水平偏高和区域集聚特征明显的地区协调度更易遭受破坏，同时，东部地区更密集的畜牧业生产活动对协调关系的负面影响程度明显提升，并已成为全国恶化协调效果最显著的地区；②耕地资源配置是影响协调度的首要因素，且在时间上由影响方向不稳定发展为强度递增、方向趋稳，在空间上由西南至东北系数提高，说明山地比重偏高区域耕地资源的协调贡献更加明显，优化耕地与畜牧业空间匹配是增进畜牧业与资源环境协调发展的关键；③环境治理力度的影响程度有超越畜牧业集聚度的趋势，并由正向影响效果转向负向影响，表明当前的环境治理方式并没有统筹考虑畜牧业生产与资源环境的协调关系，特别是环保“一刀切”等政策导致畜牧业与资源环境关系失调，环境治理方式与协调发展的理念背道而驰；④草地资源配置对协调度的影响程度比较微弱、影响方向差异明显，这一方面受全国草牧业发展滞后影响，另一方面也有草地资源丰富牧区超载倾向的作用（图 8）。

总体来看，影响我国畜牧业布局与资源环境承载力协调关系的主要因素是耕地资源配置和畜牧业集聚度，且影响程度远大于草地资源配置等其他变量，这与我国食粮型畜牧业为主的结构特征相吻合。耕地资源是畜牧业发展的决定因素，它不仅为畜牧业生产提供必要的饲料粮等资源支撑，也可以消纳畜禽粪污等多种废弃物，关注畜牧业耕地资源保障属性和优化畜牧业生产空间布局对增进协调关系具有关键性影响。

4 研究结论与政策建议

4.1 研究结论

第一，全国畜牧业资源环境承载力现实值小幅增长，多数省区超载状态有一定改善，总体承载力现实值由 2001 年的 0.5638 增至 2019 年的 0.5851，资源环境对畜牧业的承载能力有增强趋势。但全国总体承载状态没有得到明显改善，74.17%的省区仍表现为资源环境超载，尤其是山东、河南、河北等重要农牧大省资源环境超载相对严重，西部未超载牧区的承载力指数也有下降。

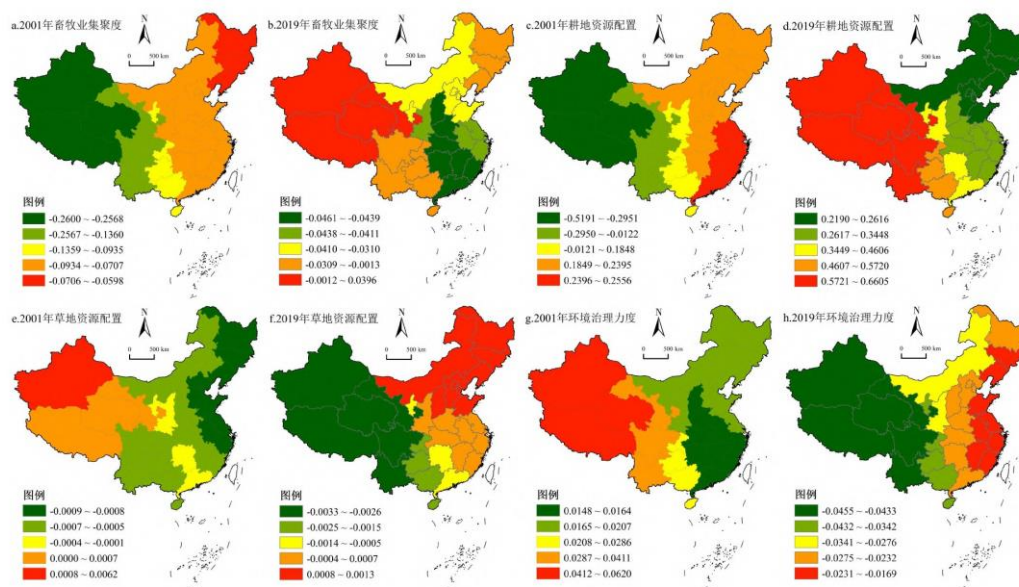


图 8 GWR 模型影响因素回归系数空间分布

第二，承载力提升拉近实际承载状态与最优承载状态的距离，全国平均协调度已稳定在 0.920 上下，畜牧业布局与资源环境承载力由低度协调提升并稳定于中度协调水平。此外，畜牧业生产与资源环境的协调度具有空间自相关性，但 Moran' sI 从期初的 0.146 降至 2019 年的 0.082，说明空间相关性正在走弱。

第三，各变量对协调度的影响具有时空非平稳性特征，耕地资源配置和畜牧业集聚度对协调水平影响最明显，但两者作用方向相反、作用强度差异较大，耕地资源配置对协调度发挥日益增强的正向作用，畜牧业集聚度则表现出弱化的负向影响。

4.2 政策建议

第一，重点推进种养结合、农牧循环，发挥好耕地资源配置对畜牧业与资源环境协调发展的促进作用。耕地资源配置对协调关系已经发挥了显著正向影响，尤其是西南地区比较明显，但东北地区作用效果偏弱，说明粮食主产区循环农业发展力度仍然不足，广袤的耕地资源对协调发展的促进效果仍有很大提升空间。各地应当结合地方实际发展有特色的种养结合业，例如蔬菜大省山东可借助畜牧业和蔬菜产业规模优势扩大有机蔬菜生产比重，开展更广泛的种养结合地方探索性实践，扩大耕地资源配置的协调成效。

第二，优化畜牧业空间布局，结合区域资源环境承载力科学谋划畜牧业生产规模。市场需求的扩大往往会在资源环境产权不明晰的情况下导致畜牧业生产规模盲目扩大并衍生资源环境问题，地方“唯市场导向”的畜牧业生产特征具有忽视资源环境承载能力的倾向，这是整个东部地区畜牧业超载和不协调的重要成因。因此，应当引导地方畜牧业发展充分考虑资源环境诸要素的承载阈值，结合承载力划出区域生产红线，优化全国畜牧业布局与资源环境承载力的空间匹配。

第三，构建畜牧业发展与资源环境保护的长效协调机制，统筹畜牧业与资源环境两大系统，形成营养、可持续型畜牧业生产格局。满足动物蛋白营养需要和保护资源环境常成为一组矛盾化的对立目标，这主要是对两者内在联系认识不清、协调机制建立不全作用的结果。在实践过程中，需要坚决摒弃保护与发展对立的思想，在东部地区率先试点畜牧业与资源环境长效协调机制，例如资源环境补偿机制、资源环境交易制度等，为协调发展提供长期稳定的制度保障。

参考文献:

- [1]Leu S,Ben-Eli M,Mor-Mussery A.Effects of grazing control on ecosystem recovery,biological productivity gains,and soil carbon sequestration in long-term degraded loess farmlands in the Northern Negev,Israel[J].Land Degradation&Development,2021,32(8):2580-2594.
- [2]Anggraini L J,Ngadiyono N,Bintara S,et al.Sustainability studies of smallholder livestock based on climatological conditions,land resources and farmer profile[C].IOP Conference Series:Earth and Environmental Science,2021,667(1):012091.
- [3]García F E,López A Z,Flórez D C,et al.Noise levels during the milking of dairies with mechanical systems in the highlands of the tropics of Colombia and its effect on milk quality and animal welfare[J].Revista de Investigaciones Veterinarias del Peru,2019,30(2):691-698.
- [4]Elzen B,Bos B.The RIO approach:Design and anchoring of sustainable animal husbandry systems[J].Technological Forecasting and Social Change,2019,145:141-152.
- [5]Mititelu-IonușO,Simulescu D,Popescu S M.Environmental assessment of agricultural activities and groundwater nitrate pollution susceptibility:A regional case study(Southwestern Romania)[J].Environmental Monitoring and Assessment,2019,191(8):1-15.
- [6]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.
- [7]Hooda P S,Truesdale V W,Edwards A C,et al.Manuring and fertilization effects on phosphorus accumulation in soils and potential environmental implications[J].Advances in Environmental Research,2001,5(1):13-21.
- [8]Tara G.Livestock-related greenhouse gas emissions:Impacts and options for policy makers[J].Environmental Science&Policy,2009,12:491-503.
- [9]Bakhov Z K,Sultangalieva K U,Zhumadilova N B,et al.Solution of environmental problems of livestock breeding through intensification of waste treatment processes[C].IOP Conference Series:Earth and Environmental Science,2021,659(1):012008.
- [10]张晖.中国畜牧业面源污染研究[D].南京:南京农业大学,2010.
- [11]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.
- [12]Meadows D H,Meadows D L,Randers J,et al.The Limits to Growth:A Report for the Club of Rome's Project on the Predicament of Mankind[M].New York:Universe Books,1972.
- [13]Lee J.Land resources as a basic factor in livestock carrying capacity[J].Irish Geography,1976,9(1):63-75.

-
- [14]Keon G M,Stone G S,Syktus J I,et al.Climate change impacts on northern Australian rangel and livestock carrying capacity:A review of issues[J].The Rangeland Journal,2009,31(1):1-29.
- [15]Feng X,Qiu H,Pan J,et al.The impact of climate change on livestock production in pastoral areas of China[J].Science of the Total Environment,2021,770:144838.
- [16]Han Z,Han C,Yang C.Spatial econometric analysis of environmental total factor productivity of ranimal husbandry and its influencing factors in China during 2001-2017[J].Science of the Total Environment,2020,723:137726.
- [17]易青,李秉龙,耿宁.基于环境修正的中国畜牧业全要素生产率分析[J].中国人口·资源与环境,2014,24(S3):121-125.
- [18]郭秀锐,毛显强,冉圣宏.国内环境承载力研究进展[J].中国人口·资源与环境,2000(S1):29-31.
- [19]余丹林,毛汉英,高群.状态空间衡量区域承载状况初探——以环渤海地区为例[J].地理研究,2003,22(2):201-210.
- [20]段佩利,刘曙光,尹鹏,等.中国沿海城市开发强度与资源环境承载力时空耦合协调关系[J].经济地理,2018,38(5):60-67.
- [21]封志明,杨艳昭,闫慧敏,等.百年来的资源环境承载力研究:从理论到实践[J].资源科学,2017,39(3):379-395.
- [22]岳文泽,王田雨.资源环境承载力评价与国土空间规划的逻辑问题[J].中国土地科学,2019,33(3):1-8.
- [23]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.
- [24]李靖,张正尧,毛翔飞,等.我国农业生产力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.
- [25]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.
- [26]安晶潭.畜禽养殖资源环境承载力分析、预测及预警研究[D].北京:中国农业科学院,2015.
- [27]王国刚,王明利,杨春.中国畜牧业地理集聚特征及其演化机制[J].自然资源学报,2014,29(12):2137-2146.
- [28]宋璐.我国畜牧业养殖区域布局演变与发展研究[D].长春:吉林农业大学,2019.
- [29]孟祥海,张俊飏,李鹏.中国畜牧业资源环境承载压力时空特征分析[J].农业现代化研究,2012,33(5):556-560.
- [30]倪印锋,王明利.中国牧草产业地理集聚特征及影响因素[J].经济地理,2018,38(6):142-150.
- [31]赵俊伟,陈永福,余乐,等.中国生猪养殖业地理集聚时空特征及影响因素[J].经济地理,2019,39(2):180-189.

[32]齐亚彬. 资源环境承载力研究进展及其主要问题剖析[J]. 中国国土资源经济, 2005(5):7-11, 46.

[33]毛汉英, 余丹林. 区域承载力定量研究方法探讨[J]. 地球科学进展, 2001(4):549-555.

[34]尚勇敏, 王振. 长江经济带城市资源环境承载力评价及影响因素[J]. 上海经济研究, 2019(7):14-25, 44.

[35]丛晓男. 耦合度模型的形式、性质及在地理学中的若干误用[J]. 经济地理, 2019, 39(4):18-25.

[36]Su S L, Lei C R, Li A Y, et al. Coverage inequality and quality of volunteered geographic features in Chinese cities: Analyzing the associated local characteristics using geographically weighted regression[J]. Applied Geography, 2017, 78:78-93.

[37]卢宾宾, 葛咏, 秦昆, 等. 地理加权回归分析技术综述[J]. 武汉大学学报: 信息科学版, 2020, 45(9):1356-1366.