



张俊华, 肖海峰. 中国畜牧养殖资源环境压力: 时空分异特征及其与畜牧产出水平的耦合协调关系[J]. 中国农业大学学报, 2025, 30(01): 276-292.  
ZHANG Junhua, XIAO Haifeng. Resource and environmental pressure on animal husbandry in China: Characteristics of spatio-temporal differentiation and its coupling coordination relationship with livestock output[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2025, 30(01): 276-292.  
DOI: 10.11841/j.issn.1007-4333.2025.01.24

## 中国畜牧养殖资源环境压力: 时空分异特征及其与畜牧产出水平的耦合协调关系

张俊华<sup>1,2</sup> 肖海峰<sup>1\*</sup>

(1. 中国农业大学 经济管理学院, 北京 100083;  
2. 河南省社会科学院 农村发展研究所, 郑州 451464)

**摘 要** 为准确测算中国畜牧养殖资源环境压力,并揭示其时空分异特征及其与畜牧产出水平的关系,采用空间自相关和耦合协调模型从时空角度揭示其演变特征、空间自相关性及其与畜牧产出水平的耦合协调关系。结果表明:1)我国畜牧养殖资源环境压力呈波动增长态势,多数省份处于承压状态,畜产品主产区中冀吉鲁豫湘等处于高压,黑皖鄂处于中等压力;2)畜牧养殖资源环境压力的空间集聚特征逐渐增强,主产区中冀辽豫鄂湘地区为高-高集聚,蒙黑川地区为低-高集聚,皖鲁地区为高-低集聚;3)畜牧养殖资源环境压力与畜牧产出水平间的耦合度呈增长趋势,多数地区的耦合度均提升,但冀鲁豫地区的耦合度出现下降,且大多数地区的耦合协调度长期处于一般协调阶段。因此,加强畜牧养殖水土草粮等资源管理以提高资源利用效率,推广应用畜牧养殖废弃物资源化利用和降碳技术将有助于促进资源环境约束条件下畜牧业生产的稳定可持续发展。

**关键词** 畜牧业; 资源环境压力; 时空演变分析; 产出水平; 空间自相关; 耦合协调关系

中图分类号 X713;F326.3 文章编号 1007-4333(2025)01-0276-17 文献标志码 A

## Resource and environmental pressure on animal husbandry in China: Characteristics of spatio-temporal differentiation and its coupling coordination relationship with livestock output

ZHANG Junhua<sup>1,2</sup>, XIAO Haifeng<sup>1\*</sup>

(1. College of Economics and Management, China Agricultural University, Beijing 100083, China;  
2. Institute of Rural Development, Henan Academy of Social Sciences, Zhengzhou 451464, China)

**Abstract** In order to accurately quantify the resource and environmental pressure of animal husbandry in China, and reveal its spatio-temporal differentiation characteristics as well as its relationship with the output level of animal husbandry, this study adopts spatial autocorrelation and coupling coordination models to clarify the evolution characteristics of the spatial autocorrelation and the coupling coordination relationship with animal husbandry output level from the perspective of time and space. The findings show that: 1) The resource and environmental pressure on animal husbandry in China exhibits a fluctuating growth trend, with the majority of provinces experiencing pressure. Regions such as Hebei, Jilin, Shandong, Henan, and Hunan face high pressure, whereas Heilongjiang, Anhui, and Hubei experience moderate pressure in 2022. 2) The spatial agglomeration characteristics of resource and environmental pressure on animal

收稿日期: 2024-02-03

基金项目: 农业农村部 and 财政部项目(CARS-39-22)

第一作者: 张俊华(0009-0008-5796-9433), 助理研究员, 主要从事农业经济与农村发展, 畜牧业经济研究, E-mail: zhhnzjh@163.com

通讯作者: 肖海峰(0009-0006-4863-1209), 教授, 主要从事农业经济理论与政策, 畜牧业经济研究, E-mail: haifengxiao@cau.edu.cn

husbandry are gradually strengthening. High-high agglomeration is observed in key production areas such as Hebei, Liaoning, Henan, Hubei, and Hunan, while low-high agglomeration is present in regions such as Inner Mongolia, Heilongjiang, and Sichuan. Additionally, Anhui and Shandong exhibit high-low agglomeration. 3) The coupling degree between resource and environmental pressure on animal husbandry and the output level of livestock industry is on the rise, with most areas experiencing an increase in coupling degree. However, Hebei, Shandong and Henan show a decreasing coupling degree. Furthermore, the coupling coordination degree in most areas remains at a generally coordinated stage in the long term. Based on the above findings, it is recommended to strengthen the management of water, soil, grass and grain resources in animal husbandry to enhance resource utilization efficiency. Facilitating the recycling and utilization of animal husbandry waste resources and promoting the application of carbon reduction technologies will foster the stable and sustainable development of animal husbandry in harmony with the resource environment.

**Keywords** animal husbandry; resource and environmental pressure; spatial-temporal evolution analysis; output level; spatial autocorrelation; coupling coordination relationship

改革开放以来,我国畜牧业为满足经济快速增长背景下居民日益增加的畜产品消费需求,选择了过度消耗资源和忽略对生态环境影响的发展道路<sup>[1]</sup>。虽然这一过程在前期能够有效提升畜牧业的综合生产能力,但由此所引发的畜牧业区域资源承载力与生产布局不平衡、生产过程资源低效利用和废弃污染物超排<sup>[2]</sup>等问题仍在不断加重我国的畜牧养殖资源环境压力<sup>[3]</sup>。过去这种粗放型的生产方式在一定程度上满足了居民的畜产品消费需求,但同时也隐含着畜牧养殖资源环境压力持续加重造成的抗风险能力偏弱<sup>[4]</sup>和产业发展质量效益不高<sup>[5]</sup>等问题。当前我国畜牧业资源的结构性供给短缺和环境的区域性污染加剧问题<sup>[6]</sup>仍然突出;水、土地、饲草和饲料粮资源是畜牧养殖的重要基础性资源要素,水体环境、土壤环境和温室气体排放是畜牧养殖废弃物的主要污染形式,这些正是阻碍未来畜牧业高质量发展的硬性约束条件。畜牧业高质量发展在推进适度规模经营、保障畜牧业发展用地安全、健全饲草料供应体系、促进农牧业循环发展、加强废弃物处置和资源化利用以及提升绿色养殖水平等方面指示了我国畜牧业的发展路径。可见,促进畜牧养殖生产布局与资源环境禀赋相匹配,因地制宜发展畜牧养殖<sup>[7]</sup>,切实提高畜牧养殖资源利用效率和环境保护水平既是实现资源环境与畜牧产业经济协调可持续发展的迫切需要,也是提升我国畜产品供应保障能力以满足未来继续增长的产品数量、质量和安全需求的必由之路。

畜牧业发展与资源环境之间的矛盾在联合国粮农组织于2006年发布《畜牧业的巨大阴影:环境

问题与选择》后成为国内外学者们关注的热门话题;关于畜牧养殖资源环境的相关研究起初主要从畜禽粪污排放量以及对环境产生污染<sup>[8-9]</sup>的主要物质质量估算<sup>[10]</sup>、区域畜禽粪污负荷及潜在威胁<sup>[11]</sup>、耕地、水体和温室气体排放负荷量<sup>[12]</sup>及环境风险和环境效应<sup>[13]</sup>评价等方面展开,并扩展到畜禽粪污减量化、资源化和生态化处理、区域粪污负荷预警、畜禽载畜量估算和畜牧养殖可持续发展潜力评估等方面;而后逐步形成畜牧养殖与水、土地、饲草和饲料粮资源,水体、土壤环境和温室气体排放等单一指标评价的研究方向。具体来看,在水资源方面,虞祎等<sup>[14]</sup>基于水足迹理论将畜牧养殖饮食、饮水及清洁用水的虚拟水量加总以评估我国畜牧业水资源承载力,而消费者对畜禽产品需求日益增长<sup>[15]</sup>、水资源的空间分布不均、与其他生产要素匹配度不高以及耗水型产品生产与消费的分离是造成水资源压力增大的主要原因<sup>[16]</sup>。在土地资源方面,长期以来畜牧业养殖用地难的问题在不同畜禽品种、饲养规模和饲养区域中都广泛存在<sup>[17]</sup>,而完善和优化养殖用地配置、合理规划养殖用地空间和提高土地资源效率等是保障畜产品市场供应并实现畜牧业可持续发展的重要举措<sup>[18]</sup>。在饲草资源方面,叶勇等<sup>[19]</sup>构建了可食饲草储量模型用于评估草原载畜能力;当前,我国饲草生产存在生产水平不高、季节性供需不平衡和优质草产品供应不足等问题,并且饲草生产和畜牧业发展在时间和空间维度上具有明显的非均衡特征<sup>[20]</sup>,当前国内的饲草生产能力难以满足畜牧业发展和草原生态保护工作需要的的问题已经成为制约畜牧业可持续发展的主要原因<sup>[21]</sup>,

并且,水资源短缺也是阻碍我国饲草生产供给能力提升的关键因素<sup>[22]</sup>,可见完善牧草产业支持体系是实现草畜紧密结合的重要手段<sup>[23]</sup>。在饲料粮资源方面,李欣等<sup>[24]</sup>对我国畜禽养殖饲料粮需求结构的测算结果表明,生猪生产对饲料粮的需求量最大,辛良杰等<sup>[25]</sup>和刘长全等<sup>[26]</sup>对我国饲料粮需求量和产销需求平衡特征进行测算,结果表明我国饲料粮安全仍面临着巨大挑战,受农业生产结构调整滞后于消费需求结构转变的影响,我国饲料粮结构性供给不足,生产结构与需求结构错配的问题长期存在。在水、土环境方面,未经处理的畜禽粪污水是水和土壤中硝酸盐污染的主要来源<sup>[27]</sup>,并且当前我国由畜禽养殖造成的土壤污染和水体流失问题仍然十分严峻<sup>[28]</sup>。在畜牧养殖碳排放方面,饲料生产、运输、利用和畜产品生产是农牧业温室气体排放的主要来源<sup>[29]</sup>,相关学者运用IPCC系数法和生命周期法对我国畜牧业碳排放进行测度,并对其地区差异<sup>[30]</sup>和时空演化特征<sup>[31]</sup>进行分析,结果表明我国畜牧业仍面临着较大的碳排放压力,当前碳排放总体差异波动性增长,空间关联性也不断增强,核心区正从草原牧区向农耕牧区演变。

上述研究极大地丰富了畜牧养殖资源和环境状况评价的内容,但是由于畜牧业系统的复杂性,从多指标角度对其进行综合评价的探索还比较少,其中孟祥海等<sup>[32]</sup>从土壤、水环境、饲料粮和饲草承载压力等角度进行评价,韩冬梅等<sup>[33]</sup>构建了包含耕地、水和粮食的畜禽养殖资源承载风险综合指数对中国畜禽养殖业的风险和短板进行评估,熊学振等<sup>[34]</sup>构建包括资源供给、环境消纳和社会支持系统的畜牧业资源环境承载力评价体系以探究畜牧业布局与资源环境承载力的协调关系,已有研究为本研究提供了有价值的思路借鉴和方法学支持。基于此,本研究选择2008—2022年的数据,以中国31个省级行政区(统计数据未含港澳台地区,下同)为研究对象,使用承载力评价的概念和指数化方法,依据孟祥海<sup>[35]</sup>的计算思路分别测算水资源、用地资源、饲草资源、饲料粮资源、水环境、土壤环境和碳排放等各类畜牧养殖资源和环境压力指数,采用层次分析法(主观)和熵值法(客观)相结合的综合赋权方法计算得到畜牧养殖资源环境综合压力指数,并对其时空演变特征进行评估;在此基础上,运用空间自相关和耦合协调分析方法探讨中国畜牧

养殖资源环境压力的空间自相关性特征及其与畜牧养殖产出水平之间的耦合协调关系,以期在畜牧养殖资源环境压力加大背景下促进中国畜牧业与资源环境和谐永续发展提供理论参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 指标设定

经济学概念中通常把资源称为生产资源,即自然界进入生产过程的各种物质资源,环境则是指生产活动产生的废物的消纳场所,也可作为提供生产服务的投入品。对于畜牧业生产而言,其资源和环境压力的来源主要包括生产投入和废物排放两方面;生产投入方面,畜牧养殖主要依赖用水、用地、饲草和饲料粮等生产资源投入,废物排放方面,畜牧养殖的全过程中均会产生碳排放而对空气环境形成压力,并且畜禽生产活动所产生的粪便在未经无害化处理而直接排放进入水土环境中超出水体自身净化能力和土壤分解恢复能力时所引发的水体污染和土壤性状改变将会对水土环境形成压力。因此,本研究的畜牧养殖资源环境压力主要包括用水资源、用地资源、饲草资源、饲料粮资源、水环境、土壤环境和碳排放。其中,用水资源指畜禽饮用、生产和清洗用水;用地资源指畜牧养殖圈舍和养殖场区用地;饲草资源指畜禽饲喂过程所消耗的饲草资源;饲料粮资源指畜牧养殖所需的饲用粮食资源;水环境指自然水体对畜禽粪尿的消纳和净化能力;土壤环境指土地中的微生物分解和植物作物生长利用对粪污的消化和自身的恢复能力;碳排放指畜禽养殖胃肠道发酵、粪肥管理、饲料粮种植以及饲料和产品的运输、加工与屠宰等全生命周期所产生的碳排放。

基于上述讨论,本研究从水、土地和饲草料资源对畜牧业生产的约束,土壤和水环境对畜禽粪便的消纳能力以及畜牧生产的碳排放等角度测算畜牧养殖资源和环境状况,并分别设定畜牧养殖用水、用地、饲草和饲料粮资源压力指数,畜牧养殖水质、土壤环境和碳排放压力指数以便测算畜牧养殖资源环境综合压力。另外,为更加准确地评估区域畜牧养殖的资源环境压力,本研究在核算压力指数时暗含以下假定:一是畜牧养殖资源的消耗仅考虑畜禽生产活动对资源要素的需求,二是基于胡钰等<sup>[36]</sup>关于粪污原料收集半径约30 km的调查结果,

在本研究中假定畜禽粪污不跨区域(省份)流动,三是将各类农作物和饲草等作为畜禽粪便中氮、磷元素的吸收作物,四是本研究中的畜禽品种主要包括猪、牛、羊、禽以及马、驴、骡和兔等。

### 1.1.1 水资源压力

畜牧养殖水资源压力是指在一段时期内,某区域畜牧养殖用水总量与该区域畜牧业可供用水量的比值,计算公式为:

$$P_w = \frac{W_g}{W_a}; W_g = \sum_{i=1}^n K_i r_i \quad (1)$$

式中: $P_w$ 为区域畜牧养殖用水资源压力指数; $W_g$ 为畜牧养殖年耗水总量; $W_a$ 为畜牧养殖年可供用水量; $i$ 为畜禽类别; $K_i$ 为畜禽年养殖量; $r_i$ 为畜禽单位耗水量; $r_i$ 包括饮用、生产和清洗用水<sup>[37]</sup>。在计算畜牧养殖年供水总量 $W_a$ 时参照虞祎<sup>[14]</sup>的水盈余(赤字)概念,用地区水资源总量与工业、生活、生态和种植业用水量的差值计算获得,此时暗含水资源优先供应用于非农业用水和种植业用水的假定。

此外,畜禽养殖过程中的繁殖和屠宰过程会造成养殖数量的变化,因此参照 Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)<sup>[38]</sup>的方法对畜禽年养殖量进行调整:

$$K_i = \begin{cases} \text{Herds}_{\text{end}} & \text{if: Days}_{\text{live}} \geq 365 \\ \text{Days}_{\text{live}} \cdot \left( \frac{\text{NAPA}}{365} \right) & \text{if: Days}_{\text{live}} < 365 \end{cases} \quad (2)$$

式中: $\text{Herds}_{\text{end}}$ 为畜禽种类年末存栏量; $\text{Days}_{\text{live}}$ 为畜禽饲养周期; $\text{NAPA}$ 为畜禽全年出栏总量;其中饲养周期根据《全国农产品成本收益资料汇编(2009—2023)》<sup>[39]</sup>中的数据进行调整计算。

### 1.1.2 土地资源压力

畜牧养殖土地资源压力是指一段时期内,某区域畜牧养殖标准用地面积与该区域畜牧养殖可利用土地保有面积的比值,计算公式为:

$$P_l = \frac{L_g}{L_a}; L_g = \sum_{i=1}^n K_i s_i \quad (3)$$

式中: $P_l$ 为区域畜牧养殖土地资源压力指数; $L_g$ 为畜牧养殖标准用地面积; $L_a$ 为畜牧养殖可利用土地保有面积; $s_i$ 为畜禽种类单位标准用地面积。另外,由于国内相关统计资料中对土地利用的情况仅统计了农用地、耕地、园地、林地和牧草地面积,考虑数据的可获得性,采用农用地面积减去园地面积、林地面积、牧草地面积和养殖水面之后剩余的面积

作为农业用地的保有面积;畜牧养殖可利用土地保有面积用农业用地保有面积与基本农田保护面积的差值表示。

### 1.1.3 饲草资源压力

畜牧养殖饲草资源压力是指在一段时期内,某区域畜牧养殖过程消耗的饲草所需要的草地面积与该区域可利用草地面积的比值,计算公式为:

$$P_{fg} = \frac{FG_m}{FG_a}; FG_m = \sum_{j=1}^n K_j t_j \quad (4)$$

式中: $P_{fg}$ 为区域畜牧养殖饲草资源压力指数; $FG_m$ 为畜牧养殖消耗的饲草所需的草地面积; $FG_a$ 为可利用的草地面积; $j$ 为畜禽产品类别,仅包括牛肉、羊肉和牛奶等草食畜产品; $K_j$ 为畜禽品种的年养殖量; $t_j$ 为畜禽种类消耗的饲草所需单位草地面积,在此参考谢鸿宇<sup>[40]</sup>关于饲草生态足迹的方法计算生产每单位畜产品需要的草地面积。

### 1.1.4 饲料粮资源压力

畜牧养殖饲料粮资源压力是指在一段时期内,某区域畜牧养殖耗粮总量与该区域粮食中可用于饲喂使用的粮食总量的比值,计算公式为:

$$P_f = \frac{F_m}{F_a \times \delta}; F_m = \sum_{i=1}^n K_i u_i \quad (5)$$

式中: $P_f$ 为区域畜牧养殖饲料粮资源压力指数; $F_m$ 为畜牧养殖年耗粮总量,包含畜产品饲料粮消耗量和母畜饲料粮消耗量; $F_a$ 为粮食年总产量, $\delta$ 为饲料粮占该区域粮食总产量的比重, $F_a \times \delta$ 表示粮食总量中可以作为饲料粮的数量; $u_i$ 为畜禽种类的单位粮食转化系数,粮食转化系数指生产单位畜产品消耗的粮食数量,按照粮食转化系数=耗粮数量/胴体重量,胴体重量=屠宰率×活体重量(主产品产量)计算。依据辛良杰等<sup>[25]</sup>的测算标准计算饲料粮的消耗量;另外,在计算母畜消耗的饲料粮时,母牛、母羊的存栏数量按照存栏量的45%和55%计算;计算奶牛消耗的饲料粮时,假设泌乳牛、牛犊和育成牛的占比分别为40%、30%和30%,牛犊和育成牛的年粮食消耗量分别为320和1000 kg。

### 1.1.5 水环境压力

畜牧养殖水环境压力是指一段时期内,既定水环境标准下某区域畜禽粪便进入水体所需用于稀释污染物的水资源总量与该区域可用于稀释污染物的水资源总量的比值,计算公式为:

$$P_{we} = \frac{WE_m}{WE_a}; WE_m = \text{Max}(\frac{WOC_k}{ULWOC_k}); WOC_k = \sum_{i=1}^n E_i \times \theta \times c_{ik} \quad (6)$$

式中:  $P_{we}$  为区域畜牧养殖水环境压力指数;  $WE_m$  为既定水环境标准下稀释畜禽粪便所需要的水资源量;  $WE_a$  为可用于稀释畜禽粪便污染物的水资源总量, 即可承载水资源总量;  $i$  为畜禽类别;  $k$  为污染物类别;  $WOC_k$  为所有畜禽种类的粪便排入水体中的  $k$  类污染物总含量;  $ULWOC_k$  为既定水环境标准下  $k$  类污染物含量上限值;  $E_i$  为畜禽粪污排放量;  $\theta$  为畜禽粪便入水率<sup>[41,11]</sup>;  $c_{ik}$  为  $i$  类畜禽粪便中  $k$  污染物的含量。

### 1.1.6 土壤环境压力

畜牧养殖土壤环境压力是指一段时期内, 某区域可承载土壤中氮、磷养分投入量所需要的土地面积与该区域可承载土地面积的比值。根据土壤表观养分平衡模型, 良性农业生产系统中氮、磷输入量与输出量应相等, 即: 氮、磷超载量 = 作物移走氮、磷量 - 化肥氮、磷输入量 - 畜禽粪便氮、磷输入量。畜牧养殖土壤环境压力的计算公式为:

$$P_s = \frac{S_r}{S_l}; S_r = S_l + S_s; S_s = \frac{N_s}{n_{\max}} \quad (7)$$

$$N_s = Y_m + Y_f - Y_c - Y_p \quad (8)$$

$$Y_m = \sum_{i=1}^m Q_i \times u_i \times z_i - \sum_{i=1}^l M_i \times u_i \times z_i \times \rho \quad (9)$$

$$Y_c = \sum_{o=1}^n PR_o \times v_o; Y_p = W \times S \times \tau \times \epsilon \quad (10)$$

式中:  $P_s$  为区域畜牧养殖土壤环境压力指数;  $S_r$  为承载土壤中氮、磷养分投入量所需要的土地面积;  $S_l$  为可用于承载土壤中氮、磷养分投入量的土地面积, 包括耕地、园地、林地和可利用草地;  $S_s$  为承载土壤中氮、磷养分盈余量所需要的土地面积;  $N_s$  为氮、磷养分盈余量;  $Y_m$  为畜禽粪便中氮、磷养分含量;  $Y_f$  为化肥中氮、磷养分折纯量;  $Y_c$  为农作物转移的氮、磷养分量,  $Y_p$  为饲草转移的氮、磷养分量;  $n_{\max}$  为单位土地面积所能承载的氮、磷养分最大量;  $Q_i$  为第  $i$  种畜禽养殖量;  $u_i$  为  $i$  类畜禽的粪便排泄系数;  $z_i$  为第  $i$  种畜禽粪便的氮、磷养分含量;  $M_i$  为牧区、农牧交错区大牲畜(牛、马、驴、骡等)存栏量;  $\rho$  为牧区、农牧交错区大牲畜粪便作为燃料直接燃烧的比例, 按 20% 计算<sup>[42]</sup>;  $o$  为农作物类别;  $PR_o$  为第  $o$  类农作

物年产量;  $v_o$  为第  $o$  类农作物单位产量所需氮、磷养分量;  $W$  为单位面积草地的鲜草产量<sup>[43]</sup>;  $S$  为可利用草地面积;  $\tau$  为单位饲草干物质含量;  $\epsilon$  为饲草干物质中氮、磷养分含量。

### 1.1.7 碳排放压力

畜牧养殖碳排放压力是指一段时期内, 某区域畜牧业全生命周期内的温室气体排放量占该区域温室气体承载能力的比值。按照全生命周期评价方法计算畜牧业在生产过程中的温室气体排放总量, 并将其与引起升温的单位温室气体含量相比计算碳排放压力指数, 其中温室气体排放量以  $CO_2$  当量计算, 公式为:

$$P_e = \frac{E_t}{E_c}; E_t = E_{cd} + E_{fb} + E_{sy} + E_{sl} + E_{ys} + E_{tz} \quad (11)$$

式中:  $P_e$  为区域畜牧养殖碳排放压力指数;  $E_t$  为以  $CO_2$  当量计算的畜牧养殖全生命周期温室气体总排放量;  $E_c$  为能造成区域温度上升  $1^\circ C$  的  $CO_2$  当量;  $E_{cd}$  为畜禽胃肠道发酵产生的  $CO_2$  和  $CH_4$  排放量;  $E_{fb}$  为畜禽粪便管理系统产生的  $CO_2$ 、 $CH_4$  和  $N_2O$  排放量;  $E_{sy}$  为畜禽饲养过程产生的  $CO_2$  排放量;  $E_{sl}$  为畜禽生产所消耗的饲料粮所产生的  $CO_2$  排放量;  $E_{ys}$  为畜禽生产中饲料粮和畜禽及其产品运输和加工过程产生的  $CO_2$  排放量;  $E_{tz}$  为畜禽屠宰加工过程产生的  $CO_2$  排放量。  $E_t$  的计算参考畜牧业全生命周期碳排放的方法进行核算<sup>[44]</sup>。

## 1.2 研究方法

### 1.2.1 畜牧养殖资源环境综合压力指数的测算

本研究采用熵值法和层次分析法相结合的综合赋权方法确定压力指数的权重并计算获得畜牧养殖资源环境综合压力指数。层次分析法是主观赋权方法, 熵值法是客观赋权法, 两种方法计算权重时的原理不同, 所利用的数据特征也不一致, 因此计算综合权重时不能采用简单平均方法, 而应采用综合计算方法得到综合权重, 其计算方法可以表示为:

$$W_p = \frac{W_{ap} \times W_{ep}}{\sum_{z=1}^n W_{ap} \times W_{ep}} \quad (12)$$

式中:  $W_p$  为综合权重;  $W_{ap}$  为 AHP 方法计算所得权重;  $W_{ep}$  为熵值法计算所得权重;  $p$  为压力指数类型。本研究计算所得权重见表 1。

表1 畜牧养殖资源环境综合压力的权重

Table 1 Weight of comprehensive pressure on animal husbandry resources and environment

| 指标<br>Index                                                     | 熵值法<br>Entropy evaluation<br>method | 层次分析法<br>Analytic hierarchy<br>process | 综合权重<br>Comprehensive<br>weight |
|-----------------------------------------------------------------|-------------------------------------|----------------------------------------|---------------------------------|
| 畜牧养殖用水资源压力<br>Water resource pressure on animal husbandry       | 19.616                              | 10.036                                 | 17.747                          |
| 畜牧养殖用地资源压力<br>Land resource pressure on animal husbandry        | 8.756                               | 4.139                                  | 3.267                           |
| 畜牧养殖饲草资源压力<br>Forage resource pressure on animal husbandry      | 10.618                              | 18.953                                 | 18.143                          |
| 畜牧养殖饲料粮资源压力<br>Feed grain resource pressure on animal husbandry | 6.014                               | 11.874                                 | 6.438                           |
| 畜牧养殖水环境压力<br>Water environmental pressure on animal husbandry   | 15.676                              | 17.094                                 | 16.174                          |
| 畜牧养殖土壤环境压力<br>Soil environmental pressure on animal husbandry   | 26.490                              | 10.769                                 | 17.218                          |
| 畜牧养殖碳排放压力<br>Carbon emission pressure on animal husbandry       | 12.830                              | 27.135                                 | 21.013                          |

注:数据来源:使用熵值法和层次分析法计算得到。

Note: Data source: Calculated by using entropy evaluation method and analytic hierarchy process.

### 1.2.2 空间自相关模型

空间自相关是一种用来度量空间数据分布特征和相互关系的统计方法,其基本思想是认为在空间上相邻或者接近位置上的空间指标数据之间存在会随距离的增加而减弱的依赖性 or 相似性。空间自相关有全局空间自相关和局部空间自相关两种类型,其中全局空间自相关能够反映空间数据是否有聚集或离散的趋势以及趋势的强度和显著性,局部空间自相关是对研究区域中不同地区的空间进行分析用于反映每个地区与其周边地区之间的空间差异程度和显著性。全局和局部空间自相关 Moran's  $I$  值分别可以表示为:

$$I = \frac{n \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (13)$$

$$I_i = \frac{(x_i - \bar{x}) \sum_{j=1}^n w_{ij} (x_j - \bar{x})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (14)$$

式中: $n$ 为要素个数; $x_i$ 和 $x_j$ 分别为第 $i$ 个和第 $j$ 个要素的属性值; $\bar{x}$ 为属性值的平均数; $w_{ij}$ 为要素间的空间权重,本研究采用畜牧业经济距离空间权重进行计算,即在消除通胀的条件下,样本期内两地区畜

牧业产值平均值之差的绝对值的倒数。畜牧业是资源环境依赖型产业,各地区的畜牧业产值能够较准确地反映产业发展状况,因此使用畜牧业产值计算得到的畜牧业经济距离权重矩阵进行空间自相关分析能够更准确地反映畜牧养殖资源环境压力的经济意义及其区域相关性特征。

### 1.2.3 耦合协调度模型

耦合协调度模型可以用于分析事物的协调发展水平。其中,耦合度能够反映事务间的相互依赖与制约关系,协调度则是用来测度耦合关系中良性耦合状况的指标,能够反映两者协调关系的好坏程度。在本研究以畜牧养殖资源环境压力指数为基础构建畜牧业产出能力与畜牧养殖资源环境压力的耦合协调度模型,进而反映畜牧养殖资源环境压力与畜牧业产出水平的耦合协调关系,使用各地区肉类总产量、奶类总产量和禽蛋产量按熵值法加权计算得到的畜产品总产量来反映畜牧业产出水平。其耦合协调度的计算公式可以表示为:

$$C = \frac{U_1 \times U_2}{(U_1 + U_2)^2} \quad (15)$$

式中: $C$ 为耦合度,并且 $0 \leq C \leq 1$ ;  $U_1$ 和 $U_2$ 分别为畜牧养殖资源环境压力和畜牧业产出水平; $T = \alpha U_1 + \beta U_2$ ,  $D = \sqrt{C \times T}$ ,  $T$ 为基于调节系数 $\alpha$ 和 $\beta$ 构成的总和协调指数,且 $\alpha + \beta = 1$ ,在本研究中假定 $\alpha$ 和 $\beta$ 均为0.5,  $D$ 即为两个指标的耦合协调度,且 $D \in (0, 1]$ 。

### 1.3 数据来源

本研究的基础数据来源于2009—2023年的《中国统计年鉴》<sup>[45]</sup>《中国农村统计年鉴》<sup>[46]</sup>《中国畜牧兽医年鉴》<sup>[47]</sup>《中国环境统计年鉴》<sup>[48]</sup>《全国农产品成本收益资料汇编》<sup>[39]</sup>和国家统计局数据库网站,部分数据来源于《中国林业和草原统计年鉴》<sup>[49]</sup>和《中国水利年鉴》<sup>[50]</sup>。另外,计算畜牧养殖水环境压力时的畜禽粪污排放量数据来源于国家环保总局环发[2004]43号文件,计算畜牧养殖土壤环境压力时的畜禽粪便中氮、磷羊粪含量数据来源于文献《中国畜禽粪便产生量估算及环境效应》<sup>[13]</sup>,饲草转移的氮、磷养分数据来源于专著《土壤肥科学通论》<sup>[51]</sup>和文献《中国畜牧业资源环境承载压力时空特征分析》<sup>[32]</sup>,计算畜牧养殖碳排放压力时的畜禽胃肠发酵和粪便管理系统的温室气体排放系数和全生命周期内各生产过程的碳排放系数均来源于文献《中国省际畜牧业碳排放测度及时空演化机制》<sup>[43]</sup>。考虑本研究用数据的可得性,港澳台地区不在本研究的范围内。

## 2 结果与分析

### 2.1 畜牧养殖资源环境压力指数的时空变动特征

#### 2.1.1 资源压力的时变特征

2008—2022年,在各畜牧养殖资源类型中,除畜牧养殖饲料粮资源压力整体呈现先下降后增长的趋势以外,畜牧养殖水资源压力、用地资源压力和饲草资源压力整体均呈增长趋势,并且用水资源压力和用地资源压力尚处于低压力状态(图1)。

畜牧养殖水资源压力的大小由水资源供应量和畜牧养殖用水量共同决定,我国水资源紧张的局势长期存在的同时畜牧养殖用水需求持续增长,畜牧养殖水资源压力于2012年受水资源供应明显增长的影响而出现下降,之后波动增长,截至2022年增长到0.841(图1(a))。土地资源是不可再生资源,并且可利用的土地资源有限,随着畜牧业生产规模的快速增加,畜牧业对养殖用地的需求也

不断增加,畜牧养殖用地资源压力整体呈现增长趋势,但在2017—2018年受国家相关部门划定畜牧限养和禁养区并严格落实环保政策的影响,畜牧养殖用地压力增长明显;之后国家环保政策进一步收紧,大量关停养殖场,养殖用地的需求受行政手段的强制措施影响而大量减少,短期内土地资源压力减小,但也因此引发了生猪产业供应严重不足的新问题;而后又因生猪生产供应的恢复和鼓励支持政策的影响,生猪养殖用地需求快速增加,推动土地资源压力出现反弹增长,截至2022年畜牧养殖用地资源压力达到0.553(图1(b))。我国天然草原面积有限,随着畜产品消费需求(特别是牛、羊肉等草畜产品)的不断增加,牧区超载过牧情况持续存在,加之我国大部分草原地区多年降水量减少,部分地区旱情严重且不断加剧,草原返青期拉长,虽然草场产草量有所增长,草原载畜能力也随之提升,但草原压力仍然持续增大,截至2022年畜牧养殖饲草资源压力达到3.043(图1(c))。玉米是我国畜牧养殖饲料粮的主要种类,畜牧养殖饲料粮资源压力主要受饲用玉米供需变动的影响,2015年以前,我国主要饲料粮玉米的产量稳步提升,但却呈现出产量、库存和进口“三高”的局面,特别是玉米库存量超过2.5亿吨,该阶段的畜牧养殖饲料粮资源压力逐年波动下降;2016—2018年,适逢我国农业供给侧结构性改革“调结构,去库存”等方针政策提出和落实的时期,玉米库存逐步释放,畜牧养殖饲料粮资源压力随之快速增长;2019年受非洲猪瘟疫情和环保政策等因素的共同冲击,国内生猪产能尚未恢复,对玉米等饲料粮的需求明显下降,畜牧养殖饲料粮资源压力也快速下降,但2020年以来生猪产能开始恢复,畜牧养殖饲料粮资源压力也随之快速增长(图1(d))。

#### 2.1.2 环境压力的时变特征

2008—2022年,在各畜牧养殖环境类型中,畜牧养殖水环境压力呈现较明显的波动特征,畜牧养殖土壤环境压力呈下降趋势,畜牧养殖碳排放压力呈增长趋势(图2)。

具体而言,在既定的水环境标准下畜禽粪污中的污染物流失到水环境中的单位数量是一定的,因此畜牧养殖水环境压力与水资源总量的变化之间有较为密切的关系,其中水资源总量是指降水形成的地表和地下产水总量;由于年度间降水量的变化

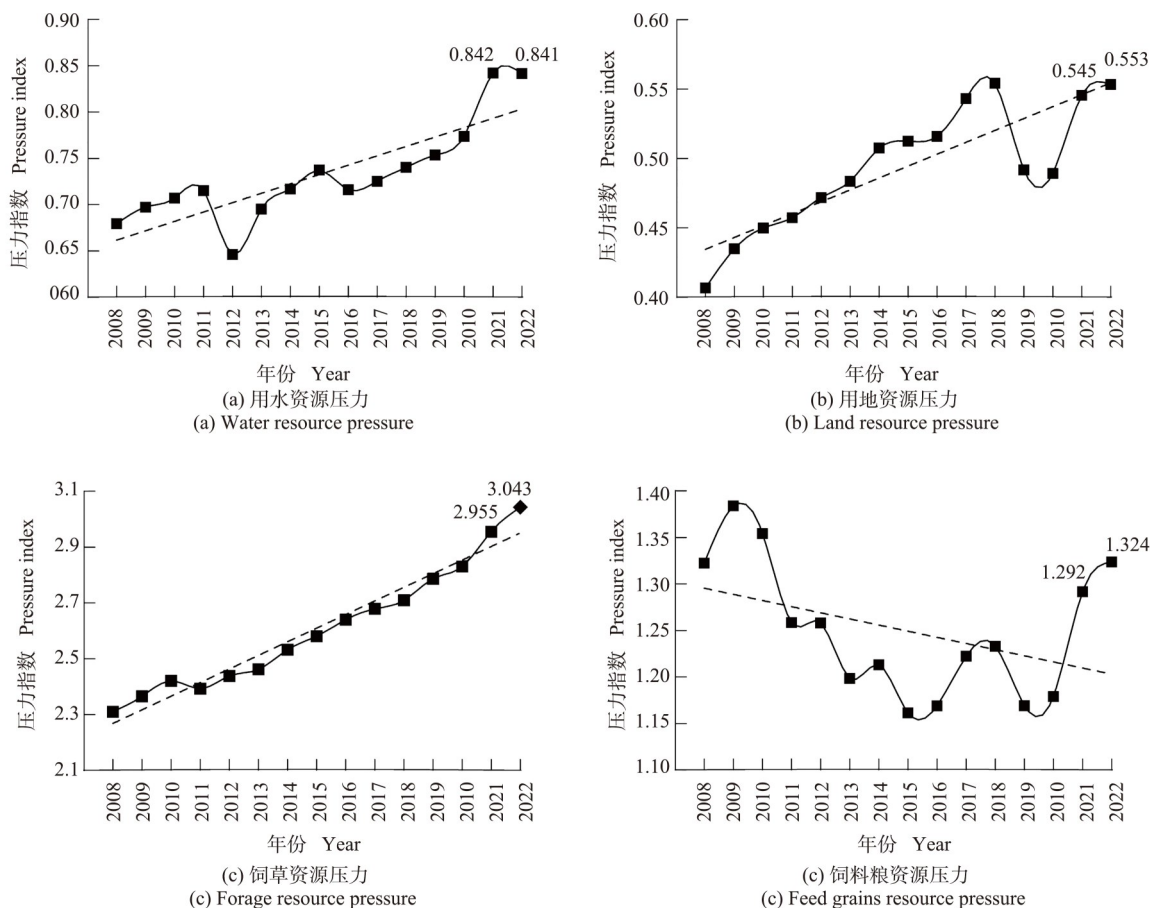


图1 2008—2022年畜牧养殖资源压力指数变动趋势

Fig. 1 Trend of resource pressure index of animal husbandry from 2008 to 2022

幅度较大,因此2008—2012年间波动幅度较大,2013—2019年间波动幅度有所减小,2020—2022年快速增长,截至2022年增长至1.818(图2(a))。与畜牧养殖水环境压力类似,在既定的标准下畜禽粪污中的污染物流失到土壤环境中的单位数量也是有限的;与此同时,随着农作物和饲草产量的增长以及化肥减量化行动的实施,土壤中过量的氮磷元

素被动转移,因此畜牧养殖土壤环境压力整体波动下降,到2022年畜牧养殖土壤环境压力下降至1.039(图2(b))。畜牧养殖碳排放压力的变动主要受畜产品生产的影响,2008—2016年畜产品产出水平稳步增长,畜牧养殖碳排放压力也呈现持续增长趋势;2017—2022年受畜产品生产规模波动变化的影响,畜牧养殖碳排放压力呈现波动增长趋势,截

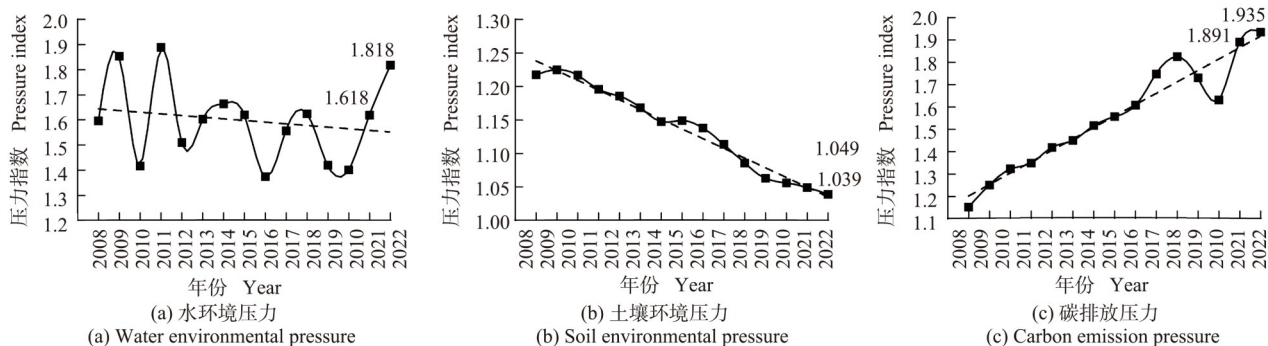


图2 2008—2022年畜牧养殖环境压力指数变动趋势

Fig. 2 Trend of environmental pressure index of animal husbandry from 2008 to 2022

至2022年畜牧养殖碳排放压力指数增长至1.935(图2(c))。

### 2.1.3 资源环境压力的时变特征

总体而言,我国畜牧养殖资源环境压力呈现波

动增长趋势,其中资源压力指数持续增长,环境压力指数波动增长,截至2022年我国畜牧养殖资源环境压力指数增长至历史最高水平的1.674,与2008年相比增长0.389,年均增长1.91%(图3)。

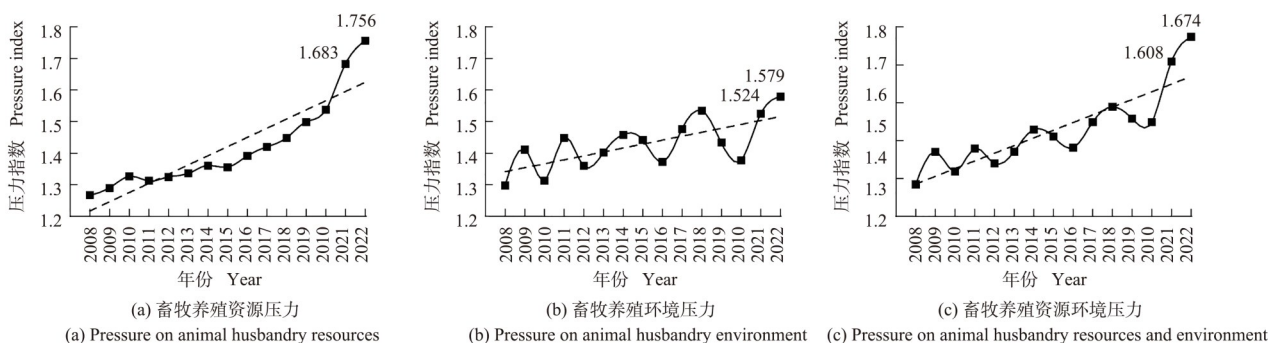


图3 2008—2022年畜牧养殖资源环境压力指数变动趋势

Fig. 3 Trend of resource and environmental pressure index of animal husbandry from 2008 to 2022

对畜牧养殖资源环境压力指数变动的时间趋势分解后可以看出,2008—2018年畜牧养殖资源环境综合压力从1.284波动增长至1.489,该阶段我国经济快速发展,畜产品产量稳步增长,畜牧业的发展主要依赖各类资源要素投入的增加,但随着资源环境压力的增大,资源环境的生态修复能力有所减弱,畜牧产业发展对环境的影响难以得到及时恢复;2019年以来,资源环境压力指数先下降后快速增长,该阶段环保执行力度加强,大量关停限养区的养殖场,短期内在一定程度上减轻了畜牧养殖资源环境压力,但同时也引发了猪肉市场供应严重不足,猪肉价格大幅上涨且波动频繁的问题;为了弥补畜产品供应缺口,后续其他替代畜产品种相继扩大养殖规模,并且在生猪产能恢复政策支持下,生猪产能也快速提升,又给资源环境带来更大压力;受畜产品生产供应反弹的影响,2020年以后畜牧养殖资源环境压力指数快速上涨,此时正处于畜牧业技术水平提升和环境治理的重要阶段,我国宏观经济和畜牧业发展过程中对资源的过度使用以及对环境的影响已经越来越得到重视,基于可持续发展的目标,畜牧业各生产环节通过技术水平提升,不断提高资源的利用效率,虽然对环境的治理工作有一定成效,但畜牧业需求持续增长带动下生产供应的增加仍然给当前畜牧养殖带来了较大的资源环境压力。

### 2.1.4 畜牧养殖资源环境压力的空间演变特征

在空间维度方面,将各地区的畜牧养殖资源环

境压力划分为高压、中压和低压3类。其中河北、山东和河南省等畜牧业主产省份长期处于高压阶段,宁夏回族自治区因干旱等原因而长期处于高压阶段,四川、陕西、甘肃、青海和新疆等我国西部地区的部分省(自治区)长期处于低压阶段,多数省份长期处于中压阶段。2008—2022年,大多数省(自治区、市)的畜牧养殖资源环境压力都呈增长趋势,其中辽宁、吉林和湖南等省份从中等压力阶段进入高压阶段,广西、重庆、贵州和云南等省(市)从低压阶段进入中等压力阶段;北京和天津等直辖市受发展定位和环境治理等因素的影响而从高压阶段进入中等压力阶段,但仍处于中-高压临界线附近,虽然2022年时内蒙古自治区畜牧养殖资源环境压力指数正处于低压阶段,但2008年以来整体呈波动变化的不稳定状态,且多数年份仍处于中等压力阶段,表明内蒙古自治区畜牧业生产容易受到资源和环境的影响。另外,安徽和江西等省份已经临近进入高压阶段,陕西、甘肃和青海等省已经临近进入中等压力阶段(图4)。总体而言,我国多数省份的畜牧养殖资源环境压力处于承压状态(高于1),并且呈现持续增长的趋势,仅西部的部分省份还处于低压状态,但也基本临近承压状态;在我国居民对畜产品需求持续增长的条件下,充分发挥主产省生产优势的同时,合理利用西部部分省份的资源环境优势,提高资源利用效率,加强畜牧业环境治理能力也是未来畜牧业高质量发展的可选之路。

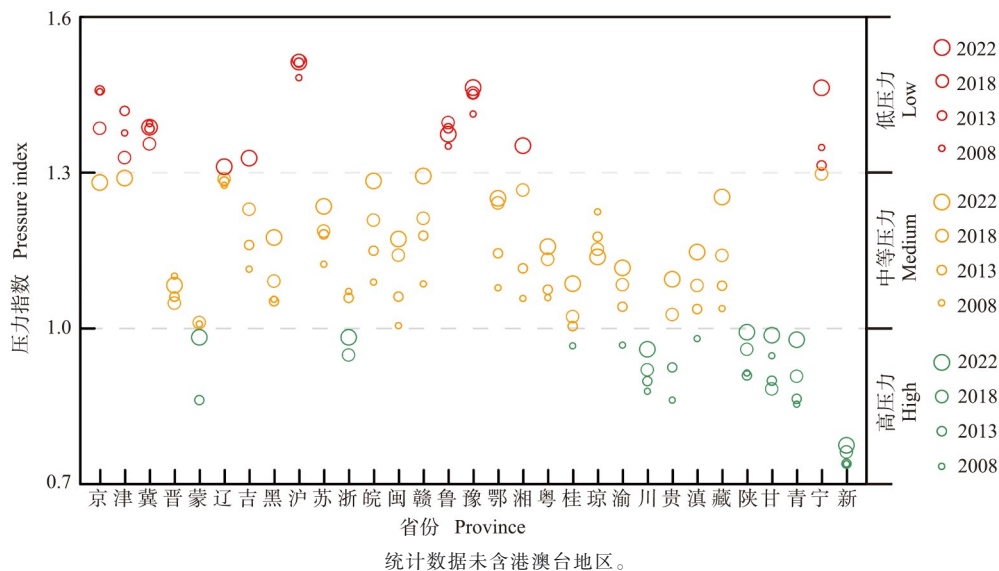


图4 全国31个省(自治区、市)畜牧养殖资源环境压力指数时空演变

Fig. 4 Spatio-temporal evolution of resource and environmental pressure index of animal husbandry in 31 provinces (autonomous regions and municipalities)

## 2.2 畜牧养殖资源环境压力指数的空间自相关分析

### 2.2.1 全局空间自相关分析

为了测度畜牧养殖资源环境压力在时空上的集聚程度,使用2008—2022年全国31个省(自治区、市)畜牧养殖资源环境压力指数组成的面板数据计算Moran's  $I$ 值,并进行显著性检验。从结果来看,畜牧养殖资源环境压力的全局Moran's  $I$ 值均显著为正,这表明畜牧养殖资源环境压力存在正向的空间自相关效应,相邻省份的畜牧养殖资源环境压力有空间集聚特征;从时间维度看,全局Moran's  $I$ 值呈波动增长趋势,表明畜牧养殖资源环境压力的空间自相关性特征不够平稳,易受到资源禀赋和技术水平的影响,并且畜牧养殖资源环境压力的空间集聚态势正逐渐增强,表明国内畜牧养殖资源环境综合压力较大地区的辐射效应对周边临近地区资源的依赖和环境的影响越来越明显,同时也说明畜牧业发展的集聚效果越来越明显(图5)。

### 2.2.2 局部空间自相关分析

运用局部空间自相关分析可以有效探究各地区畜牧养殖资源环境压力与临近区域的局部空间相关性。Moran散点图将各地区畜牧养殖资源环境压力的空间相关特征散布在高-高(H-H)、低-高(L-H)、低-低(L-L)和高-低(H-L)4个象限中。由图6

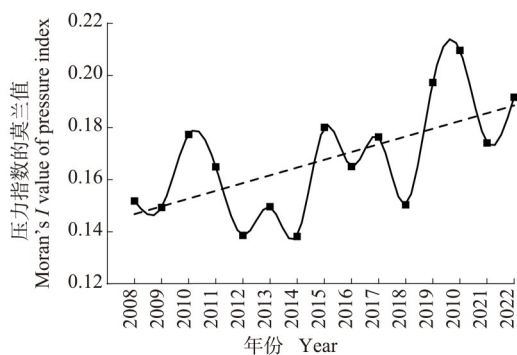


图5 畜牧养殖资源环境压力指数的Moran's  $I$ 变动

Fig. 5 Moran's  $I$  variation of the resource and environmental pressure index of animal husbandry

可知,2010、2015、2020和2022年,畜牧养殖资源环境压力均表现为空间正相关特征,即畜牧养殖资源环境压力大小接近的省(自治区、市)更容易在空间上呈现集聚特征,空间溢出效应显著。

具体而言,在研究时间期内,各省份的空间集聚特征如下:天津、上海、河南和宁夏一直表现为H-H集聚类型,表明高值地区长期被高值地区包围,难以利用地理区位优势,通过向邻近地区调取资源要素来减轻本地区的资源环境压力;四川和青海一直表现为L-H集聚类型,表明低值地区长期被高值地区包围,即自身资源环境压力较低,且周边高压地区向该地区的溢出效应不明显;山西、浙江、广西、重

庆、贵州、陕西和新疆一直表现为L-L集聚类型,表明自身及周边地区的畜牧养殖压力均较低;北京和山东一直表现为H-L集聚类型,表明高值地区长期被低值地区包围。海南省从H-H集聚向L-H集聚再向L-L集聚的变迁,表明自身畜牧养殖资源环境压力逐步降低,且周边地区资源环境压力也在向低值变迁;湖南和西藏在中期从L-H集聚向H-H集聚变迁,这可能是自身压力增加或者周边地区压力向该地区溢出造成的;甘肃在后期从L-H集聚向L-L集聚变迁,表明周边地区生态压力在逐渐减弱;黑龙江和广东在中期从L-L集聚向L-H集聚变迁,内蒙

古、福建和云南在后期从L-L集聚向L-H集聚变迁,表明周边地区资源环境压力逐步增强,并且存在向上述地区溢出的可能性;吉林和江西在早期从L-L集聚向H-L集聚变迁,安徽在中期从L-L集聚向H-L集聚变迁,表明上述地区资源环境压力逐步增强,并且存在向周边地区溢出的可能性;湖北在中期从L-L集聚向H-L集聚变迁后再向H-H集聚变迁,表明该地区资源环境压力增强的同时向周边地区溢出部分压力;河北、江苏和辽宁分别在早期、中期和后期从H-L集聚向H-H集聚,从侧面表明上述地区的高压力向周边地区有较强烈的溢出效应。

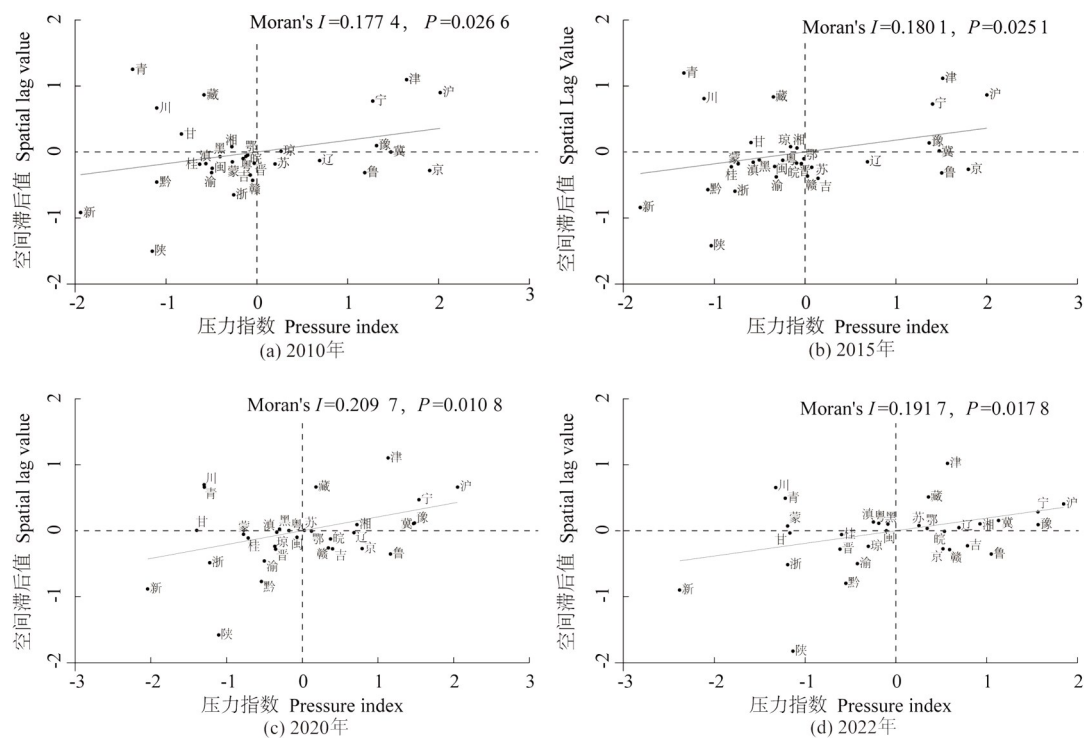


图6 畜牧养殖资源环境压力指数的Moran散点图

Fig. 6 Moran scatter plot of resource and environmental pressure index of animal husbandry

2.3 畜牧养殖资源环境压力及畜牧业产出水平耦合协调关系的时空特征分析

测算出全国31个省(自治区、市)畜牧养殖资源环境压力与畜牧业产出水平的耦合度和耦合协调度,并将耦合度划分为4种类型(图7):低耦合阶段(0.000~0.300)、拮抗阶段(0.301~0.500)、磨合阶段(0.501~0.800)和协调耦合阶段(0.801~1.000),将耦合协调度划分为5种类型(图8):严重失调耦合阶段(0.000~0.200)、中度失调耦合阶段(0.201~0.400)、一般协调耦合阶段(0.401~

0.600)、中度协调耦合阶段(0.601~0.800)和高度协调耦合阶段(0.801~1.000)。

华北地区的河北省耦合度最高,其畜牧业产值在各省区的排名长期居于前5位,并且作为我国畜牧业大省长期处于协调耦合阶段,该省畜牧业生产对其资源环境要素的依赖度最高,也更容易受到资源环境因素的制约;内蒙古自治区长期处于磨合阶段,因其拥有较丰富的草地资源而成为我国重要的草食畜牧业主产地之一,但因自然环境和交通运输条件等因素制约下饲料用粮供给成本较高,不易发

展规模化养殖;山西省的耦合度从拮抗阶段过渡到磨合阶段,表明其畜牧业产出水平与其资源环境要素的匹配程度在逐步提升。

东北地区的辽宁省耦合度最高,其畜牧业产值在各省区的排名长期居于5~10位;吉林省的耦合度在中期逐步从磨合阶段过渡到协调耦合阶段;黑龙江省的耦合度在后期逐步从磨合阶段过渡到协调耦合阶段,3个省份的耦合度在空间上呈现从低纬度到高纬度逐步下降特征,在时间上呈现从低纬度到高纬度逐级过渡特征。

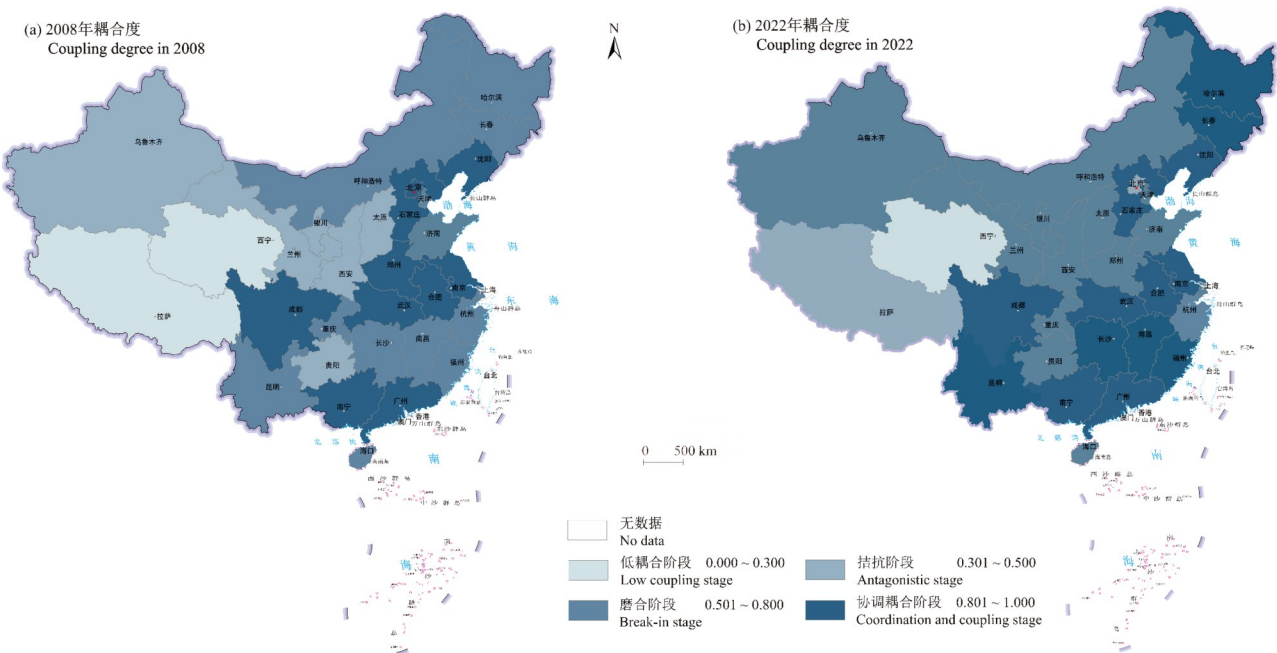
华东地区各省份长期处于磨合阶段或协调耦合阶段,但山东省的耦合度逐步从协调耦合阶段下降至低耦合阶段,其畜牧业产出水平长期居于前2位,作为我国畜牧业主产省份,在畜牧业生产中长期面临着资源环境因素的制约,其产出水平的提升正从依赖资源要素投入的增加向技术水平和生产效率的提升转变,因此虽然其耦合度逐步下降,但其耦合度的良性发展正逐步提升。

华中地区河南、湖北和湖南3省的畜牧业产出水平均较高,其中河南省畜牧业产值长期居于前3位,湖南省长期居于前6位,湖北省长期居于前10

位,2022年3省的畜牧业产值约占全国畜牧业产值的18.36%;多数时期3省的耦合度均处于协调耦合阶段,但河南省的耦合度趋于下降,湖北省和湖南省的耦合度趋于上升,其中河南省与山东省的畜牧业产出水平较为接近,耦合度的变化趋势也较一致,表明其畜牧业生产与资源环境因素的依赖关系、畜牧业生产的技术水平和良性耦合发展程度处于相近的发展阶段。

华南地区的广东和广西两省的耦合度均长期处于协调耦合阶段,海南省的耦合度长期处于磨合阶段。西南地区的四川省长期处于协调耦合阶段,且耦合度呈增长趋势,其畜牧业产值居于首位,与山东和河南相比拥有更加丰富的自然资源用于发展畜牧业,因此其耦合度尚处于增长阶段;长期而言,通过技术水平提升和生产效率提高进而增加其畜牧产出水平是四川省未来畜牧业高质量、可持续发展的重要手段。

西北地区各省份虽然拥有广袤的土地,但其畜牧业产出水平相对较弱,一方面因为畜牧业发展对水、土地、饲草、饲料粮等资源的综合依赖度较强,西北地区畜牧业发展易受到自然环境的制约,另一



审图号为GS(2023)2763号,底图未修改。

Review No. GS(2023)2763. The base map has not been modified.

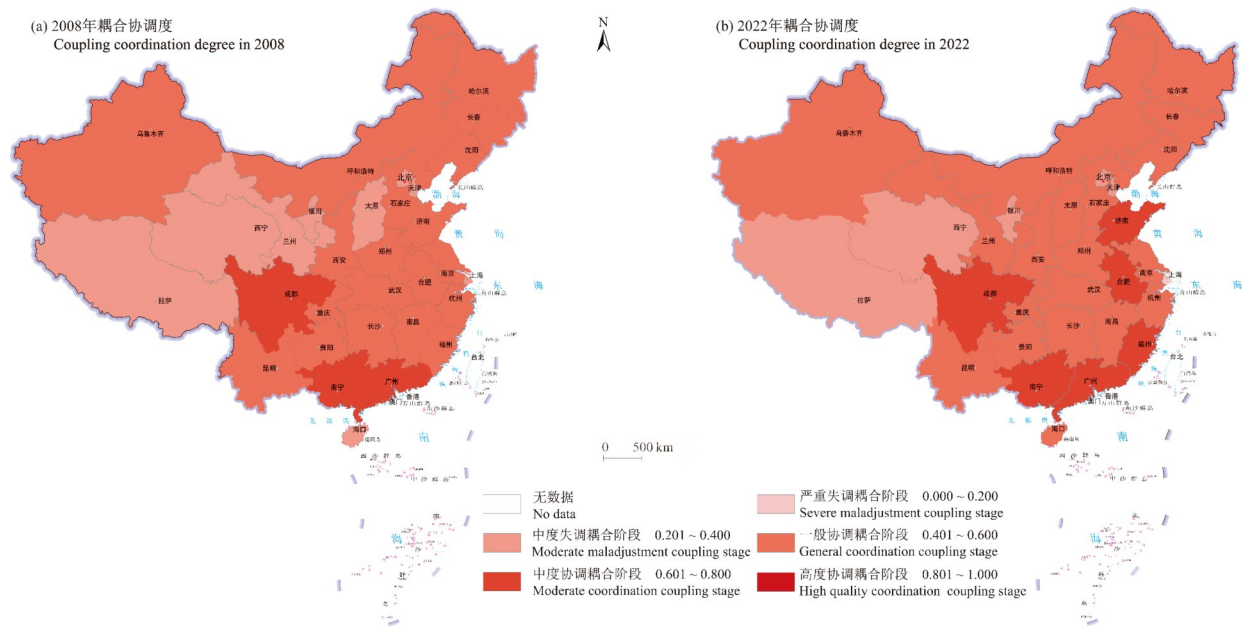
图7 中国畜牧养殖资源环境压力指数与畜牧业产出水平耦合度的时空分布

Fig.7 Spatial and temporal distribution of coupling degree between resource and environment pressure index of animal husbandry and output level of animal husbandry in China

方面是因为西北地区技术资源供应相对薄弱,导致各省(自治区)的畜牧业发展相对较缓慢;但西北地区各省(自治区)畜牧业也在持续稳定发展,除青海省以外,其余各省(自治区)的耦合度均从拮抗阶段逐步提升至磨合阶段。

进一步对耦合度的良性发展程度进行评价,2008年西藏、青海、甘肃、宁夏、山西、北京、天津、上海和海南处于中度失调阶段,四川、广西和广东处于中度协调阶段,其余省(自治区、市)均处于一般协调阶段,截至2022年甘肃、山西和海南省的耦合

协调度提升到一般耦合阶段,福建和山东省的耦合协调度提升到中度耦合阶段,上海市的耦合协调度下降至严重失调阶段。总体而言,我国大部分省(自治区、市)的畜牧养殖产出水平与资源环境因素的耦合协调度均处于一般协调阶段,该阶段的畜牧业生产正逐渐向更高效、高质的生产方式转变,开始注重资源要素的集约高效利用与生产活动带来的环境问题的治理和修复,但同时也说明我国畜牧业发展、资源有序利用和环境有效保护与治理之间的可持续稳定发展还有较大的改善空间。



审图号为GS(2023)2763号的标准地图制作,底图未修改。

Review No. GS(2023)2763. The base map has not been modified.

图8 中国畜牧养殖资源环境压力指数与畜牧业产出水平耦合协调度的时空分布

Fig.8 Spatial and temporal distribution of coupling coordination degree between resource and environment pressure index of animal husbandry and output level of animal husbandry in China

3 讨论

《“十四五”全国农业绿色发展规划》将提高资源利用水平、改善生态环境质量、增加绿色产品供给和农牧业减排固碳作为主要发展目标。畜牧业是农业的重要组成部分,测度畜牧养殖资源环境压力状况,评价其时空特征及其与产出水平的匹配程度对于指导优化农牧业绿色发展具有重要意义。本研究运用指数法分别测算畜牧养殖用水、用地、饲草和饲料粮资源,水质、土壤环境和碳排放压力指数,然后运用熵值法(客观)和层次分析法(主观)相结合的综合赋权方法测算2008—2022年中国大

陆31个省(自治区、市)的畜牧养殖资源环境压力指数,探究其空间自相关特征及与畜牧业产出水平间的耦合协调关系。

畜牧养殖资源环境压力指数测度结果表明,饲草资源是制约畜牧业发展的最主要约束条件,这与孟祥海<sup>[32]</sup>的研究结论一致;碳排放的约束次之,吴强等<sup>[31]</sup>研究表明畜牧业碳排放正向资源优势区域集聚,并且呈现较强的增长惯性和路径依赖特征。研究期内,我国畜牧养殖所面临的资源环境压力持续增长,大多数地区都处于承压状态,其中多数畜产品主产省份长期处于高压状态,部分主产省份也即将跃入高压状态;依据各地区的资源禀赋和

环境条件合理划定资源环境要素的承载阈值,优化畜牧业产业结构和发展适度规模经营有助于畜牧业生产与资源环境条件相匹配<sup>[43]</sup>。与此同时,畜牧养殖资源环境压力的空间集聚特征越来越明显,高压地区向周边地区的溢出效应也愈发强烈;这样的集聚情况在使区域产业发展增效的同时也存在着放大产业发展风险的潜在威胁<sup>[33]</sup>。另外,多数地区畜牧养殖资源环境压力与畜牧业产出水平之间的耦合度呈增长趋势,但多数地区耦合度的良性发展程度尚处于中等水平。综合而言,加强畜牧养殖水土草粮等资源管理,因地制宜在农区、牧区选择合适的发展模式和养殖品种,统筹推进种养结合等农牧循环发展从而提高资源利用效率;推广应用粪水肥料化、有机肥利用,粪污能源化利用,粪便基质化、垫料化和饲料化利用等畜牧养殖废弃物资源化利用方式以及饲料配方营养调控、品种选育和生物抑制剂等生产技术将会有助于减轻畜牧业的环境负效应,缓解畜牧养殖资源环境压力,提升畜牧业产出水平及其耦合协调水平,进而促进畜牧业与资源环境的稳定可持续发展。

囿于篇幅限制,本研究未对各种资源和环境类型压力指数的空间特征、空间自相关性和耦合协调关系分别进行分析,后续可以进一步细化相关内容。此外,本研究对畜牧养殖资源环境压力与畜牧业产出水平之间耦合关系的探究仅包含了时空演变特征,未来有待应用计量经济学研究方法,深入研究影响两者耦合协调度的关键因素和内在机理。

## 4 结论与建议

### 4.1 结论

本研究以2008—2022中国畜牧业所面临的资源环境条件为研究对象,采用指数法测算畜牧养殖各类资源和环境压力指数,使用熵值法和层次分析法相结合的综合赋权方法加权计算畜牧养殖资源环境压力指数,探究其时空变化特征,并运用空间自相关和耦合协调分析的方法探究中国畜牧养殖资源环境综合压力的空间自相关性特征及其与畜牧养殖产出水平之间的耦合协调关系。主要结论如下:

1) 用水资源、用地资源、饲草资源和碳排放压力指数均呈增长趋势,饲料粮资源和水环境压力指数均呈先波动下降后增长趋势,土壤环境压力指数

呈下降趋势。各资源和环境类型对综合压力的贡献从大到小依次为:饲草资源、碳排放、水环境、土壤环境、用水资源、饲料粮资源和土地资源;

2) 畜牧养殖资源环境压力指数波动增长,且近年增速加快;从空间角度看,除西部地区的部分省(自治区)处于低压力外,其余省份均处于承压状态;2022年畜产品产量排名前10的省份中冀吉鲁豫湘等处于高压,黑皖鄂处于中等压力,蒙川地区虽然尚处低压力,但均已接近中等压力的临界值;

3) 畜牧养殖资源环境压力指数的全局Moran's  $I$  值波动增长,表明畜牧养殖资源环境压力较大地区对临近地区的资源依赖和环境影响越加明显;截至2022年,津冀辽沪苏豫鄂湘藏宁等呈H-H集聚,蒙黑闽粤川滇青等呈L-H集聚,晋浙桂琼渝贵陕甘新等呈L-L集聚,京吉皖赣鲁等呈H-L集聚;

4) 除京津沪和冀鲁豫地区的耦合度下降以外,其余地区均增加;截至2022年,东北的黑吉辽,华北的河北,华中的鄂湘,华东的苏皖赣闽,华南的桂粤,西南的川滇均处于协调耦合阶段,京藏处于拮抗阶段,西北的青海处于低耦合阶段,其余地区均处于磨合阶段。另外,2022年除鲁皖川桂粤闽的良性发展程度为中度协调耦合,藏青宁京津地区为中度失调耦合以外,其余地区均为一般协调耦合。

### 4.2 建议

1) 因地制宜,多措并举,全面提升科技支撑,鼓励研发和推广应用养殖用水循环利用、饲草品种改良、农闲田种草、草田轮作、青贮饲草制作、生物饲料添加剂与饲草料精准配置、粪污堆肥发酵、生物发酵菌剂堆肥、粪便干湿分离科学入土增肥和牧草生物固碳等资源节约型、环境保护型和降碳减排型养殖技术,充分提升并发挥畜牧业新质生产力,提高资源利用效率和畜牧业生产效率。

2) 统筹地区间资源环境要素,优化畜牧产业布局和资源要素配置,促进资源优势互补和区域间融合发展;建立多方参与的合作机制,协调畜牧业生产与资源环境之间的关系,支持“农粮牧输”“牧草农送”构建“粮+经+饲+草”四元种植结构,持续推进“粮改饲”政策,继续保持和合理优化草原生态保护补助奖励政策、畜牧良种补贴政策以及畜禽养殖废弃物资源化利用支持政策。

3) 继续强化对养殖企业、合作社和家庭牧场等新型经营主体的产业支持政策,完善畜牧业生产社

会化服务体系建设,引导畜牧业向适度规模化经营发展,通过引入和应用现代化的生产技术和管 理方式,推进畜牧养殖节本增效,提高资源环境利用效率,确保资源的合理利用和管理,减轻环境负担及其对畜牧业生产的制约。

## 参考文献 References

- [1] 戴铁军,王婉君,刘瑞. 中国社会经济系统资源环境压力的时空差异[J]. 资源科学, 2017, 39(10): 1942-1955.  
Dai T J, Wang W J, Liu R. The spatiotemporal differences in resource and environmental pressures in China's socio-economic system [J]. *Resources Science*, 2017, 39(10): 1942-1955 (in Chinese)
- [2] 李靖,张正尧,毛翔飞,张汝楠. 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, Zhang R N. Evaluation and optimization suggestions for the layout of agricultural productivity in China: An analysis based on resource and environmental carrying capacity[J]. *Issues in Agricultural Economy*, 2016, 37(3): 26-33, 110 (in Chinese)
- [3] Bai Z, Ma W, Ma L, Velthof G L, Wei Z, Havl k P, Oenema O, Lee M R F, Zhang F. China's livestock transition: Driving forces, impacts, and consequences[J]. *Science Advances*, 2018, 4: 8534. [2024-01-03]. DOI: 10.1126/sciadv.aar8534
- [4] 刘刚,罗千峰,张利库. 畜牧业改革开放40周年:成就、挑战与对策[J]. 中国农村经济, 2018(12): 19-36  
Liu G, Luo Q F, Zhang L X. 40th anniversary of animal husbandry reform and opening up: Achievements, challenges, and countermeasures [J]. *China Rural Economy*, 2018(12): 19-36 (in Chinese)
- [5] 于法稳,黄鑫,王广梁. 畜牧业高质量发展:理论阐释与实现路径[J]. 中国农村经济, 2021(4): 85-99  
Yu F W, Huang X, Wang G L. High quality development of animal husbandry: Theoretical interpretation and implementation path [J]. *China Rural Economy*, 2021(4): 85-99 (in Chinese)
- [6] 熊学振,孙雨萌,杨春. 中国畜牧业与资源环境承载力的时空耦合协调关系[J]. 经济地理, 2022, 42(2): 153-162  
Xiong X Z, Sun Y M, Yang C. The spatiotemporal coupling and coordination relationship between animal husbandry and resource and environmental carrying capacity in China [J]. *Economic Geography*, 2022, 42(2): 153-162 (in Chinese)
- [7] 夏晓平,李秉龙,隋艳颖. 中国畜牧业生产结构的区域差异分析:基于资源禀赋与粮食安全视角[J]. 资源科学, 2010, 32(8): 1592-1600  
Xia X P, Li B L, Sui Y Y. Analysis of regional differences in the production structure of animal husbandry in China: Based on the perspective of resource endowment and food security [J]. *Resources Science*, 2010, 32(8): 1592-1600 (in Chinese)
- [8] Teira-Esmatges M. R., Flotats X. A method for livestock waste management planning in NE Spain [J]. *Waste Management*, 2003, 23(10): 917-932
- [9] 周天墨,付强,诸云强,胡卓玮,杨飞. 中国分省畜禽产污系数优化及污染物构成时空特征分析[J]. 地理研究, 2014, 33(4): 762-776  
Zhou T M, Fu Q, Zhu Y Q, Hu Z W, Yang F. Optimization of livestock and poultry pollution production coefficient and analysis of spatiotemporal characteristics of pollutant composition in different provinces of China [J]. *Geographical Research*, 2014, 33(4): 762-776 (in Chinese)
- [10] 刘忠,增院强. 中国主要农区畜禽粪尿资源分布及其环境负荷[J]. 资源科学, 2010, 32(5): 946-950  
Liu Z, Zeng Y Q. Distribution and environmental load of livestock and poultry manure resources in major agricultural regions of China [J]. *Resources Science*, 2010, 32(5): 946-950 (in Chinese)
- [11] 张绪美,董元华,王辉,沈旦. 中国畜禽养殖结构及其粪便N污染负荷特征分析[J]. 环境科学, 2007(6): 1311-1318  
Zhang X M, Dong Y H, Wang H, Shen D. Analysis of the structure of livestock and poultry farming in China and the characteristics of fecal N pollution load [J]. *Environmental Science*, 2007(6): 1311-1318 (in Chinese)
- [12] Garnett T. Livestock-related greenhouse gas emissions: Impacts and option for policy maker [J]. *Environmental Science and Policy*, 2009(12): 491-503
- [13] 王方浩,马文奇,窦争霞,马林,刘小利,许俊香,张福锁. 中国畜禽粪便产生量估算及环境效应[J]. 中国环境科学, 2006(5): 614-617  
Wang F H, Ma W Q, Dou Z X, Ma L, Liu X L, Xu J X, Zhang F S. Estimation of livestock and poultry feces production and environmental effects in China [J]. *Chinese Environmental Science*, 2006(5): 614-617 (in Chinese)
- [14] 虞伟,张晖,胡浩. 基于水足迹理论的中国畜牧业水资源承载力研究[J]. 资源科学, 2012, 34(3): 394-400  
Yu Y, Zhang H, Hu H. Research on the carrying capacity of water resources in China's livestock industry based on water footprint theory [J]. *Resources Science*, 2012, 34(3): 394-400 (in Chinese)
- [15] 邢浩翰,李保明,郑炜超,刘志丹,张源辉. 畜禽产品水足迹研究进展[J]. 中国农业大学学报, 2021, 26(6): 196-205  
Xing H H, Li B M, Zheng W C, Liu Z D, Zhang Y H. Research progress on water footprint of livestock and poultry products [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2021, 26(6): 196-205 (in Chinese)
- [16] Zhang C, Anadon L D. A multi-regional input-output analysis of domestic virtual water trade and provincial water footprint in China [J]. *Ecological Economics*, 2014, 100: 159-172
- [17] 乔娟. 畜牧业规模养殖用地难:问题与原因[J]. 中国畜牧杂志, 2014, 50(18): 8-12  
Qiao J. Difficulty in using land for large-scale animal husbandry: Problems and reasons [J]. *Chinese Journal of Animal Science*, 2014, 50(18): 8-12 (in Chinese)
- [18] 张利库,罗千峰,韩磊. 构建中国生猪产业可持续发展的长效机制研究[J]. 农业经济问题, 2020(12): 50-60  
Zhang L X, Luo Q F, Han L. Research on building a long term mechanism for sustainable development of China's pig industry [J]. *Issues in Agricultural Economy*, 2020(12): 50-60 (in Chinese)
- [19] 叶勇,杨露. 畜禽载畜量预警的实证分析:以内蒙古牧业旗为例[J]. 技术经济, 2012, 31(2): 99-102  
Ye Y, Yang L. Empirical analysis of livestock load warning in Inner Mongolia animal husbandry banner [J]. *Journal of Technology Economics*, 2012, 31(2): 99-102 (in Chinese)
- [20] 郭豪杰,王文信. 中国草畜生产的时空匹配格局及驱动机制[J]. 经济地理, 2022, 42(10): 146-157  
Guo H J, Wang W X. The spatiotemporal matching pattern and driving mechanism of grass and livestock production in China [J]. *Economic Geography*, 2022, 42(10): 146-157 (in Chinese)
- [21] 张浩,李旭君,龙雪芬,梁耀文,王明利. 中国西南地区饲草产业与草食畜牧业耦合协调关系:基于对四川、云南、贵州的实地调研[J]. 草业科学, 2023, 40(7): 1932-1942

- Zhang H, Li X J, Long X F, Liang Y W, Wang M L. The coupling and coordination relationship between grass industry and herbivorous livestock industry in Southwest China: Based on field research in Sichuan, Yunnan, and Guizhou[J]. *Pratacultural Science*, 2023, 40(7): 1932-1942 (in Chinese)
- [22] Fitton N, Alexander P, Arnell N, Bajzelj B, Calvin K, Doelman J, Gerber J S, Havlik P, Hasegawa T, Herrero M, Krisztin T, van Meijl H, Powell T, Sands R, Stehfest E, West P C, Smith P. The vulnerabilities of agricultural land and food production to future water scarcity[J]. *Global Environmental Change*, 2019, 58: 101944. [2024-01-03]. DOI: 10.1016/j.gloenvcha.2019.101944
- [23] 石自忠,王明利. 中国牧草产业政策:演变历程与未来展望[J]. 中国草地学报, 2021, 43(2): 107-114
- Shi Z Z, Wang M L. China's grassland industry policy: Evolution and future prospects[J]. *Chinese Journal of Grassland*, 2021, 43(2): 107-114 (in Chinese)
- [24] 李欣,李干琼. 我国饲料粮消费测算[J]. 中国农业大学学报, 2023, 28(10): 206-215
- Li X, Li G Q. Re-estimate feed grain consumption in China[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2023, 28(10): 206-215 (in Chinese)
- [25] 辛良杰,王立新,刘爱民. 我国饲料粮区域产销平衡特征及政策启示[J]. 自然资源学报, 2018, 33(6): 965-977
- Xin L J, Wang L X, Liu A M. Characteristics and policy implications of regional production and consumption balance of feed grains in China[J]. *Journal of Natural Resources*, 2018, 33(6): 965-977 (in Chinese)
- [26] 刘长全,韩磊,李婷婷,王术坤,罗千峰. 大食物观下中国饲料粮供给安全问题研究[J]. 中国农村经济, 2023(1): 33-57
- Liu C Q, Han L, Li T T, Wang S K, Luo Q F. Research on the security of feed grain supply in China under the perspective of big food[J]. *China Rural Economy*, 2023(1): 33-57 (in Chinese)
- [27] Han D, Currell M J, Cao G. Deep challenges for China's war on water pollution[J]. *Environmental Pollution*, 2016, 218: 1222-1233
- [28] Ma T, Sun S, Fu G, Hall J W, Ni Y, He L, Yi J, Zhao N, Du Y, Pei T, Cheng W, Song C, Fang C, Zhou C. Pollution exacerbates China's water scarcity and its regional inequality[J]. *Nature Communications*, 2020, 11: 650, [2024-01-03]. DOI: 10.1038/s41467-020-14532-5
- [29] Salami S A, Luciano G, O'Grady M N, Biondi L, Newbold C J, Kerry J P, Priolo A. Sustainability of feeding plant by-products: A review of the implications for ruminant meat production[J]. *Animal Feed Science and Technology*, 2019, 251: 37-55
- [30] 张金鑫,王红玲. 中国畜牧业碳排放地区差异、动态演进与收敛分析:基于全国31个省(市)1997—2017年畜牧业数据[J]. 江汉论坛, 2020(9): 41-48
- Zhang J X, Wang H L. Regional differences, dynamic evolution, and convergence analysis of carbon emissions in China's livestock industry: Based on livestock industry data from 31 provinces (cities) in China from 1997 to 2017[J]. *Jiangnan Tribune*, 2020(9): 41-48 (in Chinese)
- [31] 吴强,张园园,张明月. 中国畜牧业碳排放的量化评估、时空特征及动态演化:2001—2020[J]. 干旱区资源与环境, 2022, 36(6): 65-71
- Wu Q, Zhang Y Y, Zhang M Y. Quantitative assessment, temporal and spatial characteristics and dynamic evolution of China's animal husbandry carbon emissions[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2022, 36(6): 65-71 (in Chinese)
- [32] 孟祥海,张俊彪,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
- Meng X H, Zhang J B, Li P. Analysis of spatiotemporal characteristics of the carrying pressure of animal husbandry resources and environment in China[J]. *Research of Agricultural Modernization*, 2012, 33(5): 556-560 (in Chinese)
- [33] 韩冬梅,汪刚,田晓喻. 基于短板理论的中国畜禽养殖资源承载风险评估[J]. 资源科学, 2022, 44(10): 2074-2088
- Han D M, Wang G, Tian X Y. Risk assessment of carrying capacity of livestock and poultry breeding resources in China based on the theory of weakness[J]. *Resources Science*, 2022, 44(10): 2074-2088 (in Chinese)
- [34] 熊学振,孙雨萌,杨春. 中国畜牧业与资源环境承载力的时空耦合协调关系[J]. 经济地理, 2022, 42(2): 153-162
- Xiong X Z, Sun Y M, Yang C. The spatiotemporal coupling and coordination relationship between animal husbandry and resource and environmental carrying capacity in China[J]. *Economic Geography*, 2022, 42(2): 153-162 (in Chinese)
- [35] 孟祥海. 中国畜牧业污染防治问题研究[D]. 武汉:华中农业大学, 2014
- Meng X H. Research on environmental pollution prevention and control in China's livestock industry [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2014 (in Chinese)
- [36] 胡钰,张斌,谷保静,马林,柏兆海,栾健,金书秦. 推进种养结合的制约因素及政策建议[J]. 中国乳业, 2021(11): 149-154
- Hu Y, Zhang B, Gu B J, Ma L, Bai Z H, Luan J, Jin S Q. Constraints and policy recommendations for promoting the integration of planting and breeding[J]. *China Dairy*, 2021(11): 149-154 (in Chinese)
- [37] 王艳丰,张丁华,孔雪旺. 畜禽健康养殖与疾病防治宝典[M]. 北京:化学工业出版社, 2017
- Wang Y F, Zhang D H, Kong X W. Encyclopedia of healthy livestock and poultry breeding and disease prevention and control[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2017 (in Chinese)
- [38] Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories Volume IV: Agriculture, forestry and other land use[R]. Geneva: IPCC, 2006
- [39] 国家发展和改革委员会价格司. 全国农产品成本收益资料汇编, 2009—2023[M]. 北京: 中国统计出版社, 2009-2023
- Price Department of the National Development and Reform Commission. *Compilation of National Agricultural Product Cost Benefit Data*, 2009-2023 [M]. Beijing: China Statistical Publishing House, 2009-2023 (in Chinese)
- [40] 谢鸿宇,陈贤生,杨木壮,招华庆,赵美婵. 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, Zhao H Q, Zhao M C. Ecological footprint analysis of animal husbandry products in Chinese units[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(6): 3264-3270 (in Chinese)
- [41] 张维理,武淑霞,冀宏杰, Kolbe H. 中国农业面源污染形势估计及控制对策 I: 21 世纪初期中国农业面源污染的形势估计[J]. 中国农业科学, 2004(7): 1008-1017
- Zhang W L, Wu S X, Ji H J, Kolbe H. Estimation and control strategies of agricultural non point source pollution in China I: Estimation of agricultural non point source pollution in China in the early 21st century[J]. *Chinese Agricultural Science*, 2004(7): 1008-1017 (in Chinese)
- [42] 刘刚,沈镭. 中国生物质能源的定量评价及其地理分布[J]. 自然资源学报, 2007(1): 9-19
- Liu G, Shen L. Quantitative evaluation and geographical distribution of biomass energy in China[J]. *Journal of Natural Resources*, 2007(1): 9-19 (in Chinese)
- [43] 毛留喜,侯英雨,钱拴,李锡福,伏洋,张海珍,张艳红. 牧草产量的遥感估算与载畜能力研究[J]. 农业工程学报, 2008(8): 147-151

- Mao L X, Hou Y Y, Qian S, Li X F, Fu Y, Zhang H Z, Zhang Y H. Remote sensing estimation of forage yield and research on livestock carrying capacity[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2008(8): 147-151 (in Chinese)
- [44] 姚成胜, 钱双双, 李政通, 梁龙武. 中国省际畜牧业碳排放测度及时空演化机制[J]. *资源科学*, 2017, 39(4): 698-712
- Yao C S, Qian S S, Li Z T, Liang L W. Provincial animal husbandry carbon emissions in China and temporal-spatial evolution mechanism[J]. *Resources Science*. 2017, 39(4): 698-712 (in Chinese)
- [45] 国家统计局. 中国统计年鉴, 1981—2021[M]. 北京: 中国统计出版社, 1981—2021
- National Bureau of the People's Republic of China. *China Statistical Yearbook*, 1981-2021 [M]. Beijing: China Statistics Press, 1981-2021 (in Chinese)
- [46] 中国国家统计局农村社会经济调查司. 中国农村统计年鉴, 1985—2021 [M]. 北京: 中国统计出版社, 1985—2021
- Department of Rural social and Economic Investigation of National Bureau of Statistics of the People's Republic of China. *China Rural Statistical Yearbook*, 1985-2021 [M]. Beijing: China Statistics Press, 1985-2021 (in Chinese)
- [47] 农业农村部畜牧兽医司, 全国畜牧总站. 中国畜牧兽医年鉴, 1999—2021 [M]. 北京: 中国农业出版社, 1999—2021
- Department of Animal Husbandry and Veterinary Medicine, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, National Animal Husbandry Station. *China Animal Husbandry and Veterinary Yearbook*, 1999—2021 [M]. Beijing: China Agricultural Publishing House, 1999-2021 (in Chinese)
- [48] 国家统计局生态环境部. 中国环境统计年鉴, 2009—2023[M]. 北京: 中国统计出版社, 2009—2023
- Ministry of Ecology and Environment, National Bureau of Statistics. *China Environmental Statistics Yearbook*, 2009—2023 [M]. Beijing: China Statistical Publishing House, 2009-2023 (in Chinese)
- [49] 国家林业和草原局. 中国林业和草原统计年鉴, 2009—2023[M]. 北京: 中国林业出版社, 2009-2023
- State Forestry and Grassland Administration China. *Forestry and Grassland Statistical Yearbook*, 2009-2023 [M]. Beijing: China Forestry Press, 2009-2023 (in Chinese)
- [50] 国家水利部. 中国水利年鉴, 2009—2023[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2009-2023
- Ministry of Water Resources of China. *China Water Resources Yearbook*, 2009-2023 [M]. Beijing: China Water Resources and Hydropower Publishing House, 2009-2023 (in Chinese)
- [51] 沈其荣. 土壤肥科学通论[M]. 北京: 高等教育出版社, 2001
- Shen Q R. *General Theory of Soil and Fertilizer Science* [M]. Beijing: Higher Education Press, 2001 (in Chinese)

责任编辑: 王岩



**第一作者简介:** 张俊华, 2024年6月在中国农业大学经济管理学院获管理学博士学位, 现为河南省社会科学院农村发展研究所(乡村振兴研究所)助理研究员。主要从事农业经济与农村发展、畜牧产业经济、农业资源与环境经济、农产品市场与政策等领域的研究。曾获研究生国家奖学金、河南省优秀毕业研究生、博士研究生学业奖学金等奖励。参与农业农村部畜产品统计监测预警研究项目(A170302); 农业农村部和财政部研究项目(CARS-39-22); 教育部人文社科项目(20YJA790027)和河南省教育厅人文社科规划项目(2017-ZZJH-232)。参编《中国绒毛用羊产业发展与政策研究报告(2021)》《中国绒毛用羊产业经济研究(第八辑)》《2020年畜牧业发展形势及2021年展望报告》《2021年畜牧业发展形势及2022年展望报告》《2022年畜牧业发展形势及2023年展望报告》《2023年畜牧业发展形势及2024年展望报告》等著作, 在《农业技术经济》等杂志发表学术论文5篇。



**通讯作者简介:** 肖海峰, 博士, 中国农业大学经济管理学院教授、博士生导师, 主要研究方向为畜牧业经济、农产品市场与政策。先后主持完成国家自然科学基金项目、农业部软科学项目、农业部、财政部等部委项目、中德合作、FAO项目等40余项。出版著作及教材近20部, 在《中国农村经济》《农业经济问题》等杂志上发表论文200余篇, 多项政策建议获得党和国家领导人批示。获得北京市“四个一批”人才、全国农业推广硕士优秀论文指导教师、中国农业大学十大优秀博士论文指导教师等奖励。自2011年起, 被农业部、财政部聘为国家绒毛用羊产业技术体系产业经济研究室主任、产业经济岗位专家, 从2012年开始, 被农业部聘为肉羊产业监测与预警首席专家。