



楚天舒,洪世腾,陈晨晨,等.基于模糊线性规划的中国畜禽养殖地下水资源承载力估算[J].江西农业大学学报,2026,48(1):289-300.

CHU T S,HONG S T,CHEN C C,et al.Estimation on groundwater bearing capacity of animal based on fuzzy linear programming in China[J].Acta agriculturae universitatis Jiangxiensis,2026,48(1):289-300.

基于模糊线性规划的中国畜禽养殖 地下水资源承载力估算

楚天舒^{1,2},洪世腾³,陈晨晨³,戴子扬⁴,廖科科⁵,张海星²,
赵智强⁶,张学健⁷,盖力强^{8*}

(1.中国地质调查局 自然资源综合调查指挥中心自然资源要素耦合过程与效应重点实验室,北京 100055;2.中国农业大学 资源与环境学院,北京 100193;3.中国农业大学 工学院,北京 100083;4.西北农林科技大学 动物医学院,陕西 咸阳 712199;5.江西农业大学 工学院/现代农业装备江西省重点实验室,江西 南昌 330045;6.南方科技大学 环境科学与工程学院,广东 深圳 518055;7.衢州学院 化学与材料工程学院,浙江 衢州 324000;8.国家地质实验测试中心 自然资源部生态地球化学重点实验室,北京 100037)

摘要:【目的】在畜禽养殖过程中,畜禽饮水和圈舍冲洗等环节大量消耗地下水。我国是水资源缺乏国家,科学合理利用地下水资源是畜禽养殖业绿色发展的必由之路。因此,开展畜禽养殖地下水资源承载力的建模工作,对促进区域种养结合与地下水资源可持续利用具有重要意义。【方法】评估2013—2022年中国31个省(区、市)畜禽养殖地下水压力,以天津、河北、内蒙古、辽宁、吉林、山东、河南、甘肃和宁夏9个热点省(区、市)为研究对象,结合地下水资源逐年波动变化的特点,运用模糊线性规划方法构建畜禽养殖地下水资源承载力模型,采用情景分析法仿真优化出适宜畜禽养殖量。【结果】2013—2022年中国畜禽养殖地下水压力值范围为0.8%~1.1%,年际间差异较小。从空间维度上分析,北方地区畜禽养殖地下水压力值高于南方地区,东部地区高于西部地区,其中天津等9个热点省(区、市)压力值在1.3%~5.9%之间波动,远高于全国平均值。经模糊线性规划模型求解可得,当畜禽用水量减少50%时,天津、河北、内蒙古、辽宁、吉林、山东、河南、甘肃和宁夏畜禽养殖地下水资源承载力的优化结果分别为0.2亿,6.8亿,4.8亿,0.9亿,1.1亿,1.3亿,2.5亿,0.9亿,0.3亿头,是当前养殖量的1.6、4.2、2.7、1.1、1.8、1.1、1.9、2.8和1.7倍。【结论】若能减少畜禽用水量,天津和河北等9省(区、市)的畜禽养殖业将有较大的发展潜力。因此,建议各地借鉴宁夏的水权改革经验,开展各地特色的畜禽养殖用水确权与用水权市场建设,大力推广节水养殖技术与设施设备,促进传统畜禽养殖业向节水型畜禽养殖业转型。

关键词:地下水;畜禽养殖;承载力;模糊线性规划

中图分类号:S815;P614.8 **文献标志码:**A

文章编号:1000-2286(2026)01-0289-12

CSTR:32399.14.aauj.2026025

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



收稿日期:2025-06-09 **修回日期:**2025-07-03 **接受日期:**2025-07-06

基金项目:国家重点研发计划项目(2023YFD1801105)

Project supported by the National Key Research and Development Program of China(2023YFD1801105)

作者简介:楚天舒,助理研究员,博士,orcid.org/0000-0003-4143-7017,chuts@cau.edu.cn;*通信作者:盖力强,高级工程师,博士,主要从事资源评价和生态修复研究,orcid.org/0000-0002-0754-0064,geliqiang220@163.com。

©《江西农业大学学报》编辑部,开放获取CC BY-NC-ND协议

Estimation on groundwater bearing capacity of animal based on fuzzy linear programming in China

CHU Tianshu^{1,2}, HONG Shiteng³, CHEN Chenchen³, DAI Ziyang⁴, LIAO Keke⁵,
ZHANG Haixing², ZHAO Zhiqiang⁶, ZHANG Xuejian⁷, GE Liqiang^{8*}

(1.Key Laboratory of Coupling Process and Effect of Natural Resources Elements, Command Center of Natural Resource Comprehensive Survey, Beijing 100055, China; 2.College of Resources and Environmental Sciences, China Agricultural University, Beijing 100193, China; 3.College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China; 4.College of Veterinary Medicine, Northwest A&F University, Xianyang, Shaanxi 712199, China; 5.College of Engineering, Jiangxi Agricultural University, Jiangxi Key Laboratory of Modern Agricultural Equipment, Nanchang 330045, China; 6.School of Environmental Sciences and Engineering, Southern University of Science and Technology, Shenzhen, Guangdong 518055, China; 7.College of Chemical and Material Engineering, Quzhou University, Quzhou, Zhejiang 324000, China; 8.Key Laboratory of Eco-Geochemistry, Ministry of Natural Resources, National Research Center for Geoanalysis, Beijing 100037, China)

Abstract: [Objective] While breeding animals, a substantial amount of groundwater is consumed to clean pens and for them to drink. China is a water-scarce country. The scientific and rational use of groundwater resources is essential for the green development of animal breeding. Therefore, modeling the bearing capacity of groundwater resources for animal breeding is crucial for promoting the integration of regional planting and breeding, as well as ensuring the sustainable use of groundwater resources. [Method] This study evaluated the groundwater pressure of animal breeding in 31 provinces (autonomous regions and municipalities) of China from 2013 to 2022. Nine of them, including Tianjin, Hebei, Inner Mongolia, Liaoning, Jilin, Shandong, Henan, Gansu and Ningxia, were selected as the research objects. Based on the annual fluctuations in groundwater availability, the fuzzy linear programming method was employed to construct a groundwater resource bearing capacity model for animal farming. Additionally, the scenario analysis method was employed to simulate and optimize the suitable animal breeding volume. [Result] From 2013 to 2022, the groundwater pressure values for animal breeding in China ranged from 0.8% to 1.1%, with small inter-annual differences. Spatially, the groundwater pressure values of animal breeding in the northern region were higher than those in the southern region. Those in the eastern region were higher than those in the western region. Besides, the pressure values such as those in Tianjin fluctuated between 1.3% and 5.9%, which was higher than the national average. The fuzzy linear programming model revealed that when the water consumption of animals was reduced by 50%, the optimization result of groundwater bearing capacity for animal farming in Tianjin, Hebei, Inner Mongolia, Liaoning, Jilin, Shandong, Henan, Gansu and Ningxia was 20 million, 680 million, 480 million, 90 million, 110 million, 130 million, 250 million, 90 million and 30 million heads respectively. And it was 1.6, 4.2, 2.7, 1.1, 1.8, 1.1, 1.9, 2.8 and 1.7 times the current breeding volume. [Conclusion] If the animal water consumption had been reduced, the animal breeding industry would have significant development potential. Therefore, it was recommended that other provinces draw on Ningxia's water rights reform experience to develop localized systems for animal water rights allocation and establish water rights trading markets tailored to regional characteristics. Water-saving technologies and related facilities should be promoted, to facilitate the transition from traditional animal husbandry to water-efficient animal husbandry.

Keywords: groundwater; animal farming; bearing capacity; fuzzy linear programming

【研究意义】畜禽养殖业的高速发展,产出了大量物美价廉的肉蛋奶等,保障人们日常生活的营养摄入。而畜禽养殖业高效生产离不开大量物资投入,如水、电、饲料、设施设备等。其中,畜禽饮水、圈舍冲

洗等养殖环节需要消耗大量水资源。我国是水资源缺乏国家,科学合理利用水资源是畜禽养殖业绿色发展的必由之路^[1]。因此,开展畜禽养殖业发展与水资源的承载关系研究,显得尤其重要。【前人研究进展】作为自然资源承载力的重要组成部分,水资源承载力是指在某一发展阶段,可开采利用的水资源对区域经济社会发展的最大支撑能力;该指标主要用于定量分析水资源对区域经济社会发展的限制,常作为阈值使用^[2-4]。由于农业生产严重依赖水资源,水资源承载力被广泛用于区域种植业和养殖业的生产规模规划研究。在国家层面,刘统兵等^[5]运用基尼系数评价中国 31 个省(区、市)的农业水土匹配情况发现,中国灌溉水与耕地分布差距较大、地理分布不均衡的特点,其中华北、西北和东北地区呈现“土多水少”,而华东、华中和西南地区呈现“水多土少”。在地区层面,Wang 等^[6]运用改进理想点模型评估 2000—2020 年安徽省农业水资源承载力发现,安徽省南部地区的承载能力逐渐增加,而北部地区的承载能力正在下降。徐东平等^[7]运用系统动力学方法建立仿真模型发现,通辽市科尔沁区未来通过实施农牧循环产业和调优农牧业结构等措施,预计 2030 年水资源需求量为 7.22 亿 m³,能基本维持水资源供需平衡。Li 等^[8]构建了基于农作物和畜禽需水特性的水资源配置方法并优化发现,为了提升经济效益,洋河流域的种植面积和畜禽数量建议保持在 3.19×10^4 hm² 和 2.14×10^5 头。Li 等^[9]利用遥感卫星数据和水热平衡模型评价西北绿洲农业的水资源承载力发现,随着农作物种植面积增大,水资源承载力快速下降;建议和田绿洲区用核桃和玉米替代棉花种植。韩冬梅等^[10]运用短板理论分析发现,水资源短缺将严重限制京津冀地区畜禽养殖业发展。

【本研究切入点】畜禽养殖大量消耗地下水,而地下水资源逐年波动变化,区域地下水资源是否能承载当前畜禽养殖量,养殖业未来发展潜力如何,有待进一步研究。【拟解决的关键问题】本研究评估 2013—2022 年中国 31 个省(区、市)畜禽养殖地下水压力,选取畜禽养殖地下水压力的热点省(区、市)为研究对象,运用模糊线性规划方法构建畜禽养殖地下水资源承载力模型,结合情景分析法,优化出区域适宜畜禽养殖量,为区域种养结合与地下水资源可持续利用提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究思路

经过本研究团队长期实地走访典型畜禽规模化养殖场了解到,当前畜禽养殖过程中,养殖用水主要来自地下水(图 1)。因此,本研究将畜禽养殖地下水资源承载力定义为,以地下水资源可持续利用为导向,区域地下水资源可承载的畜禽养殖量。本研究提出具体研究步骤:第一步,畜禽养殖地下水压力核算。根据统计资料整理出 2013—2022 年中国 31 个省(区、市)畜禽养殖量和地下水资源量等参数,核算各地区历年畜禽养殖地下水压力,找出压力相对较大的热点省(区、市)。第二步,畜禽养殖地下水资源承载力模型构建。以热点省(区、市)为研究对象,考虑到地下水资源逐年波动变化特点,运用模糊线性规划方法与畜禽养殖地下水压力阈值,构建畜禽养殖地下水资源承载力模型。其中,承载力模型从经济

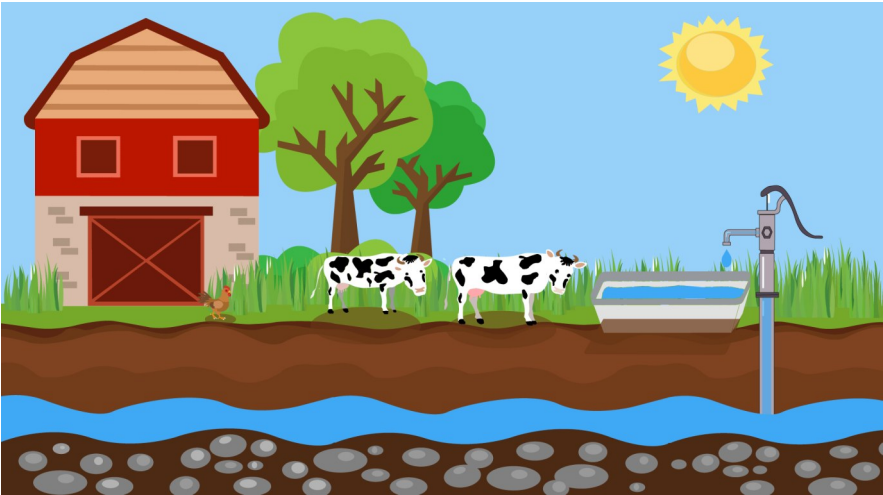


图 1 研究示意

Fig.1 Research schematic

效益、资源约束和政策导向 3 个角度构建目标函数与约束条件。第三步,畜禽养殖地下水资源承载力优化。考虑到未来节水型畜牧业发展趋势,运用情景分析法,仿真分析不同畜禽用水量情况下区域适宜畜禽养殖量。

1.2 畜禽养殖地下水压力计算方法

根据资源承载力定义^[4,11],本研究将区域畜禽养殖用水量与地下水资源量的比值定义为畜禽养殖地下水压力,用于表征区域畜禽养殖对地下水资源需求程度,具体计算公式如下:

$$R = \frac{\sum_{j=1}^6 x_j b_j t_j}{w} \quad (1)$$

式①中: R 为畜禽养殖地下水压力; x_j 为区域内第 j 种畜禽养殖量,头或羽,根据《中国农村统计年鉴 2014—2023》^[12]整理得到; b_j 为第 j 种畜禽养殖用水量, $\text{m}^3/(\text{d}\cdot\text{头})$ 或 $\text{m}^3/(\text{d}\cdot\text{羽})$,根据各省(区、市)的用水定额标准整理得到; t_j 为第 j 种畜禽的养殖时间, d ;本研究中,奶牛、肉牛、蛋鸡和肉羊取 365 d 值,肉鸡取 59 d 值,生猪取 180 d 值^[13-14]; w 为地下水资源量, m^3 ,根据《中国统计年鉴 2014—2023》^[15]整理得到。

1.3 畜禽养殖地下水资源承载力计算方法

本研究以畜禽养殖地下水压力热点省(区、市)为优化对象,采用模糊线性规划方法^[16]构建畜禽养殖地下水资源承载力模型,仿真分析各省(区、市)适宜的畜禽养殖量。

(1)目标函数:以畜禽养殖业产值最大化为目标,旨在提升畜禽养殖业的经济效益,促进养殖业高质量发展,目标函数具体如下:

$$\max f(x) = \sum_{j=1}^6 a_j x_{ij} \quad (2)$$

式②中: a_j 为第 j 种畜禽的单位产值,元/头或元/羽,根据《中国农村统计年鉴 2014—2023》^[12]整理得到,具体数值详见表 1; x_{ij} 为第 i 省市第 j 种畜禽养殖量,头或羽。

表 1 9 省(区、市)的 6 种畜禽单位产值

Tab.1 The unit output value of 6 species of animal in 9 provinces (autonomous regions and municipalities)

省(区、市) Provinces (autonomous regions and municipalities)	奶牛/ (10^4 元·头 $^{-1}$) Dairy cattle	肉牛/ (10^4 元·头 $^{-1}$) Beef cattle	蛋鸡/ (元·羽 $^{-1}$) Layer	肉鸡/ (元·羽 $^{-1}$) Broiler	生猪/ (10^4 元·只 $^{-1}$) Swine	肉羊/ (10^4 元·只 $^{-1}$) Sheep
天津 Tianjin	2.96	1.60	167.80	23.70	0.21	0.11
河北 Hebei	3.11	1.70	164.71	24.84	0.19	0.10
内蒙古 Inner Mongolia	2.84	1.13	185.50	24.84	0.29	0.14
辽宁 Liaoning	2.29	1.49	157.19	27.98	0.23	0.11
吉林 Jilin	2.38	1.49	159.84	27.62	0.22	0.11
山东 Shandong	3.30	2.32	169.97	24.84	0.22	0.10
河南 Henan	2.54	1.28	168.30	24.57	0.22	0.13
甘肃 Gansu	3.78	1.12	167.50	24.84	0.21	0.14
宁夏 Ningxia	3.39	1.02	171.54	24.84	0.22	0.12

(2)地下水资源约束:为了避免畜禽养殖业无序发展对地下水资源过度消耗,本研究设置优化出的区域畜禽养殖地下水压力不超过阈值,约束条件具体如下:

$$\sum_{j=1}^6 b_{ij} x_{ij} t_j / R \leq w_i \quad (3)$$

式③中: b_{ij} 为第 i 个省第 j 种畜禽的用水量, $\text{m}^3/(\text{d}\cdot\text{头})$ 或 $\text{m}^3/(\text{d}\cdot\text{羽})$;本研究根据 9 省(区、市)6 种畜禽的用水定额^[17]整理得到,详见表 2; t_j 为第 j 种畜禽的养殖时间, d ; R 是畜禽养殖地下水压力阈值,在 2013—2022 年中国 31 个省(区、市)畜禽养殖地下水压力的所有数据中,其上四分位数为 2%;因此,为了避免过度消耗地下水资源,本研究将畜禽养殖地下水压力热点省份中,天津、河北、内蒙古等 8 个省(区、市)的阈值设置

为 2%;而宁夏用水权确权成果显示,其畜禽养殖业用水结构中,地下水水源和黄河水水源约各占一半^[18-20];因此,本研究将宁夏的阈值相应地调整为 4%; w_i 为第 i 个省市地下水资源量, m^3 。

表 2 9 省(区、市)6 种畜禽的用水定额

Tab.2 Water quotas for 6 species of animal in 9 provinces (autonomous regions and municipalities) m^3/d

省(区、市) Provinces (autonomous regions and municipalities)	奶牛 Dairy cattle	肉牛 Beef cattle	蛋鸡 Layer	肉鸡 Broiler	生猪 Swine	肉羊 Sheep
天津 Tianjin	0.100	0.040	0.5×10^{-3}	0.4×10^{-3}	0.009	0.010
河北 Hebei	0.094	0.055	0.3×10^{-3}	0.3×10^{-3}	0.034	0.010
内蒙古 Inner Mongolia	0.120	0.060	1.0×10^{-3}	0.8×10^{-3}	0.050	0.010
辽宁 Liaoning	0.078	0.060	0.7×10^{-3}	0.6×10^{-3}	0.033	0.010
吉林 Jilin	0.270	0.055	1.5×10^{-3}	1.3×10^{-3}	0.047	0.010
山东 Shandong	0.132	0.085	0.8×10^{-3}	0.7×10^{-3}	0.039	0.011
河南 Henan	0.080	0.064	0.7×10^{-3}	0.6×10^{-3}	0.030	0.011
甘肃 Gansu	0.150	0.060	1.0×10^{-3}	0.8×10^{-3}	0.035	0.009
宁夏 Ningxia	0.100	0.050	0.5×10^{-3}	0.4×10^{-3}	0.040	0.008

(3)农田养分约束:为了促进农田养分高效利用与农业面源污染防治,本研究优化出的各省(区、市)的畜禽养殖量不应该超过畜禽粪便农田氮承载力,约束条件具体如下:

$$\sum_{j=1}^6 x_{ij} \beta_j \leq m_i \tag{4}$$

式④中: β_j 为第 j 种畜禽的猪当量折算系数,头/头或头/羽;本研究中,奶牛、肉牛、蛋鸡、肉鸡、生猪和肉羊的折算系数^[14]分别约为 28.49 头/头、10.18 头/头、0.19 头/羽、0.04 头/羽、1.00 头/头和 0.83 头/头; m_i 为第 i 省市农田氮承载力(以猪当量计),头,由各省(区、市)作物产量与 NY/T 3877—2021《畜禽粪便土地承载力测算方法》^[13]计算获得,本研究天津、河北、内蒙古、辽宁、吉林、山东、河南、甘肃和宁夏的畜禽粪便农田氮承载力分别取 0.4 亿, 7.1 亿, 6.2 亿, 3.1 亿, 4.2 亿, 6.4 亿, 10.9 亿, 0.9 亿, 0.3 亿头。

(4)政策导向约束:各省(区、市)畜禽养殖“十四五”发展规划中均提出增加畜禽养殖量的目标。因此,本研究设置优化出的畜禽养殖量不应小于 2022 年的实际养殖量,约束条件具体如下:

$$X_{ij} \leq x_{ij} \tag{5}$$

式⑤中: X_{ij} 为 2022 年畜禽养殖的值,头或羽,根据历年统计资料^[12]整理得到,具体数值详见表 3。

表 3 2022 年畜禽养殖量

Tab.3 Animal breeding in 2022

万头

省(区、市) Provinces (autonomous regions and municipalities)	奶牛 Dairy cattle	肉牛 Beef cattle	蛋鸡 Layer	肉鸡 Broiler	生猪 Swine	肉羊 Sheep
天津 Tianjin	10.4	19.7	943.3	2 438.0	200.5	50.7
河北 Hebei	148.1	247.1	18 603.5	29 984.0	3 506.1	1 418.7
内蒙古 Inner Mongolia	159.0	658.9	2 923.1	6 193.0	886.9	6 124.1
辽宁 Liaoning	27.6	261.2	14 746.5	45 620.5	2 894.3	787.8
吉林 Jilin	12.5	377.8	4 473.4	24 323.5	1 839.4	687.5
山东 Shandong	86.4	197.0	20 457.3	105 336.3	4 528.4	1 459.1
河南 Henan	40.7	322.8	21 302.5	43 322.7	5 918.8	2 030.4
甘肃 Gansu	35.9	495.5	1 008.6	2 774.2	895.7	2 595.6
宁夏 Ningxia	83.7	148.4	616.4	700.6	110.8	710.6

考虑到地下水资源逐年波动变化特点,本研究根据 2013—2022 年 9 个省(区、市)的地下水资源量^[15](表 4),根据其最小值、平均值和最大值计算并构建模糊三角数,以此来进行模糊线性规划的求解^[21],过程如下:

1)求约束条件中不考虑伸缩指标时各省市养殖业的最优生产效益 f_0

$$\begin{cases} \max f(x) = \sum_{j=1}^6 a_j x_{ij} \\ \sum_{j=1}^6 b_{ij} x_{ij} t_j / R \leq w_{i,ave} \\ \sum_{j=1}^6 x_{ij} \beta_j \leq m_i \\ x_{ij} \geq X_{ij} \end{cases} \quad (6)$$

式⑥中: $w_{i,ave}$ 为第*i*个省市地下水资源量平均值, m^3 ,该数据详见表4; m_i 为第*i*个省市的农田氮承载力,头。 x_{ij} 为第*i*省市第*j*种畜禽养殖量,头或羽。

2)求约束条件对伸缩指标完全放开时各省市养殖业的最优生产效益 f_1

$$\begin{cases} \max f(x) = \sum_{j=1}^6 a_j x_{ij} \\ \sum_{j=1}^6 b_{ij} x_{ij} t_j / R \leq w_{i,max} \\ \sum_{j=1}^6 x_{ij} \beta_j \leq m_i \\ x_{ij} \geq X_{ij} \end{cases} \quad (7)$$

式⑦中: $w_{i,max}$ 为第*i*个省市的地下水资源量最大值, m^3 ,该数据详见表4。

3)引入参数 λ ,将模糊线性规划转化为普通线性规划求 x_{ij}

$$\begin{cases} \max \lambda \\ \sum_{j=1}^6 a_j x_{ij} - (f_1 - f_0) \lambda \geq f_0 \\ \sum_{j=1}^6 b_{ij} x_{ij} t_j / R + (w_{i,max} - w_{i,ave}) \lambda \leq w_{i,max} \\ \sum_{j=1}^6 x_{ij} \beta_j \leq m_i \\ x_{ij} \geq X_{ij} \\ \lambda \geq 0 \end{cases} \quad (8)$$

式⑧中: λ 是计算过程中引入的参数,无实际意义。

表 4 9 省(区、市)的地下水资源量

Tab.4 Groundwater resources in 9 provinces (autonomous regions and municipalities)									亿 m^3
年份 Year	天津 Tianjin	河北 Hebei	内蒙古 Inner Mongolia	辽宁 Liaoning	吉林 Jilin	山东 Shandong	河南 Henan	甘肃 Gansu	宁夏 Ningxia
2013	5.0	138.8	249.3	139.4	160.2	172.3	147.1	138.9	22.1
2014	3.7	89.3	236.3	82.3	120.2	116.9	166.8	112.6	21.3
2015	4.9	113.6	224.6	83.2	127.4	133.1	173.1	100.9	20.9
2016	6.1	133.7	248.2	120.9	154.7	164.8	190.2	108.7	18.6
2017	5.5	116.3	207.3	86.6	133.3	151.1	206.5	133.4	19.3
2018	7.3	124.4	253.6	79.8	137.9	196.7	188.0	165.6	18.1
2019	4.2	97.8	233.8	106.8	156.1	128.4	119.1	148.7	18.4
2020	5.8	130.3	243.9	115.2	169.4	201.8	185.8	158.2	17.8
2021	11.0	220.2	238.6	150.8	166.2	237.7	257.0	120.0	16.4
2022	6.8	152.8	223.1	154.3	192.6	225.4	140.4	112.7	15.3
均值 Ave.	5.8	145.8	248.3	105.5	110.1	154.2	198.9	132.7	16.2
最大值 Max.	11.0	220.2	253.6	154.3	192.6	237.7	257.0	165.6	22.1
最小值 Min.	3.7	89.3	207.3	79.8	120.2	116.9	119.1	100.9	15.3

1.4 情景分析方法

由于我国经济的快速发展以及人口的大量增长,地下水资源需求量不断增加,超采问题日益严重,地下水的“节流”问题迫在眉睫。2024年3月国务院发布《节约用水条例》强调,国家大力支持节水型饮水设备、精准用水技术以及养殖废水的循环利用系统等养殖业节水技术的研究和推广^[22]。因此,考虑到未来节水型畜牧业发展的趋势,本研究采用情景分析法,假设畜禽用水量在现有基础上以10%为一个变化幅度,逐步减少0~50%,仿真分析各省(区、市)畜禽养殖承载力的变化,以探究在满足地下水资源保护政策的前提下未来畜禽养殖业的发展方向与潜力。

此外,本研究基于北太天元数值计算通用软件V3.5.0平台,开展上述模型代码编写与仿真分析。

2 结果与分析

2.1 畜禽养殖地下水压力

按照式①计算得到2013—2022年中国31个省(区、市)的畜禽养殖地下水压力值。从时间维度上分析,近十年间中国整体的畜禽养殖地下水压力值在0.8%~1.1%之间波动,年际间差异较小(图2a)。从空间维度上分析,中国31个省(区、市)之间差异较大,北方地区畜禽养殖地下水压力值高于南方地区,东部地区高于西部地区,其中山东畜禽养殖地下水压力值最高,达到3.8%;西藏最低,仅为0.1%。因此,确定天津、河北、内蒙古、辽宁、吉林、山东、河南、甘肃和宁夏9个热点省(区、市)为研究对象。

对热点省(区、市)进一步分析可知,2013—2022年天津等9个省(区、市)的畜禽养殖地下水压力值在1.3%~5.9%之间波动,远高于全国平均值(图2b)。从时间维度来看,除宁夏外,其余8个省(区、市)畜禽养殖地下水压力呈现下降趋势,2022年下降至2%左右。

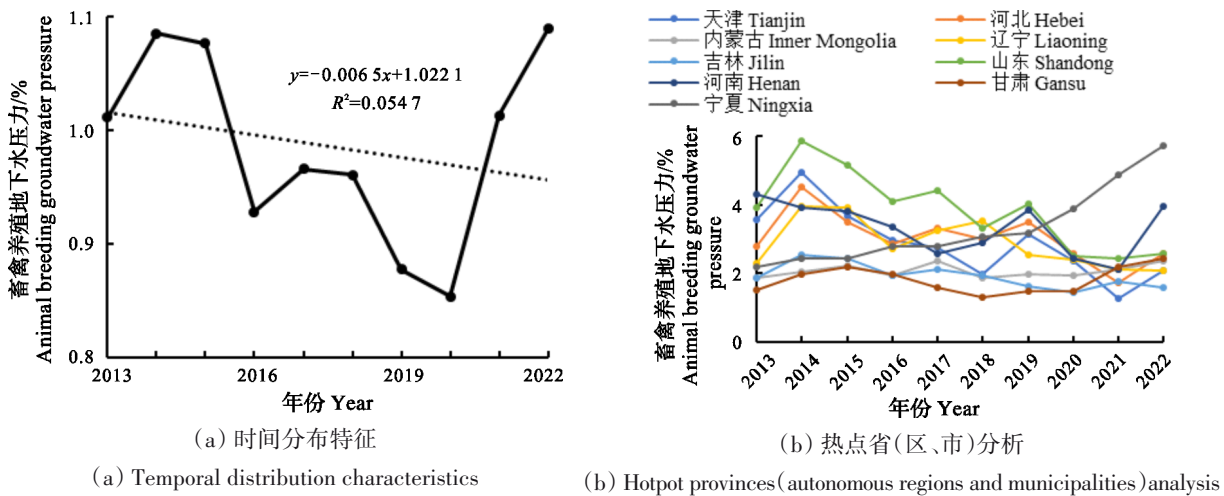


图2 畜禽养殖地下水压力的时间变化特征和热点省(区、市)分析

Fig2 Temporal variation and hotspot provinces (autonomous regions and municipalities) analysis of animal breeding groundwater pressure

2.2 畜禽养殖承载力

按照式②~式⑧仿真计算,当畜禽用水量减少0~50%时,9个热点省(区、市)的畜禽养殖地下水资源承载力逐步增大(图3)。当畜禽用水量维持现状时,9个省(区、市)均无解;当畜禽用水量减少10%时,仅内蒙古和甘肃有解,其他省(区、市)无解;当畜禽用水量减少50%时,9个省(区、市)均有解。这说明,随着畜禽用水量减少,各地区畜禽养殖地下水压力值下降,畜禽养殖承载力和产值呈现上升趋势。但需要注意的是,相较于农田养分约束和政策导向约束,地下水资源成为模型的限制因素;当畜禽用水量下降,带来畜禽用水总量下降,小于地下水资源可利用量,才能解除该限制因素,模型求解。基于此推断,若不降低畜禽用水量,随着未来畜禽养殖量增加,地下水资源量可能将不满足其需水量,限制畜禽养殖业的发展。

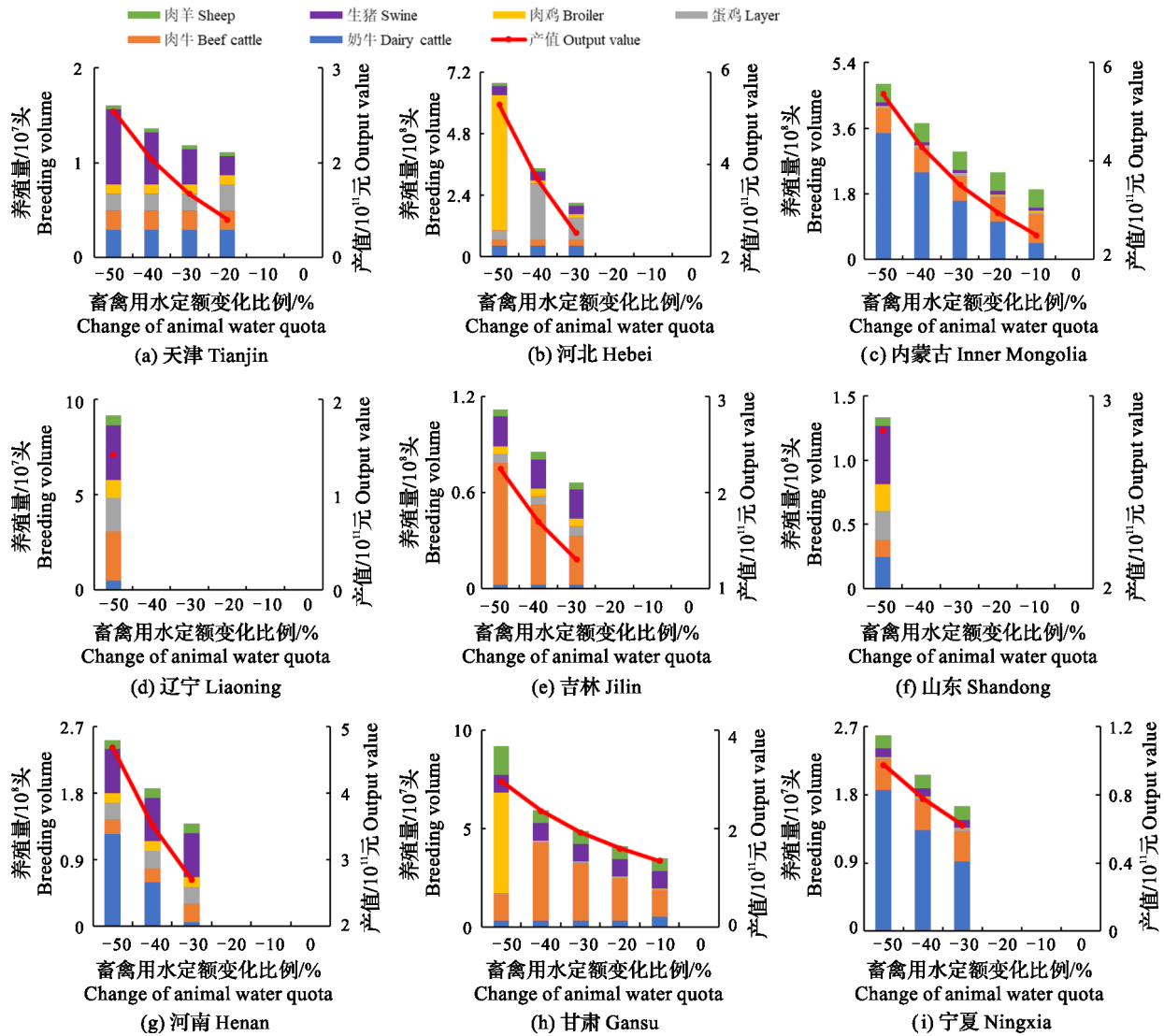


图3 天津(a)、河北(b)、内蒙古(c)、辽宁(d)、吉林(e)、山东(f)、河南(g)、甘肃(h)

和宁夏(i)的畜禽养殖地下水资源承载力仿真分析

Fig.3 Simulation analysis result on groundwater bearing capacity of animal in Tianjin(a), Hebei(b), Inner Mongolia(c), Liaoning(d), Jilin(e), Shandong(f), Henan(g), Gansu(h), and Ningxia(i)

当畜禽用水量减少50%时,天津、河北、内蒙古、辽宁、吉林、山东、河南、甘肃和宁夏的畜禽养殖地下水资源承载力分别为0.2亿,6.8亿,4.8亿,0.9亿,1.1亿,1.3亿,2.5亿,0.9亿,0.3亿头(以猪当量计,全文同),畜禽养殖业产值分别增长了93.1%、156.1%、125.3%、9.3%、85.5%、13.0%、83.8%、133.7%和75.0%。从畜禽种类来看,不同省(区、市)主要增长的畜禽种类存在较大差异,天津的生猪、河北的肉鸡、内蒙古的奶牛、吉林的肉牛、河南的奶牛、甘肃的肉鸡和宁夏的奶牛的养殖量均有明显提升。这主要是优化模型为使畜禽养殖业的产值达到最高,在满足政策约束和农田氮养分约束的前提下,将各省(区、市)内单位地下水消耗下产值最高的畜禽种类最大化导致的。

3 讨论

3.1 与国内研究的对比分析

本研究运用畜禽养殖地下水压力指标来定量评价区域畜禽养殖业对地下水资源的需求程度。结合时间和空间2个维度的评价结果可知,近10年中国畜禽养殖地下水压力值在0.8%~1.1%之间波动,时间上年际间差异较小,空间上总体呈现“北方高于南方,东部高于西部”的特征,其中天津、河北和内蒙古等9个热点省(区、市)的压力值在1.3%~5.9%之间波动,远高于全国平均值。本研究评价结果与国内其他

水资源研究的评价结果类似,李原园等^[23]对第三次全国水资源调查数据评估发现,中国水资源总量南方显著高于北方,北方面临较高的水资源压力。楚天舒等^[24]根据第二次全国污染源普查成果,运用熵值法和理想点法评价发现,畜禽养殖业的水环境压力主要呈现“东高西低”的特征,并以黄淮海地区为热点区域。王永玲^[25]综合水资源的供给、利用和管理,运用灰色关联熵法分析发现,北京、天津、黑龙江、青海和宁夏的水资源承载力处于超负荷状态,河北、内蒙古以及河南等省份的水资源承载力也非常接近警戒线。由此可见,北方地区畜禽养殖业的发展面临着严重的水资源压力。

在畜禽承载力方法学上,本研究尝试融合模糊线性规划方法与畜禽养殖地下水压力阈值,构建畜禽养殖地下水资源承载力模型,以解决地下水资源逐年波动变化对评价结果的影响。这主要是因为畜禽养殖属于长周期、跨年的生产活动,畜禽种群结构与数量需要保持相对稳定;而地下水资源受到气象等多因素影响,历年波动较大(表4)。若强行逐年计算区域畜禽养殖是否超载,容易出现某个地区“去年不超载、今年超载”的评价结果,这不利于科学指导地区畜禽养殖业的长期有序生产。因此,本研究优选模糊数学方法,结合各省(区、市)近10年地下水资源量的最大值、最小值和平均值,构建模糊线性规划模型,来解决地下水资源量历年波动的问题。并且,本研究使用不同地下水资源约束的情景分析,代替是否超载的判断,为区域畜禽养殖业可持续发展与地下水资源保护的协同实现,提供新的解决思路和方法。

3.2 与当前畜禽养殖量的对比分析

结合畜禽养殖地下水资源承载力仿真分析结果(图4)可知,当畜禽用水量减少50%时,天津、河北、内蒙古、辽宁、吉林、山东、河南、甘肃和宁夏的畜禽养殖地下水资源承载力分别为0.2亿,6.8亿,4.8亿,0.9亿,1.1亿,1.3亿,2.5亿,0.9亿,0.3亿头,分别是当前养殖量的1.6、4.2、2.7、1.1、1.8、1.1、1.9、2.8和1.7倍,各地畜禽养殖有较大的发展潜力。与此同时,这9个省(区、市)的农田氮承载力分别为0.4亿,7.1亿,6.2亿,3.1亿,4.2亿,6.4亿,10.9亿,0.9亿,和0.3亿头,分别是当前养殖量的4.1、4.4、3.4、3.6、6.8、5.3、8.2、2.8和2.0倍。因此,各地可适当增加粪肥还田量,促进畜禽粪污资源化利用与区域种养结合。

3.3 大力推广畜禽养殖节水技术

华北地区是畜禽养殖地下水压力的热点区域,若不减少畜禽用水量,未来地下水资源将极大可能限制畜禽养殖业的发展。而大力推广节水技术是缓解水资源匮乏和养殖业发展之间矛盾的重要手段。整理现有的各种节水技术发现,在饮水设备方面,养殖企业使用饮水碗能有效节约猪场饮用水30%以上;家禽养殖场使用乳头式饮水器,较水槽可节约用水75%~80%,使用水位控制器饮水同样能节约牛羊场饮用水^[26]。在圈舍冲洗方面,猪场采用干清粪工艺能够节水32.0~34.1%^[27];鸡场采用的先强力风机物理清扫再用水冲洗的方式能节水50%以上^[28]。更有实践表明,综合采用高效喂水技术和干清粪工艺的数字化猪场较常规猪场可节水30%以上^[29]。在国外畜禽养殖相关的研究报道中,节水技术也常被提及。在加拿大安大略省,通过降低空气温度和回收牛奶冷却水等方式,某封闭奶牛场可节水约19%^[30]。由此可见,节水技术的推广能够使养殖企业达到节水30%以上的目标,促进了区域畜禽养殖承载潜力的提升与畜禽养殖业的可持续发展。

3.4 用水权改革促畜禽养殖业节水化转型

可持续发展是畜禽养殖业未来发展的必然方向。因此,能否有充足的水资源来支撑其发展,是畜禽养殖业亟需探讨的核心问题之一。本研究从水资源安全角度出发,探究地下水资源能否支撑畜禽养殖业可持续发展。研究结果显示,畜禽养殖地下水压力的热点省(区、市)主要集中于北方地区,其畜禽养殖业未来的发展将极大概率受到地下水资源的限制。为此,地方政府尝试开展了养殖业用水的确权工作,为水资源安全问题的解决提供基础的政策保障。宁夏作为北方地区用水权改革的“先行者”,从2021年起便开启了对规模化养殖企业与养殖户的用水权确权工作,实现确权到户或乡镇,并建立了水权收储交易投融资机制^[31]。2023年,宁夏全区工农业用水权确权工作全面完成,确权总水量达49亿 m^3 ^[32]。这极大提高了养殖户对水资源高效利用的重视程度,促进了节水技术的推广与应用。确权以后,单只畜禽的用水量平均下降幅度达33.3%^[32],有效地推动了畜禽养殖业的节水增效。宁夏在用水权改革方面的创新实践与制度探索,为北方地区其他地下水资源短缺的省份提供了极具价值的参考范例。其他北方省份可借鉴宁夏的成功经验,开展具有各地特色的用水权改革,促进传统畜禽养殖业的节水化转型,从而提高各地的畜禽养殖地下水资源承载力。

4 结论

本研究评估了中国31个省(区、市)畜禽养殖地下水压力,运用模糊线性规划方法构建畜禽养殖地下水资源承载力模型,仿真优化出热点省(区、市)适宜畜禽养殖量,得到以下结论:

2013—2022年中国畜禽养殖地下水压力值在0.8%~1.1%之间波动,年际间差异较小。从空间维度上分析,北方地区畜禽养殖地下水压力值高于南方地区,东部地区高于西部地区。天津、河北、内蒙古、辽宁、吉林、山东、河南、甘肃和宁夏为9个热点省(区、市),压力值在1.3%~5.9%之间波动,远高于全国平均值。

经模糊线性规划模型求解可得,当畜禽用水量减少50%时,天津、河北、内蒙古、辽宁、吉林、山东、河南、甘肃和宁夏畜禽养殖地下水资源承载力的优化结果分别为0.2亿,6.8亿,4.8亿,0.9亿,1.1亿,1.3亿,2.5亿,0.9亿,0.3亿头,是当前养殖量的1.6、4.2、2.7、1.1、1.8、1.1、1.9、2.8和1.7倍,各地畜禽养殖有较大的发展潜力。建议各地借鉴宁夏的水权改革经验,开展各地特色的畜禽养殖用水确权与用水权市场建设,大力推广节水养殖技术与设施设备,促进传统畜禽养殖业向节水型畜禽养殖业的转型。

致谢:自然资源要素耦合过程与效应重点实验室开放课题(2024KFKT011)和自然资源部生态地球化学重点实验室开放基金项目(ZSDHJJ202203)同时对本研究给予了资助,谨致谢意!

参考文献 References:

- [1] 康绍忠. 中国农业节水十年:成就、挑战及对策[J]. 中国水利, 2024(10): 1-9.
KANG S Z. Ten years of agricultural water-saving in China: achievements, challenges and measures[J]. China water resources, 2024(10): 1-9.
- [2] 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.
FENG Z M, YANG Y Z, YAN H M, et al. A review of resources and environment carrying capacity research since the 20th century: from theory to practice[J]. Resources science, 2017, 39(3): 379-395.
- [3] 夏军, 朱一中. 水资源安全的度量:水资源承载力的研究与挑战[J]. 自然资源学报, 2002(3): 262-269.
XIA J, ZHU Y Z. The measurement of water resources security: a study and challenge on water resources carrying capacity [J]. Journal of natural resources, 2002(3): 262-269.
- [4] 惠洪河, 蒋晓辉, 黄强, 等. 水资源承载力评价指标体系研究[J]. 水土保持通报, 2001(1): 30-34.
HUI Y H, JIANG X H, HUANG Q, et al. Research on evaluation index system of water resources bearing capacity [J]. Bulletin of soil and water conservation, 2001(1): 30-34.
- [5] 刘统兵, 方瑜, 黄峰, 等. 中国广义农业水土资源匹配及利用状况动态评价[J]. 农业工程学报, 2023, 39(10): 56-65.
LIU T B, FANG Y, HUANG F, et al. Dynamic evaluation of the matching degree and utilization condition of generalized agricultural water and arable land resources in China [J]. Transactions of the Chinese society of agricultural engineering, 2023, 39(10): 56-65.
- [6] WANG C, LI Z J, CHEN H F, et al. Comprehensive evaluation of agricultural water resources' carrying capacity in Anhui Province based on an improved TOPSIS model[J]. Sustainability, 2023, 15(18): 1-16.
- [7] 徐冬平, 赵波, 李同昇, 等. 中国北方农牧交错区水资源承载力动态仿真研究:以内蒙古通辽市科尔沁区为例[J]. 水土保持通报, 2017, 37(1): 262-269.
XU D P, ZHAO B, LI T S, et al. Dynamic simulation of carrying capacity of water resources in agro-pastoral ecotone in Northern China: a case study at Horqin district, Tongliao city, Inner Mongolia [J]. Bulletin of soil and water conservation, 2017, 37(1): 262-269.
- [8] LI H, DU Y, WU S, et al. Evaluation of the agricultural water resource carrying capacity and optimization of a planting-raising structure[J]. Agricultural water management, 2021, 243: 106456.
- [9] LI B F, GUI D W, XUE D P, et al. Analysis of the expansion characteristics and carrying capacity of oasis farmland in North-western China in recent 40 years[J]. Agronomy, 2022, 12(10): 1-19.
- [10] 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. Resources carrying risk of livestock and poultry breeding in China based on the short board theory [J]. Resources science, 2022, 44(10): 2074-2088.

- [11] 张鑫,王纪科,蔡焕杰,等.区域地下水资源承载力综合评价研究[J].水土保持通报,2001(3):24-27.
ZHANG X, WANG J K, CAI H J, et al. Comprehensive evaluation on resources carrying capacity of regional groundwater[J]. Bulletin of soil and water conservation, 2001(3):24-27.
- [12] 国家统计局农村社会经济调查司.中国农村统计年鉴2014—2023[M].北京:中国统计出版社,2023:187-258.
Department of Rural Social and Economic Surveys of National Bureau of Statistics of China. China rural statistical yearbook 2014—2023[M]. Beijing: China Statistics Press, 2023:187-258.
- [13] 中华人民共和国农业农村部.畜禽粪便土地承载力测算方法:NY/T 3877—2021[S].北京:中国农业出版社,2021.
Ministry of Agriculture and Rural Affairs of the People's Republic of China. Method for calculating land bearing capacity of animal manure: NY/T 3877—2021[S]. Beijing: China Agriculture Press, 2021.
- [14] 董红敏.畜禽养殖业粪便污染监测核算方法与产排污系数手册[M].北京:科学出版社,2019:38-53.
DONG H M. Manual for manure pollution accounting methodology and discharge coefficients of livestock production [M]. Beijing: Science Press, 2019:38-53.
- [15] 国家统计局.中国统计年鉴2014—2023[M].北京:中国统计出版社,2023:236.
National Bureau of Statistics. China statistical yearbook 2014—2023[M]. Beijing: China Statistics Press, 2023:236.
- [16] 李茉,郭萍,杨改强.农业水资源配置与种植结构调整不确定性优化模型[M].北京:科学出版社,2023:79.
LI M, GUO P, YANG G Q. The uncertainty optimization model of agricultural water resources allocation and planting structure adjustment[M]. Beijing: Science Press, 2023:79.
- [17] 国家标准化管理委员会.地方标准信息服务平台[EB/OL].(2022-01-25)[2025-05-18].<https://dbba.sacinfo.org.cn/>.
Standardization Administration of China. Local standard information service platform[EB/OL].(2022-01-25)[2025-05-18]. <https://dbba.sacinfo.org.cn/>.
- [18] 中宁县人民政府.中宁县工业、规模化养殖业用水权确权成果报告[EB/OL].(2022-08-19)[2025-05-18].<https://www.znzf.gov.cn/xwzx/qwfb/202208/P020220819459681834140.pdf>.
Zhongning County People's Government. Report on the results of the confirmation of water rights for industrial and large-scale aquaculture in Zhongning County [EB/OL].(2022-08-19)[2025-05-18]. <https://www.znzf.gov.cn/xwzx/qwfb/202208/P020220819459681834140.pdf>.
- [19] 张娜,王怀博,暴路敏,等.小微工业企业和规模化畜禽养殖业用水权确权方法的思考与建议[J].水利发展研究,2024,24(4):78-81.
ZHANG N, WANG H B, BAO L M, et al. Reflections and suggestions on the method for confirming the ownership of water rights for small and micro industrial enterprises and large-scale livestock and poultry breeding industry [J]. Water resources development research, 2024, 24(4):78-81.
- [20] 宁夏回族自治区人民政府办公厅.宁夏回族自治区人民政府办公厅关于印发《宁夏回族自治区水预算管理试点实施方案》的通知[EB/OL].(2025-03-05)[2025-05-18].http://nxjgsw.nx.gov.cn/zcfg/202503/t20250325_4865429.html.
General Office of the People's Government of Ningxia Hui Autonomous Region. Notice of the general office of the people's government of Ningxia Hui Autonomous Region on issuing the implementation plan for the pilot program of water budget management in Ningxia Hui Autonomous Region [EB/OL]. (2025-03-05) [2025-05-18]. http://nxjgsw.nx.gov.cn/zcfg/202503/t20250325_4865429.html.
- [21] 谢季坚,刘承平.模糊数学方法及其应用[M].武汉:华中科技大学出版社,2013:202-206.
XIE J J, LIU C P. Fuzzy mathematics methods and their applications[M]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 2013:202-206.
- [22] 中华人民共和国国务院.节约用水条例[EB/OL].(2024-03-20)[2025-05-18].https://www.gov.cn/zhengce/content/202403/content_6940435.htm.
The State Council of the People's Republic of China. Regulations on water conservation [EB/OL]. (2024-03-20) [2025-05-18]. https://www.gov.cn/zhengce/content/202403/content_6940435.htm.
- [23] 李原园,李云玲,郭旭宁,等.1956—2016年中国水资源总量时空分布规律及变化特征[J].水科学进展,2025,36(1):18-27.
LI Y Y, LI Y L, GUO X N, et al. Spatial-temporal distribution and variation characteristics of water resources in China during 1956—2016[J]. Advances in water science, 2025, 36(1):18-27.
- [24] 楚天舒,黄译萱,赖世宣,等.中国各省市区别养殖业灰水足迹分析与评价[J].中国农业资源与区划,2023,44(11):53-64.
CHU T S, HUANG Y X, LAI S X, et al. Analysis and evaluation of gray water footprint for planting-animal husbandry indus-

- try in provincial regions, China[J]. Chinese journal of agricultural resources and regional planning, 2023, 44(11): 53-64.
- [25] 王永玲. 中国省域水资源承载力评价: 基于支持-压力耦合机制[J]. 统计与决策, 2024, 40(8): 68-73.
- WANG Y L. Evaluation of water resources carrying capacity in China's provinces: based on the support-pressure coupling mechanism[J]. Statistics & decision, 2024, 40(8): 68-73.
- [26] 朱文峰, 刘明平, 李业峰, 等. 畜禽养殖节水措施探讨[J]. 中国畜牧业, 2024(14): 67-69.
- ZHU W F, LIU M P, LI Y F, et al. Discussion on water-saving measures of livestock and poultry breeding[J]. China animal industry, 2024(14): 67-69.
- [27] 肖和良, 肖卫红. 猪场干清粪工艺节水试验及对粪污减排效果的研究[J]. 猪业科学, 2018, 35(6): 93-95.
- XIAO H L, XIAO W H. Water-saving test of dry manure cleaning process in pig farm and its effect on manure emission reduction[J]. Swine industry science, 2018, 35(6): 93-95.
- [28] 王学静, 穆英丽, 鲍佳茵, 等. 肉鸡机械化规模化立体笼养养殖场(小区)空舍期清洗消毒效果评估及改进[J]. 北方牧业, 2022(16): 20.
- WANG X J, MU Y L, BAO J Y, et al. Evaluation and improvement of cleaning and disinfection effectiveness during the empty period in mechanized large-scale multi-tiered cage broiler breeding farms (complexes) [J]. Northern animal husbandry, 2022(16): 20.
- [29] 赖建兵, 潘卡丽, 蒋永健, 等. 数字化条件下的猪场饮水节水实践与探究[J]. 浙江畜牧兽医, 2023, 48(4): 7-9.
- LAI J B, PAN K L, JIANG Y J, et al. Practice and exploration of drinking water saving in pig farms under digital conditions [J]. Zhejiang journal animal science and veterinary medicine, 2023, 48(4): 7-9.
- [30] RICHELLE L, VANDERZAAG A C, BURTT S, et al. Water use and conservation on a free-stall dairy farm[J]. Water, 2017, 9(12): 977.
- [31] 景晓栋, 田贵良. 宁夏用水权改革实践成效及经验启示[J]. 中国水利, 2023(3): 13-17.
- JING X D, TIAN G L. Reform of water entitlement in Ningxia: practices and experiences [J]. China water resources, 2023(3): 13-17.
- [32] 新华社新媒体. “权”解旱塬渴: 西海固用水权改革见闻[EB/OL]. (2023-05-13) [2025-04-12]. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1765768381043020667&wfr=spider&for=pc>.
- Xinhua News Agency New Media. “Rights” to quench thirst for dry plateaus: observations on water rights reform in Xihaigu [EB/OL]. (2023-05-13) [2025-04-12]. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1765768381043020667&wfr=spider&for=pc>.

(责任编辑:熊淑琪)



第一作者简介:楚天舒,助理研究员,工学博士。主要从事农业资源利用与环境保护研究工作。结合长期实地调研,针对土壤环境、水环境与大气环境风险防控,构建畜禽粪便农田承载力模型,优化畜禽粪便资源化模式,促进区域种养平衡。主要参加国家重点研发计划项目子课题,主持重点实验室开放基金等项目,已发表相关论文40余篇。



通信作者简介:盖力强,高级工程师,理学博士。主要从事水资源评价和环境修复研究工作。负责、参与完成国家自然科学基金、地质调查及其他省部级项目10余项;发表论文20余篇,参编专著4部,地下水环境图集3部,行业标准1项。