中国农业大学学报 2026,31(12):149-163
Journal of China Agricultural University http://zgnydxxb.ijournals.cn

楚天舒,赵毅,戴子扬,任一哲,朱克白,贺雪妮,乔帅帅,杨绣娟. 面向畜禽粪便发酵的秸秆肥料化需求量估算[J]. 中国农业大学学报,2026,31(12):149-163.
CHU Tianshu,ZHAO Yi,DAI Ziyang,REN Yizhe,ZHU Kebai,HE Xueni,QIAO Shuaishuai,YANG Xiujuan. Estimation of straw fertilizer demand for animal manure fermentation[J]. *Journal of China Agricultural University*,2026,31(12):149-163.
DOI: 10.11841/j.issn.1007-4333.2026.12.12

面向畜禽粪便发酵的秸秆肥料化需求量估算

楚天舒[1] 赵 毅[2] 戴子扬[3] 任一哲[2] 朱克白[2] 贺雪妮[2] 乔帅帅[4] 杨绣娟[5*]

(1. 中国农业大学 资源与环境学院,北京 100193;
2. 中国农业大学 工学院,北京 100083;
3. 西北农林科技大学 动物医学院,陕西 杨凌 712199;
4. 河套学院 水利与土木工程学院,内蒙古 巴彦淖尔 015000;
5. 河套学院 农牧与食品学院,内蒙古 巴彦淖尔 015000)

摘 要 为科学评估秸秆与畜禽粪便养分资源量,引导各地农业废弃物肥料化利用,依据2000—2023年中国31个省区市的作物产量与畜禽养殖量等数据(统计数据未包含港、澳、台地区。下同),采用蒙特卡洛法与Copula函数系统性地评估历年秸秆和畜禽粪便的碳、氮养分资源量;并以碳氮比为关键参数,估算出所需的秸秆量及比例。结果表明:1)2000—2023年,中国秸秆碳、氮养分资源量均呈"下降—上升—波动"的变化趋势,2023年分别达3.19×10^8、7.49×10^6 t,其中河南、山东、黑龙江和内蒙古为热点区域;2)畜禽粪便碳、氮养分资源量呈"上升—下降—波动"的变化趋势,2023年分别为6.07×10^7、3.92×10^6 t,其中河南、河北、山东、新疆和四川为热点区域;3)中国秸秆肥料化需求量和需求比例均呈现"上升—下降—波动"的变化趋势,2023年中国秸秆肥料化需求量和需求比例分别为2.85×10^8 t和37.01%。新疆、内蒙古和山西等17个省区市的秸秆肥料化需求比例中位值低于50%,而北京、福建、海南和西藏在100%左右波动;4)当秸秆肥料化需求比例增长10%,中国畜禽养殖增量为2.15×10^9头(以猪当量计)。综上,本研究建议福建、海南、西藏完善秸秆收储运体系,从资源丰富区域调运秸秆;开发特色作物秸秆资源利用,缓解秸秆肥料化供需失衡问题;新疆、内蒙古、山西等17个省区市可适当扩大畜禽养殖规模,并向资源匮乏地区提供秸秆。

关键词 秸秆; 畜禽粪便; 发酵; 肥料化; 碳氮比
中图分类号 X713 **文章编号** 1007-4333(2026)12-0149-15 **文献标志码** A

Estimation of straw fertilizer demand for animal manure fermentation

CHU Tianshu[1], ZHAO Yi[2], DAI Ziyang[3], REN Yizhe[2], ZHU Kebai[2], HE Xueni[2], QIAO Shuaishuai[4], YANG Xiujuan[5*]

(1. College of Resources and Environmental Sciences, China Agricultural University, Beijing 100193, China;
2. College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China;
3. College of Veterinary Medicine, Northwest A&F University, Yangling 712199, China;
4. College of Water Conservancy and Civil Engineering, Hetao College, Bayannur 015000, China;
5. College of Agriculture, Animal Husbandry and Food Science, Hetao College, Bayannur 015000, China)

Abstract To scientifically assess the nutrient resources of straw and animal manure and guide the utilization of agricultural waste as fertilizer in various regions, data on crop yields and livestock and poultry breeding volumes from 2000 to 2023 in 31 provinces across China were utilized (Statistical data do not include Hong Kong, Macao,

收稿日期:2026-04-24;接受日期:2026-06-25
基金项目:内蒙古自治区科技创新重大示范项目(2025ZDSF0022);大学生创新创业训练计划项目(202411631020)
第一作者:楚天舒(ORCID:0000-0003-4143-7017),助理研究员,博士,主要从事农业资源高效利用与环境保护研究,E-mail:chuts@cau.edu.cn
通讯作者:杨绣娟(ORCID:0009-0001-0381-6641),副教授,博士,主要从事农作物生理生态及农业资源高效利用等领域研究,E-mail:1322361744@qq.com

and Taiwan regions. The same below). The Monte Carlo method and Copula function were employed to systematically evaluate the carbon and nitrogen nutrient resources of straw and animal manure over the years. To meet the material requirements for animal manure fermentation, the required quantity and proportion of straw were estimated with the carbon-to-nitrogen ratio as the key parameter. The results showed that: 1) From 2000 to 2023, the carbon and nitrogen nutrient resources of straw in China showed a trend of initial decline, followed by a rise and subsequent fluctuations, reaching 3.19×10^8 and 7.49×10^6 t, respectively, in 2023. Henan, Shandong, Heilongjiang and Inner Mongolia were the hotspot areas. 2) The carbon and nitrogen nutrient resources of livestock manure showed a trend of initial increase, then decline, followed by fluctuations, reaching 6.07×10^7 and 3.92×10^6 t respectively in 2023. Henan, Hebei, Shandong, Xinjiang and Sichuan were the hotspot areas. 3) The demand for straw as fertilizer and the demand proportion in China showed a trend of initial increase, followed by decline and subsequent fluctuations, reaching 2.85×10^8 t and 37.01% in 2023. respectively. The median value of the demand proportion for straw as fertilizer in 17 provinces and municipalities including Xinjiang, Inner Mongolia and Shanxi was less than 50%, while in Beijing, Fujian, Hainan and Xizang it exceeded 100%. 4) For every 10% increase in the proportion of straw used as fertilizer, the increase in livestock and poultry breeding volumes in China was 2.15×10^9 heads (in terms of pig equivalent). In conclusion, this study suggests that Fujian, Hainan and Xizang should improve the straw collection, storage and transportation system and transport straw from resource-rich areas; promote the utilization of straw resources from characteristic crops to alleviate the imbalance between supply and demand of straw as fertilizer; Xinjiang, Inner Mongolia, Shanxi and other 17 provinces and municipalities could appropriately expand the scale of livestock breeding and provide straw to resource-poor areas.

Keywords crop straw; animal manure; fermentation; fertilization; carbon-to-nitrogen ratio

农业面源污染治理是农村生态环境保护的核心任务,直接关系农村生态文明建设成效与农业绿色发展进程。秸秆与畜禽粪便不仅是农业面源污染的主要来源,也是政府、社会各界及科研工作者的重点关注对象。2025年12月国务院印发的《固体废物综合治理行动计划》中将秸秆与畜禽粪便资源化利用与科学还田作为重要工作内容。

堆肥和沼气作为农业废弃物资源化利用的关键环节,可以将秸秆和畜禽粪便转化成有机肥,实现“废物”变“资源”。在工程转化过程中,秸秆和畜禽粪便养分资源量、物料调配等因素成为研究重点。在秸秆和畜禽粪便养分资源量方面,已有研究主要从不同尺度上开展。1)在国家尺度,中国农作物秸秆资源总量达8.37×10^{10} t,其中玉米、水稻和小麦3大粮食作物秸秆资源量分别为3.72×10^{10}、1.91×10^{10}和1.47×10^{10} t[1];畜禽粪便养分资源量约为4.71×10^7 t,其中氮、磷和钾养分量分别为1.48×10^7、9.01×10^6和1.45×10^7 t[2](统计数据未包含港、澳、台地区。下同)。2)在省域尺度,云南省作物秸秆资源量为2.84×10^7 t,其中玉米秸秆资源量最多,约占总量的56.46%,而麻类的秸秆资源量最少,仅占0.07%[3]。山东省作物秸秆养分资源量为1.63×10^6 t,氮、磷和钾养分量分别为6.36×10^5、4.02×10^4和7.51×10^5 t;畜禽粪便养分资源量为8.27×10^5 t,氮、磷和钾养分量分别为3.52×10^5、5.11×10^4和2.96×10^5 t[4]。3)在区域尺度,我国青藏高原区域玉米秸秆资源总量约为2.12×10^7 t,其中四川省凉山州最多,其玉米秸秆氮、磷和钾养分总量约为29.02×10^4 t[5]。然而,已有研究主要从国家、省域和地区等多尺度上评估秸秆资源量,为定量评估时空差异奠定了良好基础。但研究过程中多采用氮、磷和钾质量分数的均值代入计算,忽略了其养分含量变异性的问题,不利于农业废弃物资源精细化管理。

在发酵物料调配方面,碳氮质量分数比(以下简称“碳氮比”)是秸秆和畜禽粪便肥料化转化的关键参数。已有研究表明:在厌氧发酵研究方面,污水污泥与稻草的厌氧发酵中,当碳氮比为30、有机负荷率为3.5 g/(L·d)时,甲烷产量提升26%[6]。在序批式反应器中,将家禽垫料与小麦秸秆的厌氧发酵发现:当碳氮比为20、总固体含量6%、水力停留时间7.6 d时,甲烷日产率0.72 L[7]。玉米秸秆与厨余垃圾厌氧发酵过程,经预处理后将物料碳氮比调至30时,甲烷产率达334.5 mL/g,较未预处理组提

升266.9%[8]。在好氧堆肥研究方面，通过40 d堆肥实验发现碳氮比25时，堆肥腐殖化指数提升46.1%，化学聚合物合成显著增强，而细菌残体碳含量降低48.0%[9]。辣椒秸秆堆肥实验发现，甲烷排放量随碳氮比降低而显著增加；当碳氮比为18时，甲烷日排放量为2.27 mg/m^2[10]。已有研究聚焦于实验室尺度研究，通过优化碳氮比等参数，提升甲烷产气率、腐殖化指数等关键指标，助力农业废弃物高效发酵。然而，现有秸秆和畜禽粪便资源量是否能满足发酵需求，缺乏宏观尺度的研究与分析，不利于指导农业废弃物资源化利用的政策制定。

因此，本研究拟基于2000—2023年中国31个省区市的作物产量与畜禽养殖量等数据，采用蒙特卡洛法与Copula函数系统性估算历年秸秆和畜禽粪便的碳、氮养分资源量，明确其时空分布特征；以碳氮比为关键参数，估算出畜禽粪便发酵所需的秸秆量与比例；采用情景分析法，定量评估秸秆肥料化利用比例增加时，各地区畜禽养殖增量，以期为区域农业废弃物肥料化利用与政策规划提供科学依据。

1　材料与方法

1.1　秸秆及畜禽粪便碳氮养分资源量计算方法

本研究根据2000—2023年中国31个省区市的作物产量与畜禽养殖量等参数，计算得到秸秆量与畜禽粪便量；再结合其氮、磷质量分数，计算得到秸秆与畜禽粪便的碳氮养分资源量，计算公式如下：

$$Q_{\mathrm{s}}=\sum_{i=1}^{5}(S_{\mathrm{s},i}A_{\mathrm{s},i}X_{\mathrm{s},i}\omega_{\mathrm{s},i}) \tag{1}$$

$$Q_{\mathrm{a}}=\sum_{j=1}^{6}(S_{\mathrm{a},j}W_{\mathrm{a},j}K\omega_{\mathrm{a},j}) \tag{2}$$

式中：Q_{s}为作物秸秆碳或氮养分资源量，kg；$S_{\mathrm{s},i}$为第i种作物的产量[11]，kg；$A_{\mathrm{s},i}$为第i种作物的草谷比[12]，%；$X_{\mathrm{s},i}$为第i种作物秸秆的收集率[12]，%；$\omega_{\mathrm{s},i}$为第i种作物秸秆的碳或氮质量分数[13]，%，详见表1；Q_{a}为畜禽粪便碳或氮养分资源量，kg；$S_{\mathrm{a},j}$为第j种畜禽养殖量[11]，头或羽；$W_{\mathrm{a},j}$为第j种畜禽的粪便排泄量[14-15]，kg/头或kg/羽；K为畜禽粪便的收集利用率，%，本研究取值88%[16]；$\omega_{\mathrm{a},j}$为第j种畜禽粪便的碳或氮质量分数[17-18]，%，详见表1；i=1，2，…，5分别为水稻、小麦、玉米、油菜和棉花；j=1，2，…，6分别为奶牛、生猪、羊、肉牛、蛋鸡和肉鸡。

1.2　秸秆肥料化需求量估算方法

在堆肥和沼气实际生产中，为了有利于微生物发酵，好氧堆肥和厌氧发酵均需要将秸秆和畜禽粪便混合，调配到适宜的碳氮比[19-20]。因此，本研究根据2000—2023年中国31个省份秸秆与畜禽粪便的碳氮养分资源量，以碳氮比为关键参数，估算出所需秸秆量，即为面向畜禽粪便发酵的秸秆肥料化需求量。该指标旨在定量估算满足畜禽粪便发酵所需的秸秆需求量，助力农业废弃物资源化利用与规划。计算公式如下：

$$F=\frac{M_2}{M_1}\times 100\% \tag{3}$$

$$M_1=\sum_{i=1}^{5}S_{\mathrm{s},i} \tag{4}$$

$$M_2=\frac{RQ_{\mathrm{an}}-Q_{\mathrm{ac}}}{C-RN} \tag{5}$$

$$R=\frac{Q_{\mathrm{sc}}+Q_{\mathrm{ac}}}{Q_{\mathrm{sn}}+Q_{\mathrm{an}}} \tag{6}$$

$$C=\frac{Q_{\mathrm{sc}}}{M_1}\times 100\% \tag{7}$$

$$N=\frac{Q_{\mathrm{sn}}}{M_1}\times 100\% \tag{8}$$

式中：F为秸秆肥料化需求比例，%；M_1为秸秆资源量，kg；M_2为秸秆肥料化需求量，kg；R为畜禽粪便与秸秆混合后的碳氮比，参考行业技术手册[19-20]，本研究取值为25～30；Q_{ac}为畜禽粪便碳养分资源量，kg；Q_{an}为畜禽粪便氮养分资源量，kg；Q_{sc}为作物秸秆碳养分资源量，kg；Q_{sn}为作物秸秆氮养分资源量，kg；C为秸秆整体的碳质量分数，‰；N为秸秆整体的氮质量分数，‰，C和N是过程量，每次对秸秆碳氮质量分数进行蒙特卡洛模拟取值后，先计算秸秆碳氮养分资源量，再除以秸秆资源量得到。

此外，计算结果主要采用箱线图形式展示。由于异常值占比较少，图中均不显示异常值。

1.3　样本来源及检测方法

农作物秸秆与畜禽粪便样品来自本研究团队建立的农业生物质特性数据库。其中，水稻、小麦、玉米、油菜和棉花秸秆的样本均采自各作物主要产区，样本量分别为1 513、778、1 155、418和235个，秸秆样品取自河北、山东、陕西、甘肃、河南、安徽和湖北等31省份[13]。奶牛、生猪、羊、肉牛、蛋鸡和肉鸡粪便样本均来自于各畜禽主要养殖省份，样本量

分别为656、1 426、25、569、666和593个，粪便样品来自黑龙江、吉林、河北、山西、山东、河南、四川等31省份[17-18]。在检测方法方面，本研究主要采用重铬酸钾容量法测得秸秆与粪便的碳质量分数，采用浓硫酸消煮与硼酸滴定法测得秸秆与粪便的氮质量分数[21]。并且，按照以下质量把控措施保障数据可靠性：1）每个样本2次平行试验；2）本研究团队测定结果与第三方机构的测定结果进行比对；3）依据3σ原则剔除异常值。

1.4 蒙特卡洛法

蒙特卡洛法是一种将概率统计模型与计算机技术相结合的方法，根据概率曲线模拟变量分布，可以求得问题的范围解，在不确定性分析方面具有广泛应用[22]。由于秸秆和畜禽粪肥的氮磷养分质量分数具有较强的变异性[13,17-18]，适宜使用蒙特卡洛法进行不确定性分析。所以，本研究针对秸秆碳质量分数、秸秆氮质量分数，畜禽粪便碳质量分数、畜禽粪便氮质量分数和碳氮比5个参数进行10万次模拟分析。其中，为促进好氧与厌氧微生物的高效发酵，本研究参考沼气工程与堆肥工程的相关技术手册[19-20]，将碳氮比的取值范围设置为25～30，分布类型为正态分布[19-20]。其余4种参数的取值范围与分布类型详见下表1[13,17-18]。

需要注意的是，碳、氮养分是秸秆与畜禽粪便的基本构成元素，其质量分数存在较强关联。因此，本研究利用Copula函数[23-25]来建立其联合分布，可确保模拟出来秸秆与畜禽粪便碳氮质量分数符合作物实际情况，避免出现“碳取最大值而氮取最小值”或“碳取最小值而氮取最大值”等异常情况。具体来说，将联合分布分解为对应变量（碳和氮质量分数）各自的边缘分布与1个Copula函数，以独立地评估变量间的相关性结构[26]。本研究中根据贝叶斯信息量（Bayesian Information Criterion）最小准则[27]选择了拟合效果最优的Copula函数，其中小麦、玉米、棉花、奶牛、肉牛和蛋鸡的联合分布类型为Clayton（BIC值分别为－5.05、－8.87、5.00、－9.24、－86.78、－31.41和－106.36），水稻和油菜的联合分布类型为Gumbel（BIC值分别为－44.71和－44.61），羊和肉鸡的联合分布类型为Gaussian（BIC值分别为－1.64和178.32），生猪的联合分布类型为Frank（BIC值为－128.12），具体的拟合情况和函数关系式详见图1。所有计算均在北太天元数值计算通用软件V3.5.0上进行。

1.5 情景分析

由于现有秸秆资源量远多于畜禽粪便资源量，本研究采用情景分析法，以2023年数据为基础，分别设置秸秆肥料化需求比例增长2.5%、5.0%、7.5%和10.0%的情景，定量分析畜禽养殖增量。具体操作过程：首先，本研究以式（5）为基础，利用式（3）对M_2进行换元；其次，利用畜禽粪便碳氮比对Q_{ac}进行消元；进而，推导获得Q_{an}的表达式，即不同秸秆肥料化需求比例增量下的畜禽粪便氮养分增量；最终，结合生猪排泄系数等参数，推算出畜禽养殖增量（以猪当量计，全文同），具体计算公式如下：

$$\Delta Q_{an}=\frac{(C-RN)\Delta FM_1}{R-R_a} \tag{9}$$

$$\Delta n=\frac{\Delta Q_{an}}{WK\omega} \tag{10}$$

式中：ΔQ_{an}为畜禽粪便氮养分增量，kg；R_a为畜禽粪便碳氮比，该值是在计算过程中获取；ΔF为秸秆肥料化需求比例增量，%，若模拟计算中，秸秆肥料化需求比例大于100%，则取值为0；若需求比例与100%的差值小于情景数值，则取较小的差值，防止出现需求比例＞100%的情况。Δn为畜禽养殖增量，头；W为生猪粪便排泄量[14-15]，kg/头；K为畜禽粪便的收集利用率，%，本研究取值88%[16]；ω为生猪粪便氮质量分数，%。

2 结果与分析

2.1 秸秆及畜禽粪便碳氮养分资源量估算结果

由图2（a）和（b）可见，2000—2023年中国秸秆碳、氮养分资源量均呈现“下降—上升—波动”的变化趋势。其中：2003年达到最小值，其中位值分别为1.71×10^8和4.08×10^6 t；2003年后一直增加，2021年达到最大值，分别为3.10×10^8和7.27×10^6 t；2023年分别为3.19×10^8和7.49×10^6 t。由图2（c）和（d）可见2000—2023年中国畜禽粪便碳、氮养分资源量均呈现“上升—下降—波动”的变化趋势（图2（c）和（d））。其中：2005年达到最大值，其中位值分别为7.18×10^7和4.34×10^7 t；2005年后一直下降，2009年达到最小值，分别为4.92×10^7和3.11×10^6 t；2023年分别为6.07×10^7和3.92×10^6 t。

表 1　秸秆与畜禽粪便的碳、氮质量分数的累计概率曲线参数

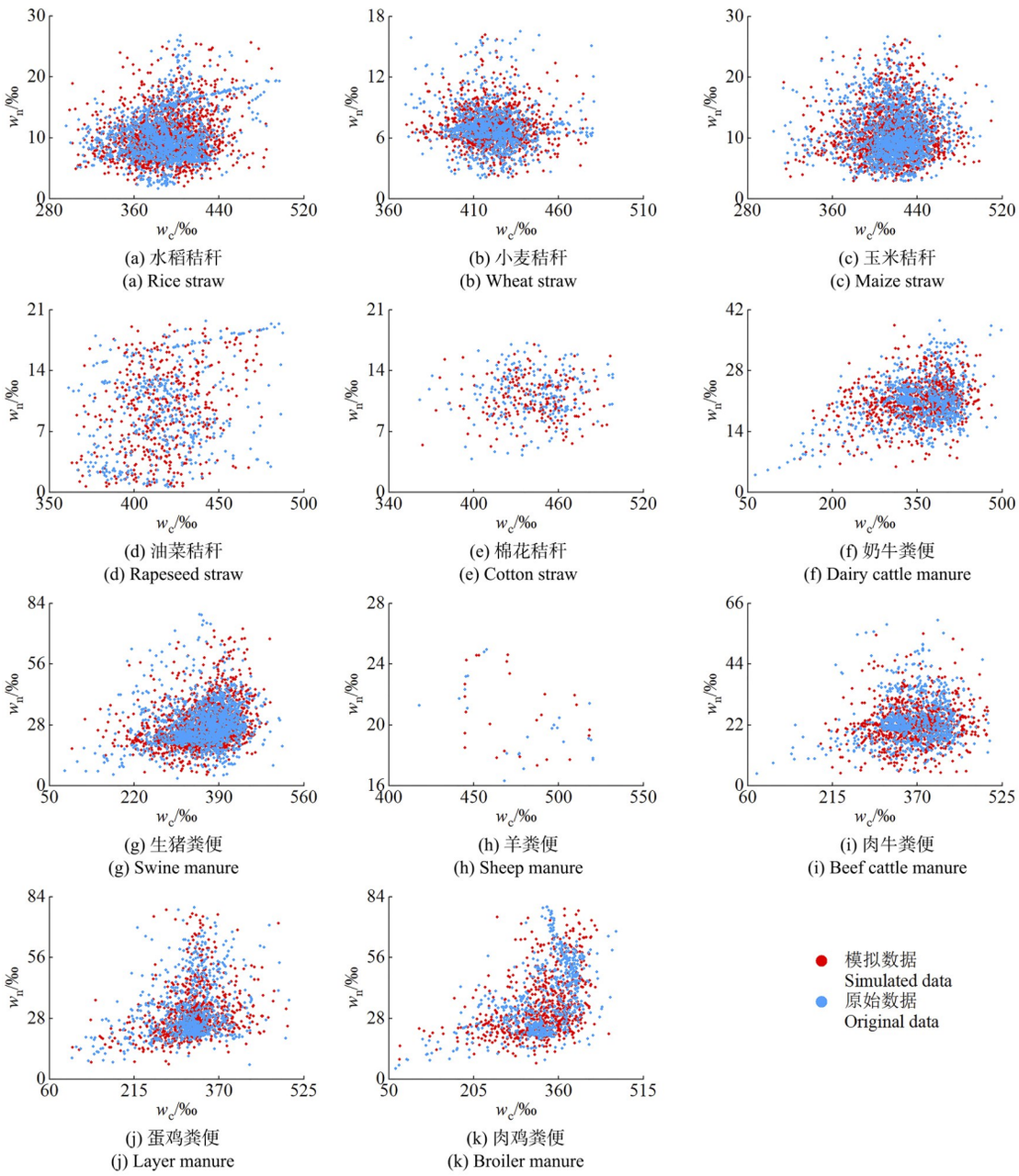
Table 1　Parameters of cumulative probability curves for carbon and nitrogen in straws and manure.

养分含量/‰ Nutrient content	种类 Species	最大值 Maximum	最小值 Minimum	分布类型 Type	参数 Parameter	K-S检验 P值 K-S test P-value
碳 Carbon	水稻 Rice	480.87	370.10	约翰逊分布	a=0.26, b=2.18, loc=397.42, scale=57.90	0.45
	小麦 Wheat	480.87	370.10	双伽马分布	a=1.32, loc=420.52, scale=9.27	0.23
	玉米 Maize	510.40	304.80	约翰逊分布	a=0.44, b=1.60, loc=428.68, scale=32.59	0.51
	油菜 Rapeseed	487.47	361.30	逻辑斯蒂分布	loc=416.86, scale=14.62	0.17
	棉花 Cotton	498.22	361.90	双伽马分布	a=1.76, loc=444.29, scale=11.77	0.20
	奶牛 Dairy cattle	508.00	63.95	伯尔分布	c=34.19, d=0.15, loc=-2.05, scale=419.29	0.09
	生猪 Swine	516.60	80.93	约翰逊分布	a=1.42, b=2.05, loc=426.64, scale=81.24	0.37
	羊 Sheep	520.38	289.65	R分布	c=0.77, loc=482.61, scale=37.76	0.48
	肉牛 Beef cattle	502.30	76.63	双韦伯分布	c=1.32, loc=363.42, scale=45.44	0.12
	蛋鸡 Layer	497.58	101.10	广义正态分布	β=0.85, loc=323.36, scale=28.83	0.03#
	肉鸡 Broiler	465.50	62.40	对数伽马分布	c=1.15, loc=348.16, scale=49.54	0.43
氮 Nitrogen	水稻 Rice	26.70	2.91	约翰逊分布	a=-1.21, b=1.58, loc=6.19, scale=3.83	0.15
	小麦 Wheat	16.50	2.07	正态逆高斯分布	a=0.51, b=0.18, loc=6.50, scale=1.44	0.50
	玉米 Maize	26.70	2.91	非对称拉普拉斯分布	κ=0.65, loc=8.30, scale=2.70	0.02#
	油菜 Rapeseed	19.74	0.63	广义半逻辑斯蒂分布	c=0.54, loc=0.63, scale=10.46	0.05
	棉花 Cotton	17.18	3.83	双韦伯分布	c=1.30, loc=11.44, scale=2.31	0.94
	奶牛 Dairy cattle	39.59	4.01	非对称拉普拉斯分布	κ=1.01, loc=21.06, scale=3.81	0.75
	生猪 Swine	78.84	3.40	非对称拉普拉斯分布	κ=0.62, loc=21.88, scale=5.96	0.02#
	羊 Sheep	24.97	16.33	三角分布	c=0.22, loc=15.90, scale=10.29	0.29
	肉牛 Beef cattle	59.92	4.38	双韦伯分布	c=0.92, loc=21.60, scale=5.43	0.01#
	蛋鸡 Layer	76.09	6.74	约翰逊分布	a=-1.15, b=1.00, loc=19.83, scale=4.83	0.02#
	肉鸡 Broiler	79.34	4.90	非对称拉普拉斯分布	κ=0.44, loc=21.30, scale=7.88	0.00#

注：a、b、c、d、β、κ为分布的形状特征参数；loc为分布的位置特征参数；scale为分布的尺寸特征参数。采用K-S检验评价分布的拟合优度，当P>0.05时，表明拟合分布与原始样本分布无统计学差异，拟合效果良好。#指所有候选分布均未通过显著性检验；选取K-S检验P值最大的分布作为最优分布。

Note: a, b, c, d, β and κ are shape parameters of the distributions; loc is the location parameter, and scale is the scale parameter. The goodness-of-fit of each distribution is evaluated using the K-S test. P-value>0.05 indicates no statistically significant difference between the fitted distribution and the original sample, representing a favorable fitting performance. For values marked with #, where none of the candidate distributions passed the significance test, the distribution with the largest K-S test P-value is selected as the optimal distribution.

由图3(a)和(b)可见，从空间分布特征上看，2000—2023年中国31个省区市之间秸秆碳、氮资源量的差异呈现扩大趋势。河南、山东、黑龙江和内蒙古逐步成为碳、氮养分资源的热点区域，其秸秆碳养分资源量分别约占全国的9.63%、8.82%、11.27%和6.47%；氮养分资源量分别约占全国的



w_c和w_n分别为碳和氮质量分数。

w_c and w_n denote the mass fractions of carbon and nitrogen, respectively.

图1 秸秆与畜禽粪便碳、氮质量分数的联合分布拟合结果

Fig. 1 Fitting results of the joint distribution of carbon and nitrogen in straws and manure

8.52%、7.91%、11.55%和6.45%。而资源洼地主要集中在西藏、北京、天津、宁夏和青海，其秸秆碳养分资源量分别约占全国的0.03%、0.08%、0.37%、0.55%和0.13%；氮养分资源量分别约占全国的0.04%、0.07%、0.35%、0.54%和0.16%。

由图3(c)和(d)可见，2000—2023年中国31个省区之间畜禽粪便碳、氮资源量的差异呈现缩小趋势。其中，河南、河北、山东、安徽和四川始终为畜禽粪便碳、氮养分资源量的热点区域，其畜禽粪便碳养分资源量分别约占全国的7.34%、7.27%、9.23%、4.22%和6.30%；氮养分资源量约占全国的7.53%、7.28%、10.46%、4.85%和6.04%。而资源洼地主要集中在北京、天津、重庆、上海、浙江和海南，其畜禽粪便碳养分资源量分别约占全国的

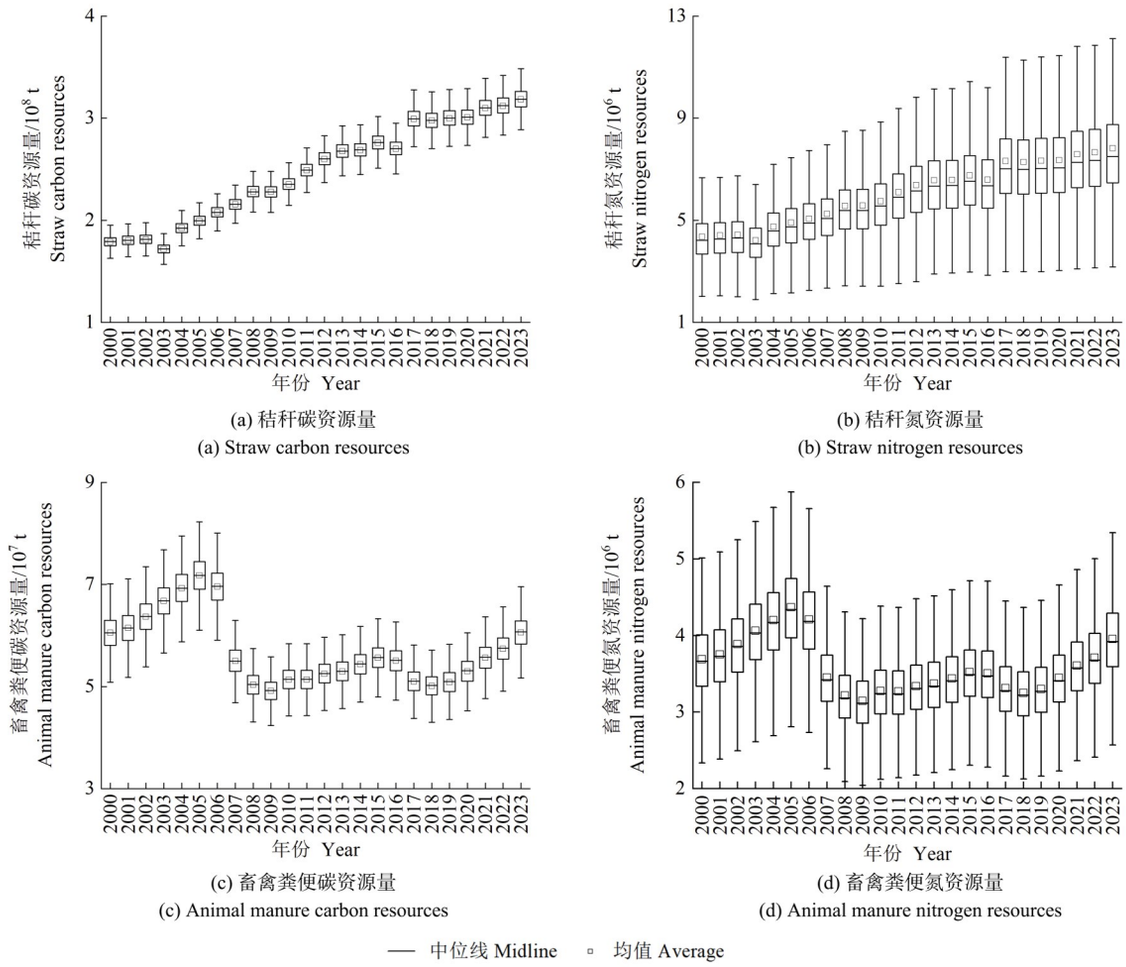


图 2　秸秆与畜禽粪便碳氮养分资源量

Fig 2　Carbon and nitrogen resources quantity of straw and animal manure

0.14%、0.45%、1.27%、0.12%、0.83% 和 0.52%；氮养分资源量分别约占全国的 0.14%、0.46%、1.30%、0.11%、0.94% 和 0.57%。

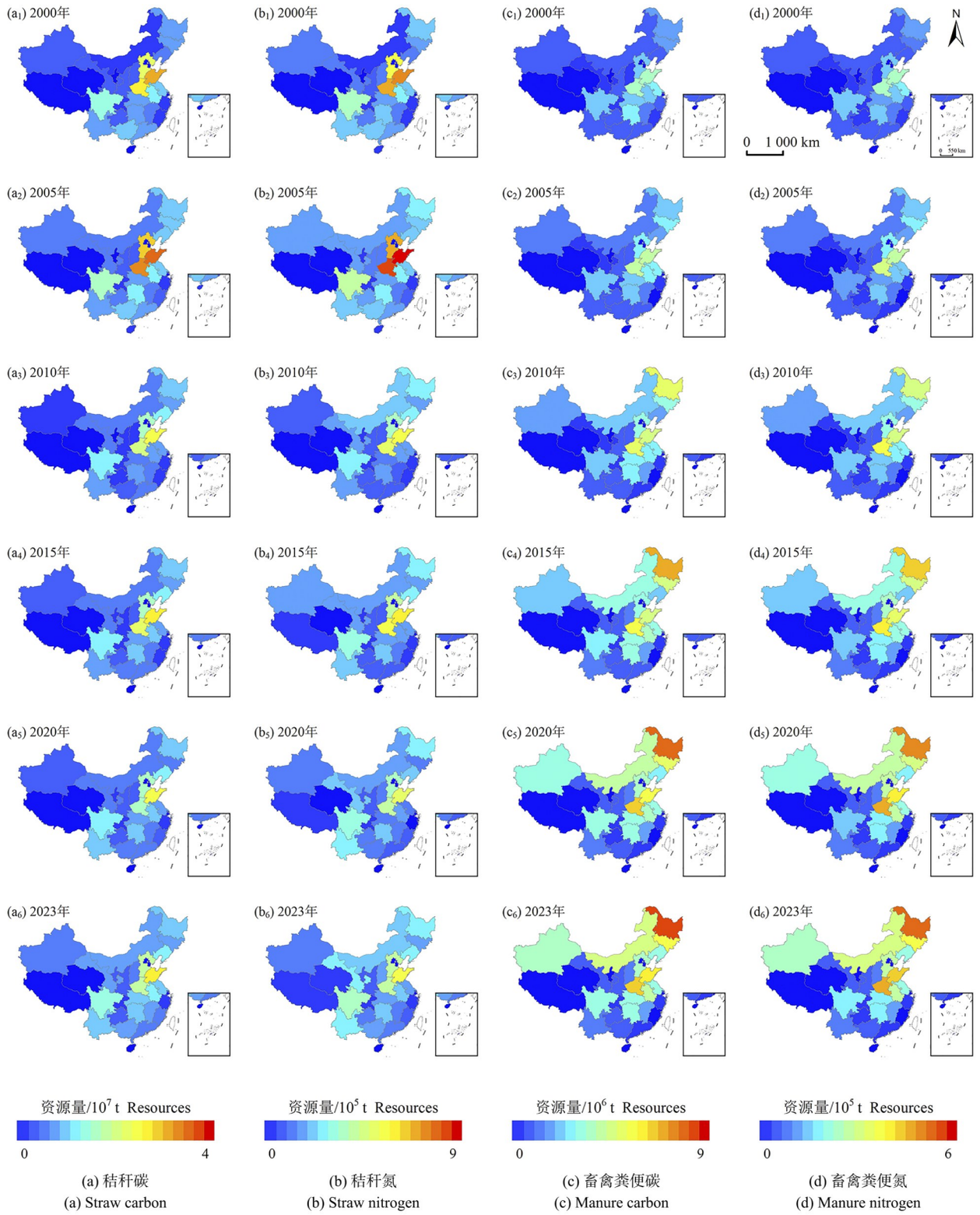
2.2　秸秆肥料化需求量估算结果

由图 4(a)可见，2000—2023 年中国秸秆肥料化需求量呈现“上升—下降—波动”的变化趋势。2009 年达到最小值 2.14×10^8 t，而波动变化到 2023 年时达到最大值 2.85×10^8 t。由图 4(b)可见，2000—2023 年中国秸秆肥料化需求比例呈现类似变化趋势。其中：该比例从 2000 年开始上升，到 2003 年达到最大值 59.31%；而波动变化期间在 2017 年达到最小 31.46%；到 2023 年中国秸秆肥料化需求比例为 37.01%。历年中国秸秆肥料化需求比例的中位值均低于 100%，这表明中国秸秆资源丰富，足以支撑畜禽粪便发酵需求。

由图 5 可见，2000—2023 年新疆、内蒙古和山西等 17 个省区市的秸秆肥料化需求比例中位值基本低于 50%。其中，新疆和内蒙古秸秆肥料化需求比例中位值一直维持在较低水平，分别为 5.79%～16.18% 和 6.03%～18.52%。四川、云南、天津、河北、辽宁、山东和贵州的秸秆肥料化需求比例中位值位于 50% 上下波动，分别为 35.98%～62.85%、40.69%～55.63%、28.10%～75.74%、27.13%～58.15%、27.77%～52.40%、30.98%～58.09% 和 24.19%～66.70%。广东和广西的秸秆肥料化需求比例中位值在 50%～100% 波动，分别为 62.94%～91.27% 和 50.54%～80.98%。北京、福建、西藏和海南的秸秆肥料化需求比例中位值在 100% 左右波动，分别为 38.68%～178.40%、61.46%～216.71%、87.89%～251.80% 和 91.52%～175.50%。

2.3　情景分析结果

由图 6 可见，随着秸秆肥料化需求比例从 2.5%



基于审图号 GS(2024)0650 的标准地图,底图无修改。统计数据未包含港、澳、台地区。下同。

Based on the standard map with review number GS(2024)0650, and no modifications made to the base map. Data do not include those of Hong Kong, Macao, and Taiwan regions. The same applies below.

图 3 2000—2023 年中国 31 个省区市秸秆和畜禽粪便碳氮养分资源的空间分布特征

Fig. 3 Spatial distribution characteristics of carbon and nitrogen resources from straw and animal manure in 31 provinces of China from 2000 to 2023

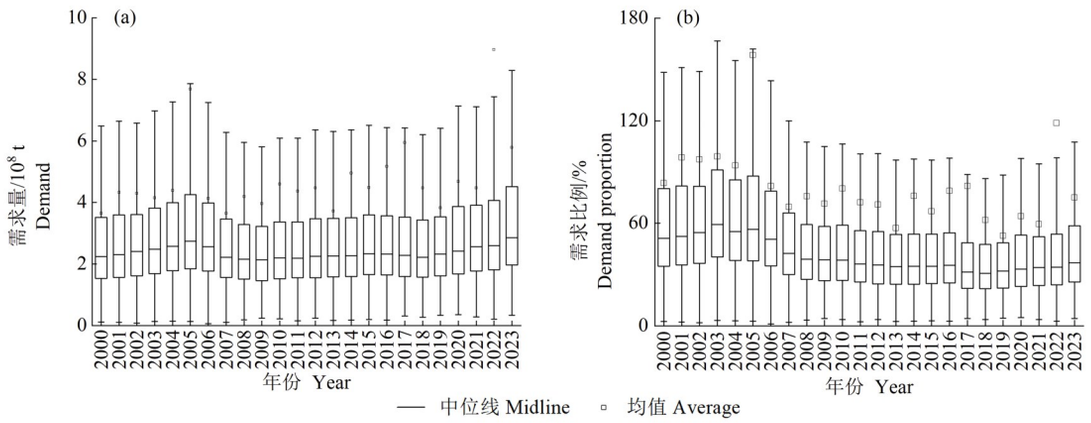


图 4　2000—2023 年中国秸秆肥料化需求量(a)和需求比例(b)

Fig. 4　Straw fertilization demand (a) and demand proportion (b) in China from 2000 to 2023

增长到 10%，中国畜禽养殖增量呈现正增长，中位值从 5.39×10^8 头增长到 2.15×10^9 头。当秸秆肥料化需求比例增长 10% 时，黑龙江、河南和吉林的畜禽养殖增量中位值为全国前 3，分别为 3.20×10^8、2.20×10^8 和 1.93×10^8 头，约占全国的 14.93%、10.24% 和 8.99%。河北、内蒙古、辽宁、山东和新疆的畜禽养殖增量中位值也处于较高水平，分别为 1.49×10^8、1.91×10^8、1.07×10^8、1.45×10^8 和 1.79×10^8 头，约占全国的 35.95%。而 2023 年福建、海南、西藏秸秆肥料化需求比例的中值均高于 100%（图 5），导致无论需求比例如何增长，均无畜禽养殖增量。

3　讨　论

3.1　与行业标准估算结果的对比分析

本研究依据秸秆与畜禽粪便的碳氮养分资源，以碳氮比为关键参数，当秸秆肥料化需求比例为 10% 时，河北、内蒙古、吉林、黑龙江、山东、河南、四川和新疆的畜禽养殖增量上下四分位点范围分别为 3.73×10^7～1.49×10^8、4.77×10^7～1.91×10^8、4.83×10^7～1.93×10^8、8.01×10^7～3.20×10^8、3.64×10^7～1.45×10^8、5.50×10^7～2.20×10^8、2.05×10^7～0.81×10^8 和 4.45×10^7～1.79×10^8 头。同时，根据行业标准 NY/T 3877—2021《畜禽粪便土地承载力测算方法》[28]，以农作物氮养分需求与畜禽粪肥氮养分供给平衡为基础，估算出河北、内蒙古、吉林、黑龙江、山东、河南、四川和新疆的畜禽养殖增量上下四分位范围分别为 9.95×10^7～2.50×10^8、1.23×10^8～2.69×10^8、6.27×10^7～1.83×10^8、1.97×10^8～3.65×10^8、1.05×10^8～2.32×10^8、2.44×10^8～4.55×10^8、9.87×10^7～1.77×10^8、5.35×10^7～9.95×10^7 头，将本研究估算畜禽养殖增量结果与行业标准估算结果相近，均具有较大的养殖增量，但数值存在一定差异。这主要是因为本研究着力于解决畜禽粪便好氧堆肥或厌氧发酵工程的物料需求，而行业标准核心是解决畜禽粪肥养分供需平衡。两者均是助力畜禽粪便肥料化利用，只是本研究在工程处理阶段，而行业标准在粪肥施用阶段。

3.2　蒙特卡洛法在农业废弃物养分资源量估算中的应用

秸秆与畜禽粪便作为重要的农业废弃物，其资源化利用是农业绿色发展的重要研究内容。秸秆与畜禽粪便的碳、氮养分资源量，是开展资源化利用研究的基础数据，影响政府政策制定与工程技术研发。然而，已有研究在核算其养分资源量时，主要采用的是将碳或氮质量分数的均值代入计算获得[2,29-30]。这些研究忽略了秸秆与畜禽粪便的碳或氮质量分数具有较强的变异性问题。因此，本研究选用了蒙特卡洛法与 Copula 函数，尝试估算了秸秆与畜禽粪便的碳、氮养分资源量范围，并解决碳、氮质量分数相互关联问题，为更准确评估农业废弃物养分资源量提供了一种新的研究思路。

3.3　聚焦重点区域，加强农业废弃物肥料化利用

从秸秆肥料化需求比例估算结果可知，福建、海南、西藏秸秆肥料化需求比例长期在 100% 左右波动，存在秸秆资源供需失衡问题与环境污染风险（图 5）。例如，由于秸秆碳源不足，导致畜禽粪便发酵碳氮比失衡，降低有机肥品质和增加温室气体排放[10]。为应对该问题，各地积极推进相关政策实

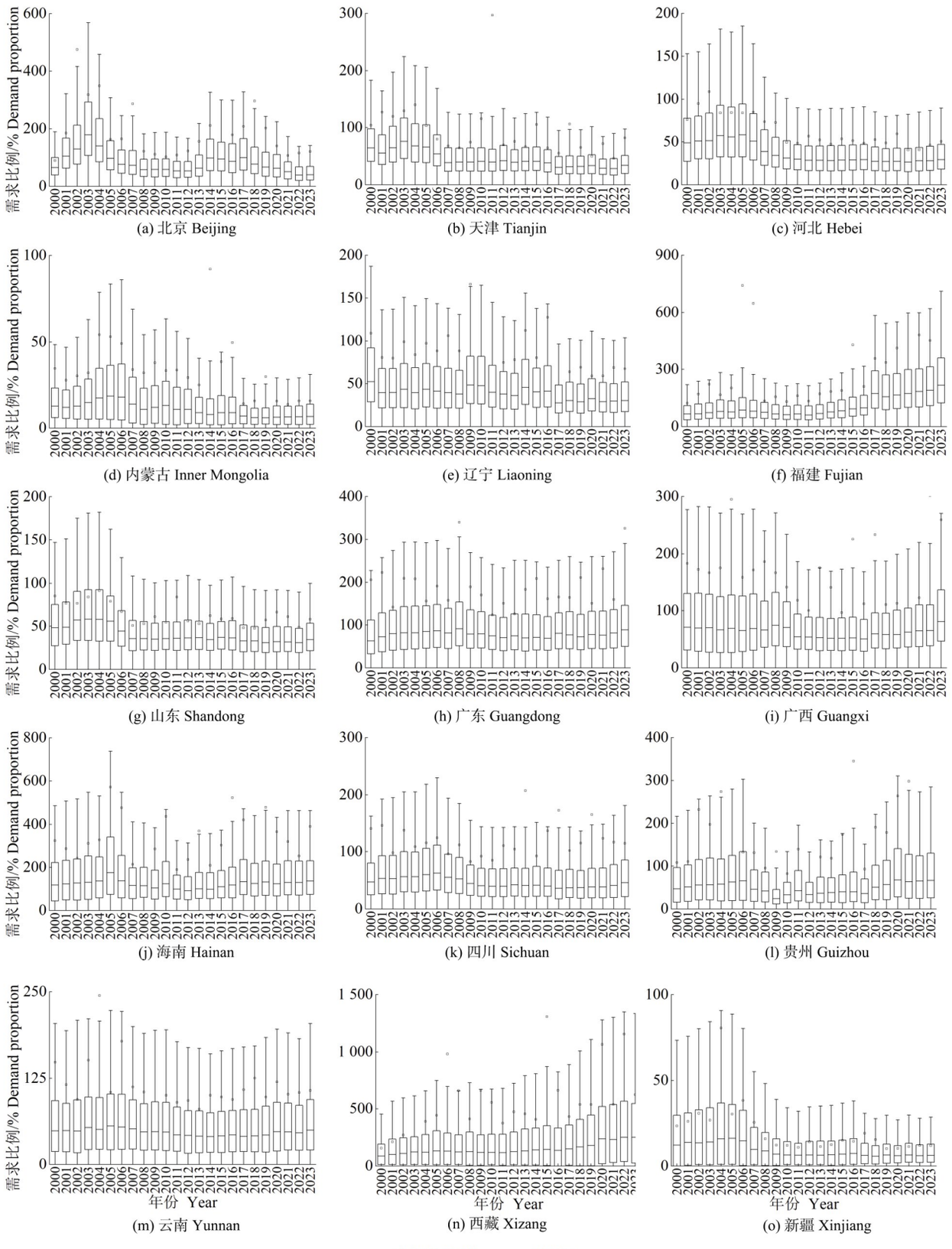


图 5 2000—2023 年我国典型省区市秸秆肥料化需求比例

Fig. 5 Demand proportion of straw conversion to fertilizer in 31 provinces of China from 2000 to 2023

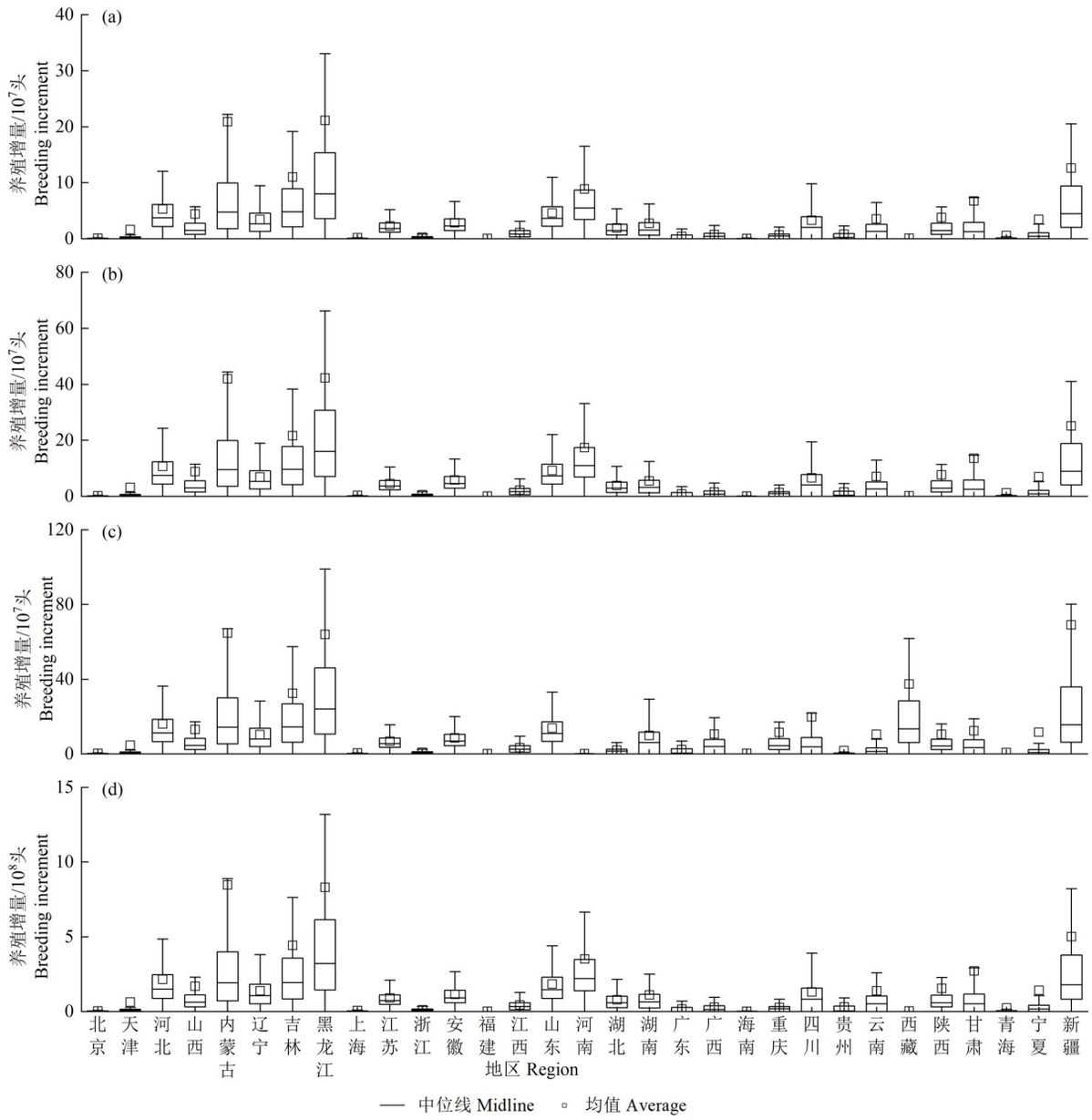


图 6　秸秆肥料化需求比例分别增长 2.5%(a)、5.0%(b)、7.5%(c)和 10.0%(d)时 31 个省区市的畜禽养殖增量

Fig. 6　Animal and poultry breeding increments of 31 provinces when the demand proportion increases by 2.5% (a), 5.0% (b), 7.5% (c) and 10.0% (d), respectively

施，改善秸秆资源供需失衡问题。福建通过秸秆综合利用项目和农业绿色发展先行区建设项目，对实施农作物秸秆离田后作为有机肥原料的经营主体进行补助 100 元/t，高于秸秆直接粉碎还田机补助 60 元/亩[31-32]，调动农户收集与利用秸秆的积极性。海南秸秆综合利用方案指出，推动秸秆高效离田，培育秸秆收储运社会化服务组织，完善秸秆收储运体系，在养殖集中地区投资建设有机肥厂，推进秸秆肥料化利用[33]；并且发掘与利用本地桑树、荔枝等特色作物秸秆资源[34]，弥补秸秆资源不足的情况。

新疆、内蒙古、山西等 17 个省区市的秸秆肥料化需求比例中位值长期低于 50%（图 5）。一方面，凭借丰富的秸秆资源，上述 17 个省份可以适当提高畜禽养殖规模（图 6），这也符合当地扩大畜禽养殖规模的政策导向。例如，新疆强化地方特色品种保护选育与良种推广，完善基础设施、延伸产业链、扩大养殖量，计划到 2030 年牲畜出栏率要提高

10%[35]。内蒙古大力建设国家重要农畜产品生产基地，构建现代畜牧养殖、饲草饲料保障体系，保证“十四五”期全区存栏奶牛、肉羊、肉牛分别达到350万头、6 000万只、1 000万头[36]。山西将优化产业结构、强化科技支撑、完善产业链条，计划全省年出栏生猪、肉鸡、肉牛分别达1 200万头、25 000万只、682万只，存栏奶牛达50万头[37]。另一方面，这17个省份拥有丰富的秸秆资源，四川可以向邻近的西藏、青海，江西可以向福建调运秸秆资源，缓解秸秆资源供需不平衡的问题，促进秸秆资源高效利用。

3.4 与秸秆资源量相关研究的对比分析

已有关于秸秆资源量的研究主要集中在秸秆资源量估算、利用途径分析和肥料化利用潜力评价。在秸秆资源量估算方面，已有研究主要采用草谷比和可收集系数来核算作物秸秆资源量。2022年我国秸秆可收集量为86 429.01万t，其中华东区的秸秆资源总量最高，达到19 439.22万t，而西北区和华南区的秸秆资源总量最少，分别为6 688.02万和7 312.03万t[38]。在秸秆资源利用途径研究方面，已有研究主要通过调研走访或调查统计数据的形式，确定秸秆资源的利用结构。例如廖羚伶等[39]分析农作物秸秆资源台账发现，广西壮族自治区秸秆饲料化利用量占据最大份额，燃料化利用量次之。于博洋等[40]利用调查问卷分析发现，吉林省秸秆利用结构以能源化、饲料化和肥料化利用为主，占比分别是56.33%、25.65%和15.32%。在秸秆肥料化利用潜力评价方面，已有研究普遍将秸秆资源量换算成养分量，进而分析该养分量对于化肥的替代比例。四川成都平原地区作物秸秆还田带来氮31.72 kg/hm^2、五氧化二磷14.06 kg/hm^2、氧化钾113.58 kg/hm^2，对化肥的替代率达到了31.08%、29.69%和437.22%[41]。吉林水稻秸秆全量还田对氮、五氧化二磷和氧化钾的平均替代比例分别为15.16%、18.50%和11.06%，玉米分别为15.66%、19.42%和78.13%，大豆分别为27.26%、6.96%和43.35%，可以节约化肥47.22亿元[42]。

3.5 研究展望

本研究系统厘清了2000—2023年中国秸秆与畜禽粪便碳氮养分资源的时空演变规律，建立了面向畜禽粪便发酵的秸秆肥料化需求量估算方法，为农业废弃物资源化利用政策制定提供了量化依据，但仍有不足之处。在养分参数层面，本研究暂未充分考虑农作物品种更替、种植制度变化及秸秆还田政策变迁对碳氮养分参数的动态影响。未来可结合长期定位监测数据构建养分参数动态修正机制，进一步提升计算精度。在空间尺度层面，本研究以省级行政单元为基础开展核算分析，后续可向下细化至市、县域等尺度开展精细化测算，更好地支撑地方秸秆资源管理与跨区域调配。

4 结 论

本研究构建了面向畜禽粪便发酵的秸秆肥料化需求量估算方法，核算2000—2023年中国秸秆与畜禽粪便碳氮养分资源量、秸秆肥料化需求量和需求比例。主要结论如下：

1）2000—2023年，中国秸秆碳、氮养分资源量均呈“下降—上升—波动”变化，2023年的中位值分别达3.19×10^8、7.49×10^6 t；畜禽粪便碳、氮养分资源量呈“上升—下降—波动”变化，2023年其中位值分别为6.07×10^7、3.92×10^6 t。

2）2000—2023年中国秸秆肥料化需求量和需求比例均呈现“上升—下降—波动”的变化趋势，2023年中国秸秆肥料化需求量和需求比例中位值分别为2.85×10^8 t和37.01%。

3）当秸秆肥料化需求比例增长10%，中国畜禽养殖增量中位值为2.15×10^9头。

因此，本研究建议：福建、海南、西藏完善秸秆收储运体系，从资源丰富区域调运秸秆，开发特色作物秸秆资源利用，缓解秸秆肥料化供需失衡问题；新疆、内蒙古、山西等17个省区市可凭借丰富秸秆资源，适当扩大畜禽养殖规模，并向资源匮乏地区提供秸秆。

参考文献 References

[1] 丛宏斌，姚宗路，赵立欣，孟海波，王久臣，霍丽丽，袁艳文，贾吉秀，谢腾，吴雨浓. 中国农作物秸秆资源分布及其产业体系与利用路径[J]. 农业工程学报，2019，35(22)：132-140
Cong H B，Yao Z L，Zhao L X，Meng H B，Wang J C，Huo L L，Yuan Y W，Jia J X，Xie T，Wu Y N. Distribution of crop straw resources and its industrial system and utilization path in China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*，2019，35(22)：132-140 (in Chinese)

[2] 石晓晓，郑国砥，高定，陈同斌. 中国畜禽粪便养分资源总量及替代化肥潜力[J]. 资源科学，2021，43(2)：403-411
Shi X X，Zheng G D，Gao D，Chen T B. Quantity of available nutrient in livestock manure and its potential of replacing chemical fertilizers in China [J]. *Resources Science*，2021，43(2)：403-411 (in Chinese)

[3] 程正涛，徐彪，刘治航，李忠华，张无敌，梁承月．云南省农作物秸秆资源量及沼气化碳减排效益分析[J]．环境科学与技术，2025，48(9)：210-220
Cheng Z T，Xu B，Liu Z H，Li Z H，Zhang W D，Liang C Y．Analysis of crop straw resources and carbon emission reduction benefits from biogas production in Yunnan Province[J]．*Environmental Science & Technology*，2025，48(9)：210-220(in Chinese)

[4] 马荣辉，杨武杰，于蕾，杨泽龙，王健，郭跃升．山东省作物秸秆和畜禽粪尿有机肥资源现状及替代化肥潜力分析[J]．中国农业科学，2024，57(4)：721-739
Ma R H，Yang W J，Yu L，Yang Z L，Wang J，Guo Y S．Investigation on potential of replacing chemical fertilizer for crop straw and livestock manure organic fertilizer in Shandong province[J]．*Scientia Agricultura Sinica*，2024，57(4)：721-739(in Chinese)

[5] 宋大刚，胡晗颖，卢兰，冯海军．1988-2018年青藏高原玉米秸秆资源时空分布特征及还田替代化肥潜力[J]．应用与环境生物学报，2024，30(6)：1124-1132
Song D G，Hu H Y，Lu L，Feng H J．Characteristics of spatial and temporal distribution of maize straw resources and the potential of returning as chemical fertilizer in the Qinghai-Xizang Plateau，1988-2018[J]．*Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*，2024，30(6)：1124-1132(in Chinese)

[6] Lian Q J，Qi J，Huang D B，Song W，Yuan J．Carbon to nitrogen ratio and organic loading rate optimization of sewage sludge and rice straw：Economic analysis and anaerobic digestion process understandings through machine learning[J]．*Energy*，2025，330：136789

[7] Zhan Y H，Zhu J，Xiao Y T，Wu S，Ndeddy A R．Efficient methane production from anaerobic co-digestion of poultry litter with wheat straw in sequencing batch reactor：Effects of carbon-to-nitrogen ratio，total solids，and hydraulic retention time[J]．*Bioresource Technology*，2023，381：129127

[8] Hua D L，Hou X H，Zhao Y X，Xu H P，Meng G F，Jin F Q，Li Y．Pre-digestion of corn straw with kitchen waste improves synergistic methanogenic profiles at different carbon-to-nitrogen ratios[J]．*Industrial Crops and Products*，2024，222：120099

[9] Jia P H，Huang Y M，Wang X Y，Zhu Z L，Dou Y X，Huang Q，Zha S M，Wang A W．Mechanisms of chemical polymers and microbial residues in affecting organic matter stabilization under varying carbon/nitrogen ratios during composting[J]．*Chemical Engineering Journal*，2025，513：162879

[10] Chen Y F，Xu J G，Liu B，Zhang Z，Xu M．The biological mechanism of a lower carbon/nitrogen ratio increases methane emissions during vegetable waste composting[J]．*Science of the Total Environment*，2024，955：177297

[11] 国家统计局农村社会经济调查司．中国农村统计年鉴2025[M]．北京：中国统计出版社，2025
National Bureau of Statistics Rural Social and Economic Survey Department．*China Rural Statistical Yearbook* 2025[M]．Beijing：China Statistics Press，2025(in Chinese)

[12] 农业农村部．农业农村部办公厅关于做好农作物秸秆资源台账建设工作的通知[EB/OL]．(2019-02-20)[2026-02-01]．https://www.moa.gov.cn/nybgb/2019/201902/201905/t20190518_6309472.htm
Ministry of Agriculture and Rural Affairs．Notice of the General Office of the Ministry of Agriculture and Rural Affairs on establishing crop straw resource ledgers[EB/OL]．(2019-02-20)[2026-02-01]．https://www.moa.gov.cn/nybgb/2019/201902/201905/t20190518_6309472.htm(in Chinese)

[13] Wang X L，Yang Z L，Liu X，Huang G Q，Xiao W H，Han L J．The composition characteristics of different crop straw types and their multivariate analysis and comparison[J]．*Waste Management*，2020，110：87-97

[14] 生态环境部第二次全国污染源普查工作办公室．第二次全国污染源普查产排污系数手册[M]．北京：中国环境出版集团，2020
Second National Pollution Source Census Office of the Ministry of Ecology and Environment．*Compilation of Pollution Generation and Discharge Coefficients from the Second National Pollution Source Census*[M]．Beijing：China Environmental Publishing Group，2020(in Chinese)

[15] 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
Dong H M．*Manual for Manure Pollution Accounting Methodology and Discharge Coefficients of Animal Production*[M]．Beijing：Science Press，2019(in Chinese)

[16] 包维卿，刘继军，安捷，谢光辉．中国畜禽粪便资源量评估相关参数取值商榷[J]．农业工程学报，2018，34(24)：314-322
Bao W Q，Liu J J，An J，Xie G H．Discussion on value-taking of relative parameters for assessment of livestock and poultry excrement resource in China[J]．*Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*，2018，34(24)：314-322(in Chinese)

[17] Wang X L，Yang Z L，Liu X，Huang G Q，Xiao W H，Han H J．Characteristics and Non-parametric Multivariate Data Mining Analysis and Comparison of Extensively Diversified Animal Manure[J]．*Waste and Biomass Valorization*，2021，12(5)：2343-2355

[18] 李丹阳，亓传仁，卫亚楠，李国学．中国北方地区羊养殖业产污系数测算研究[J]．农业工程学报，2021，37(6)：220-227
Li D Y，Qi C R，Wei Y N，Li G X．Measurement of pollution production coefficient of sheep breeding industry in Northern China[J]．*Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*，2021，37(6)：220-227(in Chinese)

[19] 李季，彭生平，李国学．堆肥工程实用手册[M]．3版．北京：化学工业出版社，2025
Li J，Peng S P，Li G X．*Practical Handbook for Composting Engineering*[M]．3rd ed．Beijing：Chemical Industry Press，2025(in Chinese)

[20] 齐岳．沼气工程建设手册[M]．北京：化学工业出版社，2013
Qi Y．*Biogas Engineering Construction Manual*[M]．Beijing：Chemical Industry Press，2013(in Chinese)

[21] 鲍士旦．土壤农化分析[M]．3版．北京：中国农业出版社，2000
BAO S D．*Soil and Agricultural Chemical Analysis*[M]．3rd ed．Beijing：China Agriculture Press，2000(in Chinese)

[22] 楚天舒，陈晨晨，贺雪妮，任一哲，杨行，赵智强，张起赫，廖科科，汤树生．面向土壤酸化防控的畜禽粪便农田承载力估算[J]．江西农业大学学报，2025，47(2)：548-556
Chu T S，Chen C C，He X N，Ren Y Z，Yang H，Zhao Z Q，Zhang Q H，Liao K K，Tang S S．Estimation of farmland carrying capacity of animal and poultry manure in soil acidification prevention and control[J]．*Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis*，2025，47(2)：548-556(in Chinese)

[23] 米子甲，李想，沈延青，乔海山，白音包力皋，王战策，祁善胜，包娟．基于Copula函数和蒙特卡洛法的黄河上游多站径流相关分析与随机模拟[J]．水利水电技术，2025，56(12)：67-86
Mi Z J，Li X，Shen Y Q，Qiao H S，Bai Y B L G，Wang Z C，Qi S S，Bao

J. Correlation analysis and stochastic simulation of multi-station runoff in the Upper Yellow River based on copula functions and Monte Carlo Method[J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2025, 56(12): 67-86 (in Chinese)

[24] Nelson R B. *Dependence Modeling with Copulas*[M]. New York: Springer, 2006

[25] NELSON R B. *An Introduction to Copulas*[M]. 2nd ed. New York: Springer, 2006

[26] 李洪敏, 任仲秋. 京津冀城市群大气复合污染预测与动态交叉传导特征分析[J]. 环境科学, 2026, 47(1): 210-222
Li H M, Ren Z Q. Characterization of atmospheric composite pollution prediction and dynamic cross-transmission in the Beijing-Tianjin-Hebei Urban Agglomeration [J]. *Environmental Science*, 2026, 47(1): 210-222 (in Chinese)

[27] 乌日娜, 张海霞, 赵金名, 曹永强. 基于气候情景的中国北方草原复合干热事件时空演变特征研究[J]. 生态学报, 2026, 46(9): 4865-4881
Wu J N, Zhang H X, Zhao J M, Cao Y Q. Study on spatiotemporal evolution characteristics of compound drought-heat events in northern China grasslands based on climate scenarios[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2026, 46(9): 4865-4881 (in Chinese)

[28] NY/T 3877—2021. 畜禽粪便土地承载力测算方法[S]. 北京: 中国农业出版社, 2021
NY/T 3877—2021 Method for calculating land carrying capacity of animal and poultry manure[S]. Beijing: China Agriculture Press, 2021 (in Chinese)

[29] 徐少奇, 陈文杰, 解林奇, 柴胜阳, 贾凯雪, 魏雨泉. 我国有机废弃物资源总量及养分利用潜力[J]. 植物营养与肥料学报, 2022, 28(8): 1341-1352
Xu S Q, Chen W J, Xie L Q, Chai S Y, Jia K X, Wei Y Q. Organic waste resources and nutrient utilization potential in China[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2022, 28(8): 1341-1352 (in Chinese)

[30] 刘俊杰, 严晓斌, 张美怡, 刘天舒, 孙志梅. 中国农作物秸秆资源产量分布及利用分析[J]. 农业资源与环境学报, 2025, 42(3): 751-760
Liu J J, Yan X B, Zhang M Y, Liu T S, Sun Z M. Analysis of yield distribution and utilization of crop straw resources in China[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2025, 42(3): 751-760 (in Chinese)

[31] 漳浦县人民政府. 2025年农作物秸秆综合利用项目政策公开[EB/OL]. [2025-02-01]. http://www.zhangpu.gov.cn/cms/html/zpxrmzf/2025-08-28/692820259.html
People's Government of Zhangpu County. Notice on the public disclosure of the 2025 crop straw comprehensive utilization project policies[EB/OL]. [2025-02-01]. http://www.zhangpu.gov.cn/cms/html/zpxrmzf/2025-08-28/692820259.html (in Chinese)

[32] 福建省农业农村厅. 2025年农业绿色发展先行区建设项目[EB/OL]. [2025-02-01]. https://nynct.fujian.gov.cn/xxgk/czzj/zjzcgk/202503/t20250304_6772136.htm
Department of Agriculture and Rural Affairs of Fujian Province. Construction project of pilot zones for Agricultural Green Development in 2025[EB/OL]. [2025-02-01]. https://nynct.fujian.gov.cn/xxgk/czzj/zjzcgk/202503/t20250304_6772136.htm (in Chinese)

[33] 海南省农业农村厅. 海南省2024年农作物秸秆综合利用重点县实施方案[EB/OL]. [2025-02-01]. https://agri.hainan.gov.cn/hnsnyt/xxgk/tzgg/xztz/202411/P020241119369468721796.pdf
Department of Agriculture and Rural Affairs of Hainan Province. Implementation plan for key counties of comprehensive utilization of crop straw in Hainan Province in 2024[EB/OL]. [2025-02-01]. https://agri.hainan.gov.cn/hnsnyt/xxgk/tzgg/xztz/202411/P020241119369468721796.pdf (in Chinese)

[34] 海南省农业农村厅. 一吨农林废弃物换千元产值,秸秆"点草成金"[EB/OL]. [2025-02-01]. https://agri.hainan.gov.cn/hnsnytywdt/zwdt/202307/t20230703_3446044.html
Department of Agriculture and Rural Affairs of Hainan Province. One ton of agroforestry waste generates one thousand yuan in output value, and straw realizes the transformation of "Turning Grass into Gold"[EB/OL]. [2025-02-01] https://agri.hainan.gov.cn/hnsnytywdt/zwdt/202307/t20230703_3446044.html (in Chinese)

[35] 新疆维吾尔自治区人民政府. 关于印发《新疆草原畜牧业转型升级规划(2023—2030年)》的通知[EB/OL]. [2025-02-01]. https://www.xinjiang.gov.cn/xinjiang/zfgbml/202311/27f303027bf24221bc1c8f1e50b17865.shtml
People's Government of Xinjiang Uygur Autonomous Region. Notice on issuing the Xinjiang grassland animal husbandry transformation and upgrading plan (2023-2030) [EB/OL]. [2025-02-01]. https://www.xinjiang.gov.cn/xinjiang/zfgbml/202311/27f303027bf24221bc1c8f1e50b17865.shtml (in Chinese)

[36] 内蒙古自治区农牧厅.《内蒙古自治区"十四五"畜牧业高质量发展规划》[EB/OL]. [2025-02-01]. https://nmt.nmg.gov.cn/gk/zfxxgk/fdzdgknr/ghjh/202303/t20230301_2265173.html
Department of Agriculture and Animal Husbandry of Inner Mongolia Autonomous Region. The high-quality development of animal husbandry in Inner Mongolia autonomous region during the 14th Five-year Plan Period [EB/OL]. [2025-02-01]. https://nmt.nmg.gov.cn/gk/zfxxgk/fdzdgknr/ghjh/202303/t20230301_2265173.html (in Chinese)

[37] 山西省农业农村厅. 关于印发《山西省"十四五"畜牧兽医行业发展规划》的通知[EB/OL]. [2025-02-01]. https://www.weihengag.com/home/article/detail/id/19960
Department of Agriculture and Rural Affairs of Shanxi Province. Notice on issuing the Development Plan for Animal Husbandry and Veterinary Industry in Shanxi Province during the 14th Five-year Plan Period[EB/OL]. [2025-02-01]. https://www.weihengag.com/home/article/detail/id/19960 (in Chinese)

[38] 刘俊杰, 严晓斌, 张美怡, 刘天舒, 孙志梅. 中国农作物秸秆资源产量分布及利用分析[J]. 农业资源与环境学报, 2025, 42(3): 751-760
Liu J J, Yan X B, Zhang M Y, Liu T S, Sun Z M. Analysis of yield distribution and utilization of crop straw resources in China[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2025, 42(3): 751-760 (in Chinese)

[39] 廖羚伶, 游群, 虢锐, 苏天明, 王渝婷. 广西农作物秸秆资源及综合利用情况研究[J]. 山西农经, 2026(11): 113-115
Liao L L, You Q, Guo R, Su T M, Wang Y T. Study on crop straw resources and its comprehensive utilization in Guangxi [J]. *Shanxi Agricultural Economy*, 2026(11): 113-115 (in Chinese)

[40] 于博洋, 万畅, 于童, 姜婷婷, 荀其蕾, 李明, 李忠和, 那伟. 吉林省秸秆资源利用现状分析与优化对策[J]. 安徽农业科学, 2026, 54(6): 63-67
Yu B Y, Wan C, Yu T, Jiang T T, Xun Q L, Li M, Li Z H, Na W. Analysis of the current status and research on optimization strategies of straw resource

utilization in Jilin Province[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2026, 54(6): 63-67 (in Chinese)

[41] Wang Y, Liang B Q, Bao H, Chen Q, Cao Y L, He Y Q, Li L Z. Potential of crop straw incorporation for replacing chemical fertilizer and reducing nutrient loss in Sichuan Province, China[J]. *Environmental Pollution*, 2023, 320: 121034

[42] 刘慧, 王雪怡, 姜海洋, 杨丽娟, 刘玉凤, 张国显. 吉林省主要作物秸秆养分资源量及其还田替代化肥潜力[J]. 植物营养与肥料学报, 2026, 32(5): 979-993
Liu H, Wang X Y, Jiang H Y, Yang L J, Liu Y F, Zhang G X. Nutrient resource quantities in major crop straws and their potential for replacing chemical fertilizers through complete return to soil in Jilin Province[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2026, 32(5): 979-993 (in Chinese)

责任编辑：杨爱东



第一作者简介：楚天舒，工学博士，中国农业大学资源与环境学院助理研究员。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2项，主持重点实验室开放基金等项目6项，以第一作者或通讯作者发表SCI、EI和核心期刊论文50余篇。



通讯作者简介：杨绣娟，博士，校聘副教授，河套学院农牧与食品学院专任教师，内蒙古自治区“英才兴蒙”工程第六类高层次人才。主要从事农作物生理生态及高产高效栽培技术研究；牵头或参与省、市、校级各类科研课题12项，主持自治区企业横向项目、市级社科项目、校级人才基金项目并顺利结题，参与多项自治区科技创新专项、重点研发计划及市级科技计划等在研课题；以第一作者发表（参与发表）18篇高水平学术论文；参编教材《农学概论（第3版）》；指导学生斩获中国国际大学生创新大赛（2025）内蒙古赛区选拔赛金奖，持续指导自治区级大学生创新创业训练计划项目，立足河套灌区农业发展开展技术研究，助力区域现代农牧业高质量发展。