



李一鸣, 陈晨, 赵智强, 蒲胜海, 马红红, 吴湘琳, 钱海峰, 楚天舒, 李晓红. 基于土壤有机碳密度变化率的畜禽粪便农田承载力估算[J]. 中国农业大学学报, 2024, 29(6): 240-248.

LI Yiming, CHEN Chenchen, ZHAO Zhiqiang, PU Shenghai, MA Honghong, WU Xianglin, QIAN Haifeng, CHU Tianshu, LI Xiaohong. Estimation on farmland bearing capacity of animal manure based on soil organic carbon density change rate[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2024, 29(6): 240-248.

DOI: 10.11841/j.issn.1007-4333.2024.06.24

基于土壤有机碳密度变化率的畜禽粪便农田承载力估算

李一鸣¹ 陈晨² 赵智强² 蒲胜海³ 马红红³ 吴湘琳³ 钱海峰⁴
楚天舒^{1*} 李晓红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. 新疆农业科学院 土壤肥料与农业节水研究所/农业农村部西北绿洲农业环境重点实验室, 乌鲁木齐 830091;

4. 黑龙江省农垦科学院, 哈尔滨 150038;

5. 中国农业大学 经济管理学院, 北京 100083)

摘要 为完善面向土壤固碳的畜禽粪便承载力估算方法研究, 以北大荒集团和新疆生产建设兵团种养业生产系统为研究对象, 根据种养业生产现状与农田土壤固碳机制, 以静稳态模型为基础, 构建基于土壤有机碳密度变化率的畜禽粪便农田承载力模型; 设定土壤有机碳密度变化率目标值, 估算每 hm^2 农田适宜施用畜禽粪便有机肥量与畜禽承载量。结果表明: 1) 当农田土壤有机碳密度维持当前水平, 北大荒集团和新疆生产建设兵团农田可承载的畜禽养殖量以猪当量计分别为180.5~832.1和14.7~327.6头/ hm^2 。2) 考虑土壤固碳需求, 两地畜禽养殖业未来发展潜力大。本研究成果可为区域种养结合与绿色低碳发展提供参考资料。

关键词 畜禽粪便农田承载力; 静稳态模型; 土壤有机碳密度变化率; 土壤固碳

中图分类号 X713

文章编号 1007-4333(2024)06-0240-09

文献标志码 A

Estimation on farmland bearing capacity of animal manure based on soil organic carbon density change rate

LI Yiming¹, CHEN Chenchen², ZHAO Zhiqiang², PU Shenghai³, MA Honghong³,
WU Xianglin³, QIAN Haifeng⁴, CHU Tianshu^{1*}, LI Xiaohong⁵

(1. College of Resources and Environmental Sciences, China Agricultural University, Beijing 100193, China;

2. College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China;

3. Research Institute of Soil, Fertilizer and Agricultural Water Conversation, Xinjiang Academy of Agricultural Sciences/Key Laboratory of Agro-Environment in Northwest Oasis, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Urumqi 830091, China;

4. Heilongjiang Academy of Agricultural Reclamation, Harbin 150038, China;

5. College of Economics and Management, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract To develop the estimation method of the bearing capacity of animal manure based on soil carbon sequestration, The agriculture and animal husbandry production system in Beidahuang Group (BG) and Xinjiang Production and Construction Corps (XPCC) were selected as the research objects. According to

收稿日期: 2023-10-26

基金项目: 农业科技创新稳定支持项目(xjnywdzc-2023005-6); “天池英才”引进计划; 国家现代农业产业技术体系建设专项资金(CARS-01-63); 农业农村部西北绿洲农业环境重点实验室开放基金(XBLZ-20225); 国家环境保护土壤环境管理与污染控制重点实验室开放课题

第一作者: 李一鸣(ORCID:0009-0004-6630-6093), 博士研究生, E-mail: 389088160@qq.com

通讯作者: 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

the current situation of the agriculture and animal husbandry industry and farmland soil carbon sequestration mechanism, the farmland bearing capacity model of animal manure based on soil organic carbon density change rate was constructed. This model was based on the steady-state method from IPCC technical guidelines. The target value of soil organic carbon density change rate was set, and manure application amount and carrying capacity could be calculated through this model. The results showed that: 1) When the farmland soil organic carbon density remained at the current level, the bearing capacity of animal manure for BG and XPCC ranged from 180.5 to 832.1 and 14.7 to 327.6 pig equivalent per hectare, respectively. 2) Considering the demand for soil carbon sequestration, the amount of animal breeding would be increased in the future. This study provided reference materials for coupling crop and livestock production, green and low-carbon development.

Keywords bearing capacity of animal manure; steady-state method; soil organic carbon density change rate; soil carbon sequestration

人类活动直接或间接造成的温室气体排放是全球变暖的主要原因之一。政府间气候变化专门委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)发布报告指出,2007—2016年,农业生产温室气体排放量占人为温室气体排放总量的23%,而农田土壤固碳量约占陆地生态系统总固碳量的21%^[1]。因此,促进农田土壤固碳,已成为当前农业领域的重要研究课题。

在土壤有机碳宏观数据分析方面,韩天富等^[2]核算了农业农村部1 298个农田点位监测数据发现,中国农田土壤0~20 cm的有机碳密度约为35.13 t/hm²。Ren等^[3]计算了中国69个农田点位的有机碳变化数据发现,相比于不施肥和单施化肥,有机肥施用能提高土壤有机碳量0.23~0.26和0.18~0.19 g/(kg·a)。Du等^[4]运用荟萃分析法定量评价粪肥施用对土壤性质的影响程度发现,与化肥相比,施用有机肥能够显著提高土壤有机碳量17.7%。旱地和水田土壤有机碳密度分别能提升699.6和401.4 kg/(hm²·a)^[5]。在土壤有机碳长期定位试验方面,新疆乌鲁木齐^[6]、甘肃平凉^[7]、北京昌平^[8]和江西南昌^[9]的长期定位试验结果显示,与单施化肥相比,长期施用有机肥能提升土壤有机碳密度1 200、372、1 170和406 kg/(hm²·a)。Jin等^[10]分析了2万多户中国农村家庭调查数据发现,施用有机肥能加强种植业与养殖业的养分循环利用效率,减少化肥过量使用与畜禽粪污污染,促进农业绿色发展。由此可见,施用有机肥不仅能提升土壤有机碳密度,还能促进区域种养结合^[11]。畜禽粪便农田承载力是协调区域种养业的关键参数,王圣伟等^[12]考虑到畜禽粪便排泄系数不确定性问题,运用蒙特卡洛法分析黑龙江畜禽粪便农田承载力发现,当以磷养分为

计算基准时,大庆、绥化和牡丹江等7市农田出现超载情况。楚天舒等^[13]基于QUAL2K模型建立地表水水质响应模型,评估了江山港流域的畜禽粪便水环境承载力发现,江山港流域当前并未超载。但尚未有关于土壤有机碳密度的承载力研究报道。因此,如何根据农田土壤固碳机制,构建畜禽粪便农田承载力模型,优化出适宜畜禽养殖量,指导区域协同开展种养结合与土壤固碳减排工作,是当前亟需解决的科学问题。

因此,本研究拟选择北大荒集团和新疆生产建设兵团的种养业生产系统为研究对象,根据农田土壤固碳机制,以静稳态模型为基础,构建基于土壤有机碳密度变化率的畜禽粪便农田承载力模型;设置土壤有机碳密度变化率目标值,仿真分析每hm²农田适宜施用畜禽粪便有机肥量,估算其畜禽粪便农田承载力,以期为区域种养结合与绿色低碳发展提供参考资料。

1 材料与方法

1.1 研究对象

北大荒集团和新疆生产建设兵团分别位于黑龙江省和新疆维吾尔自治区内。种植业方面,北大荒集团和新疆生产建设兵团主要农作物生产全程机械化程度高,生产力水平发达。北大荒集团主要栽培作物为水稻、玉米和大豆,2020年粮食产量为213.4亿kg^[14],是我国重要的商品粮基地。新疆生产建设兵团主要栽培作物为棉花、小麦和玉米,其中,棉花面积86.5万hm²,产量213.4万t^[15],是我国重要的优质产棉区。养殖业方面,2020年北大荒集团和新疆生产建设兵团的肉类产量分别约为253万和50万t,禽蛋产量分别为117万和15万t^[14-15]。由

此可见,北大荒集团和新疆生产建设兵团的种植业占主导地位。

在耕地质量方面,北大荒集团以黑土为主,位于我国重要的黑土区;根据黑龙江海伦农田生态系统国家野外科学观测研究站和齐齐哈尔试验站的长期定位试验监测结果可知,在仅施用化肥的情况下,其土壤有机碳密度变化率为 $-670.4\sim-1.4\text{ kg/hm}^2$ ^[16-18],土壤有机碳呈现逐年下降趋势。新疆生产建设兵团以盐碱地为主,土壤肥力较低;根据国家土壤质量新市区观测实验站和塔里木大学试验站的长期定位试验监测结果可知,在仅施用化肥的情况下,土壤有机碳密度变化率为 $-461.1\sim-10.1\text{ kg/hm}^2$ ^[6,19],土壤有机碳库同样呈现逐年下降趋势。土壤有机碳库减少成为两地耕地质量提升所面临的核心问题之一。

1.2 研究内容

在种养业生产系统中,畜禽养殖产生的粪便经过好氧堆肥或厌氧发酵处理成为粪肥;科学规划粪肥施用量,不仅能促进土壤有机碳密度增加,提升耕地质量,而且能协调种养业生产规模,促进种养平衡。因此,本研究根据区域种养业实际生产与农田土壤固碳过程(图1),推导计算基于土壤有机碳

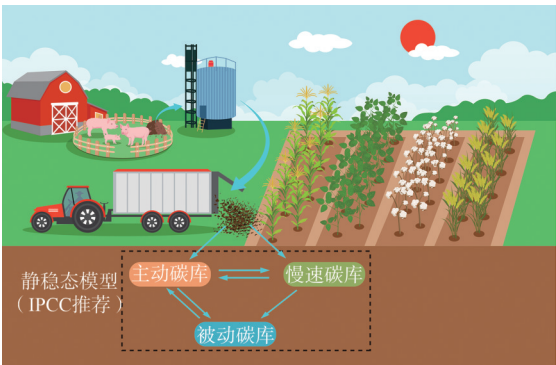


图1 种养业实际生产与农田土壤固碳过程示意图
Fig. 1 Schematic diagram of the actual production process of planting industry, breeding industry and farmland soil carbon sequestration

密度变化率的畜禽粪便农田承载力,具体计算流程见图2。根据国家“双碳”目标与耕地质量提升需求,本研究设置适当的农田土壤有机碳密度变化率的目标值,运用静稳态模型仿真分析,得到每 hm^2 农田适宜施用畜禽粪便有机肥量。进而,结合畜禽养殖参数、粪肥收集利用率和粪肥养分特性,推导出每 hm^2 农田可承载的畜禽养殖量(以猪当量计,全文同),作为其畜禽粪便农田承载力。

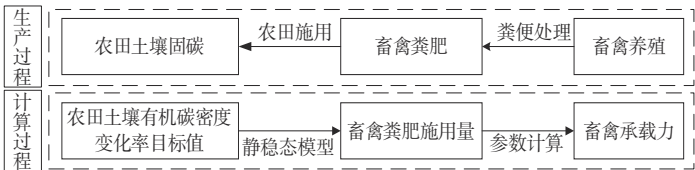


图2 畜禽粪便农田承载力计算流程示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the calculation process of farmland bearing capacity of animal manure

1.3 计算数据与方法

本研究设定农田土壤有机碳密度变化率的分析情景,运用静稳态模型仿真分析出畜禽粪便农田承载力。其中,静稳态模型被《2006年IPCC国家温室气体清单指南2019修订版》所推荐用于土壤有机碳密度变化率的计算,该模型改编自美国科罗拉多州立大学研发的CENTURY生态系统模型^[20]。土壤有机碳密度变化率计算如下:

$$\Delta C_{OG} = C_y - C_{y-1} \tag{1}$$

式中: ΔC_{OG} 为土壤有机碳密度变化率, kg/hm^2 ; C_y 和 C_{y-1} 分别为第 y 和 $y-1$ 年的土壤有机碳密度, kg/hm^2 ,采用式(2)计算:

$$C_y = A_y + S_y + P_y \tag{2}$$

式中: A_y 、 S_y 、 P_y 分别为第 y 年主动、慢速和被动3个碳库的有机碳密度, kg/hm^2 。其中,主动碳库是由微生物及其伴生代谢产物构成,周转速度快;慢速碳库具有中等稳定性和周转速度;被动碳库是由矿物碳和微生物分解产物构成,周转速度慢。在静稳态模型^[20]中输入土壤有机碳密度初始值 c_0 、第 y 年的畜禽粪肥碳输入量 c_{input} 、月平均温度 t 、月平均降水量 p 、月平均蒸散发量 e 、土壤含砂率 r_s 等计算获得3个碳库的有机碳密度,进而求得土壤有机碳密度变化率,部分输入参数的计算方法见式(3),计算所需参数详见表1。

$$\begin{cases} c_0 = 100w_0\rho h \\ c_{\text{input}} = m\alpha \\ m = n\omega zd(1 - r_i)/1000 \end{cases} \quad (3)$$

式中： w_0 为土壤有机碳质量分数，g/kg； ρ 为土壤容重，g/cm³； h 为耕层厚度，cm； m 为畜禽粪肥的氮量，kg； α 为畜禽粪肥碳氮比； n 为年畜禽养殖

量^[14-15]，头； ω 为畜禽体重^[21]，kg/头； z 为每 1 000 kg 体重的畜禽日排泄粪便氮量^[20]，kg/(1 000 kg·d)； d 为畜禽饲养时间^[21]，d； r_1 和 r_2 分别为好氧堆肥和厌氧发酵过程中氮损失率，%，该损失率包含了氨挥发、淋溶或径流、硝化反硝化等途径的氮损失，详见表 2。

表 1 土壤有机碳密度变化率的计算参数
Table 1 Calculation parameters of soil organic carbon density change rate

指标 Index	北大荒集团 BG	新疆生产建设兵团 XPCC	参考文献 Reference
土壤有机碳质量分数(w_0)/(g/kg) Soil organic carbon content	45.47	14.63	[22]
耕地土壤容重(ρ)/(g/cm ³) Soil bulk density of cultivated land	1.25	1.30	[23],[24]
耕层厚度(h)/cm Thickness of the tillage layer	25.27	28.30	[23],[24]
月平均温度(t)/℃ Average monthly temperature	3.23	10.32	[25]
月平均降水量(p)/mm Average monthly precipitation	46.12	13.60	[25]
月平均蒸散发量(e)/mm Average monthly evapotranspiration	62.07	92.84	[25]
土壤含砂率(r_s)/% Soil sand content	39	36	[26]

表 2 畜禽粪肥碳氮比与氮损失率
Table 2 C/N ratio of animal manure and nitrogen loss rate

指标 Index	生猪 Swine	奶牛 Dairy cattle	肉牛 Beef cattle	蛋鸡 Layer	肉鸡 Broiler	参考文献 Reference
畜禽粪肥的碳氮比(α) C/N ratio of animal manure	11	16	19	10	10	[20]
好氧堆肥的氮损失率(r_1)/% Nitrogen loss rate of aerobic composting	73	58	73	73	73	[20],[27]
厌氧发酵的氮损失率(r_2)/% Nitrogen loss rate of anaerobic digestion			28			[20],[27]

2 结果与分析

本研究根据畜禽粪便农田承载力计算流程(图 2)设定土壤有机碳密度变化率为 0(即农田土壤有机碳密度维持当前水平),使用式(1)~(3)和静稳态

模型推导出北大荒集团和新疆生产建设兵团的畜禽粪便农田承载力。

2.1 北大荒集团畜禽粪便农田承载力估算

图 3 示出北大荒集团畜禽粪便农田承载力估算结果:北大荒集团畜禽粪便农田承载力最低的是宝泉岭

分公司,其他分公司的承载力是宝泉岭分公司的1.02~1.72倍,分公司之间差异相对较小。采用好氧堆肥处理技术时,北大荒集团每 hm^2 农田可承载的奶牛、肉牛、蛋鸡、肉鸡和生猪养殖量平均分别为11.4头、

47.9头、6 153.9羽、31 781.1羽和651.1头。当采用厌氧发酵处理技术时,北大荒集团每 hm^2 农田可承载的奶牛、肉牛、蛋鸡、肉鸡和生猪养殖量平均分别为6.6头、17.9头、2 299.4羽、11 875.0羽和243.2头。

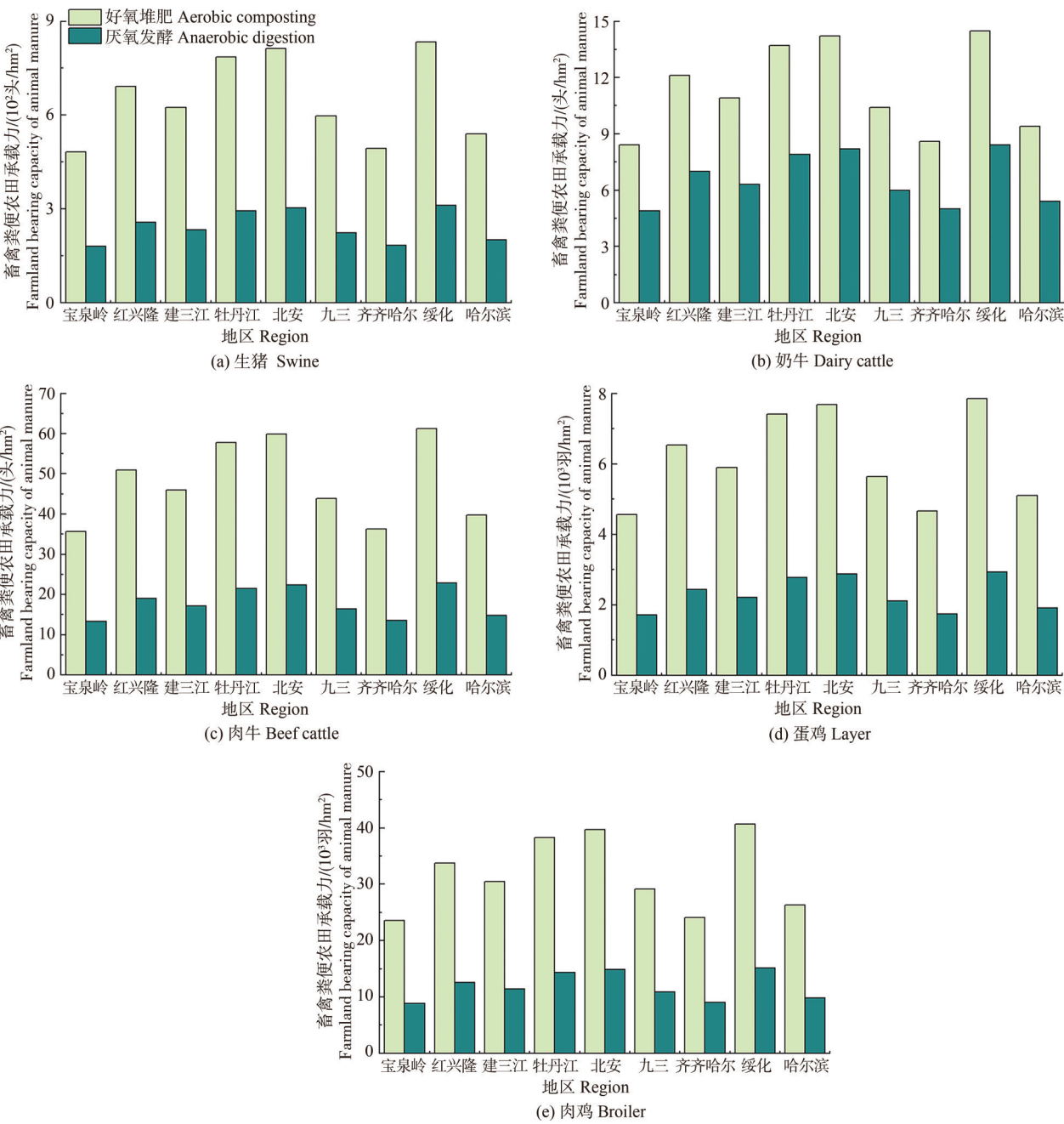


图3 北大荒集团畜禽粪便农田承载力估算结果

Fig. 3 Estimation result of farmland bearing capacity of animal manure in BG

2.2 新疆生产建设兵团畜禽粪便农田承载力估算

图4示出新疆生产建设兵团畜禽粪便农田承载力估算结果:新疆生产建设兵团畜禽粪便农田承载力最低的是第14师,其它师的承载力是第14师的

1.87~8.35倍,师之间差异相对较大,最高的是第9师。当采用好氧堆肥处理技术时,新疆生产建设兵团平均分别为3.3头、14.0头、1 794.1羽、9 265.7羽和189.6头。当采用厌氧发酵处理技术时,新疆生

产建设兵团平均分别为1.9头、5.2头、670.3羽、3462.1羽和70.8头。

从畜禽粪便农田承载力计算结果可知,采用厌氧发酵处理技术计算出的承载力低于好氧堆肥。主要是因为厌氧发酵过程中养分损失比例低于好氧堆肥,粪肥中养分留存率更高,所对应的每 hm^2 农田畜禽粪肥施用量与承载力相对较低。

总的来说,当农田土壤有机碳密度维持当前水

平,采用好氧堆肥处理技术时,北大荒集团和新疆生产建设兵团每 hm^2 农田可承载的畜禽养殖量分别为483.1~832.7和39.2~327.2头;而在厌氧发酵处理技术时,每 hm^2 农田可承载的畜禽养殖量分别为180.5~311.1和14.6~122.2头。为了便于推广应用,本研究根据不同畜禽的粪便排泄量与养分特性,推导出猪当量折算规则,即100头猪相当于1.8头奶牛或7.4头肉牛或945.6羽蛋鸡或4883.4羽肉鸡。

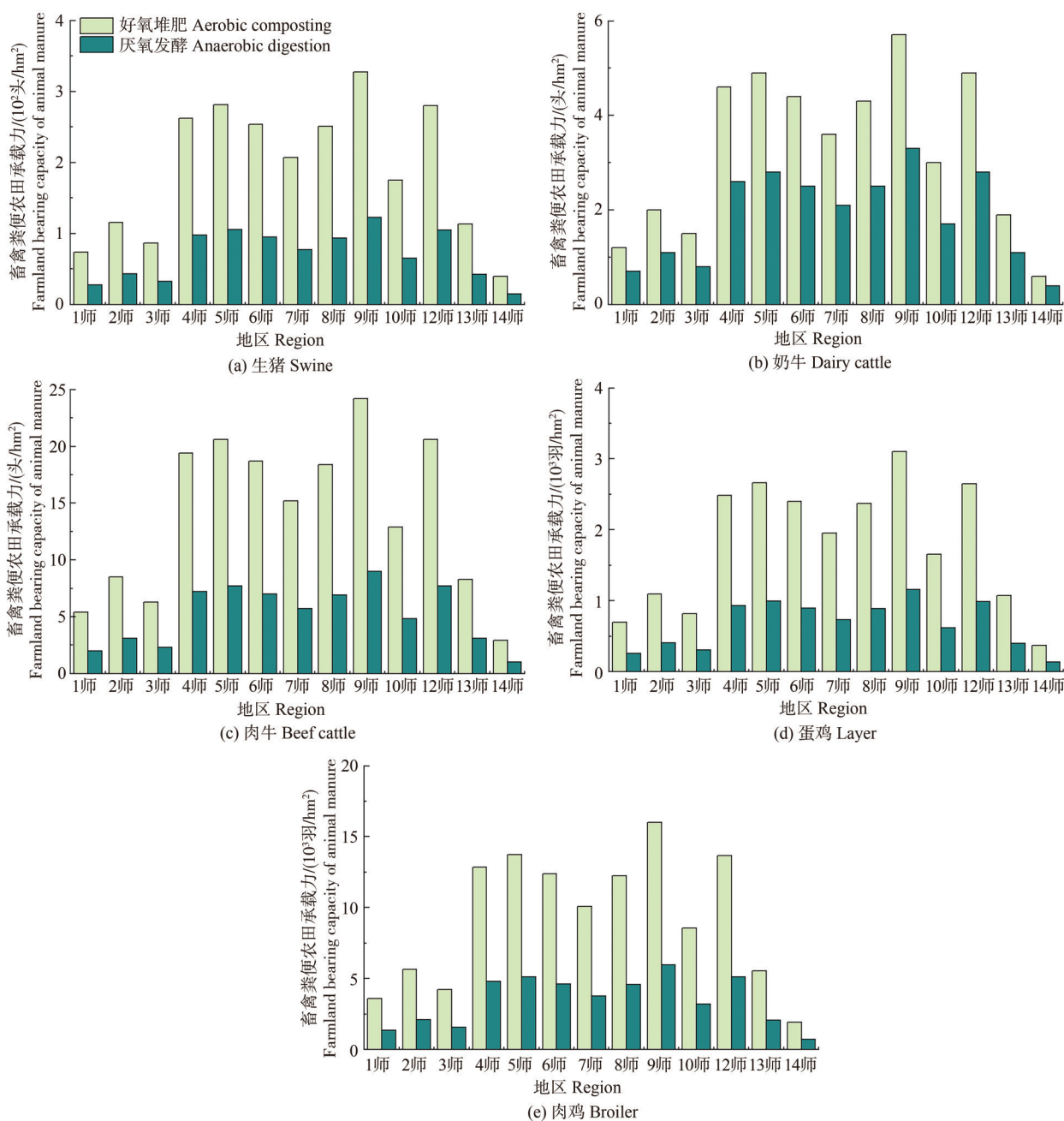


图4 新疆生产建设兵团畜禽粪便农田承载力估算结果

Fig. 4 Estimation result of farmland bearing capacity of animal manure in XPCC

3 讨 论

3.1 与现有行业标准计算结果的对比分析

本研究以土壤固碳机制为基础,构建土壤碳固定模型,计算得到北大荒集团畜禽粪便农田承载力的平均值为651.1头/hm²。而行业标准NY/T 3877—2021《畜禽粪便土地承载力测算方法》^[28]是以作物养分供需关系为基础,构建作物养分模型,计算得到的北大荒集团畜禽粪便农田承载力为120.1头/hm²。上述2种方法的计算结果存在较大差异,主要原因是北大荒集团地处中国重要的黑土地带,土壤有机碳质量分数高达26.49 g/kg;而随着开垦年限增长,土壤有机碳密度呈现快速下降趋势,导致土壤有机碳密度年变化量高^[29],则需要大量的畜禽粪肥的碳输入维持土壤碳循环,畜禽承载力相对较高。但若粪肥过量施用,远超过农作物氮养分吸收量,这势必将增加农田面源污染发生风险。

本研究计算得到新疆生产建设兵团畜禽粪便农田承载力平均值为189.6头/hm²,而行业标准计算得到承载力平均值为180.6头/hm²。2种方法的计算结果相近,这主要是因为新疆生产建设兵团盐碱地分布广、土壤肥力低,土壤有机碳质量分数仅为8.49 g/kg;土壤有机碳密度年变化量低^[30],则需要相对较少的畜禽粪肥的碳输入维持土壤碳循环。但从地力提升角度考虑,新疆生产建设兵团未来应适当增加粪肥施用量。

总的来说,本研究目标是促进土壤固碳、减少农业温室气体净排放,而行业标准目标是平衡作物养分供需关系、减少养分损失带来的面源污染风险。不同方法的侧重点不同,导致畜禽粪便农田承载力计算结果存在较大差异。

3.2 不同区域畜禽粪便承载力差异分析

受到土壤有机碳密度、气候等因素影响,北大荒集团和新疆生产建设兵团的畜禽粪便农田承载力的平均值分别为651.1和189.6头/hm²,差异较大。进一步分析可知,全国土壤有机碳质量分数为5.51~29.76 g/kg,变异系数高达54.9%^[22],由此计算出各地区畜禽粪便承载力将存在较大差异。因此,未来各地区使用该模型计算畜禽粪便承载力时,须慎重考虑区域农田土壤有机碳质量分数的变异范围,可采用分级计算等手段解决数据变异性大的问题。

3.3 区域养殖业发展潜力分析

北大荒集团和新疆生产建设兵团畜禽承载量远高于当前畜禽养殖量。以2020年为例,按照基于土壤有机碳变化率的畜禽粪便农田承载力计算,北大荒集团的畜禽承载量为 1.93×10^9 头,是其实际养殖量的168.2倍;新疆生产建设兵团的畜禽承载量为 3.07×10^8 头,是实际养殖量的11.7倍。这表明两地仅靠当地畜禽养殖产生的粪肥还田,不能满足土壤固碳的需要,还需增加粪肥施用量。与此同时,也侧面显示出两地畜禽养殖业发展潜力大,未来可根据区域畜禽产品需求情况,逐步扩大畜禽养殖量。

此外,本研究主要考虑了粪肥还田对农田土壤有机碳的影响,由于地区秸秆综合利用现状与模型适用性问题,暂未考虑秸秆还田带来的土壤碳输入量。因此,未来研究可以将秸秆还田纳入到研究范畴,能全面地估算畜禽粪便农田承载力。

4 结 论

本研究构建了基于土壤有机碳密度变化率的畜禽粪便农田承载力模型,仿真分析出北大荒集团和新疆生产建设兵团的畜禽粪便农田承载力,得到以下结论:

1)当农田土壤有机碳密度维持当前水平,北大荒集团和新疆生产建设兵团的畜禽粪便农田承载力分别为180.5~832.7和14.6~327.2头/hm²。

2)考虑农田土壤固碳需求,北大荒集团和新疆生产建设兵团的畜禽养殖业未来发展潜力大。

中国幅员辽阔,各地区农业生产条件不一,农业绿色发展目标与路径不同。因此,在区域种养业规划与设计时,需综合考虑区域特色的发展目标、农业生态环境风险重点防控点等,选择适宜的选畜禽粪便农田承载力计算方法,实现农业绿色低碳发展与区域种养平衡。

参考文献 References

- [1] 政府间气候变化专门委员会. 气候变化与土地[EB/OL]. [2023-10-20]. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/4/2020/06/SRCCL_SPM_zh.pdf
- [2] IPCC. Climate Change and Land [EB/OL]. [2023-10-20]. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/4/2020/06/SRCCL_SPM_zh.pdf
- [2] 韩天富, 都江雪, 曲潇琳, 马常宝, 王慧颖, 黄晶, 柳开楼, 刘立生, 谢建华, 吴远航, 张会民. 1988—2019年中国农田表土有机碳库密度变化及其

- 主要影响因素[J]. 植物营养与肥科学报, 2022, 28(7): 1145-1157
- Han T F, Du J X, Qu X L, Ma C B, Wang H Y, Huang J, Liu K L, Liu L S, Xie J H, Wu Y F, Zhang H M. Factors affecting change in topsoil organic carbon pool density in Chinese farmlands from 1988 to 2019[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2022, 28(7): 1145-1157 (in Chinese)
- [3] Ren F L, Zhang X B, Liu J, Sun N, Sun Z G, Wu L H, Xu M G. A synthetic analysis of livestock manure substitution effects on organic carbon changes in China's arable topsoil[J]. *CATENA*, 2018, 171: 1-10
- [4] Du Y D, Cui B J, Zhang Q, Wang Z, Sun J, Niu W Q. Effects of manure fertilizer on crop yield and soil properties in China: A meta-analysis[J]. *CATENA*, 2020, 193: 104617
- [5] Xia L L, Lam S K, Yan X Y, Chen D L. How does recycling of livestock manure in agroecosystems affect crop productivity, reactive nitrogen losses, and soil carbon balance? [J]. *Environmental Science and Technology*, 2017, 51(13): 7450-7457
- [6] Lyu J L, Liu H, Wang X H, Olave R, Tian C Y, Liu X J. Crop yields and soil organic carbon dynamics in a long-term fertilization experiment in an extremely arid region of Northern Xinjiang, China [J]. *Journal of Arid Land*, 2017, 9(3): 345-354
- [7] Fan T L, Xu M G, Song S Y, Zhou G Y, Ding L P. Trends in grain yields and soil organic C in a long-term fertilization experiment in the China Loess Plateau [J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2008, 171(3): 448-457
- [8] Gai X P, Liu H B, Liu J, Zhai L M, Yang B, Wu S X, Ren T Z, Lei Q L, Wang H Y. Long-term benefits of combining chemical fertilizer and manure applications on crop yields and soil carbon and nitrogen stocks in North China Plain [J]. *Agricultural Water Management*, 2018, 208: 384-392
- [9] Jiang G Y, Shirato Y, Xu M G, Yagasaki Y, Huang Q H, Li Z Z, Nie J, Shi X J. Testing the modified Rothamsted Carbon Model for paddy soils against the results from long-term experiments in Southern China [J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2013, 59(1): 16-26
- [10] Jin S Q, Zhang B, Wu B, Han D M, Hu Y, Ren C C, Zhang C Z, Wei X, Wu Y, Mol A P J, Reis S, Gu B J, Chen J. Decoupling livestock and crop production at the household level in China [J]. *Nature Sustainability*, 2021, 4(1): 48-55
- [11] Brewer K M, Muñoz-Araya M, Martínez I, Marshall K N, Gaudin A C. Long-term integrated crop-livestock grazing stimulates soil ecosystem carbon flux, increasing subsoil carbon storage in California perennial agroecosystems[J]. *Geoderma*, 2023, 438: 116598
- [12] 王圣伟, 李翔, 李艳霞, 赵岩. 基于排泄系数不确定性分析的畜禽粪污土地承载力评估[J/OL]. 中国环境科学: 1-11[2023-12-01]. <https://doi.org/10.19674/j.cnki.issn1000-6923.20230629.003>
- Wang S W, Li X, Li Y X, Zhao Y. Assessment of land bearing capacity of livestock manure based on uncertainty analysis of excretion coefficients [J/OL]. *China Environmental Science*: 1-11[2023-12-01]. <https://doi.org/10.19674/j.cnki.issn1000-6923.20230629.003> (in Chinese)
- [13] 楚天舒, 赖世宣, 杨行, 赵智强, 郭青霞. 基于地表水目标水质的畜禽粪便水环境承载力估算[J]. 中国农业大学学报, 2024, 29(1): 146-156
- Chu T S, Lai S X, Yang H, Zhao Z Q, Guo Q X. Estimation of water environmental bearing capacity of animal manure based on surface water target quality [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2024, 29(1): 146-156 (in Chinese)
- [14] 黑龙江省农垦总局统计局. 黑龙江垦区统计年鉴2012—2021[M]. 北京: 中国统计出版社, 2012-2021
- Bureau of Statistics of Heilongjiang Land Reclamation Area. *Heilongjiang Land Reclamation Area Statistical Yearbook 2012-2021* [M]. Beijing: China Statistics Press, 2012-2021 (in Chinese)
- [15] 新疆生产建设兵团统计局. 新疆生产建设兵团统计年鉴 2012—2021[M]. 北京: 中国统计出版社, 2012-2021
- Statistics Bureau of Xinjiang Production and Construction Corps. *Xinjiang Production and Construction Corps Statistical Yearbook 2012—2021* [M]. Beijing: China Statistics Press, 2012-2021 (in Chinese)
- [16] Qiao Y F, Miao S J, Han X Z, You M Y, Zhu X, Horwath W R. The effect of fertilizer practices on N balance and global warming potential of maize-soybean-wheat rotations in Northeastern China [J]. *Field Crops Research*, 2014, 161: 98-106
- [17] Hao X X, Han X Z, Wang S Y, Li L J. Dynamics and composition of soil organic carbon in response to 15 years of straw return in a Mollisol [J]. *Soil and Tillage Research*, 2022, 215: 105221
- [18] Wang L G, Qiu J J, Tang H J, Li H, Li C S, Van Ranst E. Modelling soil organic carbon dynamics in the major agricultural regions of China [J]. *Geoderma*, 2008, 147(1-2): 47-55
- [19] 韩东亮. 干旱区绿洲农田土壤有机碳动态模拟[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2014
- Han D L. Simulation of soil organic carbon dynamics in oasis farmland in arid regions [D]. Urumqi: Xinjiang Agricultural University, 2014 (in Chinese)
- [20] IPCC. 2019 refinement to the 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventory [R]. Switzerland: Intergovernmental Panel on Climate Change, 2019
- [21] 楚天舒, 赖世宣, 杨增玲. 黑龙江农垦种养业生产系统温室气体排放与土壤固碳的核算[J]. 中国农业大学学报, 2021, 26(4): 143-156
- Chu T S, Lai S X, Yang Z L. Accounting on greenhouse gas emissions and SOC stocks of the crop-farm animal production system in Heilongjiang Land Reclamation Area [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2021, 26(4): 143-156 (in Chinese)
- [22] 全国农业技术推广服务中心. 测土配方施肥土壤基础养分数据集: 2005—2014[M]. 北京: 中国农业出版社, 2015
- National Agro-Tech Extension and Service Center. *Data Set of Soil Basic Nutrients for Formula Fertilization Based on Soil Testing*: 2005—2014 [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2015 (in Chinese)
- [23] 全国农业技术推广服务中心, 农业部耕地质量监测保护中心, 沈阳农业大学. 东北黑土区耕地质量评价[M]. 北京: 中国农业出版社, 2017
- National Agro-Tech Extension and Service Center, Cultivated Land Quality Monitoring and Protection Center of the Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Shenyang Agricultural University. *Evaluation of the Cultivated Land Quality in Black Soil Region of Northeast China* [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2017 (in Chinese)
- [24] 农业农村部耕地质量监测保护中心. 西北区耕地质量评价[M]. 北京: 中国农业出版社, 2018
- Cultivated Land Quality Monitoring and Protection Center of the Ministry of Agriculture and Rural Affairs. *Evaluation of the Cultivated Land Quality in Northwest China* [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2018 (in Chinese)
- [25] University of East Anglia. Climatic research unit [EB/OL]. [2023-10-20]. <https://www.uea.ac.uk/groups-and-centres/climatic-research-unit>.
- [26] Food and Agriculture Organization of the United Nations. Harmonized world soil database v 1.2 [EB/OL]. [2023-10-20]. <https://www.fao.org/soils-portal/data-hub/soil-maps-and-databases/harmonized-world-soil-database-v12/en/>
- [27] 楚天舒, 赖世宣, 黄译萱, 马红红, 吴湘琳, 蒲胜海, 李晓红. 新疆生产建

- 设兵团农牧业温室气体排放的脱钩与驱动效应分析[J]. 中国农业大学学报, 2023, 28(10): 216-228
- Chu T S, Lai S X, Huang Y X, Ma H H, Wu X L, Pu S H, Li X H. Decoupling and driving effects analysis of greenhouse gas emissions from agriculture and animal husbandry in Xinjiang Production and Construction Corps[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2023, 28(10): 216-228 (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 bearing capacity of animal manure[S]. Beijing: China Agriculture Press, 2021 (in Chinese)
- [29] 张兴义, 刘晓冰, 赵军. 黑土利用与保护[M]. 北京: 科学出版社, 2018
- Zhang X Y, Liu X B, Zhao J. *Utilization and Conservation of Black Soil* [M]. Beijing: Science Press, 2018 (in Chinese)
- [30] 吴志勇. 新疆生产建设兵团耕地土壤养分现状及演变规律[J]. 新疆农业大学学报, 2012, 35(1): 57-61
- Wu Z Y. Soil nutrient status and evolution law of cultivated land in Xinjiang production and construction crops [J]. *Journal of Xinjiang Agricultural University*, 2012, 35(1): 57-61 (in Chinese)

责任编辑: 刘迎春



第一作者简介: 李一鸣, 博士研究生, 现就读于中国农业大学资源与环境学院植物营养系, 硕士毕业于中国农业大学。研究方向为农业资源高效利用与环境保护。参加国家重点研发计划项目子课题、重点实验室开放基金等项目。



通讯作者简介: 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, 主持重点实验室开放基金等项目, 已发表相关论文21篇。