

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2025.06.007

基于养分平衡模型的安徽省 畜禽养殖业土地承载力研究

邵培艳¹, 王晓辉², 胡淑恒¹, 何祥亮²

(1. 合肥工业大学 资源与环境工程学院, 安徽 合肥 230009; 2. 安徽省生态环境科学研究院, 安徽 合肥 230071)

摘要:为探究安徽省畜禽养殖业现状,防治农业面源污染,加强畜禽粪污资源化利用,文章采用养分平衡模型测度安徽省2017—2021年畜禽粪污氮磷养分供给量和农作物粪污氮磷养分需求量,分析安徽省各地市畜禽养殖土地承载力时空差异特征以及环境污染风险。结果表明:安徽省畜禽粪污氮磷养分供给量主要集中在北部的阜阳、蚌埠、宿州以及亳州市,4市占全省排放总量的54%左右;农作物粪污氮磷养分需求量分布与其有相同规律。整体上全省畜禽养殖业未超载,土地承载力指数为0.50左右,但是个别地区养殖压力较大,如安庆、池州、黄山和宣城市土地承载力指数均在0.70以上,具有较高的环境污染风险。因此各区域可按照自身实际情况调整粪肥施用比例、合理布局畜禽养殖区域,及时做好环境污染风险较高区域的畜禽养殖总量控制,推动种养平衡发展。

关键词:养分平衡法;土地承载力;氮;磷;安徽省

中图分类号:X713

文献标志码:A

文章编号:1003-5060(2025)06-0757-07

Land carrying capacity of livestock and poultry breeding industry in Anhui Province based on nutrient balance model

SHAO Peiyan¹, WANG Xiaohui², HU Shuheng¹, HE Xiangliang²

(1. School of Resources and Environmental Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 2. Anhui Academy of Eco-Environmental Sciences, Hefei 230071, China)

Abstract: In order to explore the current situation of livestock and poultry breeding industry in Anhui Province, prevent and control agricultural non-point source pollution, strengthen the resource utilization of livestock and poultry manure, the nutrient balance model was used to measure the nitrogen and phosphorus nutrient supply of livestock and poultry manure and the nitrogen and phosphorus nutrient demand of crop manure in Anhui Province from 2017 to 2021, and the spatio-temporal difference characteristics of land carrying capacity of livestock and poultry breeding and environmental pollution risks in various cities in Anhui Province were analyzed. The results show that the supply of nitrogen and phosphorus nutrients from livestock and poultry manure in Anhui Province is mainly concentrated in Fuyang, Bengbu, Suzhou and Bozhou in the north, which accounts for about 54% of the total emissions in the province. The distribution of nitrogen and phosphorus nutrient demand of crop manure has the same pattern. As a whole, the livestock and poultry breeding industry in the province is not overloaded, and the land carrying capacity index is about 0.50. However, the breeding pressure in some regions is relatively large. For example, the land carrying capacity index of Anqing, Chizhou, Huangshan and Xuancheng is above 0.70, which has a high risk of environmental pollution. Therefore, each region should adjust the proportion of manure application and rationally plan livestock and poultry breeding areas according to its actual situations, timely control the total amount of livestock and poultry

收稿日期:2023-04-21;修回日期:2023-05-18

基金项目:安徽省重点研究与开发计划资助项目(202004i07020005);安徽省环境保护专项资金资助项目(2021BTAFN03462; 2022BTQFN3794)

作者简介:邵培艳(1999—),女,河南周口人,合肥工业大学硕士生;

王晓辉(1972—),男,安徽长丰人,安徽省生态环境科学研究院正高级工程师,硕士生导师,通信作者,E-mail:wxx0712@163.com

breeding in areas with high environmental pollution risk, and promote the balanced development between farming and breeding.

Key words: nutrient balance method; land bearing capacity; nitrogen; phosphorus; Anhui Province

随着畜禽养殖业发展步伐的日益加快,产生了大量的畜禽粪污,其含有的有机质、氮磷钾等养分有利于作物生长^[1]。因此,种养结合模式成为畜禽养殖业发展的方向,将畜禽粪污还田是最经济有效的处置方式。但是,由于配套耕地面积不足导致畜禽粪污难以及时消纳所带来的环境污染问题也不容忽视^[2-3]。多年前,欧盟等通过限制农田施肥量控制畜禽粪污流失的环境污染问题,规定耕地氮肥施用量^[4]为 170 kg/hm²。国内外学者在不同区域对畜禽养殖环境承载力进行研究,评估区域理论最大养殖量,合理规划区域畜禽养殖结构,促进种养结合平衡发展,实现畜禽养殖发展与生态环境保护的双赢目标^[5-8]。

安徽省第二次污染源普查的结果显示,畜禽养殖废水中各污染物排放量分别为化学需氧量 48.49×10⁴ t、氨氮 0.58×10⁴ t、总氮 2.69×10⁴ t、总磷 0.60×10⁴ t。以化学需氧量计,污染物排放量占农业源排放量的 94%,占全省水污染物排放量的 45%。畜禽粪污还田“最后一公里”仍未完全打通,粪污治理的形势依然严峻,与周边尤其是长三角其他省份存在明显差距。当前,文献[9-10]分别从时间和空间尺度上分析安徽省畜牧业废弃物对环境的污染风险,但安徽省畜禽养殖业土地承载力仍缺乏在时空尺度上的系统研究。

本文根据近年来安徽省各市实际情况以及统计年鉴数据,以氮、磷作为流通元素,采用养分平衡模型结合 2018 年农业农村部发布的《畜禽粪污土地承载力测算技术指南》(以下简称《指南》)^[11],系统分析了 2017—2021 年安徽省各市畜禽粪污养分产生量、农作物粪污养分需求量以及畜禽粪污土地承载力的时空差异,以期了解畜禽粪肥养分供需规律、合理规划粪肥施用比例、优化养殖布局,为安徽省种养结合绿色发展提供理论支撑。

1 方 法

1.1 农作物粪污养分需求量

农作物粪污养分需求量计算公式为:

$$D = \alpha \theta A / \omega = \frac{\alpha \theta \sum P_i Q_i}{\omega} \quad (1)$$

其中: D 为农作物粪污氮、磷养分需求量; A 为区域农作物生长所需要的氮、磷养分量; P_i 、 Q_i 分别为第 i 类农作物的年总产量、农作物形成 100 kg 产量所需氮磷养分质量分数; α 为粪肥供给养分占比; θ 为粪肥占施肥的比例; ω 为粪肥当季利用率。

根据《安徽省统计年鉴 2018—2022 年》^[12], 选取 10 余种农作物作为研究对象,参考《指南》及文献[13]的研究成果,确定 Q_i 取值,结果见表 1 所列。

表 1 全省农作物形成 100 kg 产量所需养分需求量

作物类别	氮养分需求量/kg	磷养分需求量/kg
谷子	3.80	0.44
稻谷	2.20	0.80
小麦	3.00	1.00
玉米	2.30	0.30
豆类	7.20	0.75
薯类	0.50	0.09
油料	7.19	0.88
棉花	11.70	3.04
糖料	0.48	0.06
烟叶	3.85	0.53
蔬菜	0.60	0.11
瓜果类	0.30	0.06
茶叶	6.40	0.88
苹果	0.30	0.08
梨	0.47	0.23
葡萄	0.74	0.51
其他园林水果	0.59	0.11

根据《2021 年安徽省耕地质量监测报告》^[14] 数据确定土壤养分分级:氮养分分级为 I 级, α 取 35%;亳州、蚌埠、阜阳、铜陵磷养分分级为 II 级, α 取 45%,其余地市均为 III 级, α 取 55%。参照《指南》粪肥氮磷的当季利用率分别取 30%和 35%。参考《安徽省畜禽养殖废弃物资源化利用提升行动计划》^[15],结合实际情况取粪肥占施肥的比例为 25%。

1.2 畜禽粪污养分供给量

畜禽粪污养分供给量指畜禽产生的粪便、尿液中含有的氮、磷养分,经过收集、处理、储存后所留存的养分量。

畜禽粪、尿排放总量 Y_i 为:

$$Y_i = \sum [C_i (\mu_{磷} + \mu_{尿}) E] \quad (2)$$

其中: C_i 为第 i 种畜禽养殖量; $\mu_{粪}$ 和 $\mu_{尿}$ 为第 i 种畜禽粪、尿日排泄系数; E 为养殖周期。

畜禽粪污中氮、磷养分供给量 T_i 为:

$$T_i = \lambda\beta \sum (Y_{粪}w_{粪} + Y_{尿}w_{尿}) \quad (3)$$

其中: $w_{粪}$ 、 $w_{尿}$ 分别为第 i 种畜禽粪便、尿液中氮磷养分的质量分数; λ 为粪污不同处理方式所占比例; β 为不同处理方式下氮磷养分的留存率。

表 2 畜禽粪便日排泄系数及氮磷养分质量分数

类别	猪粪	猪尿	牛粪	牛尿	羊粪	羊尿	家禽粪便
$\mu/[\text{kg}/(\text{只} \cdot \text{d})]$	2.00	3.30	20.00	10.00	2.60	0.41	0.12
$w(\text{N})/\%$	0.55	0.18	0.38	0.51	1.01	0.70	0.81
$w(\text{P})/\%$	0.26	0.02	0.10	0.02	0.22	0.03	0.37

根据《指南》以及 2018—2020 年安徽省各地推行的畜禽废弃物资源化利用三年行动计划^[21]等确定 λ 及 β 的取值,见表 3 所列。

表 3 不同畜禽粪污处理方式占比及 N、P 养分留存率 %

处理方式	占比	N 留存率	P 留存率
堆肥	40	68.5	76.5
厌氧发酵	10	95.0	75.0
固体储存	27	63.5	80.0
沼气工程	10	65.0	65.0
污水氧化塘储存	13	62.0	72.0

1.3 区域畜禽粪污土地承载力

为便于计算,本文采用猪当量作为畜禽粪污氮、磷养分排泄量的度量单位。将不同畜禽换算为猪当量,1 头猪相当于 1 个猪当量等于 0.15 头奶牛、0.3 头肉牛、2.5 只羊、25 只家禽^[22-23]。区域畜禽理论最大养殖量 I :

$$I = D/\eta \quad (4)$$

其中, η 为单位猪当量粪肥养分供给量。

综合考虑畜禽粪污在各个处理过程中的损失,参考《指南》确定 η_N 、 η_P 取值分别为 7.0、1.2 kg。

以猪当量计的实际养殖量与理论养殖量的比值为区域畜禽粪污土地承载力指数,该指数的计算公式为:

$$R = M/I \quad (5)$$

其中, M 为畜禽实际饲养总量。

土地承载力指数可评价区域畜禽养殖是否超载,指导各地畜禽养殖业布局优化以及种养平衡发展。该指数的分级与环境风险评价,见表 4 所列。

本研究以出栏量作为生猪养殖量,猪、牛、羊和家禽的养殖量为年底存栏量,饲养周期分别为 199、365、365、210 d^[16-18]。排泄系数以及畜禽粪、尿中氮磷养分质量分数等数据主要参考文献^[19-20]的研究成果,并结合安徽省内畜禽养殖业现状,最终得到畜禽粪便日排泄系数,结果见表 2 所列。

表 4 畜禽养殖土地承载力指数环境风险评价分级

R	≤ 0.40	(0.40, 0.70]	(0.70, 1.00]	> 1.00
分级	I	II	III	IV
环境风险评价	无	稍有	有	较严重

2 结果与分析

2.1 畜禽粪污养分供给量时空分布特征

安徽省畜禽粪污养分供给量的时空分布特征见表 5 所列。从时间上看粪污氮、磷养分供给变化趋势基本一致,从空间上看粪污排放量总体表现为北多南少,与各地畜禽养殖规模和结构有关联。阜阳、宿州、亳州和蚌埠 4 市畜禽养殖规模大,粪污氮养分供给量均超过 1.50×10^4 t/a,磷养分供给量也均在 1.2×10^4 t/a 以上,均占全省养分供给总量 54% 左右;淮北、黄山、马鞍山、芜湖、铜陵、池州 6 市的氮磷养分供给量均低于 0.50×10^4 t/a,占全省总量的 10% 左右。

2017—2021 年全省氮养分供给总量分别为 24.20×10^4 、 16.26×10^4 、 16.41×10^4 、 16.69×10^4 、 18.29×10^4 t/a;磷养分供给总量分别为 18.29×10^4 、 12.29×10^4 、 12.46×10^4 、 12.61×10^4 、 13.86×10^4 t/a,养分供给量呈现先降低后增加的趋势。省内 16 个地市 2018 年粪污氮、磷养分供给量均降幅明显,这是由于 2018 年以来,非洲猪瘟疫情对畜牧业产业链、供应链等造成了重大影响。为此,安徽省采取成立防控非洲猪瘟等重大动物疫病指挥部、启动 I 级应急响应等措施进行调控。到 2021 年底,生猪生产恢复超出预期,年末存栏达 $1.582.5 \times 10^4$ 头,超 2017 年末存栏 11.6%,畜禽饲养总量恢复至 2017 年的 80%。

表 5 安徽省不同年份粪污氮磷养分供给量

地区	氮养分供给量/(10 ⁴ t/a)					磷养分供给量/(10 ⁴ t/a)				
	2017年	2018年	2019年	2020年	2021年	2017年	2018年	2019年	2020年	2021年
合肥市	1.80	1.21	1.17	1.01	1.06	1.36	0.91	0.88	0.77	0.80
淮北市	0.47	0.37	0.43	0.40	0.50	0.36	0.28	0.33	0.30	0.38
亳州市	2.35	1.57	1.55	1.61	2.01	1.78	1.19	1.17	1.22	1.52
宿州市	4.16	2.57	2.64	3.08	3.16	3.14	1.94	2.00	2.33	2.39
蚌埠市	2.20	1.59	1.60	1.53	1.56	1.66	1.21	1.21	1.15	1.18
阜阳市	4.32	2.84	2.89	3.06	3.30	3.27	2.14	2.18	2.31	2.50
淮南市	1.32	0.72	0.69	0.66	0.71	0.99	0.54	0.52	0.50	0.53
滁州市	1.89	1.23	1.22	1.22	1.41	1.43	0.93	0.93	0.92	1.06
六安市	1.75	1.14	1.12	0.97	1.24	1.32	0.86	0.84	0.73	0.93
马鞍山市	0.29	0.26	0.24	0.24	0.28	0.22	0.20	0.18	0.18	0.21
芜湖市	0.50	0.39	0.37	0.38	0.46	0.38	0.29	0.28	0.29	0.35
宣城市	0.86	0.70	0.77	0.73	0.75	0.65	0.53	0.58	0.55	0.56
铜陵市	0.30	0.19	0.16	0.18	0.21	0.23	0.14	0.12	0.13	0.16
池州市	0.31	0.27	0.27	0.28	0.30	0.23	0.20	0.20	0.21	0.22
安庆市	1.38	1.02	1.06	1.07	1.11	1.04	0.77	0.80	0.81	0.84
黄山市	0.37	0.22	0.24	0.27	0.29	0.28	0.17	0.18	0.20	0.22
安徽省	24.20	16.26	16.41	16.69	18.34	18.29	12.29	12.40	12.61	13.86

2.2 农作物粪肥养分需求量时空分布特征

安徽省农作物对粪污养分需求量的时空分布情况见表 6 所列。2017—2021 年全省农作物氮、磷养分年均需求量分别为 133.0×10^4 、 37.7×10^4 t/a, 不同年份实际需求量差异不显著, 在 5% 以下。结合安徽省土壤养分特征以及实际施肥习惯, 计算得到全省农作物对畜禽粪肥氮、磷的年均需求量分别为 38.75×10^4 、 13.91×10^4 t/a, 2017 年全省需求量最大, 2018 年最低。

全省农作物粪肥养分需求特征与其播种面积

相似, 皖北地区农作物对粪污氮、磷养分的需求量最大, 其次是江淮之间, 皖南地区需求量最小。其中阜阳、宿州、亳州、蚌埠和滁州 5 市粪污氮养分需求量超过 3.0×10^4 t/a, 各自均占到总量的 8% 以上; 5 市粪污氮、磷养分需求之和分别占全省粪污养分需求总量的 53% 和 52%。沿江及皖南地区的马鞍山、池州、铜陵、黄山 4 市年均氮养分需求量低于 1.0×10^4 t/a, 磷养分需求量低于 0.5×10^4 t/a; 4 市对氮、磷养分需求量总和仅占全省排放量的 7%。

表 6 安徽省不同年份农作物粪污氮磷养分需求量

地区	氮养分需求量/(10 ⁴ t/a)					磷养分需求量/(10 ⁴ t/a)				
	2017年	2018年	2019年	2020年	2021年	2017年	2018年	2019年	2020年	2021年
合肥市	3.14	2.71	2.71	2.65	2.72	1.25	1.16	1.15	1.12	1.14
淮北市	1.26	1.38	1.42	1.42	1.43	0.47	0.49	0.51	0.50	0.51
亳州市	4.77	4.60	4.71	4.77	4.86	1.38	1.31	1.35	1.37	1.39
宿州市	4.90	4.54	4.65	4.72	4.79	1.65	1.55	1.61	1.62	1.65
蚌埠市	3.51	3.17	3.22	3.23	3.23	1.00	0.89	0.91	0.91	0.92
阜阳市	5.70	4.97	5.07	5.12	5.23	1.72	1.47	1.51	1.51	1.54
淮南市	2.42	2.54	2.55	2.49	2.56	1.08	1.15	1.14	1.11	1.14
滁州市	3.85	3.80	3.85	3.88	3.93	1.58	1.64	1.65	1.65	1.67
六安市	2.81	2.88	2.91	2.91	2.99	1.15	1.25	1.24	1.24	1.27
马鞍山市	1.06	0.99	0.98	0.97	0.99	0.43	0.42	0.42	0.41	0.42
芜湖市	1.46	1.35	1.35	1.33	1.37	0.58	0.57	0.56	0.55	0.56
宣城市	1.32	1.15	1.17	1.16	1.18	0.51	0.47	0.47	0.47	0.48
铜陵市	0.63	0.55	0.54	0.55	0.56	0.20	0.18	0.18	0.17	0.18
池州市	0.74	0.66	0.67	0.65	0.68	0.28	0.25	0.24	0.24	0.25
安庆市	2.35	2.15	2.16	2.06	2.09	0.88	0.81	0.78	0.75	0.76
黄山市	0.40	0.37	0.37	0.36	0.37	0.13	0.12	0.12	0.12	0.12
安徽省	40.32	37.81	38.35	38.27	38.99	14.29	13.72	13.83	13.73	14.00

阜阳市对氮需求量最高、宿州市对磷需求量最高, 这与两市种植农作物种类的氮磷养分需求

量不同有关。综上, 在不考虑其他因素的条件下, 全省畜禽粪污氮、磷供给量未超出农作物生长所

需氮、磷养分需求量,需要施用化肥进行氮、磷素的补充。

2.3 畜禽粪污土地承载力分析

本研究以农作物对氮、磷养分的需求量为测算基准,采用养分平衡模型计算安徽省畜禽养殖土地承载力的理论值,并与实际值相比较,得到近5年各市氮、磷土地承载力指数见表7所列。从计算结果分析,总体上安徽省畜禽养殖业仍有一定的发展潜力,近5年实际畜禽养殖量均未超出土地承载力,种植农作物可以消纳区域内畜禽粪污所产生的养分。皖北和皖中地区的养殖规模远大于皖南地区;阜阳市和宿州市养殖规模最大,平均养殖量分别为 477×10^4 、 429×10^4 头,占全省总量的15%和14%;马鞍山、铜陵和黄山养殖规模最小,3市饲养量之和仅占全省总量的5%;各地畜禽饲养量均有波动减少的趋势。空间上,各地市畜禽养殖氮磷土地承载力存在一定差异。

以氮为基准的测算结果表明,安徽省南部地区土地承载力指数高于中部和北部地区,畜禽养殖承载压力较大;近年来,宣城市一直处于超载状态、黄山市有3年处于超载状态;淮北、淮南和马鞍山市始终处于Ⅰ级无风险状态。以磷为基准的测算结果表明,5年间安徽省畜禽养殖业总体无环境污染风险,16个地市的预警指数也均在0.70以下。

表7 安徽省2017—2021年总体土地承载力指数(以氮计)

地区	2017年	2018年	2019年	2020年	2021年
合肥市	0.90	0.68	0.66	0.58	0.61
淮北市	0.45	0.32	0.34	0.32	0.40
亳州市	0.46	0.35	0.34	0.35	0.44
宿州市	0.79	0.56	0.55	0.62	0.65
蚌埠市	0.65	0.56	0.55	0.51	0.53
阜阳市	0.75	0.60	0.59	0.61	0.64
淮南市	0.61	0.33	0.32	0.33	0.35
滁州市	0.62	0.44	0.43	0.42	0.48
六安市	0.82	0.55	0.54	0.47	0.60
马鞍山市	0.38	0.38	0.35	0.36	0.40
芜湖市	0.54	0.47	0.45	0.48	0.56
宣城市	1.01	1.01	1.10	1.06	1.02
铜陵市	0.79	0.57	0.52	0.56	0.66
池州市	0.64	0.66	0.65	0.72	0.73
安庆市	0.80	0.67	0.73	0.75	0.75
黄山市	1.25	0.83	0.92	1.04	1.10
安徽省	0.69	0.53	0.52	0.53	0.57

为避免造成环境污染,土地承载力一般取较小值作为区域发展的最大理论规模,因此,安徽省畜禽粪污还田的主要限制因素为氮素。2017年安徽省50%的地市环境污染风险指数在Ⅲ级以

上,其中黄山和宣城市处于超载状态,环境污染风险较严重。2018年由于全省畜禽养殖量以及粪肥养分供给量的减少,各市畜禽养殖环境风险级别均降低,后续3年发展平稳。到2021年,除宣城和黄山超载外,其他各市土地承载力均处于Ⅱ级以下,超载的宣城和黄山两市R值分别为1.02、1.10,有较严重的环境污染风险,这与皖南地区山多地少、耕地面积相对不足有关,畜禽粪污没有足够的农田消纳。

3 讨 论

2017年以来,为贯彻国家加快推进畜禽养殖废弃物资源化利用工作,促进安徽省畜牧业绿色发展,省政府连续出台涉及中长期动物疫病防治、种养平衡发展、养殖废弃物资源化利用、家禽生猪产业转型等文件,强调以“优供给、强安全、保生态”为目标,着力“稳生猪、治污染、调结构”,优化畜禽养殖区域空间布局。全省依法划定畜禽禁养区2107个,面积20069.71 km²,进一步厘清畜禽养殖空间管控范围,优化了产业发展空间。政策措施的不断强化与省内近年来畜禽粪污产生量变化趋势相吻合。

从安徽省畜禽粪污产生量以及供给量分析来看,全省畜禽养殖主要以生猪和肉牛为主,2021年,两者养殖量占全省畜禽养殖总量的55%(按猪当量计),全年生猪出栏 2797.8×10^4 头,较2020年增加23.1%;牛存栏 99.4×10^4 头,增长4.8%;两者粪污排放量分别占排放总量的54%和20%。2021年全省家禽存栏 30285.4×10^4 只,同比下降2.4%,粪污排放量占全省总量的14%;羊存栏 612.8×10^4 只,同比增长2.5%,粪污排放量最少,占总量的12%。目前安徽省实际畜禽粪肥施用占比仅为25%左右,仍需以大量施用化肥作为补充,但是长此以往会造成土壤板结等土质恶化。应逐步提高粪污施用比例到50%左右,最有利于作物生长。本研究假设安徽省畜禽粪污占施肥比例提升至50%,以2021年氮养分土地承载力为例,则对于畜禽粪污土地承载力指数 $R \geq 0.71$ 的池州、安庆、宣城和黄山4市环境污染风险等级均降至Ⅲ级以下,畜禽养殖业产生的粪污可被完全消纳。2021年不同粪污施用占比下土地承载力分级见表8所列。

安徽省畜禽养殖量总体未超出理论最大承载能力,畜禽养殖业仍有较大的发展潜力。皖北地区耕地面积大,畜禽粪污土地承载力指数均在

0.70以下,阜阳、宿州和亳州3市的大豆、小麦、玉米产量一直居全省前列,年平均产量分别占总量的59%、56%、72%,该类作物100 kg产量养分需求量远高于蔬菜、水果等,可以重点发展生猪和牛类的养殖。皖中地区的合肥、安庆、滁州、六安这4市为我省水稻主产区,年产量平均占全省总量的57%,因此可重点发展生猪、家禽养殖。皖南

地区山多地少,其中黄山市和宣城市以氮计的畜禽粪污土地承载力指数超过1.00,环境污染风险等级为Ⅳ级,应提高粪污替代化肥比例、严格控制养殖规模、强化养殖特色。全省应根据区域特征、资源禀赋、饲养工艺和环境承载力的不同分类施策,逐步形成布局合理、种养结合的畜禽养殖发展格局。

表8 2021年不同粪污施用占比下土地承载力分级(以氮计)

地区	实际承载力/ (10 ⁴ 头猪当量)	粪污施用占比 25%		粪污施用占比 50%	
		N理论承载力/(10 ⁴ 头猪当量)	环境风险级别	N理论承载力/(10 ⁴ 头猪当量)	环境风险级别
池州市	70.54	71.21	Ⅲ	193.30	Ⅱ
安庆市	224.16	236.66	Ⅲ	598.35	Ⅱ
宣城市	172.80	177.80	Ⅳ	337.26	Ⅱ
黄山市	58.60	61.27	Ⅳ	106.38	Ⅱ

4 结 论

本研究选取安徽省2017—2021年的畜禽养殖数据,采用养分平衡模型对畜禽粪污养分供给量、农作物粪污养分需求量和畜禽养殖业土地承载力进行测算,得到以下结论:

1) 2017—2021年全省农作物年均粪污氮、磷养分需求量分别为 38.75×10^4 、 13.91×10^4 t/a,皖北和皖中地区的氮、磷养分需求量均大于皖南地区,其中阜阳、宿州、亳州、蚌埠和滁州市5市粪污氮、磷养分需求量之和分别占全省的53%和52%。局部来看,多市农作物粪污养分需求量呈现先降低后增加的趋势,合肥、安庆和铜陵市呈持续降低趋势。

2) 2017—2021年全省畜禽粪污氮、磷养分年均供给量分别为 18.38×10^4 、 13.89×10^4 t/a,全省粪污养分供给具有较大潜力,其中阜阳、宿州、亳州和蚌埠4市粪污氮、磷均占全省养分供给总量54%左右,受各地养殖规模和结构的影响,全省粪污养分供给量北多南少。

3) 2017—2021年安徽省16个地市以磷为基准的土地承载力指数均在0.70以下;以氮为基准的测算结果表明:5年间马鞍山、淮南和淮北市均为无风险状态,宣城市和黄山市的承载最大环境风险压力较高,其余11市为稍有或有风险状态。全省畜禽粪便环境污染风险主要集中在皖中和皖南地区,2021年安庆、池州、黄山和宣城4市,以氮计畜禽粪污土地承载力指数均在0.70以上。全省畜禽养殖量未超出区域最大承载能力,畜禽养殖业仍有一定的发展潜力。

[参 考 文 献]

- [1] 孙超,潘瑜春,刘玉. 畜禽粪便资源现状及替代化肥潜力研究:以安徽省固镇县为例[J]. 生态与农村环境学报, 2017, 33(4):324-331.
- [2] 黄显雷,赵俊伟,方琳娜,等. 基于种养结合的畜禽养殖环境承载力研究:以舒兰市为例[J]. 中国农业资源与区划, 2020, 41(4):34-42.
- [3] 杜红梅,陈思畅. 基于种养平衡的湖南省畜禽养殖土地承载力分析[J]. 家畜生态学报, 2022, 43(11):59-66.
- [4] MALLIN M A, CAHOON B. Industrialized animal reduction: a major source of nutrient and microbial pollution to aquatic ecosystem[J]. Population and Environment, 2003, 24(5):369-385.
- [5] YUN L Y, LI J, HOU R X, et, al. Goats or pigs? Sustainable approach of different raising systems fed by maize silage[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 254:182-194.
- [6] 郭彩霞,杨子森,马文奇,等. 山西省畜禽粪污土地承载力及粪尿替代化肥潜力分析[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(7):1548-1557.
- [7] 刘晓永,李书田. 中国畜禽粪尿养分资源及其还田的时空分布特征[J]. 农业工程学报, 2018, 34(4):1-14, 316.
- [8] KEON G M, STONE G S, SYKTUS J I, et, al. Climate change impacts on northern Australian range land livestock carrying capacity: a review of issues[J]. The Range land Journal, 2009, 31:1-29.
- [9] 阎波杰,潘瑜春,闫静杰. 安徽省县域耕地畜禽养殖废弃物养分负荷时空演变特征[J]. 生态与农村环境学报, 2016, 32(3):466-472.
- [10] 耿维,孙义祥,袁嫚嫚,等. 安徽省畜牧业环境承载力及粪污替代化肥潜力评估[J]. 农业工程学报, 2018, 34(18):252-260, 315.
- [11] 农业部办公厅. 农业部办公厅关于印发《畜禽粪污土地承载力测算技术指南》的通知[EB/OL]. (2018-01-22)

- [2023-04-17]. https://www.moa.gov.cn/gk/tzgg_1/tfw/201801/t20180122_6135486.htm.
- [12] 安徽省统计局,国家统计局安徽调查总队. 安徽统计年鉴(2018—2022) [M]. 北京:中国统计出版社,2022.
- [13] 郑莉,张晴雯,张爱平,等. 山东省畜禽粪污土地承载力时空分异特征分析[J]. 农业环境科学学报,2019,38(4):882-891.
- [14] 安徽省农业农村厅. 关于发布《2021年安徽省耕地质量监测报告》的通知[EB/OL]. (2022-03-02) [2023-04-17]. <http://nync.ah.gov.cn/ggfw/trfl/56144441.html>.
- [15] 安徽省农业农村厅. 关于《安徽省畜禽养殖废弃物资源化利用提升行动计划(2021—2025年)》公开征求意见的通知[EB/OL]. (2022-01-25) [2023-04-17]. <http://nync.ah.gov.cn/public/7021/56103011.html>.
- [16] 王海莲,何忠伟,刘芳. 基于耕地消纳的畜牧业粪污环境承载力研究:以北京市为例[J]. 农业展望,2021,17(5):63-69.
- [17] 王舫. 基于环境承载力的黑龙江省畜禽产业布局优化研究[D]. 黑龙江:东北农业大学,2020.
- [18] 张英,武淑霞,刘宏斌,等. 基于种养平衡的河南省畜禽养殖分析及其环境污染风险研究[J]. 中国土壤与肥料,2019(4):24-30,52.
- [19] 张大牛,沈玉君,程红胜,等. 河南省粪肥养分供需及土地承载力时空差异特征分析[J]. 江苏农业科学,2022,50(10):217-225.
- [20] 林宁,查向浩,蔡吉祥,等. 喀什地区畜禽养殖粪污土地承载力时空分布[J]. 四川农业大学学报,2023,41(5):935-944,960.
- [21] 安徽省人民政府办公厅. 安徽省人民政府办公厅关于印发安徽省畜禽养殖废弃物资源化利用三年行动计划(2018—2020年)等文件的通知[EB/OL]. (2018-08-28) [2023-04-17]. <https://www.ah.gov.cn/public/1681/7939961.html>.
- [22] 王恩玲,张永翠,王元臻,等. 枣庄市畜禽粪污土地承载潜力及畜禽粪便环境污染预警分析[J]. 家畜生态学报,2021,42(7):73-77.
- [23] 王一如,周妍宏,梁馨月,等. 基于种养平衡的吉林省畜禽养殖环境承载力研究[J]. 中国饲料,2022(7):140-145.

(责任编辑 吴亮)

(上接第730页)

了可行的方法。本文基于原位梯级修复技术,通过建立地下水数值模型,结合物理试验数据对数值模型进行了识别,预测了水力负荷、污染物质量浓度对原位梯级修复效果的影响,在分析污染物质量浓度衰减过程基础上,计算得到了模拟区范围内可以承载的氨氮、硝酸盐污染物最大负荷。

当地下水温度在20~22℃、含水介质渗透性能为0.002 cm/s、污染源补给强度为0.68 m/d时,距离排污口20~40 cm范围内氨氮污染物最大负荷为18.05 g/(m²·d),40~50 cm范围硝酸盐最大负荷为54.14 g/(m²·d);氨氮质量浓度为15 mg/L时对应的硝化作用20 cm区段内的最大水力负荷为1.62 m³/(m²·d)。进入反硝化区域后在40~50 cm区段,大约经过10 cm反应距离后微生物可将硝酸盐质量浓度修复至Ⅲ类标准,此时对应的最大水力负荷为1.14 m³/(m²·d)。试验过程中突变的水力负荷及污染负荷也间接验证了该修复系统的稳定性,从而可以为工程实际应用提供可参考的修复技术参数。

受氧化及还原环境等因素的影响,从地表水经包气带入渗至含水层转化为地下水,氮的迁移转化过程复杂,在反硝化作用阶段可能会发生异化性硝酸盐还原作用,NO₃⁻被厌氧菌或兼性厌氧菌还原为NH₄⁺,致使反硝化作用的部分产物为氨氮,这是开展原位梯级修复地下水氮污染过

程中需重点关注的问题之一。

[参 考 文 献]

- [1] 易星源. 人工包气带去去除降雨氨氮污染的研究[D]. 合肥:合肥工业大学,2021.
- [2] HANG Z, ZHANG Y, CHEN Y. Recent advances in partial denitrification in biological nitrogen removal: from enrichment to application[J]. Bioresource Technology, 2020, 298: 122444.
- [3] 严琼. 我国地下水污染现状、治理技术及防治建议[J]. 山东化工, 2021, 50(22): 225-227.
- [4] 张广禄, 刘海燕, 郭华明, 等. 华北平原典型山前冲洪积扇高硝态氮地下水分布特征及健康风险评估[J]. 地学前缘, 2023, 30(4): 485-503.
- [5] 潘继隆. 傍河地下水氮污染原位梯级修复效果试验研究[D]. 合肥:合肥工业大学,2023.
- [6] 郝晨西,董深,谋吕. 基于Visual MODFLOW Flex的硝酸盐氮迁移转化特性研究[J]. 人民黄河, 2022, 44(11): 78-81.
- [7] 刘佩贵,潘继隆,尚曼廷,等. CaO₂缓释氧材料去除地下水氨氮的效能研究[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2023, 46(8): 1018-1023.
- [8] LIU P G, LIU M C, SHANG M T, et al. Horizontal well test for simulating the in situ remediation of nitrate contaminated groundwater by microbial denitrification[J]. Water Air Soil Pollution, 2019, 230: 189-199.

(责任编辑 吴亮)