

基于种养平衡的中国耕地畜禽粪尿负荷预警与治理模式效果研究

李鹏程, 韩成吉, 石自忠, 王明利

引用本文:

李鹏程, 韩成吉, 石自忠, 等. 基于种养平衡的中国耕地畜禽粪尿负荷预警与治理模式效果研究[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(3): 628-637.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2019-1035>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

中国农田畜禽粪尿磷负荷量及环境风险分析

刘晓永, 王秀斌, 李书田

农业环境科学学报. 2019, 38(11): 2594-2608 <https://doi.org/10.11654/jaes.2018-0626>

海南省畜禽养殖环境承载力及有机肥替代化肥潜力分析

杨旭, 黄艳艳, 刘海林, 茶正早, 罗微, 林清火

农业环境科学学报. 2019, 38(11): 2609-2618 <https://doi.org/10.11654/jaes.2019-0669>

京津冀地区农业面源污染风险时空差异研究

王磊, 香宝, 苏本营, 王玥, 方广玲, 胡钰, 潘丽波, 戴霞

农业环境科学学报. 2017, 36(7): 1254-1265 <https://doi.org/10.11654/jaes.2016-1539>

畜禽粪便可好氧发酵过程中挥发性气体排放差异研究

张朋月, 沈玉君, 刘树庆

农业环境科学学报. 2015(7): 1378-1383 <https://doi.org/10.11654/jaes.2015.07.021>

畜禽粪便生物炭固碳量、养分量的估算及田间施用潜在风险预测

李飞跃, 吴旋, 李俊锁, 谢越, 范行军, 蔡永兵, 赵建荣

农业环境科学学报. 2019, 38(9): 2202-2209 <https://doi.org/10.11654/jaes.2019-0025>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

李鹏程, 韩成吉, 石自忠, 等. 基于种养平衡的中国耕地畜禽粪尿负荷预警与治理模式效果研究[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(3): 628-637.
LI Peng-cheng, HAN Cheng-ji, SHI Zi-zhong, et al. Early warning of farmland pollution caused by livestock and poultry feces in China and analysis of governance model effectiveness based on the balance between planting and breeding[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, 39(3): 628-637.

基于种养平衡的中国耕地畜禽粪尿负荷预警 与治理模式效果研究

李鹏程, 韩成吉, 石自忠, 王明利*

(中国农业科学院农业经济与发展研究所, 北京 100081)

摘要:为探究中国耕地畜禽粪尿负荷污染风险,基于种养平衡视角,定义“畜禽粪尿污染风险指数”,运用系统动力学方法进行预警,并通过情景分析,模拟不同治理模式的污染治理效果及对作物养分供给情况的影响。仿真结果显示:惯性趋势下2018—2025年,中国耕地畜禽粪尿负荷将始终对环境构成明显污染;减量化、资源化、达标排放是治理污染的3类有效模式,但“减量化模式”将大幅降低畜禽产品自给率及总产值;单凭提升“资源化模式”强度,难以彻底消除污染风险;“达标排放模式”难以在满足作物氮肥需求的情况下,消除污染风险。研究表明,以“资源化模式”为主,“达标排放模式”作为补充的组合模式是消除当前污染风险的有效办法。

关键词:种养平衡;畜禽粪尿污染;系统动力学;预警;治理模式效果

中图分类号:X713 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2020)03-0628-10 doi:10.11654/jaes.2019-1035

Early warning of farmland pollution caused by livestock and poultry feces in China and analysis of governance model effectiveness based on the balance between planting and breeding

LI Peng-cheng, HAN Cheng-ji, SHI Zi-zhong, WANG Ming-li*

(Institute of Agricultural Economics and Development, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China)

Abstract: To explore the pollution risk in farmlands caused by livestock and poultry feces in China based on the balance of planting and breeding, the risk index of pollution of livestock and poultry feces was defined, and the system dynamics method was employed to ascertain early warning. Through scenario analysis, the effects of different governance modes on pollution control and crop nutrient supply were simulated. Based on the simulation results, under inertial trend, from 2018 to 2025, the livestock and poultry feces would constitute a mild level pollution risk to the environment in China. Reduction, resourcefulness, and standardized discharge were the three effective ways to control pollution caused by livestock and poultry feces. "Reduction model" would greatly reduce the self-sufficiency rate and total output value of livestock and poultry products. It was difficult to completely eliminate the pollution risk by improving the intensity of the "resource model". It was also difficult to eliminate the risk of pollution under the condition of meeting the demand of nitrogen fertilizer for crops as per the "standardized discharge model". Results show that taking "resource mode" as the primary mode and "standard emission mode" as the supplementary mode is an effective way to eliminate the current pollution risk.

Keywords: balance between planting and breeding; pollution by livestock and poultry feces; system dynamics; early warning; policy effect

收稿日期:2019-09-19 录用日期:2019-12-16

作者简介:李鹏程(1992—),男,重庆人,博士研究生,研究方向为畜牧业经济。E-mail:285172361@qq.com

*通信作者:王明利 E-mail:wangmingli@caas.cn

基金项目:“十三五”国家重点研发计划项目(2018YFD0501105);中国农业科学院科技创新工程项目(ASTIP-IAED-2020-01)

Project supported: National Key R&D Program During the 13th Five-Year Plan Period of China (2018YFD0501105); Science and technology innovation project of Chinese Academy of Agricultural Sciences (ASTIP-IAED-2020-01)

改革开放以来,中国畜禽养殖业发展迅速,产业整体素质实现了质的飞越,现已成为世界上最大的肉、蛋生产国^[1]。伴随着畜禽养殖业的迅猛发展,养殖排放也随之增多,至2015年中国畜禽粪尿排放已达到31.58亿t^[2],如何对这大量的畜禽粪尿进行有效处理已成为社会各界关注的热点。实践表明,将畜禽粪尿作为养分进行还田利用,是最为经济可行的处理方式^[3]。然而,其同时也是引起污染的重要因素,一旦耕地负荷量超过作物养分需求,则将造成地下水亚硝酸盐污染、江河水体富营养化、土壤矿物质损失等诸多危害^[4-6]。因此,从连接种植业与畜牧业的种养平衡视角出发,进行耕地畜禽粪尿负荷污染风险预警,以及分析污染治理模式效果,对于防治相关污染具有重要的现实意义。

已有大量学者基于种养结合视角,对各地区耕地畜禽粪尿负荷情况进行了分析。一些学者基于畜禽粪尿与作物养分需求之间相对大小这一实际情况,对各地区耕地畜禽粪尿负荷污染风险进行了评价,并由此提出进行总量控制的政策建议;养分的挥发、损耗、土壤供氮能力、灾害对作物养分需求的影响等情况相继被纳入到测算体系之中^[7-10]。另有一些学者在现状分析的基础上,基于不同有机无机配施比例这一假设,运用比较静态分析对各地区污染风险进行了预测,并认为在具有承载潜力的地区,可通过有机替代无机的方式扩大畜禽养殖规模,而养分盈余地区则需要移除多余部分^[11-12]。

上述研究对于摸清中国耕地畜禽粪尿负荷情况提供了坚实的基础,但仍存在以下不足:一是研究方法上,现有文献多是采用静态或比较静态分析,忽视了对中间过程的动态考量;二是研究对象上,现有研究主要围绕种植业、畜牧业两方面展开,忽视了社会、经济因素对于畜禽养殖排放污染存在的影响;三是研究内容上,现有研究多是对现状进行分析,或是在有机肥投入占总养分投入不同比例的假设下进行预测,缺乏对未来实际情况的预警,同时也缺乏对相关治理模式效果的评价。鉴于此,本研究基于种养结合视角,定义“畜禽粪尿污染风险指数”,同时将社会、经济、种植业、畜牧业纳入风险指数核算体系,运用系统动力学方法构建耕地畜禽粪尿负荷系统,动态分析系统各部分间存在的相互作用,预警2018—2025年中国耕地畜禽粪尿负荷污染风险,并从污染治理效果及对作物养分供给影响两个方面,对治理模式的效果进行评价,最终为制定畜禽粪尿治理政策措施提供参考。

1 数据来源与方法

1.1 数据来源

本研究所涉及的社会经济发展状况、畜禽养殖量和农作物产量等数据均来源于历年《中国统计年鉴》《中国农业年鉴》《国民经济统计公报》《中国畜牧兽医年鉴》以及《中国农业产业发展报告》。

1.2 方法

预警模型实质上由评价模型和预测模型构成^[13]。本研究构建畜禽粪尿污染风险指数评价耕地畜禽粪尿负荷污染风险,采用系统动力学模型预测风险指数、仿真污染治理模式效果。

1.2.1 基于种养平衡的耕地畜禽粪尿负荷污染风险评价模型

(1)评价指标设定

$$\varepsilon = \frac{L}{C} \quad (1)$$

$$L = S(1-\theta)(1-\mu) \quad (2)$$

$$C = D(1+\gamma) - f(1-\delta) - (s\lambda + p\omega)(1-\theta) - B - E \quad (3)$$

式中: ε 为畜禽粪尿污染风险指数,依据《畜禽粪污土地承载力测算技术指南》,以氮素含量进行测算; L 为耕地畜禽粪尿氮素负荷量,t; C 为耕地畜禽粪尿氮素承载力,t; S 为畜禽粪尿氮素含量,t; θ 为有机肥氮素损失率; μ 为草地畜禽粪尿负荷占比,用以排除草地承载的畜禽粪尿量; D 为作物氮肥需求量,t; γ 为作物在种植过程中因自然灾害造成产量失真的氮肥需求校正系数; f 为化肥氮施用量,t; δ 为化肥氮素损失率; s 为秸秆氮素含量,t; λ 为秸秆养分还田率, p 为农村生活氮素排放,t; ω 为农村生活排放留存率; B 为生物固氮量,t; E 为经大气沉降、灌溉输入到耕地的氮素量,t。根据相关文献^[14-15]及《畜禽粪污土地承载力测算技术指南》将 θ 、 δ 分别设为36.5%、50%;以草地畜禽粪尿负荷量(根据草地最大载畜量测算^[16])与总排放之比为草地负荷占比,以减产面积(受灾、成灾、绝收面积与各级灾害损失比例乘积之和)与播种面积之比为氮肥需求校正系数,取2008—2017年平均值,即令 μ 为8.50%、 γ 为7.66%;秸秆养分还田率随时间变化存在较大提升,依据《到2020年化肥使用量零增长行动方案》将2008—2017年 λ 设为35%,2018—2025年 λ 设为60%;依据杨淑静^[17]的研究将 ω 设为78.1%。 S 、 D 、 s 、 B 、 p 、 E 的计算公式分别如下:

$$S = \frac{\sum_{i=1}^n n_i X_i u}{1000} \quad (4)$$

式中： n_i 为*i*种畜禽猪当量换算系数， X_i 为*i*种畜禽存栏量，头； u 为单位猪当量氮素排泄量，kg。依据《畜禽粪污土地承载力测算技术指南》，按存栏量折算：100头猪相当于15头奶牛、30头肉牛、250只羊、2500只家禽；1个猪当量的氮素排泄量为11 kg。

$$D = \sum_{i=1}^n m_i Y_i \quad (5)$$

$$s = \frac{\sum_{i=1}^n g_i h_i Y_i}{1000} \quad (6)$$

$$B = \frac{\sum_{i=1}^n k_i Z_i}{1000} \quad (7)$$

式中： m_i 、 g_i 、 h_i 、 k_i 分别为*i*种作物氮肥需求系数($t \cdot 100 t^{-1}$)、谷草比、秸秆含氮量($kg \cdot t^{-1}$)、固氮系数($kg \cdot hm^{-2}$)； Y_i 、 Z_i 分别为*i*种作物产量(t)、播种面积或水田、旱地面积(hm^2)。收集国内公开发表的文章数据，确定作物相关系数(表1)，此外旱地非共生固氮系数为15，水田非共生固氮系数为44.8^[14-15,18]。

$$P = \frac{(1-r) i H}{1000} \quad (8)$$

式中： r 为常住人口城镇化率； i 为人均粪尿氮素排放量，kg； H 为总人口，人；依据秦钟等^[12]的研究将*i*设为4.4。

$$E = \frac{jW + kZ}{1000} \quad (9)$$

式中： j 、 k 分别为大气降氮系数及灌溉供氮系数， $kg \cdot hm^{-2}$ ； W 、 Z 分别为耕地面积和有效灌溉面积， hm^2 。根

据李书田等^[14]的研究，将*j*、*k*分别设为20.2、12.1。

(2) 预警值级设定

沈根祥等^[7]较早进行耕地畜禽粪尿负荷污染风险的警报分级研究，其依据种植过程中存在的有机无机配施比例在1:5到1:1之间这一实际情况，将预警级别设为5级，认为耕地畜禽粪尿负荷占到作物养分需求的0.4以上就对环境轻微污染，达到0.7、1、1.5以上分别造成稍有、较严重、很严重环境污染，这一分级标准被诸多学者采用^[19-20]。冯爱萍等^[21]依据农作物实际消纳情况及欧盟农业政策，将预警级别设为4级，认为每公顷耕地畜禽粪尿负荷量超过100 kg即对环境构成污染，超过170、225 kg分别构成较高污染和高污染。陈天宝等^[10]综合上述研究，将预警级别设为5级，认为耕地粪尿负荷量占到作物养分需求的0.45以上就对环境构成威胁，达到0.6、0.8、1以上分别构成明显、严重、重大污染威胁。通过对比上述3种分级方式可知，虽然各分级点绝对数值有所不同，但之间的相对比值十分接近，不同之处在于陈天宝等^[10]对较低级别的污染作了更为详细划分。结合本研究需要，借鉴陈天宝等^[10]研究，设置预警值级标准(表2)。

1.2.2 基于系统动力学的畜禽粪尿污染风险指数预测模型

(1) 系统框架及因果关系图

系统动力学(System dynamics, SD)以反馈控制理

表1 作物氮肥消纳系数、谷草比、秸秆含氮量

Table 1 N absorption coefficient of crops, grains-straw ratio, nitrogen content

作物 Crop	消纳系数 Absorption coefficient/ $t \cdot 100 t^{-1}$	谷草比 Grain-straw ratio	秸秆含氮量 N content of straw/ $kg \cdot t^{-1}$	固氮系数 N fixation coefficient/ $kg \cdot hm^{-2}$
水稻 Rice	2.2	0.9	8.3	
玉米 Corn	2.3	1.2	8.7	
小麦 Wheat	3	1.1	6.2	
大豆 Soybean	7.2	1.6	16.3	113.7
马铃薯 Potato	0.5	0.5	24	
油菜 Rape	5.8	1.5	8.2	
花生 Peanut	6.8	1.5	16.6	82.7
棉花 Cotton	11.7			
甘蔗 Sugarcane	0.18			
蔬菜 Vegetables	0.4			
水果 Fruits	0.48			

表2 畜禽养殖排放风险指数预警值级标准

Table 2 Classification criteria of land bearing risk index of livestock emissions

预警值级 Warning level	1	2	3	4	5
污染风险 Pollution risk	无污染	轻度污染	明显污染	严重污染	重大污染
预警值 Warning value	$\varepsilon \leq 1.15$	$1.15 < \varepsilon \leq 1.5$	$1.5 < \varepsilon \leq 2$	$2 < \varepsilon \leq 2.5$	$\varepsilon > 2.5$

论为基础,通过建立子系统间的因果关系,实现对具有多元性、动态性等特征的复杂系统的刻画,以及实现对系统发展中行为和趋势的研究,是一种研究地区环境承载及污染情况所常用的仿真方法^[22]。本研究运用系统动力学构建耕地畜禽粪尿负荷系统对2018—2025年中国畜禽粪尿污染风险指数进行预警,并仿真污染治理模式效果。

环境承载系统研究一般由社会、经济、生态3个子系统构成,本研究根据需要,按照各子系统功能将耕地畜禽粪尿负荷系统具体划分为社会、经济、种植业和畜禽养殖业4个子系统(图1)。其中,种植业子系统主要反映耕地畜禽粪尿氮素承载力,畜禽养殖子系统主要反映耕地畜禽粪尿氮素负荷量,二者直接决定畜禽粪尿污染风险指数。社会子系统、经济子系统分别通过畜禽、作物需求量、农村生活氮素排放和畜禽、作物贸易量、工业净化量对种植业子系统、畜禽养殖子系统产生影响,是驱动畜禽粪尿污染风险指数发生变化的根本力量。

(2) 存量流图

根据各子系统间的相互作用,以及子系统内部变量间的逻辑关系对因果关系图进行适当拓展,同时结合畜禽粪尿污染风险指数相关公式,运用Vensim软件建立存量流图(图2)。

各子系统变量、系统方程及参数设置如下:社会子系统以总人口为状态变量,包含新增人口流速变量、常住人口城镇化率、各畜禽产品人均消费量7个表函数;同时包括计算各畜禽产品需求量、农村常住

人口和农村生活氮素排放(公式7)的8个辅助方程,各畜禽人均需求量直接写入辅助方程。经济子系统由各畜禽贸易量6个表函数、治理单价、工业净化投入占比2个参数以及计算畜牧业总产值、环保治理投入、工业净化量的3个辅助方程构成,各肉类价格6个常数直接写入辅助方程中;根据吕志奎^[23]的调研数据,以含氮量计算,将工业净化的治理单价设为 $39\ 000\ \text{元}\cdot\text{t}^{-1}$,由于当前畜禽养殖场较少采用工业净化的方式对畜禽粪尿进行处理^[1],故假定当前工业净化投入占比为0,各肉类价格以2017年不变价格计算。种植业子系统包括化肥氮施用量1个状态变量,化肥氮增量1个流速变量,水稻、玉米等作物预计产量以及根据公式5~7测算的预计氮肥需求量、秸秆供氮量、生物固氮量、沉降灌溉供氮量共15个表函数,同时还包括各作物氮肥产出弹性、其他养分需求占比、秸秆养分还田率等共15个参数,以及计算各作物产量、氮肥需求量、氮肥盈余情况等变量的24个辅助方程,各作物消纳系数共11个常数写入辅助方程;粮食作物氮肥产出弹性来源于史常亮等^[24]测算结果,其他作物氮肥产出弹性根据各自“氮肥用量-作物产量关系函数”测算得出^[25-30],其他养分需求占比指烟草茶叶、豆类等其他作物养分需求占总养分需求的比例,取2008—2017年平均值表示,将其设定为5.9%,依据魏静等^[31]的调研数据,农村生活氮素排放还田率设定为70%,依据《全国农业可持续发展规划(2015—2030年)》将2008年畜禽养殖排放还田率设定为32.5%,2008—2017年间每年提升3.5个百分点。畜

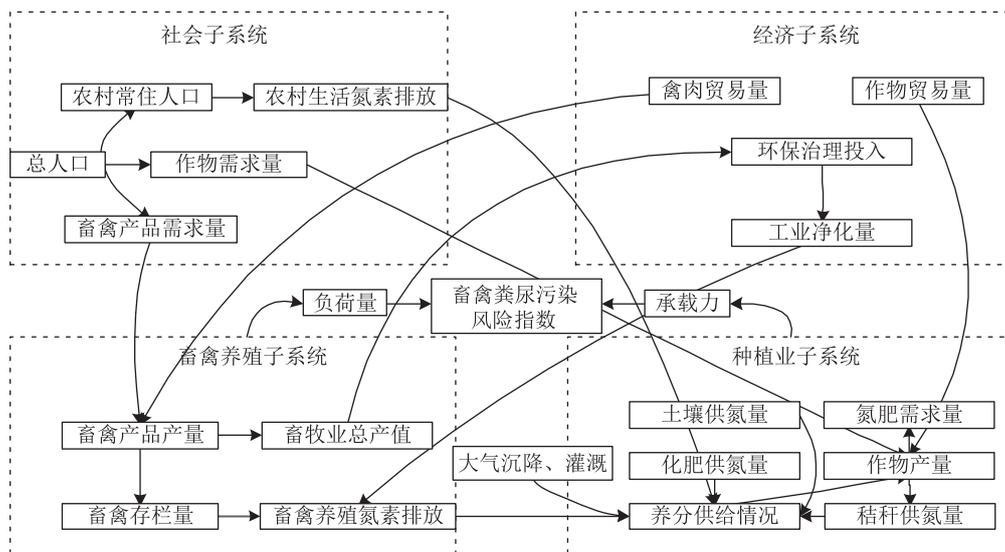


图1 耕地畜禽粪尿负荷系统因果关系图

Figure 1 Cause and effect of soil load of livestock emission system

禽养殖子系统,由其他畜禽养殖排放占比1个参数以及计算各肉类产量、各畜禽存栏量、各畜禽粪尿氮素含量、畜禽粪尿氮素含量(公式4)的19个辅助方程构成,以每5年平均值表示的各单位畜禽产肉量、出栏率10个分段函数及排放系数5个常数写入辅助方程;依据相关研究^[2],将驴等其他畜禽排放占比设为2.5%;以2008—2017年平均值表示产肉量、出栏率等变量。此外,存量流图中还包括计算畜禽粪尿污染风险指数的3个辅助方程(公式1~公式3)。

(3)历史性检验

从系统中选取生猪粪尿氮素含量、玉米氮肥需求

量和氮肥需求量为检验变量,将2008—2017年的数据代入模型进行模型历史性检验,结果见表3。

由表3可知,检验变量实际值与仿真值相关误差均小于10%,表明模型运行结果与实际数据之间拟合度较高,模型能较为准确地描述研究系统的基本现状,具有良好预测效果,可进行下一阶段的模拟仿真。

1.3 情景设置

1.3.1 惯性趋势设置

2018—2025年预测数据,如新增人口、人均畜禽消费量、畜禽贸易量、作物预计产量等变量均来源于中国农科院“中国农业产业模型”(China Agricultural

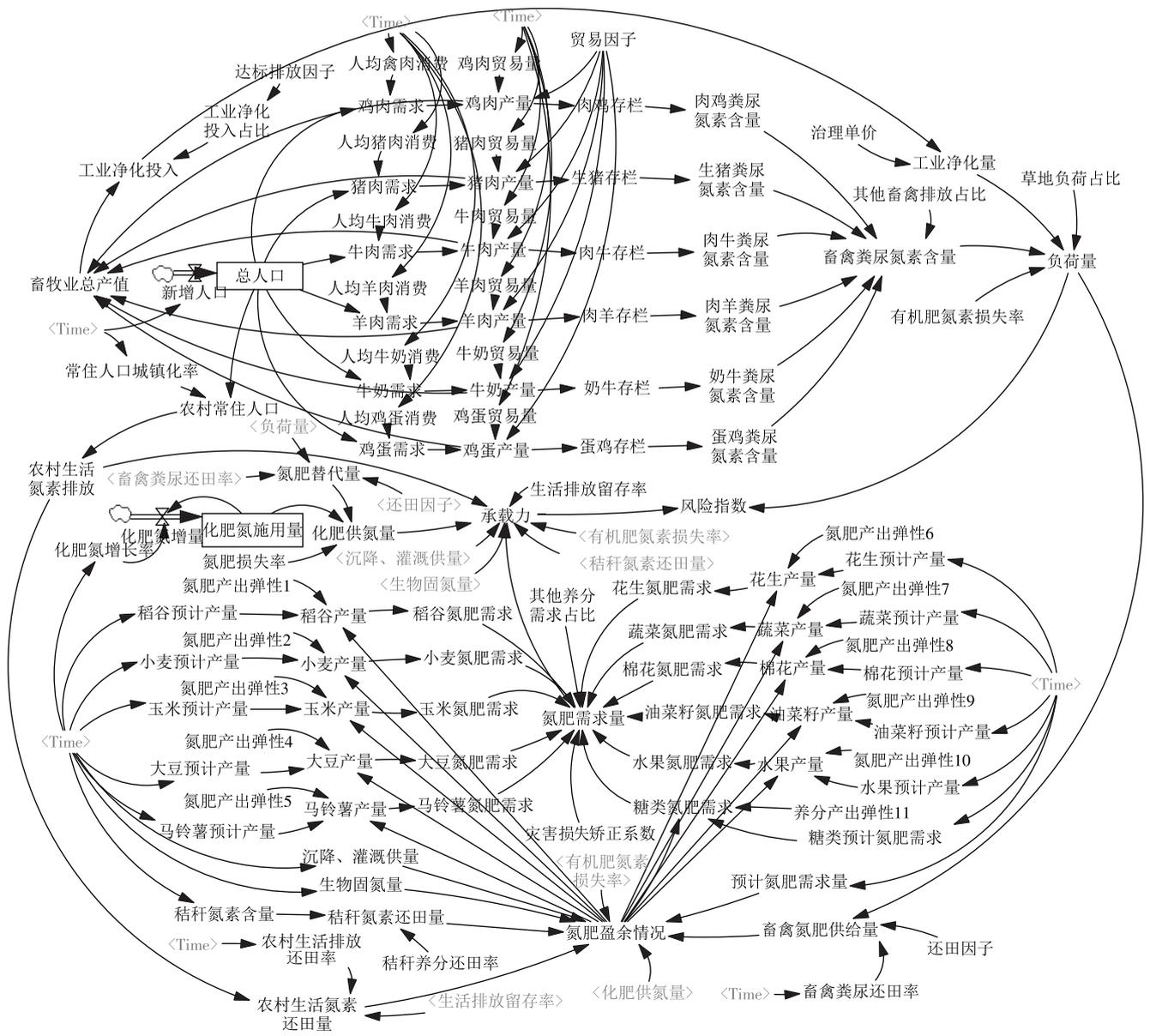


图2 耕地畜禽养殖粪尿负荷系统流图

Figure 2 Flow diagram of soil load of livestock emission system

Sector Model, CASM) 预测结果^[32]; 根据作物预计产量测算出预计氮肥需求量, 并结合《到2020年化肥使用量零增长行动方案》, 假定氮肥施用量以每年0.3%的速度增长。其他变量预测值依据相关发展规划进行假设, 如依据《国家人口发展规划(2016—2030年)》假设常住人口城镇化率每年增长1%; 依据《全国农业可持续发展规划(2015—2030年)》, 设定2018—2025年畜禽粪尿还田率每年提升1.5个百分点, 同时假定农村生活氮素排放按照畜禽养殖排放还田率相同增速变化。

1.3.2 治理情景设置

(1) 干预点选择

减量化、资源化、达标排放是应对畜禽粪尿污染的3类主要办法^[33]。“减量化模式”主要通过限制地区养殖规模, 从源头降低畜禽粪尿排放总量, 最终缓解由此造成的环境污染^[34]; 主要涉及系统中各畜禽人均消费量、贸易量2个变量, 考虑到进行污染治理的同时应当保障畜禽产品充足供给, 满足中国社会饮食需求, 故只选取贸易量作为“减量化模式”的干预点。“资源化模式”主要通过提升还田率, 并等量调减化肥用量, 以“有机替代无机”的方式提升耕地畜禽粪尿氮素承载力, 最终避免排放污染^[35]; 主要涉及系统中化肥供氮量、畜禽粪尿还田率2个干预点。“达标排放模式”主要强调畜禽养殖场运用工业净化等方式, 对养殖排放进行深度处理, 实现达标排放; 主要涉及系统中工业净化投入占比这一干预点。

(2) 情景因子参数设置

在干预点选择基础上, 设置“贸易因子”“还田因子”和“环保投入因子”, 并结合相关规划及现实约束,

调整情景因子, 改变相应干预点取值, 以形成不同治理情景。具体而言, “贸易因子”主要影响禽肉产品自给率的调整, 故以2025年我国畜禽产品自给率(总贸易量/总需求量)为参照, 分别设置自给率80%、75%、70%3个情景, 即相当于调整贸易因子, 使所有畜禽产品贸易量均提升1.64、2.05、2.46倍。“还田因子”主要影响畜禽粪尿排放还田率的调整, 设置还田率在相关规划基础上分别提升10%、20%、30%3个情景, 与之对应的2025年畜禽粪尿还田率分别为74.25%、81.00%、87.75%。“环保投入因子”主要影响工业净化投入占总产值比重的调整, 依据《全国城市生态环境保护与建设规划(2015—2020年)》中对环保投入占GDP比重的要求, 以及畜禽养殖企业平均利润率, 分别设置环保投入占比2.5%、3.5%、4.5%3个情景。依据干预点选择及情景因子设置, 进行治理情景设置(表4)。

2 结果与分析

2.1 中国耕地畜禽粪尿负荷惯性趋势预警

仿真结果显示(表5), 随着畜禽需求的持续增长, 中国畜禽粪尿氮素含量呈现持续上升态势, 到2025年, 畜禽粪尿氮素含量将达到 $1.381\ 38 \times 10^7$ t, 较2017年增长11.59%, 其中肉鸡、肉羊、奶牛粪尿氮素含量增幅较大, 分别达到35.76%、16.87%、14.88%; 绝对数值方面, 虽然生猪粪尿氮素含量增幅最小, 仅为2.44%, 但仍然是主要的氮素来源, 占到氮素总量的35.98%, 较2017年降低3.23%, 其次是肉牛、蛋鸡, 粪尿氮素含量分别占到氮素总量的20.17%、13.17%, 其他畜禽粪尿氮素含量占30.68%。2025年, 化肥氮施

表3 历史检验结果(10⁴t)

Table 3 Historic inspection results(10⁴ t)

年份 Year	生猪粪尿氮素含量 N content of pig faeces			玉米氮肥需求量 N fertilizer demand of corn			氮肥需求量 N fertilizer demand		
	真实值 Actual value	拟合值 Simulation value	误差 Error	真实值 Actual value	拟合值 Simulation value	误差 Error	真实值 Actual value	拟合值 Simulation value	误差 Error
2008	478.72	510.76	6.69%	395.87	403.48	1.92%	2 320.33	2 246.51	1.81%
2009	501.74	518.95	3.43%	398.49	406.30	1.96%	2 317.79	2 269.03	1.88%
2010	523.07	514.42	-1.65%	438.73	447.00	1.88%	2 349.16	2 309.62	1.81%
2011	525.39	517.82	-1.44%	486.03	493.08	1.45%	2 480.57	2 433.17	1.36%
2012	557.78	528.33	-5.28%	527.99	534.51	1.23%	2 575.51	2 515.58	1.19%
2013	504.74	526.82	4.37%	571.44	577.45	1.05%	2 631.75	2 569.04	1.01%
2014	522.41	518.76	-0.70%	574.46	579.78	0.93%	2 663.93	2 608.81	0.88%
2015	508.88	503.83	-0.99%	609.48	613.74	0.70%	2 711.11	2 670.16	0.69%
2016	497.00	486.30	-2.15%	606.31	609.94	0.60%	2 712.17	2 669.47	0.59%
2017	403.00	405.17	-2.01%	595.86	597.78	0.32%	2 750.65	2 698.62	0.30%

表4 治理情景设置

Table 4 Development scenario design

治理情景 Governance scenario	影响变量 Influencing variables	不同治理强度参数设置 Different governance emphasizes parameter setting			
		现状 Present	低强度 Low intensity	中等强度 Moderate intensity	高强度 High intensity
减量化 Reduction	贸易因子 Trade factor	1	1.64	2.05	2.46
资源化 Resource	还田因子 Returning factor	1	1.1	1.2	1.3
达标排放 Reach the standard of discharge	环保投入因子 Environmental protection input factors	0	0.025	0.035	0.045

用量、秸秆氮素含量、农村生活氮素排放将分别达到 $2.275\ 71\times 10^7$ 、 $7.748\ 2\times 10^6$ 、 $2.174\ 0\times 10^6$ t,较2017年分别增长2.43%、4.89%、-14.31%。随着社会农作物需求及氮肥供给的增长,作物产量持续上涨,表现为氮肥需求量持续增长,至2025年,氮肥需求量将达到 $2.774\ 30\times 10^7$ t,约增长3.10%,其中粮食作物氮肥需求上升约2.80%,达到 $1.670\ 10\times 10^7$ t,占氮肥总需求的60.20%,饲料需求上涨带动玉米产量大幅增长是粮食作物氮肥需求上涨的主要推动力量,玉米氮肥需求上升7.16%;蔬菜/瓜果氮肥需求上升4.32%,达到 $4.647\ 5\times 10^6$ t,占氮肥总需求的16.75%;油料、糖类氮肥需求上升3.38%,达到 $2.239\ 8\times 10^6$ t,占氮肥总需求的8.07%。2018—2025年畜禽粪尿污染风险指数持续下降,但始终高于1.83,表明预警区间内耕地畜禽粪尿负荷将持续对环境构成明显污染风险。

2.2 治理情景仿真

在对畜禽粪尿污染治理的过程中,须同时保障作物生长所需养分的充足供给,所以本研究将畜禽粪尿污染风险指数与氮肥盈余情况同时设为治理情景的输出结果。

从表6仿真结果可知,通过提升“减量化模式”治理强度,可有效降低污染风险指数,但即便进行高强度

治理,使畜禽产品自给率降低至70%,耕地畜禽粪尿负荷仍将对环境构成明显污染,同时将导致畜牧业总产值减少3693亿元,这表明由于我国畜禽粪尿排放总量巨大,远超过耕地承载力,若主要依靠“减量化模式”,需大幅进口国外畜禽产品,将极大降低我国畜禽产品的自给率,同时畜禽养殖是我国农民的重要收入来源,简单地进行源头减量也不利于我国农民脱贫、增收。“资源化模式”能够在维持氮肥盈余不变的情况下,有效降低风险指数,但即便进行高强度治理,将2025年还田率提升到87.75%,耕地畜禽粪尿负荷仍将对环境构成轻度污染,意味着畜禽粪尿氮素排放总量过大,超过了耕地的承载力,单凭提升资源化强度难以彻底消除污染风险。“达标排放模式”对于降低畜禽粪尿污染风险具有明显效果,进行低强度治理就可达到“减量化模式”高强度治理效果,此时污染治理支出仅为754.05亿元。但此模式同时会减少氮肥供给,当达到中等强度,氮肥供给将减少 1.25×10^6 t,此时氮肥供给将低于预计作物氮肥需求量,这表明,此模式难以在满足作物氮肥需求的情况下,消除污染风险。同时意味着在化肥用量受到控制的情况下,畜禽粪尿将成为重要的氮肥供给来源,所以应当主要将其进行资源化利用以保障氮肥的充足供给,即“达标排放模式”只能作为畜禽

表5 主要仿真结果

Table 5 Major simulation results

年份 Year	总人口 Population/ 10^8 people	秸秆含氮量 N content of straw/ 10^4 t	农村生活氮素排放 Rural life N emission/ 10^4 t	氮肥施用量 N fertilizer consumption/ 10^4 t	畜禽粪尿含氮量 N content of faeces/ 10^4 t	氮肥需求 N fertilizer demand/ 10^4 t	风险指数 Risk index
2018	13.89	738.066	250.65	2 228.49	1 244.41	2 694.12	1.94
2019	13.95	744.175	248.67	2 235.17	1 247.06	2 709.46	1.89
2020	14.01	750.809	246.49	2 241.88	1 274.6	2 724.18	1.88
2021	14.05	756.961	241.05	2 248.6	1 292.72	2 736.77	1.86
2022	14.08	761.819	235.42	2 255.35	1 312.95	2 751.14	1.84
2023	14.10	765.323	229.59	2 262.11	1 334.12	2 759.82	1.84
2024	14.11	770.475	223.57	2 268.9	1 357.88	2 771.84	1.83
2025	14.12	774.823	217.40	2 275.71	1 381.38	2 782.75	1.83

表6 2025年治理情景风险指数、氮肥盈余情况仿真结果

Table 6 Simulation results of scenario risk index and nitrogen demand in 2025

治理情景 Governance scenario	治理强度 Governance emphasizes	2025年治理效果 Governance effect in 2025	
		畜禽粪尿污染风险指数 Risk index of livestock emission pollution	氮肥盈余情况/% Surplus of nitrogen fertilizer
减量化 Reduction	低	1.73	2.03
	中	1.66	1.24
	高	1.59	0.44
资源化 Resource	低	1.63	3.28
	中	1.47	3.28
	高	1.34	3.28
达标排放 Reach the standard of discharge	低	1.55	0.03
	中	1.44	-1.30
	高	1.32	-2.56

粪尿污染治理的一种补充模式。

3 讨论

大量学者基于种养平衡视角,从畜禽存栏及作物产量或耕地面积的现状出发,对某一区域或全国范围的耕地畜禽粪尿负荷情况进行了测算,对评价畜禽粪尿环境污染风险具有重要意义。本研究则从中国禽肉产品、主要农产品消费需求及贸易量的预测数据出发,对中国畜禽粪尿环境污染风险进行预警,还通过情景模拟,分析了不同污染治理模式的实际效果,对未来相关政策制定提供参考。

由于一旦畜禽粪尿排放总量超过当地承载力,就将对环境构成威胁^[1],所以与前人的研究相同,本研究在计算耕地畜禽粪尿负荷量时,只考虑了畜禽粪尿排放量及氮素损失率^[9,11]。而与前人的研究不同,本研究还同时测算了氮肥盈余情况,并通过调整还田率,分析了“资源化模式”的治理效果。

本研究使用统一的畜禽粪尿排放系数测算了全国畜禽粪尿排放量,但不同地区畜禽粪尿排放系数存在一定差异,因此后续研究应分地区对畜禽产品需求等数据进行预测,并结合各地区畜禽粪尿排放系数,计算畜禽粪尿污染风险指数,从而使研究结果更具科学性和指导意义。

4 结论与政策启示

4.1 结论

本文基于种养平衡视角,定义畜禽粪尿污染风险

指数,并应用系统动力学方法进行中国耕地畜禽粪尿负荷污染风险预警研究,以之为基础,通过情景分析,模拟不同治理模式的污染治理效果及对作物养分供给情况的影响。研究结果显示:

(1)2018—2025年,惯性趋势下我国耕地畜禽粪尿负荷始终将对环境构成明显污染。

(2)在满足社会畜禽产品需求这一前提下,“减量化模式”主要通过增加畜禽产品进口量来减少国内养殖规模,最终降低耕地畜禽粪尿负荷污染风险,但将导致我国畜禽产品自给率及总产值大幅下降。

(3)“资源化模式”通过有机替代无机的方式,能够在维持氮肥盈余不变的情况下,有效降低污染风险,但由于氮肥供给过量,单凭提升“资源化”强度难以消除耕地畜禽粪尿负荷污染风险。

(4)“达标排放模式”主要采用工业净化等方式,对畜禽粪尿进行深度处理,对于降低污染风险具有明显效果,但进行相应处理的同时将减少氮肥供给,难以在满足作物氮肥需求的情况下,消除耕地畜禽粪尿负荷污染风险。

4.2 政策启示

(1)进一步采取措施进行污染治理。虽然在《到2020年化肥使用量零增长行动方案》作用下,2018—2025年我国“耕地畜禽粪尿负荷污染风险指数”将逐年降低,但耕地畜禽粪尿负荷始终将对环境构成明显污染,有必要进一步采取措施进行污染治理。

(2)我国耕地畜禽粪尿负荷污染治理应以“资源化模式”为主,“达标排放模式”作为补充。促进畜禽粪污资源化利用,能在缓解污染的同时,减少化肥用量,实现有机无机肥配施,提升作物产量、质量,故应作为首选模式。在受到客观条件制约,无法对畜禽粪尿进行资源化利用或超过当地承载力的地方,采用“达标排放模式”进行治理。

(3)出台激励政策进一步促进畜禽粪尿养分还田。“资源化模式”顺利开展的关键在于畜禽粪尿还田率的提升。首先,应当依据地区耕地承载力优化畜禽养殖业布局,为畜禽粪尿还田创造客观条件。其次,应通过经济激励等方式,鼓励养殖户开展种养结合,实现畜禽粪尿还田。第三,畜禽粪尿制成有机肥更便于长距离运输、使用,故应当对有机肥的生产、流通进行补贴,加强有机肥市场建设,提升畜禽粪尿养分还田率。

参考文献:

[1]李文华,成升魁,梅旭荣,等.中国农业资源与环境可持续发展战略

- 研究[J]. 中国工程科学, 2016, 18(1):60-70.
- LI Wen-hua, CHENG Sheng-kui, MEI Xu-rong, et al. Study on strategies for the sustainable development of China's agricultural resources and environment[J]. *Engineering Science*, 2016, 18(1):60-70.
- [2] 宋大利, 侯胜鹏, 王秀斌, 等. 中国畜禽粪尿中养分资源数量及利用潜力[J]. 植物营养与肥料学报, 2018, 24(5):5-22.
- SONG Da-li, HOU Sheng-peng, WANG Xiu-bin, et al. Nutrient resource quantity of animal manure and its utilization potential in China [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2018, 24(5):5-22.
- [3] 饶静, 张燕琴. 从规模到类型:生猪养殖污染治理和资源化利用研究:以河北LP县为例[J]. 农业经济问题, 2018(4):121-130.
- RAO Jing, ZHANG Yan-qin. An analysis of pollution control and utilization of manure of pig raising farms of different scales and types in China: Take LP county of Hebei Province as an example[J]. *Issues in Agricultural Economy*, 2018(4):121-130.
- [4] 孟祥海, 张俊飏, 李鹏, 等. 畜牧业环境污染形势与环境治理政策综述[J]. 生态与农村环境学报, 2014, 30(1):1-8.
- MENG Xiang-hai, ZHANG Jun-biao, LI Peng, et al. Summary of livestock environmental pollution and environmental management policies [J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2014, 30(1):1-8.
- [5] 吴二社, 张松林, 刘焕萍. 农村畜禽养殖与土壤重金属污染[J]. 中国农学通报, 2011, 27(3):285-288.
- WU Er-she, ZHANG Song-lin, LIU Huan-ping. Livestock and poultry breed aquatics in rural areas and soil heavy metal pollutions[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2011, 27(3):285-288.
- [6] 张维理, 武淑霞, 冀宏杰, 等. 中国农业面源污染形势估计及控制对策 I. 21世纪初期中国农业面源污染的形势估计[J]. 中国农业科学, 2004, 37(7):1008-1017.
- ZHANG Wei-li, WU Shu-xia, JI Hong-jie, et al. Estimation of agricultural non-point source pollution in China and the alleviating strategies I. Estimation of agricultural non-point source pollution in China in early 21 Century[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2004, 37(7):1008-1017.
- [7] 沈根祥, 汪雅谷, 袁大伟. 上海市郊农田畜禽粪便负荷量及其警报与分级[J]. 上海农业学报, 1994, 10(S1):6-11.
- SHEN Gen-xiang, WANG Ya-gu, YUAN Da-wei. Livestock and poultry excrement load and its warning and grading in suburban farmland of Shanghai[J]. *Acta Agriculturae Shanghai*, 1994, 10(S1):6-11.
- [8] 黄红英, 常志州, 叶小梅, 等. 区域畜禽粪便产生量估算及其农田承载预警分析:以江苏为例[J]. 江苏农业学报, 2013, 29(4):777-783.
- HUANG Hong-ying, CHANG Zhi-zhou, YE Xiao-mei, et al. Estimation of regional livestock manure production and farmland loading capacity: A case study of Jiangsu Province[J]. *Jiangsu Journal of Agricultural Sciences*, 2013, 29(4):777-783.
- [9] 邱乐丰, 龙文莉, 方豪, 等. 基于种养平衡的杭州市畜禽养殖环境承载力研究[J]. 自然资源学报, 2016, 31(8):1410-1419.
- QIU Le-feng, LONG Wen-li, FANG Hao, et al. Regional environmental carrying capacity for livestock and poultry breeding based on planting-breeding balance in Hangzhou City[J]. *Journal of Natural Resources*, 2016, 31(8):1410-1419.
- [10] 陈天宝, 万昭军, 付茂忠, 等. 基于氮素循环的耕地畜禽承载能力评估模型建立与应用[J]. 农业工程学报, 2012, 36(5):130-137.
- CHEN Tian-bao, WAN Zhao-jun, FU Mao-zhong, et al. Establishment and application of evaluation model for carrying capacity of farmland livestock and poultry based on nitrogen cycle[J]. *Journal of Agricultural Engineering*, 2012, 36(5):130-137.
- [11] 潘瑜春, 孙超, 刘玉, 等. 基于土地消纳粪便能力的畜禽养殖承载力[J]. 农业工程学报, 2015, 31(4):232-239.
- PAN Yu-chun, SUN Chao, LIU Yu, et al. Carrying capacity of livestock and poultry breeding based on feces disposal volume of land[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31(4):232-239.
- [12] 秦钟, 隆少秋, 王璐, 等. 基于系统动力学的东莞有机废弃物替代化肥潜力研究[J]. 农业工程学报, 2019, 35(11):223-232.
- QIN Zhong, LONG Shao-qiu, WANG Lu, et al. Potential of partial substitution of chemical fertilizer by organic manures in Dongguan based on system dynamics[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2019, 35(11):223-232.
- [13] 高伟, 刘永, 和树庄. 基于SD模型的流域分质水资源承载力预警研究[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2018, 54(3):673-679.
- GAO Wei, LIU Yong, HE Shu-zhuang. A system dynamic forewarning model of watershed dual water resources carrying capacity[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2018, 54(3):673-679.
- [14] 李书田, 金继运. 中国不同区域农田养分输入、输出与平衡[J]. 中国农业科学, 2011, 44(20):4207-4229.
- LI Shu-tian, JIN Ji-yun. Characteristics of nutrient input/output and nutrient balance in different regions of China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2011, 44(20):4207-4229.
- [15] 王敬国, 林杉, 李保国. 氮循环与中国农业氮管理[J]. 中国农业科学, 2016(3):503-517.
- WANG Jing-guo, LIN Shan, LI Bao-guo. Nitrogen cycling and management strategies in Chinese agriculture[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2016(3):503-517.
- [16] 杨旭东, 杨春, 孟志兴. 我国草原生态保护现状、存在问题及建议[J]. 草业科学, 2016, 33(9):1901-1909.
- YANG Xu-dong, YANG Chun, MENG Zhi-xing. The current situation, problems and suggestions of grassland ecological protection in China[J]. *Pratacultural Science*, 2016, 33(9):1901-1909.
- [17] 杨淑静. 宁夏灌区农业氮磷流失污染负荷估算研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2009:36.
- YANG Shu-jing. Estimation of agricultural nitrogen and phosphorus loss pollution load in Ningxia irrigation area[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2009:36.
- [18] 毕于运. 秸秆资源评价与利用研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2010:41-43.
- BI Yu-yun. Evaluation and utilization of straw resources[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2010:41-43.
- [19] 陈斌玺, 刘俊专, 吴银宝, 等. 海南省农地土壤畜禽粪便承载力和养殖环境容量分析[J]. 家畜生态学报, 2012, 33(6):78-84.
- CHEN Bin-xi, LIU Jun-zhuan, WU Yin-bao, et al. Analysis of livestock manure carrying capacity of farmland soil and environmental capacity for livestock cultivation in Hainan Province[J]. *Journal of Live-*

- stock Ecology*, 2012, 33(6):78-84.
- [20] 张绪美,董元华,王辉,等.中国畜禽养殖结构及其粪便N污染负荷特征分析[J].环境科学,2007,28(6):1311-1318.
ZHANG Xu-mei, DONG Yuan-hua, WANG Hui, et al. Structure of livestock and variation of fecal nitrogen pollution load in China[J]. *Environmental Science*, 2007, 28(6):1311-1318.
- [21] 冯爱萍,王雪蕾,刘忠,等.东北三省畜禽养殖环境风险时空特征[J].环境科学研究,2015,28(6):967-974.
FENG Ai-ping, WANG Xue-lei, LIU Zhong, et al. Temporal-spatial analysis of environmental risks from animal production in Northeast China[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2015, 28(6):967-974.
- [22] 韩成吉,张雪花,滑永胜.基于SD的耕地与生态用地联合调配策略仿真与优选:以天津市为例[J].中国生态农业学报(中英文),2019,27(3):59-72.
HAN Cheng-ji, ZHANG Xue-hua, HUA Yong-sheng. Development of strategies for joint allocation of cultivated land and ecological land in Tianjin based on system dynamics[J]. *Chinese Journal of EcoAgriculture*, 2019, 27(3):59-72.
- [23] 吕志奎.第三方治理:流域水环境合作共治的制度创新[J].学术研究,2017(12):77-83,177.
LÜ Zhi-kui. The third-party governance: Institutional innovation in watershed environmental management[J]. *Academic Research*, 2017(12):77-83,177.
- [24] 史常亮,郭焱,朱俊峰,等.中国粮食生产中化肥过量施用评价及影响因素研究[J].农业现代化研究,2016,37(4):671-679.
SHI Chang-liang, GUO Yan, ZHU Jun-feng, et al. Evaluation of over fertilization in China and its influencing factors[J]. *Research of Agricultural Modernization*, 2016, 37(4):671-679.
- [25] 于俊红,彭智平,黄继川,等.施氮量对花生养分吸收及产量品质的影响[J].花生学报,2011(3):20-23.
YU Jun-hong, PENG Zhi-ping, HUANG Ji-chuan, et al. Effects of nitrogen on yield, quality and nutritive absorption of middle and strong gluten wheat[J]. *Plant Nutrition and Fertilizing Science*, 2011(3):20-23.
- [26] 周骏.棉花最佳施肥量的探讨[J].上海农业科技,2012(2):111-113.
ZHOU Jun. Discussion on the optimum fertilization amount of cotton [J]. *Shanghai Agricultural Science and Technology*, 2012(2):111-113.
- [27] 申晓慧.不同氮肥施用量对大豆根际土壤微生物数量及产量的影响[J].大豆科学,2016,33(2):284-286.
SHEN Xiao-hui. Effect of nitrogen amount on rhizosphere soil microorganisms and yield of soybean[J]. *Soybean Science*, 2016, 33(2):284-286.
- [28] 马国勇,范艺文,贾宁.中国马铃薯生产影响因素的实证分析[J].统计与决策,2016(13):136-139.
MA Guo-yong, FAN Yi-wen, JIA Ning. Empirical analysis on the influencing factors of potato production in China[J]. *Statistics & Decision*, 2016(13):136-139.
- [29] 刘杏认.化肥及有机肥对叶菜产量和硝酸盐含量影响研究[D].保定:河北农业大学,2003:17-18.
LIU Xing-ren. Study on the effect of chemical fertilizer and organic fertilizer on leaf vegetable yield and nitrate content[D]. Baoding: Hebei Agricultural University, 2003:17-18.
- [30] 崔振岭.华北平原冬小麦-夏玉米轮作体系优化氮肥管理:从田块到区域尺度[D].北京:中国农业大学,2005:23-24.
CUI Zhen-ling. Optimizing nitrogen fertilizer management in winter wheat-summer maize rotation system in North China Plain from field to regional scale[D]. Beijing: China Agricultural University, 2005:23-24.
- [31] 魏静,马林,杨玉荣,等.城镇化对我国食物消费系统氮素水体排放的影响[J].生态学报,2009,29(11):6035-6041.
WEI Jing, MA Lin, YANG Yu-rong, et al. The influence of urbanization on nitrogen emission to water in food consumption system of China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(11):6035-6041.
- [32] 中国农业科学院.中国农业产业发展报告2019[M].北京:经济科学出版社,2019:125-133.
Chinese Academy of Agricultural Sciences. China agricultural industry development report 2019[M]. Beijing: Economic Science Press, 2019:125-133.
- [33] 金书秦,韩冬梅,吴娜伟.中国畜禽养殖污染防治政策评估[J].农业经济问题,2018(3):119-126.
JIN Shu-qing, HAN Dong-mei, WU Na-wei. Evaluation on prevention policies for livestock and poultry pollution in China[J]. *Issues in Agricultural Economy*, 2018(3):119-126.
- [34] 耿维,胡林,崔建宇,等.中国区域畜禽粪便能源潜力及总量控制研究[J].农业工程学报,2013,29(1):171-179.
GENG Wei, HU Lin, CUI Jian-yu, et al. Biogas energy potential for livestock manure and gross control of animal feeding in region level of China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2013, 29(1):171-179.
- [35] 张怀志,李全新,岳现录,等.区域农田畜禽承载力预测模型构建与应用:以赤峰市为例[J].生态与农村环境学报,2014,30(5):576-580.
ZHANG Huai-zhi, LI Quan-xin, QIU Xian-lu, et al. Development and application of model for prediction of regional farmland livestock and poultry carrying capacity: A case study of Chifeng City[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2014, 30(5):576-580.