

区域农田畜禽承载力预测模型构建与应用:以赤峰市为例

张怀志, 李全新^①, 岳现录, 冀宏杰 (中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 北京 100081)

摘要: 为对区域现有生猪养殖数量的合理性进行评价及对生猪养殖承载力进行预测, 从畜禽养殖-耕地-作物系统出发, 基于农田养分平衡理论及有机和无机肥合理配施方法, 构建区域农田畜禽承载力预测模型。以赤峰市为例, 设定有机和无机肥配施比例为 5: 5, 并保持现有农田 N 或 P_2O_5 养分盈余量不变, 分别基于 N 和 P_2O_5 养分盈余量不变实地应用该模型。结果表明, 基于 N 时可新增生猪养殖数量 43.6 万头, 承载力为 630.8 万头; 基于 P_2O_5 时可新增生猪养殖数量 369.3 万头, 承载力为 1 041.3 万头。位于西拉木伦河南岸的松山区、翁牛特旗、喀喇沁旗、宁城县和敖汉旗是可新增生猪养殖的主要区域。从环境压力角度考虑, 推荐基于 N 的预测值作为计算赤峰市可新增生猪养殖量和承载量的依据。

关键词: 农田养分平衡; 有机无机肥配施; 畜禽承载力; 模型

中图分类号: X321 文献标志码: A 文章编号: 1673-4831(2014)05-0576-05

Development and Application of Model for Prediction of Regional Farmland Livestock and Poultry Carrying Capacity: A Case Study of Chifeng City. ZHANG Huai-zhi, LI Quan-xin, YUE Xian-lu, JI Hong-jie (Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China)

Abstract: Based on the Breeding-Farmland-Crops system, a regional farmland livestock and poultry carrying capacity model was developed by integrating the theory of field nutrient balance and reasonable combined application of organic manure and inorganic fertilizers. The model was used to evaluate rationality of the number of pigs currently kept in the pens of the region and to predict pig carrying capacity of the region. A case study was performed of Chifeng City, assuming that the ratio of organic manure and inorganic fertilizer in combined fertilization was 5: 5, and that the fertilization kept surplus of N and P_2O_5 nutrients unchanged in the farmlands now under cultivation. On such as basis, the model was tested. The results show that if based on N balance, the number of pigs in pen could be increased by 0.436 million and the regional pig carrying capacity up to 6.308 million pigs and if based on P_2O_5 balance, the number of pigs in pen could be increased by 3.693 millions and the regional pig carrying capacity up to 10.413 million pigs. Songshan, Wengniute, Kalaqin, Ningcheng and Aohan on the south bank of the Xilamulun River are the major areas that have the potential to increase the number of pigs in pen. In consideration of the pressure from the environment, the N-based prediction can be recommended as the basis for calculation of potential increment in the number of pigs in pen and pig carrying capacity of Chifeng City.

Key words: farmland nutrient balance; combined application of organic manure and inorganic fertilizer; livestock and poultry carrying capacity; model

早在 20 世纪 70 年代, 欧美等发达国家就已开始重视畜禽粪便的处理利用问题。美国环保部编制了农业面源污染控制管理方法^[1], 比利时的 Flander 地区分别于 1996 和 1999 年实行了有机肥行动计划 1 (Manure Action Plan 1) 和有机肥行动计划 2 (Manure Action Plan 2)^[2]。我国先后制定并颁布了《畜禽规模养殖污染防治条例》、GB 18596—2001《畜禽养殖业污染物排放标准》、HJ 497—2009《畜禽养殖业污染治理工程技术规范》和 HJ/T 81—2001《畜禽养殖业污染防治技术规范》等法律法规和标准^[3-6]。耿维等^[7]测算得到 2010 年我国畜禽养殖粪便产生量为 22.35 亿 t, 粪便中 N、P 养分含量分别为 0.19 和 0.04 亿 t。

粪便还田是一种经济简便的粪便处理方式, 但如果区域养殖的畜禽粪便产生量超过农地承载能力, 就容易对环境造成二次污染。因此, 一些学者对农地畜禽粪便承载量和适宜的畜禽养殖数量开展研究^[8-14], 但这些研究多从畜禽粪便中氮磷养分含量可导致环境污染的风险角度出发, 而基于农田养分平衡理论的适宜畜禽养殖规模方面的研究较少, 尤其是我国农田养分过量施用的情况下, 畜禽养殖承载力方面的研究更是鲜见报道。因此, 该研

收稿日期: 2014-02-13

基金项目: 国家科技基础性工作专项(2012FY112100)

① 通信作者 E-mail: liqx258369@163.com

究在农田养分盈余和合理配施基础上建立区域农田畜禽承载力预测模型, 以期为今后不同区域农田确定适宜的畜禽养殖承载力提供理论依据。

1 研究方法

1.1 研究区概况

赤峰市位于内蒙古自治区东部 (41°17'10" ~ 45°24'15" N, 116°21'07" ~ 120°58'52" E), 总面积约为 90 275 km²。该市南部区包括元宝山区、红山区、松山区、喀喇沁旗、翁牛特旗、敖汉旗和宁城县, 北部区包括克什克腾旗、巴林左旗、巴林右旗、林西县和阿鲁科尔沁旗。可利用草原面积 480 万 hm², 年均降水量 390 mm, 耕地面积 100 余万 hm², 粮食播种面积 86 万 hm², 其中玉米播种面积超过 40 万 hm², 蔬菜播种面积 6 万 hm², 果园面积 1 万 hm²。养殖的畜禽种类主要有肉牛、奶牛、猪、马、驴、骡、羊和鸡等。根据每头猪粪便 N (57.7 g · d⁻¹) 和 P₂O₅ 含量 (14.17 g · d⁻¹), 将区域畜禽养殖数量统一折算成生猪养殖量, 得到研究区域生猪 (体质量约 75 kg) 养殖量分别为 587.3 万和 671.9 万头。

1.2 区域农田生猪承载力预测模型构建

1.2.1 区域农田生猪承载力预测模型

在分析区域农田养分平衡基础上维持或调整现有养分盈余, 通过设置有机和无机肥合理配施参数以调整养分投入量, 预测区域农田生猪总承载量 (T_{pig} , 万头) 和区域农田生猪养殖新增承载量 (S_{pig} , 万头); 分别根据猪粪便中 N 和 P₂O₅ 养分含量, 将各种畜禽养殖数量统一折算成生猪养殖量。计算公式分别为

$$T_{\text{pig}} = M_{\text{InR}} \cdot 10^6 / P_{\text{NP}}, \quad (1)$$

$$S_{\text{pig}} = M_{\text{balR}} \cdot 10^6 / P_{\text{NP}}, \quad (2)$$

$$M_{\text{balR}} = M_{\text{InR}} - M_{\text{In}}. \quad (3)$$

式(1)~(3)中 M_{InR} 和 M_{balR} 分别为按照有机和无机肥合理配施比例重新计算后的有机肥源养分允许投入量和有机肥源养分增减量, $t \cdot a^{-1}$; P_{NP} 为每头猪每天排泄粪便中 N 或 P₂O₅ 养分量, $g \cdot d^{-1}$; M_{In} 为实际有机肥源养分投入量, $t \cdot a^{-1}$ 。有机肥源包括人畜粪尿、秸秆和饼肥, 鉴于研究区域有机肥资源中饼肥所占比例较小, 且作为畜禽饲料使用, 秸秆多作为饲料, 在此忽略不计, 故有机肥源仅指人畜粪尿。

$$M_{\text{InR}} / F_{\text{InR}} = \alpha, \quad (4)$$

$$M_{\text{InR}} \cdot (1 - A) + F_{\text{InR}} \cdot (1 - B) = C_{\text{out}} + N_{\text{bal}} - N_{\text{In}} - N_{\text{Aln}} - N_{\text{NFIn}} - N_{\text{Stn}}, \quad (5)$$

$$C_{\text{out}} = \sum C_i \cdot C_{\text{mi}} / 10^3, \quad (6)$$

$$M_{\text{In}} = \sum A_j \cdot M_{\text{NPj}} \cdot 365 / 10^6. \quad (7)$$

式(4)~(7)中, F_{InR} 为根据有机和无机肥合理配施比例重新计算后的化肥源养分允许投入量, $t \cdot a^{-1}$; α 为有机和无机肥的合理配施比例; A 和 B 分别为有机肥和化肥中 N、P 损失比例; C_{out} 为作物带走养分量, $t \cdot a^{-1}$; N_{bal} 为当地环境条件允许的养分盈余量, $t \cdot a^{-1}$, 当 N_{bal} 等于现有养分盈余量时, 参照文献 [15] 计算; N_{In} 为灌溉水中养分含量, $t \cdot a^{-1}$; N_{Aln} 为养分干湿沉降量, $t \cdot a^{-1}$; N_{NFIn} 为生物固 N 量, $t \cdot a^{-1}$; N_{Stn} 为种子养分含量, $t \cdot a^{-1}$; C_i 为第 i 种作物产量, $t \cdot a^{-1}$; C_{mi} 为第 i 种作物单位产量所需要的养分量, $kg \cdot t^{-1}$; A_j 为第 j 种畜禽养殖数量或人口数量 (头 (只) 或人), 畜禽数量为其年存栏量, 人口数量为年终人口统计数; M_{NPj} 为畜禽或人的 N、P 养分日排泄量, $g \cdot d^{-1}$ 。

1.2.2 模型参数来源

养分平衡计算模型所用参数均来自文献 [7, 15-17]。 N_{FIn} 采用《2011 赤峰市统计年鉴》[18] 数据, 化肥消费量中复合肥的 N、P 和 K 比例根据东北地区统计值 1: 2.0: 0.2 计算 [17]。每年通过大气沉降输入到农田的 N 和 P₂O₅ 分别为 20.20 和 1.22 kg · hm⁻², 通过灌溉水输入到农田的 N 和 P₂O₅ 为 12.1 和 1.5 kg · hm⁻², 豆类生物固 N 量为 113.7 kg · hm⁻², 旱地非共生固 N 量为 15.0 kg · hm⁻²; N 损失途径主要有氨挥发、硝化反硝化、地表径流及淋溶等, 化肥 N 损失按 50% 计, 有机肥中的 N 损失按 30% 计。P 在土壤中的扩散系数小且移动慢, 较难损失, 一般沉淀积累在土壤中, 具有长效性, 当季利用率为 10% ~ 25%, 但 P 累积利用率可达 80% 以上, 因此 P 养分损失按投入的 20% 计。

2 结果与分析

2.1 各旗县区单位耕地面积 N 和 P₂O₅ 盈余量

从图 1 可见, 研究区域各旗县区 N 和 P₂O₅ 均有盈余, 除宁城县外, 其他旗县区耕地单位面积 N 盈余量均高于 P₂O₅。全市单位耕地面积平均 N 盈余量为 94.2 kg · hm⁻², 高于全国平均值 60.7 kg · hm⁻² [15], 与欧盟地区 (66.0 kg · hm⁻²) 相当 [19]。12 个旗县区中, 元宝山区单位耕地面积 N 盈余量最高, 为 235.6 kg · hm⁻²; 宁城县最低, 为 21.6 kg · hm⁻²。松山区、翁牛特旗和巴林左旗也低于全市平均水平。全市单位耕地面积平均 P₂O₅ 盈

余量为 $48.1 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,低于全国平均值 $59.2 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ [17]。12 个旗县区中,元宝山区单位耕地面积 P_2O_5 盈余量最高,达 $139.1 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,巴林左旗最低,为 $21.0 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,低于全市平均水平的还有松山区、翁牛特旗、宁城县、林西县和克什克腾旗。

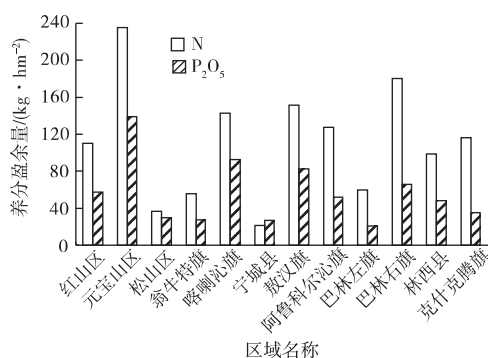


图1 赤峰市各旗县区单位耕地面积 N 和 P_2O_5 盈余量
Fig. 1 N or P_2O_5 surplus per unit area of farmland in different area of Chifeng City

2.2 基于 N 的生猪承载量和可新增养殖量预测

设定有机和无机肥合理配施比例为 5: 5 ,且研究区现有的 79 742 t N 盈余量及各旗县区 N 盈余量保持不变,预测基于 N 的生猪承载量和可新增养殖数量。由图 2 可见,红山区、松山区、翁牛特旗、喀喇沁旗、宁城县和敖汉旗生猪养殖数量可分别增加 0.9、10.0、3.4、14.5、17.9 和 34.9 万头,这可能与化肥源 N 投入量大于有机肥源 N 投入量有关。

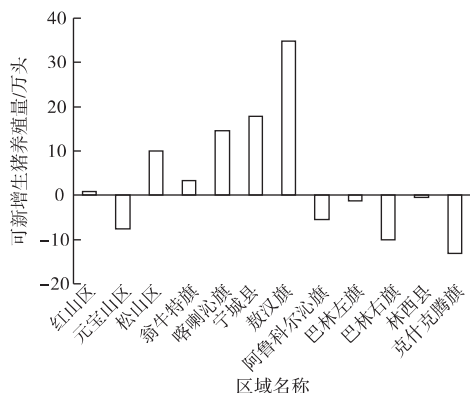


图2 基于 N 的可新增生猪养殖量预测结果
Fig. 2 N-balance-based prediction of potential increment in the number of pigs in pen in the region

在满足作物生长对 N 需求的基础上,可以减少化肥源 N 投入量,相应地增加有机肥源 N 投入量。上述 6 个旗县区有机肥源 N 投入量可分别增加

192.4、2 112.2、715.2、3 046.8、3 761.4 和 7 350.3 t 相应地化肥源 N 投入量应减少 6% ~ 33% ;而元宝山区、阿鲁科尔沁旗、巴林左旗、巴林右旗、林西县和克什克腾旗的有机肥源 N 投入量大于化肥源 N 投入量,生猪养殖数量应分别减少 7.6、5.5、1.2、10.0、0.5 和 13.2 万头。11 个旗县区累计生猪新增养殖数量为 43.6 万头。结合目前各旗县区已有生猪数量计算,预计研究区累计生猪承载量为 630.8 万头,其中松山区、翁牛特旗、宁城县、敖汉旗和阿鲁科尔沁旗生猪承载量超过 60 万头(图 3)。

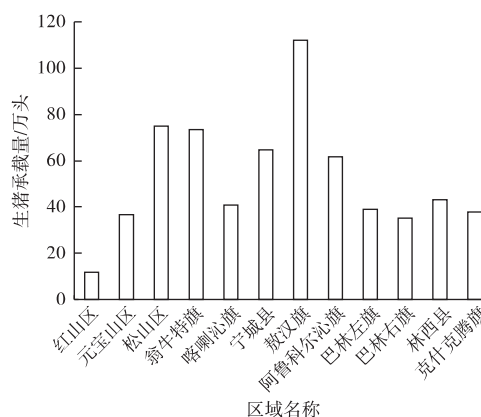


图3 基于 N 的生猪承载量预测结果
Fig. 3 N-balance-based prediction of potential pig carrying capacity of the region

2.3 基于 P_2O_5 的生猪承载量和可新增养殖量预测

设定有机和无机肥合理配施比例为 5: 5 ,且研究区现有的 45 204 t P_2O_5 盈余量和各旗县区 P_2O_5 盈余量保持不变,预测基于 P_2O_5 的生猪承载量和可新增养殖数量。由图 4 可见,红山区、松山区、翁牛特旗、喀喇沁旗、宁城县、敖汉旗红山区、阿鲁科尔沁旗、巴林左旗和林西县的生猪养殖数量可分别增加 5.9、52.6、40.2、48.2、65.5、122.8、19.4、16.7 和 14.4 万头,这可能与化肥源 P_2O_5 投入量大于有机肥源 P_2O_5 投入量有关。在满足作物生长对 P 需求的基础上,可以减少化肥源 P_2O_5 投入量,增加有机肥源 P_2O_5 投入量。上述 9 个旗县区有机肥源 P_2O_5 投入量可分别增加 307.1、2 707.5、2 070.4、2 480.0、3 369.3、6 322.8、1 000.0、864.2 和 741.9 t,化肥源 P_2O_5 投入量应减少 16.5% ~ 38.7%。元宝山区、巴林右旗和克什克腾旗目前的有机肥源 P_2O_5 投入量大于化肥源 P_2O_5 投入量,生猪养殖数量应分别减少 5.2、3.9 和 7.3 万头。11 个旗县区累计生猪新增养殖数量为 369.3 万头。结合目前各旗县区已有生猪数量计算,预计研究区域累计生猪

承载量为 1 041.3 万头,其中松山区、翁牛特旗、宁城县和敖汉旗生猪承载量超过 100 万头(图 5)。

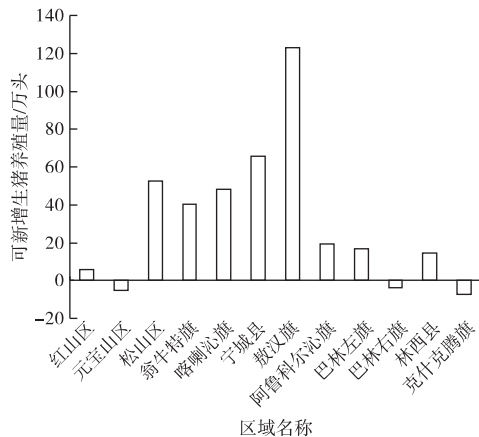


图 4 基于 P_2O_5 的可新增生猪养殖量预测结果

Fig. 4 P_2O_5 -balance-based prediction of potential increment in the number of pigs in pen in the region

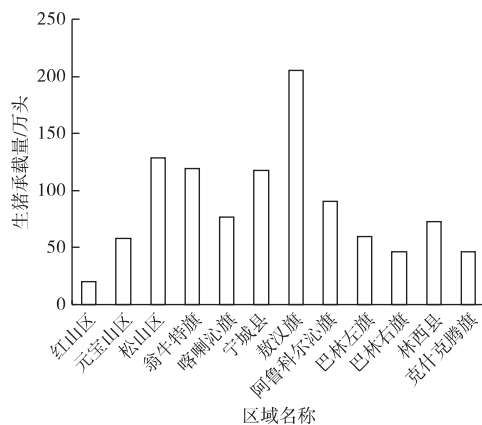


图 5 基于 P_2O_5 的生猪承载量预测结果

Fig. 5 P_2O_5 -balance-based prediction of potential pig carrying capacity of the region

3 讨论

3.1 基于养分平衡理论和有机无机肥合理配施的区域农田生猪承载量预测模型

陈天宝等^[10]构建了基于 N 素循环的耕地畜禽承载能力评估模型,该模型将所有养殖畜禽按照活体质量折算为生猪(体质量 100 kg)头数,并采用 0~1 的有机肥养分与无机肥养分投入比例进行测算,但该模型没有涉及农田养分实际盈余情况;LI 等^[14]在构建区域畜禽承载量预测模型时设定作物所需养分仅来源于养殖粪便还田和土壤供应 2 个方面,没有考虑化肥源养分,也没有涉及农田养分实

际盈余情况。但我国化肥用量超过 6 000 多万 t(折纯),忽略化学养分施用的畜禽承载量预测模型是不全面的。李书田等^[17]对我国不同区域农田养分平衡情况进行了测算,结果表明我国农田 N、P 普遍存在正盈余。该研究所构建的生猪承载量模型正是基于我国农田养分正盈余这一实际情况,维持或者调整现有养分盈余量,同时引入有机和无机肥合理配施比例参数,既可促进粪便资源的循环利用,又考虑了化学养分的施用。

3.2 关于养分盈余量与有机和无机肥合理配施比例的确定

国内外相关研究大多注重养分收支平衡计算,而较少对养分盈亏进行评价^[2,12]。鲁如坤等^[20]建立了允许养分平衡盈亏率计算模型,该模型主要用来指导作物施肥。欧盟颁布了《环境问题纳入农业一体化指标报告》(Indicator Reporting on the Integration of Environment Concerns into Agriculture Policy, IRENA),将 N、P 表观盈余作为环境风险评价指标,但并不能从农田养分平衡的计算中得到养分流失量,各地区可根据具体情况确定适宜的 N、P 养分盈余量,同时辅之以特定水体水质进行评价^[19,21-22]。根据《赤峰市河流水质月报》^[23],地表水氨氮和总磷指标达Ⅲ类水质标准,符合饮用水要求,因此在进行农田生猪承载量预测时可维持当地的养分盈余量不变。

在养分总投入量一定的情况下,曹树钦等^[24]研究表明,有机和无机养分配比为 5:5 时,可以达到既培肥土壤又能使当季作物增产的双重目的;侯红乾等^[25]和刘善勇等^[26]研究表明,有机和无机养分配比为 7:3 时水稻产量最高,5:5 时次之;赵明等^[27]研究表明,有机和无机养分配比为 6:4 时番茄产量最高;朱宝国等^[28]研究表明,有机和无机养分配比为 5:5 时番茄产量最高。因此,笔者将有机和无机肥合理配施比例设定为 5:5。

3.3 基于 N 和 P_2O_5 的预测结果比较

基于 N 预测结果表明,研究区生猪可新增养殖数量为 43.6 万头,承载量为 630.8 万头;而基于 P_2O_5 预测结果表明,生猪可新增养殖数量为 369.3 万头,承载量为 1 041.3 万头。造成预测结果差异的主要原因一是化肥源和有机肥源养分投入调整量对预测结果有影响,若有机肥源调整量为正,即有机肥源养分投入可以增加,畜禽养殖量则可新增,调整量值越大,新增畜禽养殖量就越多;相反地,若有机肥源调整量为负,则畜禽养殖量不能增加或减少。二是生猪粪便中的 N 和 P_2O_5 含量存在

差异。

研究区 N 盈余量为 79 742 t, P_2O_5 盈余量为 45 204 t 均为正盈余。基于 N 和 P_2O_5 的生猪可新增养殖数量预测结果有较大差异时该如何确定生猪可新增养殖数量? JOHANNA 等^[12]认为基于 N 盈余量确定作物有机肥用量时,容易导致 P 在土壤中的累积。农业生产实践中,基于 P_2O_5 盈余量确定作物有机肥用量较为罕见,且对土壤中 N 累积的影响未见报道。考虑到 N 和 P_2O_5 均为正盈余,因此在确定区域未来农田生猪承载量时,建议采用较低的生猪养殖数量预测值,以降低环境风险。

4 结论

该研究构建的区域农田生猪承载量预测模型引入有机和无机肥合理配比(5:5),可实现有机肥源养分的充分利用,维持目前已有的养殖结构,切合我国农业生产的实际。应用该模型测算出赤峰市基于 N 的生猪可新增养殖数量为 43.5 万头,承载量为 630.8 万头;基于 P_2O_5 的生猪可新增养殖数量为 369.3 万头,承载量为 1 041.3 万头。其中,松山区、翁牛特旗、喀喇沁旗、宁城县和敖汉旗 5 个旗县区是可新增生猪养殖的主要区域,而元宝山区应该适当减少生猪养殖量。

参考文献:

- [1] U. S. Environmental Protection Agency. National Management Measures to Control Nonpoint Pollution From Agriculture (EPA 841-B-03-004) [EB/OL]. (2003-07) [2003-12-20]. http://water.epa.gov/polwaste/nps/agriculture/agmm_index.cfm.
- [2] ANNELIES M, HOFMAN G, BAECKE E *et al.* A Methodology for the Calculation of Farm Level Nitrogen and Phosphorus Balances in Flemish Agriculture [J]. *European Journal of Agronomy*, 2003, 20(12):45-51.
- [3] 畜禽规模养殖污染防治条例 [EB/OL]. (2013-11-26) [2013-12-20]. http://www.gov.cn/zwqk/2013-11/26/content_2534836.html.
- [4] GB 18596—2001 畜禽养殖业污染物排放标准 [S].
- [5] HJ 497—2009 畜禽养殖业污染治理工程技术规范 [S].
- [6] HJ/T 81—2001 畜禽养殖业污染防治技术规范 [S].
- [7] 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.
- [8] 冯倩, 许小华, 刘聚涛, 等. 鄱阳湖生态经济区畜禽养殖污染负荷分析 [J]. *生态与农村环境学报*, 2014, 30(2):162-166.
- [9] 武兰芳, 欧阳竹, 谢小立. 我国典型农区耕地承载畜禽容量对比分析 [J]. *自然资源学报*, 2013, 28(1):104-113.
- [10] 陈天宝, 万昭军, 付茂忠, 等. 基于氮素循环的耕地畜禽承载力评估模型建立与应用 [J]. *农业工程学报*, 2012, 28(2):191-195.
- [11] 牛俊玲, 秦莉, 郑宾国, 等. 河南省规模化养殖发展中的耕地污染负荷及风险评价:以河南省长垣县为例 [J]. *农业环境科学学报*, 2008, 27(5):2105-2108.
- [12] JOHANNA S, LAWRENCE B, HUGH C J. Whole-System Phosphorus Balances as a Practical Tool for Lake Management [J]. *Ecological Engineering*, 2007, 29(3):294-304.
- [13] 陈斌玺, 刘俊专, 吴银宝, 等. 海南省农地土壤畜禽粪便承载力及养殖环境容量分析 [J]. *家畜生态学报*, 2012, 33(6):78-84.
- [14] LI H P, YU B. Numerical Study of Regional Environmental Carrying Capacity for Livestock and Poultry Farming Based on Planting-Breeding Balance [J]. *Journal of Environment Science*, 2013, 25(9):1882-1889.
- [15] 武淑霞. 我国农村畜禽养殖业氮磷排放时空变化特征及其对农业面源污染的影响 [D]. 北京:中国农业科学研究院, 2005.
- [16] 农业部科教司第一次全国污染源普查领导小组办公室. 第一次全国污染源普查畜禽养殖业源产排污系数手册 [EB/OL]. (2011-11-05) [2013-11-15]. <http://www.docin.com/p-282602001.html>.
- [17] 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.
- [18] 赤峰市统计局. 2011 赤峰市统计年鉴 [M]. 北京:中国统计出版社, 2011:11-283.
- [19] European Environment Agency (EEA). Integration of Environment Into EU Agriculture Policy: The IRENA Indicator-Based Assessment Report [R]. Copenhagen, Denmark: [s. n.], 2006:1-60.
- [20] 鲁如坤, 刘鸿翔, 闻大中, 等. 我国典型地区农业生态系统养分循环和平衡研究 IV:农田养分平衡的评价方法和原则 [J]. *土壤通报*, 1996, 27(5):197-199.
- [21] MONICA B, DARIO S, LAURA Z *et al.* Nutrient Balance as a Sustainability Indicator of Different Agro-Environments in Italy [J]. *Ecological Indicators*, 2011, 11(2):715-723.
- [22] SMITH A J, ROGER L T, KELLY N *et al.* Regional Nutrient Threshold in Wadeable Streams of New York State Protective of Aquatic Life [J]. *Ecological Indicators*, 2013, 29:455-467.
- [23] 赤峰市环境保护局. 赤峰市河流水质月报 [EB/OL]. (2010-10) [2013-12-20]. <http://www.cfhb.gov.cn/sjzx/hjsj/hlszyb/>.
- [24] 曹树钦, 叶丽娟, 陈仑寿. 土壤肥力监测与培肥 [J]. *中国农业大学学报*, 1996, 1(1):61-66.
- [25] 侯红乾, 刘秀梅, 刘光荣, 等. 有机化肥配比比例对红壤稻田水稻产量和土壤肥力的影响 [J]. *中国农业科学*, 2011, 44(3):516-523.
- [26] 刘善勇, 董霞, 朱淑仙, 等. 有机化肥配比比例对沿黄稻区水稻产量的影响 [J]. *山东农业科学*, 2013, 45(8):90-93.
- [27] 赵明, 蔡葵, 王文娇, 等. 有机化肥配比对番茄产量和品质的影响 [J]. *山东农业科学*, 2009, 41(12):90-93.
- [28] 朱宝国, 于志和, 王因因, 等. 有机肥和化肥不同比例配施对大豆产量和品质的影响 [J]. *大豆科学*, 2010, 29(1):97-100.

作者简介:张怀志(1968—),男,江苏东海人,副研究员,博士,主要从事施肥与环境、农业信息技术研究。E-mail:zhang_njau@163.com