

我国典型农区耕地承载畜禽容量对比分析

武兰芳¹, 欧阳竹¹, 谢小立²

(1. 中国科学院 地理科学与资源研究所, 生态系统网络观测与模拟重点实验室禹城试验站,
北京 100101; 2. 中国科学院 亚热带农业生态研究所, 长沙 415025)

摘要: 根据农田养分平衡理论, 对我国南北两个县级区域山东禹城和湖南桃源的耕地承载畜禽容量和负载指数进行了对比分析。基于农田 N 收支情景分析表明: 当农田施用粪便 N 分别占到总投入 N 的 30%、60% 和 100% 时, 山东禹城耕地承载畜禽容量分别为 4.1、8.3 和 13.8 $\text{LU} \cdot \text{hm}^{-2}$, 相应负载指数分别是 2.2、1.1 和 0.7, 湖南桃源耕地承载畜禽容量分别是 4.4、8.7 和 14.6 $\text{LU} \cdot \text{hm}^{-2}$, 相应负载指数分别是 1.4、0.7 和 0.4; 基于农田 N 收支的耕地畜禽容量呈现为禹城略低于桃源, 负载指数呈现为禹城显著高于桃源。基于农田 P 收支情景分析表明: 当农田施用粪便 P_2O_5 分别占总施入 P_2O_5 的 30%、60% 和 100% 时, 山东禹城耕地承载畜禽容量分别为 6.7、13.5 和 22.5 $\text{LU} \cdot \text{hm}^{-2}$, 相应的耕地畜禽承载指数分别是 1.3、0.7 和 0.4, 湖南桃源耕地承载畜禽容量分别是 2.5、5.1 和 8.5 $\text{LU} \cdot \text{hm}^{-2}$, 相应的负载指数分别是 2.4、1.2 和 0.7, 基于农田 P 收支的耕地畜禽容量呈现为禹城显著高于桃源, 负载指数为禹城低于桃源。可见, 禹城基于农田 N 收支的耕地承载畜禽容量显著低于基于农田 P 收支的耕地承载畜禽容量, 桃源正好与禹城相反。因此, 今后在制定减少农田环境污染对策时, 禹城应首先考虑农田 N 收支及粪便 N 的有效管理与利用; 桃源则应首先考虑农田 P 收支及粪便 P 的有效管理与利用, 并且因为区域内乡镇之间存在较大差异, 还应在乡镇之间进行协调平衡。

关键词: 畜禽养殖容量; 耕地负载指数; 山东禹城; 湖南桃源

中图分类号: X26 文献标志码: A 文章编号: 1000-3037(2013)01-0104-10

畜禽粪便含有丰富的养分资源, 自古以来就一直被作为有机肥返还农田。虽然作为有机肥用于作物生产是其最合适的去向, 但是, 当一定区域内畜禽数量规模及其产生粪便超过作物生长需要和土壤的自净能力时, 养分盈余问题就会显现^[1]。所以, 在许多耕地数量少而畜禽数量多的国家, 畜禽数量通常与作物的种植面积相关联, 需要根据耕地面积决定畜禽的养殖数量^[2]。为了确保畜牧生产的可持续发展, 一个地区畜禽养殖密度应确保不超过这个地区土壤的承载能力^[3], 养分盈余是一个与农业生产密切相关的环境质量指标, 欧盟许多国家已把农场尺度的 N 素收支平衡作为监测农业环境政策效应的一个重要工具^[4]。为了控制畜禽粪便的污染, 欧盟委员会把投入农田的粪便 N 作为评价 N 素环境污染的一个指标, 并确定了其投入的最高限额为 170 $\text{kg N} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ^[5], 还有一些国家同时又制定了每年粪便 P 的施限量^[6], 如挪威、瑞典和爱尔兰分别规定每年粪便 P 的最高施用量为 35、22 和 40 $\text{kg P} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ^[7]。在荷兰, 利用规定的 N、P 施限量标准已经成为立法方针,

收稿日期: 2011-03-08; 修订日期: 2012-05-23。

基金项目: 中国科学院重要方向性项目(KSCX2-YW-N-022)。

第一作者简介: 武兰芳(1963-), 女, 博士, 副研究员, 中国自然资源学会会员(S300001171M), 主要从事区域农业可持续评价、农田生态及生产力形成相关方面的研究。E-mail: wulf@igsnr.ac.cn

根据不同类型土壤制定了 N、P 养分的最大施用量和损失量,具有耕地的农民不得不想方设法使 N、P 用量低于政府规定限量标准,而那些没有耕地的畜禽养殖农场则除了根据粪便处理合同与从事种植的农民签约合作别无选择,而基于耕地的生产系统如大部分奶牛养殖场则必需保持在限量标准以下或也需要签订粪便处理协议^[8]。

尽管土壤的承载能力通常是根据单位面积上可施用 N 和 P 的最大量来表示,而不是单位面积上的畜禽单位或牛奶生产量^[9],但是,目前有许多国家和地区还是根据农田养分平衡理论,利用逐级测算方法制定有关规章制度以限制点源污染情况下的养分排放和面源污染情况下的养殖密度^[9]。例如,欧盟规定最大养殖密度为 $2.0 \text{ LU} \cdot \text{hm}^{-2}$,相当于施用粪便 N 控制在 $170 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 以下,维持饮用水中的硝酸盐含量低于 $50 \text{ mg NO}_3 \cdot \text{L}^{-1}$ 、 P_2O_5 低于 $5\,000 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$;德国根据规定农田 N 的最高施用量为 $240 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,确定各洲的最大养殖密度为 $3.5 \sim 4.5 \text{ LU} \cdot \text{hm}^{-2}$,而且,还要严格限制粪便的施用(特别是冬季)和贮存时间^[9]。韩国也正在开始启动一项新的农业环境政策以限制畜禽数量,即根据环境容量实施区域养殖配额制度的研究^[9]。

我国畜禽养殖是农民增收的主要渠道之一,通常是农民只要能力足够,养殖规模从来就没有任何限制,所以我国的畜禽养殖数量增长迅速。但是,在养殖业发展较快的广大农村地区,大部分农民既没有用于粪便堆制肥料的设施设备,也没有把粪便用于肥料的足够土地。所以,在养殖规模较大的农村地区,粪便的随意堆放和农田过量施用也成为环境的重要污染源之一。随着畜禽养殖带来的环境污染问题越来越引起人们的重视,一些学者虽已开始关注到环境污染严重地区的耕地粪便承载量^[10-12],但是关于耕地承载粪便容量,及对一定区域内生态环境友好前提下畜禽养殖适宜规模的研究报导甚少。因此,本研究尝试性地根据区域农田承载粪便数量与承载能力,分析探讨环境健康前提下我国县级区域畜禽养殖的耕地畜禽密度与承载容量,为我国今后治理环境污染一旦需要根据耕地面积制定畜禽养殖限量规模时提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 区域概况

选择位于我国不同地区的山东省禹城市(县级市)和湖南省桃源县为案例。这两个县均以农业生产为主,畜牧业发展迅速,其生产条件、生产水平及生态气候特点分别在黄淮海平原和长江中下游亚热带地区具有典型性和代表性,基本情况见文献^[3]。

1.2 分析方法

根据 Scröder 和 Schölefield 等^[9]提出的区域生态环境健康控制评价指标层次结构框架,基于农田养分平衡理论,逐级计算区域农田系统 N、P 养分施用量、可承载或可消纳粪便 N (或 P)、可承载畜禽粪便数量,最终确定区域农田承载畜禽容量。

单位耕地 N 或 P 最大可施用量: 根据营养平衡理论确定,是耕地输出 N、P 总量与可接受的 N、P 最大损失量之和。其中耕地输出 N、P 总量通过农田种植结构与产出水平计算确定^[4-13],种植结构与产出水平相关数据来自于当地历年统计资料。N、P 容许的最大损失量参考文献中已报导的限量标准^[8,14]: 可接受的 N 损失量为 $100 \sim 150 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,可接受的 P 损失量为 $20 \sim 30 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,本文分别按 $150 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $30 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 计算。

耕地可消纳粪便 N 或 P: 耕地 N 或 P 最大施用量 $\times$ 粪便 N 或粪便 P 占耕地总投入养分比例,粪便 N 或 P 投入的比例占耕地总投入养分比例分别设置 30%、60% 和 100% 三种

情景,粪便 N 的 3 种情景分别记为情景 1、情景 2 和情景 3,粪便 P 的 3 种情景分别记为情景 4、情景 5 和情景 6。

耕地可消纳粪便量: 耕地可消纳粪便 N/粪便 N 含量系数或耕地可消纳粪便 P/粪便 P 含量系数。

耕地承载畜禽容量: 耕地可消纳粪便总量/畜禽粪便排泄总量,粪便排泄量根据各种畜禽粪便排泄系数及粪便 N、P 含量系数计算^[12,14-15];同时,为了便于不同地区及不同畜禽之间相互比较,利用 LU 折算系数^[17],把各种畜禽数量换算成国际上通用的统一标准畜禽单位(LU)。畜禽养殖规模与结构相关数据来自于当地历年统计资料。

耕地畜禽承载量: 畜禽养殖数量/耕地面积。耕地畜禽承载量的大小反映了一个地区的畜禽养殖密度,耕地承载畜禽容量是一个地区农田耕作制度及其生产水平的综合反映。不同区域畜禽承载量相同,但因其所处地区的农田种植制度及产出水平不同,则耕地畜禽承载容量会存在较大差异。因此,耕地畜禽承载量的大小并不能全面反映一个地区的畜禽养殖及其粪便排放量是否超过其承载能力,为了更好地反映区域耕地畜禽及其粪便的承载状况,这里引入一个耕地畜禽负载指数用以表示区域耕地畜禽的负载程度。

耕地畜禽负载指数: 耕地畜禽承载量/耕地畜禽承载容量。负载指数 < 1,说明耕地承载的畜禽密度低于耕地可承载的畜禽容量,畜禽粪便排放量小于农田系统作物对畜禽粪便的消纳能力,承载指数越小,说明对环境的污染风险越低;承载指数 > 1,说明耕地承载的畜禽密度已高于耕地可承载的畜禽容量,畜禽粪便排放量大于农田作物对畜禽粪便的消纳能力,对环境具有污染威胁,承载指数越大,对环境的污染风险就越高。

2 结果与分析

2.1 基于农田 N 收支的耕地畜禽承载容量及其负载指数

根据目前的种植结构及产出水平,基于农田 N 收支状况的计算结果表明:①在情景 1 条件下,当畜禽粪便 N 占到耕地投入 N 总量的 30% 时,禹城各乡镇的耕地承载畜禽容量为 $2.5 \sim 4.9 \text{ LU} \cdot \text{hm}^{-2}$,全县平均为 $4.1 \text{ LU} \cdot \text{hm}^{-2}$,桃源各乡镇耕地承载畜禽容量为 $2.6 \sim 5.6 \text{ LU} \cdot \text{hm}^{-2}$,全县平均为 $4.4 \text{ LU} \cdot \text{hm}^{-2}$;②在情景 2 条件下,当耕地施用畜禽粪便 N 占到耕地输入 N 总量的 60% 时,禹城各乡镇的耕地承载畜禽容量在 $6.0 \sim 9.8 \text{ LU} \cdot \text{hm}^{-2}$ 之间,全县平均为 $8.3 \text{ LU} \cdot \text{hm}^{-2}$,桃源各乡镇耕地承载畜禽容量为 $5.2 \sim 11.3 \text{ LU} \cdot \text{hm}^{-2}$,全县平均为 $8.7 \text{ LU} \cdot \text{hm}^{-2}$;③在情景 3 条件下,当农田施用粪便 N 占总施用 N 的 100% 时,禹城各乡镇耕地承载畜禽容量为 $11.5 \sim 16.3 \text{ LU} \cdot \text{hm}^{-2}$,全县平均为 $13.8 \text{ LU} \cdot \text{hm}^{-2}$,桃源各乡镇耕地承载畜禽容量为 $8.6 \sim 18.8 \text{ LU} \cdot \text{hm}^{-2}$,全县平均为 $14.6 \text{ LU} \cdot \text{hm}^{-2}$,可见,基于农田 N 收支的耕地承载畜禽容量表现为桃源略高于禹城(图 1 和图 2)。

从耕地承载畜禽负载指数来看,在情景 1 条件下,禹城全县平均耕地畜禽负载指数为 2.2,只有 2 个乡镇在 1.0 以下,而其中一半以上乡镇的耕地负载指数大于 2.0;桃源全县平均耕地畜禽负载指数为 1.4,有近 3/4 乡镇的耕地负载指数大于 1,此时两个地区环境存在较大被污染风险。在情景 2 条件下,禹城全县平均耕地畜禽负载指数为 1.1,有近半数乡镇的耕地畜禽负载指数小于 1;桃源全县平均耕地畜禽负载指数为 0.7,除 4 个乡镇的耕地畜禽负载指数大于 1,其余乡镇的耕地畜禽负载指数均小于 1,该情景基本符合目前的实际生产情况。在情景 3 条件下,当施用 N 全部来源于粪便 N 时,禹城全县平均耕地负载指数为

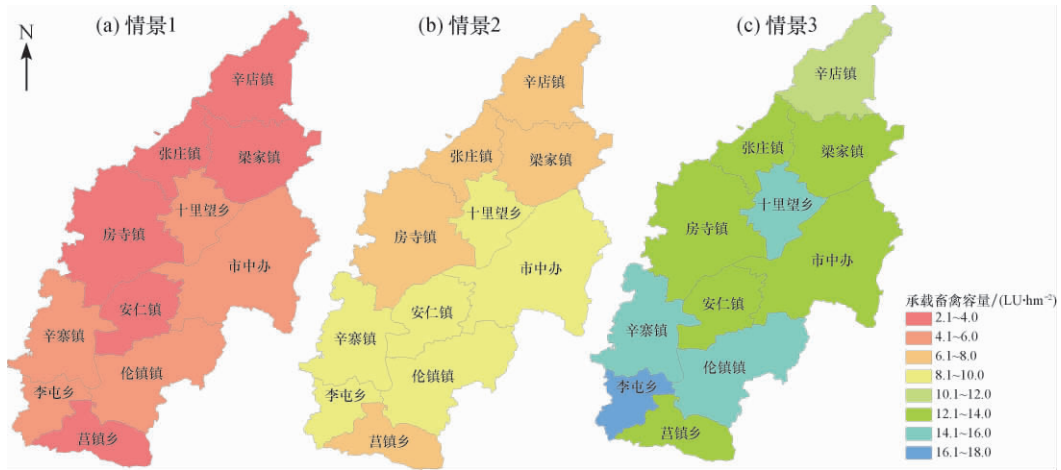


图1 禹城基于农田 N 收支的耕地承载畜禽容量

Fig. 1 Carrying capacity of livestock based on nitrogen budget in Yucheng farmland

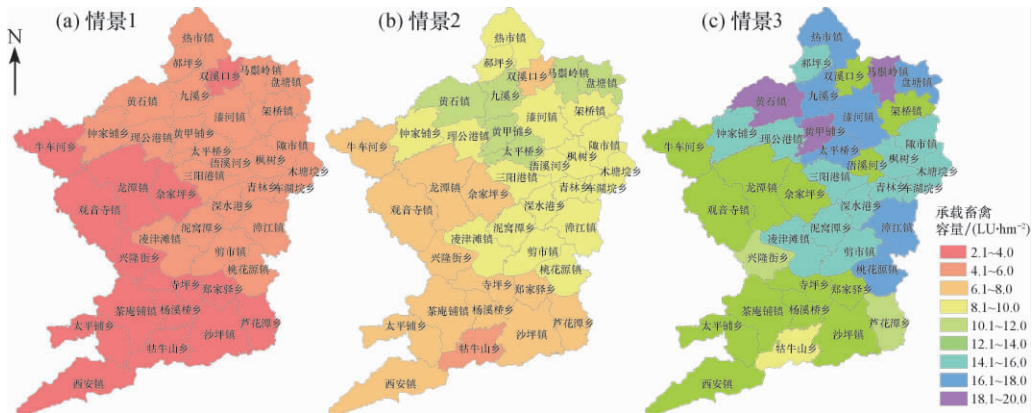


图2 桃源基于农田 N 收支的耕地承载畜禽容量

Fig. 2 Carrying capacity of livestock based on nitrogen budget in Taoyuan farmland

0.7, 极个别乡镇耕地负载指数大于 1; 桃源全县耕地平均畜禽负载指数为 0.4, 其中只有 1 个乡镇的耕地畜禽负载指数为 1.2。可见, 基于农田 N 收支状况耕地承载畜禽负载指数表现为禹城略高于桃源(图 3 和图 4)。

2.2 基于农田 P 收支的耕地畜禽承载容量及其负载指数

基于农田 P 收支状况的计算结果表明: ①在情景 4 条件下, 当农田施用粪便 P_2O_5 占到耕地总投入 P_2O_5 的 30% 时, 禹城各乡镇耕地畜禽承载容量为 $4.8 \sim 8.6 \text{ LU} \cdot \text{hm}^{-2}$, 全县平均耕地畜禽容量为 $6.7 \text{ LU} \cdot \text{hm}^{-2}$; 桃源各乡镇耕地畜禽承载容量只有 $1.3 \sim 3.6 \text{ LU} \cdot \text{hm}^{-2}$, 全县平均耕地畜禽承载容量为 $2.5 \text{ LU} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。②在情景 5 条件下, 当农田施用粪便 P_2O_5 占到耕地投入 P_2O_5 总量的 60% 时, 禹城各乡镇耕地畜禽承载容量为 $9.5 \sim 17.2 \text{ LU} \cdot \text{hm}^{-2}$, 全县平均耕地畜禽承载容量为 $13.5 \text{ LU} \cdot \text{hm}^{-2}$; 桃源各乡镇耕地畜禽承载容量为 $2.5 \sim 7.1 \text{ LU} \cdot \text{hm}^{-2}$, 全县平均耕地畜禽承载容量为 $5.1 \text{ LU} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。③在情景 6 条件下, 当农田施用 P_2O_5 100% 来自于粪便 P_2O_5 时, 禹城各乡镇耕地畜禽承载容量为 $15.9 \sim 28.6 \text{ LU} \cdot \text{hm}^{-2}$, 全县平均耕地畜禽承

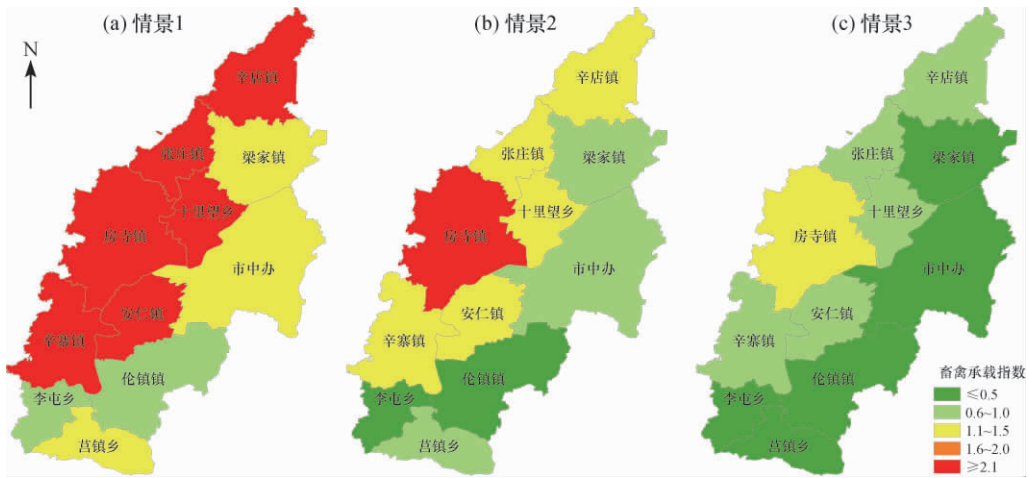


图3 禹城基于农田 N 收支的耕地畜禽承载指数

Fig. 3 Loading index of livestock in Yucheng farmland based on nitrogen budget

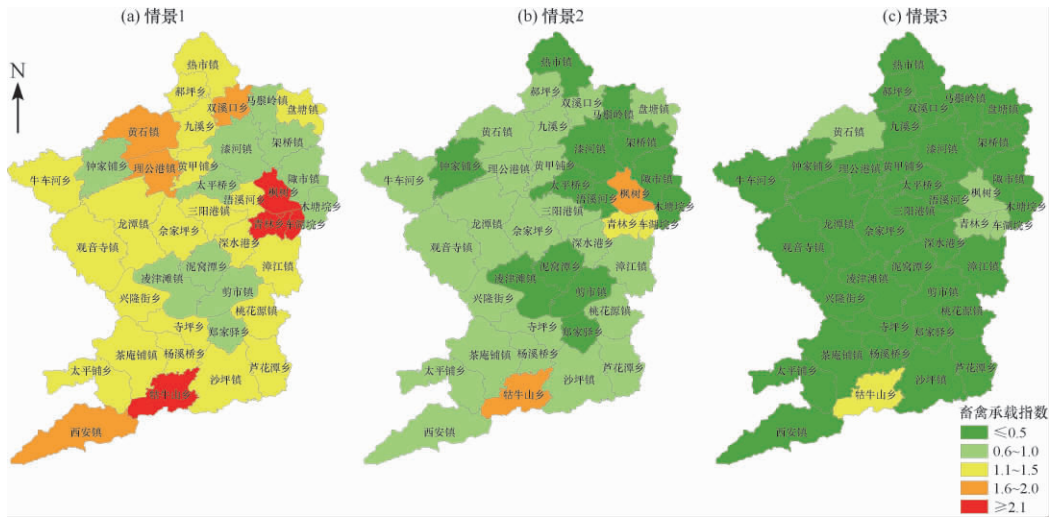


图4 桃源基于农田 N 收支的耕地畜禽承载指数

Fig. 4 Loading index of livestock in Taoyuan farmland based on nitrogen budget

载容量可达 $22.5 \text{ LU} \cdot \text{hm}^{-2}$; 桃源各乡镇耕地畜禽承载容量为 $4.2 \sim 11.8 \text{ LU} \cdot \text{hm}^{-2}$, 全县平均耕地畜禽承载容量为 $8.5 \text{ LU} \cdot \text{hm}^{-2}$, 由此可见, 基于农田 P 收支的耕地承载畜禽容量表现为禹城高于桃源(图 5 和图 6)。

从耕地承载畜禽负载指数来看, 在情景 4 条件下, 禹城全县平均耕地承载畜禽负载指数为 1.3, 其中 50% 左右耕地承载畜禽负载指数在 1.0 以下, 另 50% 左右耕地承载畜禽负载指数大于 1.0, 负载指数最高的房寺镇达 2.7; 而桃源全县平均耕地承载指数达到 2.4, 其中有 50% 左右耕地承载畜禽负载指数在 1.0~2.0 之间, 其余 50% 左右耕地承载畜禽负载指数在 2.0 以上。在情景 5 条件下, 禹城全县平均为 0.7, 除承载畜禽负载指数最高的房寺镇达到 1.4 以外, 其余乡镇耕地负载指数均在 1.0 以下; 桃源全县平均为 1.2, 其中 50% 左右耕地畜禽承载指数高于 1.0, 其余 50% 左右在 0.6~1.0 之间。在情景 6 条件时, 禹城县平均耕地

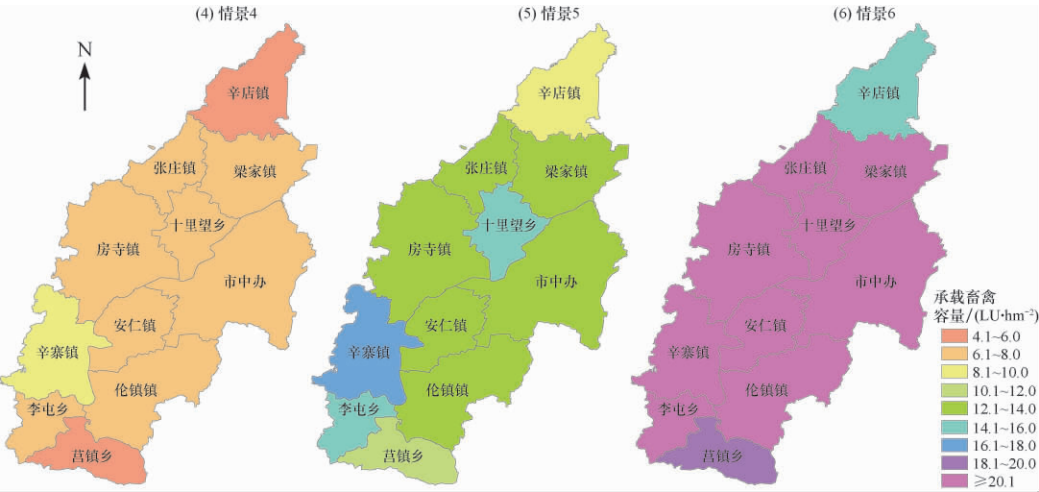


图5 禹城基于农田 P 收支的耕地承载畜禽容量

Fig. 5 Carrying capacity of livestock based on phosphorus budget in Yucheng farmland

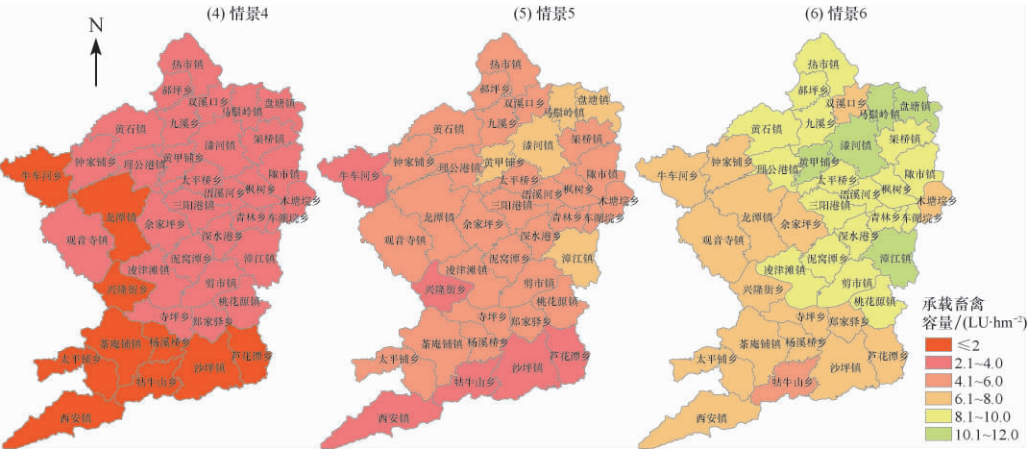


图6 桃源基于 P 收支的耕地承载畜禽容量

Fig. 6 Carrying capacity of livestock based on phosphorus budget in Yucheng farmland

畜禽负载指数为 0.4,各乡镇的耕地畜禽承载指数均在 1.0 以下,且近 80% 以上耕地承载畜禽负载指数在 0.5 以下;桃源全县平均耕地畜禽承载指数为 0.7,其中有 5 个乡镇的耕地畜禽承载指数大于 1.0,其余在 0.3~1.0 之间,可见,基于农田 P 收支状况耕地承载畜禽负载指数呈现为桃源略高于禹城(图 7 和图 8)。

总之,禹城呈现为基于农田系统 N 收支的耕地畜禽承载容量明显低于基于农田系统 P 收支的耕地畜禽承载容量(比较图 1 和图 5),基于农田 N 收支的耕地负载指数明显高于基于农田系统 P 收支的耕地负载指数(图 3 和图 7);桃源呈现为基于 N 收支的耕地畜禽承载容量明显高于基于 P 收支的耕地畜禽承载容量(图 2 和图 6),对应基于农田 N 收支的耕地负载指数明显低于基于农田 P 收支的耕地负载指数(图 4 和图 8)。

3 结论与讨论

目前,禹城全县平均耕地承载畜禽量为 $9.0 \text{ LU} \cdot \text{hm}^{-2}$,各乡镇耕地承载畜禽量为 3.5~

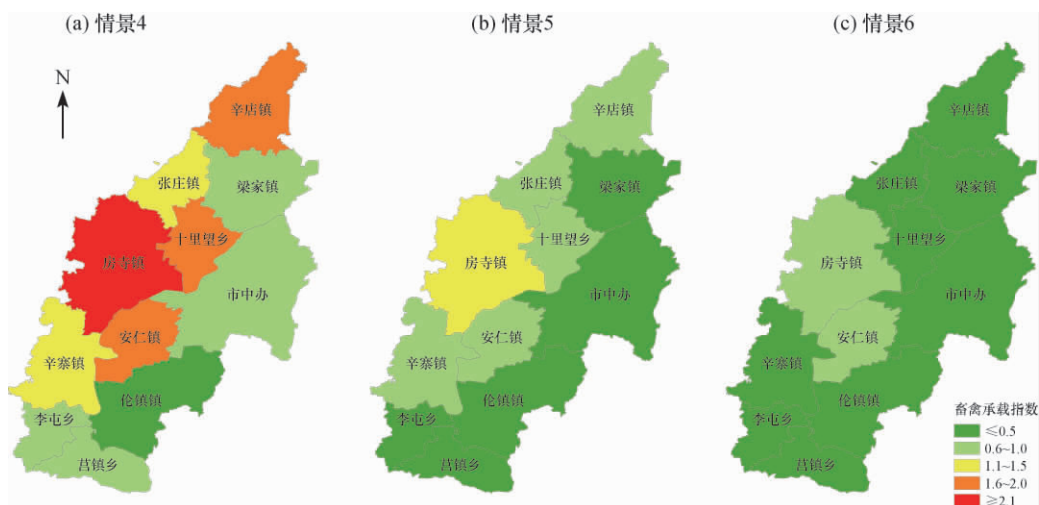


图7 禹城基于农田P收支的耕地畜禽承载指数

Fig. 7 Loading index of livestock in Yucheng farmland based on phosphorus budget

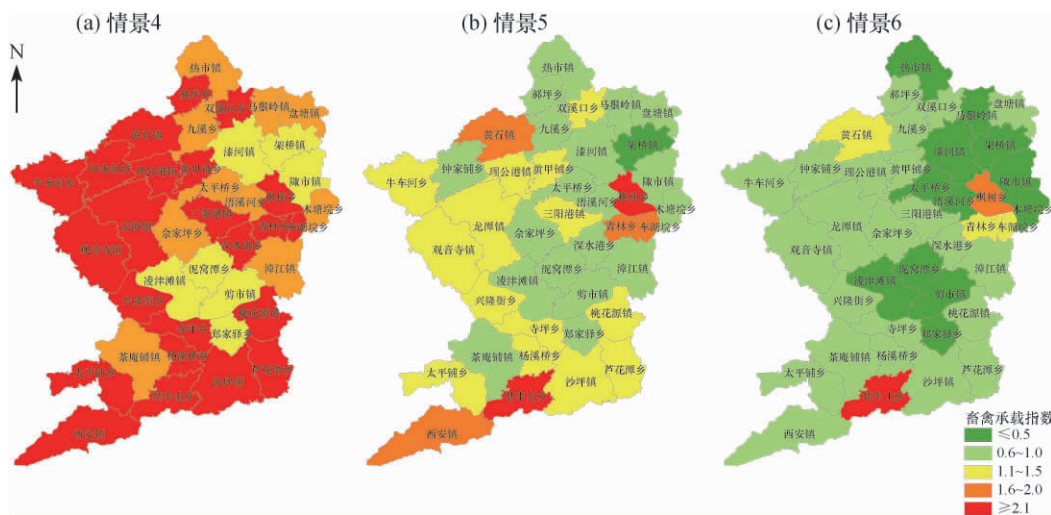


图8 桃源基于农田P收支的耕地畜禽承载指数

Fig. 8 Loading index of livestock in Taoyuan farmland based on phosphorus budget

18.2 $\text{LU} \cdot \text{hm}^{-2}$; 桃源全县平均耕地承载畜禽量为 5.5 $\text{LU} \cdot \text{hm}^{-2}$, 各乡镇耕地承载畜禽量为 2.7~13.7 $\text{LU} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。因为两个地区的种植结构及其产出水平不同而导致 N、P 养分需求总量不同, 所以, 基于农田 N、P 收支的耕地畜禽承载容量及负载指数明显不同: 基于农田 N 收支情景分析表明, 耕地畜禽承载容量呈现为山东禹城略低于湖南桃源, 耕地承载畜禽负载指数表现为禹城高于桃源; 基于农田 P 收支情景分析表明, 耕地畜禽承载容量表现为山东禹城高于湖南桃源, 耕地承载畜禽负载指数禹城低于桃源(表 1)。由此说明, 今后在制定减少农田环境污染对策时, 禹城地区应首先考虑农田 N 素收支及粪便 N 的有效管理, 根据农田系统对粪便 N 的消纳能力确定适宜的养殖规模与畜禽结构; 桃源则应首先考虑农田 P 收支及粪便 P 的有效管理, 根据农田系统对粪便 P 的消纳能力确定适宜的养殖规模与畜禽结构。而且, 两个县都应通过适当减少化肥用量增加对畜禽粪便养分的转化利用, 同时, 因各

乡镇之间的耕地畜禽承载量和负载指数均存在较大差异,还应在乡镇之间进行合理的调配与平衡。就全国而言,可能整体上畜禽承载量并不过高,但区域之间的差异很大。有机肥与化肥配施是种植业生产中的一项重要措施,在等 N 水平下有机肥的比例为 75% 是比较适宜的^[8],如此看来,如果单从环境健康角度考虑,目前禹城和桃源两个地区的养殖规模均已接近其耕地畜禽承载容量,个别乡镇已明显超过其耕地畜禽承载容量,所以,不但总体上不宜再增加畜禽数量,而且还需把局部超载地区的粪便转运到邻近承载量较低的农田。通过调整种养结构、加强粪便排泄管理和开发其它粪便高效转化利用途径等,可以在一定程度上提高耕地的畜禽承载容量,比如,在畜禽养殖管理上,可通过调整畜禽养殖结构,减少排泄高养分含量粪便的畜禽比例,通过提高饲料利用率,减少粪便养分产出量;在农田作物种植上,可通过调整种植结构,增加吸收转化养分能力强的作物比例,通过改变农作措施,提高农田作物产出水平,增加对粪便的消纳能力等。实际上农田对畜禽粪便的消纳能力还受到气候条件、土壤类型与性质等多种因素的影响,这是今后继续深入研究时值得考虑的问题,可通过设置农田长期定位试验以获得准确的承载容量。

表 1 禹城与桃源耕地畜禽承载容量与负载指数比较

Table 1 Carrying capacity of livestock and loading index of cropland in Yucheng and Taoyuan

		粪便 N 占农田总施 N 量			粪便 P 占农田总施 P 量		
		30%	60%	100%	30%	60%	100%
承载容量 /(LU · hm ⁻²)	禹城	4. 1	8. 3	13. 8	6. 7	13. 5	22. 5
	桃源	4. 4	8. 7	14. 6	2. 5	5. 1	8. 5
负载指数	禹城	2. 2	1. 1	0. 7	1. 3	0. 7	0. 4
	桃源	1. 4	0. 7	0. 4	2. 4	1. 2	0. 7

荷兰和比利时等国家已经开始实施税收政策以控制粪便的过量施用,根据农田养分收支状况,通过利用与土地有效性相关的作物产出量确定粪便的盈余量,如果粪便产出量超过一定限量水平就要进行征税,因为荷兰 P 污染比较严重,所以规定每年粪便的许可产出量不能超过 125 kg P₂O₅ · hm⁻²,并且早在 1986 年就建立了粪便产出权,每个农场根据其生产状况被分配给一定的用 P₂O₅ 表示的粪便产出份额,在 1994 年又规定粪便产出权可以进行交易,在 2000—2001 年荷兰和比利时开始实行了粪便产出权购买计划,通过对退出畜禽养殖的农民实行财政补贴,以进一步减少畜禽总数量,预计通过粪便产出权购买计划,荷兰的粪便盈余到 2003 年减少三分之一^[9]。

在未来,虽然农田面积可能减少,但畜禽数量却有可能增加,所以与畜禽粪便密切相关的环境风险也可能增加,采取有力的政策措施限制畜禽数量已不可避免^[9]。从 1996 年以来,我国的畜禽数量及其产生的粪便增长迅速,并呈不断增长趋势,但是,与此同时可消纳粪便的耕地面积却从 13. 0 × 10⁷ hm² 减少到 12. 2 × 10⁷ hm²,并呈逐年下降趋势,因此,为了解决畜禽粪便污染问题,在就地做好粪便管理、将养殖业与种植业紧密结合的基础上,应根据粪便转化利用途径与效率,合理规划区域畜禽养殖规模。此外,还应加强开发其它利用途径(如通过沼气转化利用等),以减少对环境的压力。

参考文献(References):

[9] Teira-Esmatges M R, Flotats X. A method for livestock waste management planning in NE Spain [J]. Waste Management, 2003, 23(10): 917-932.

- [2] Song J H. Regional livestock quota system under environmental capacity in Korea [J]. *Journal of Rural Development*, 2005, 28: 65-84.
- [3] Tamminga S. Pollution due to nutrient losses and its control in European animal production [J]. *Livestock Production Science*, 2003, 84: 101-111.
- [4] Brouwer F. Nitrogen balances at farm level as a tool to monitor effects of agri-environmental policy [J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 1998, 52(2/3): 303-308.
- [5] Schröder J J, Aarts H F M, Ten Berge H F M, *et al.* An evaluation of whole-farm nitrogen balances and related indices for efficient nitrogen use [J]. *European Journal of Agronomy*, 2003, 20(1/2): 33-44.
- [6] Schröder J J, Schölefeld D, Cabral F, *et al.* The effects of nutrient losses from agriculture on ground and surface water quality: the position of science in developing indicators for regulation [J]. *Environmental Science & Policy*, 2004, 7: 15-23.
- [7] Ulen B, Bechmann M, Folster J, *et al.* Agriculture as a phosphorus source for eutrophication in the north-west European countries, Norway, Sweden, United Kingdom and Ireland: A review [J]. *Soil Use and Management*, 2007, 23(SI): 5-15.
- [8] Henkens P L C M, van Keulen H. Mineral policy in the Netherlands and nitrate policy within the European Community [J]. *Netherlands Journal of Agricultural Science*, 2001, 49(2/3): 117-134.
- [9] de Haan C, Steinfeld H, Blackburn H. Livestock & the Environment—Finding a Balance [M]. Fressingfield, United Kingdom: WRENmedia, 1997.
- [10] 曹宁, 曲东, 陈新平, 等. 东北地区农田土壤氮、磷平衡及其对面源污染的贡献分析 [J]. *西北农林科技大学学报*, 2006, 34(7): 127-133. [CAO Ning, QU Dong, CHEN Xin-ping, *et al.* Analysis of the contribution to non-point pollution made by balanced fertilizer in Northwest China. *Journal of Northwest Sci-Tech University of A & F: Natural Science Edition*, 2006, 34(7): 127-133.]
- [11] 陈敏鹏, 陈吉宁. 中国区域土壤表观氮磷平衡清单及政策建议 [J]. *环境科学*, 2007, 28(6): 1305-1310. [CHEN Min-peng, CHEN Ji-ning. Inventory of regional surface nutrient balance and policy recommendations in China. *Environmental Science*. 2007, 28(6): 1305-1310.]
- [12] 王方浩, 马文奇, 窦争霞, 等. 中国畜禽粪便产生量估算及环境效应 [J]. *中国环境科学*, 2006, 26(5): 614-617. [WANG Fang-hao, MA Wen-qi, DOU Zheng-xia, *et al.* The estimation of the production amount of animal manure and its environmental effect in China. *China Environmental Science*, 2006, 26(5): 614-617.]
- [13] 武兰芳, 欧阳竹, 谢小立. 不同种养结合区农田系统氮磷平衡分析 [J]. *自然资源学报*, 2011, 26(6): 943-954. [WU Lan-fang, OUYANG Zhu, XIE Xiao-li. Nitrogen and Phosphorus balance of cropland at regional scale for integrated crop-livestock farming system in two different areas. *Journal of National Resources*, 2011, 26(6): 943-954.]
- [14] 武兰芳, 欧阳竹. 种养结合生产区农田氮素平衡分析——以山东禹城为例 [J]. *农业环境科学学报*, 2008, 27(4): 1312-1319. [WU Lan-fang, OUYANG Zhu. Nitrogen budget of farmland in crop-animal mixed farming system area: A case study of Yucheng County in Shandong Province. *Journal of Agro-Environment Science*, 2008, 27(4): 1312-1319.]
- [15] 武兰芳, 欧阳竹. 种养结合生产区农田磷素平衡分析——以山东禹城为例 [J]. *农业环境科学学报*, 2009, 28(7): 1444-1450. [WU Lan-fang, OUYANG Zhu. Phosphorus budget of farmland in crop-animal mixed farming area: A case study of Yucheng County in Shandong Province. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(7): 1444-1450.]
- [16] Oenema O, Oudendag D, Velthof G L. Nutrient losses from manure management in the European Union [J]. *Livestock Science*, 2007, 112(3): 261-272.
- [17] 胡跃高. 饲料资源蛋白质能量平衡评价方法与应用 [M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2000: 203. [HU Yue-gao. The Evaluation Method and Its Utilization of Protein and Energy Balance of Feed Resource. Beijing: China Agricultural University Press, 2000: 203.]
- [18] 王志勇, 红梅, 杨殿林, 等. 供氮水平和有机无机配施对夏玉米产量及土壤硝态氮的影响 [J]. *中国土壤与肥料*, 2008(6): 11-14. [WANG Zhi-young, HONG Mei, YANG Dian-lin, *et al.* Effect of nitrogen fertilizer rate and combined application of organic manure and chemical fertilizer on yield in summer maize and on soil NO₃-N. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2008(6): 11-14.]

Carrying Capacity of Livestock in Cropland of Two Typical Regions Dominated by Agriculture in China

WU Lan-fang¹, OUYANG Zhu¹, XIE Xiao-li²

(1. Yucheng Station, Key Laboratory of Ecosystem Network Observation and Modelling, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China;

2. Institute of Subtropical Agriculture, CAS, Changsha 410125, China)

Abstract: According to the nutrients demand and available loss of current cropping system, livestock density under environmental capacity in two different areas, i. e., Yucheng County in Shandong Province and Taoyuan County in Hunan Province, was analyzed on the basis of nutrition budget of cropland by different input scenarios of manure N and manure P_2O_5 . When the input of manure N accounted for 30%, 60% and 100% of total input of N in cropland, the carrying capacities of livestock in the farmland of Yucheng are $4.1 \text{ LU} \cdot \text{hm}^{-2}$, $8.3 \text{ LU} \cdot \text{hm}^{-2}$, $13.8 \text{ LU} \cdot \text{hm}^{-2}$ and the corresponding load indexes of the farmland are 2.2, 1.1, 0.7; and those in the farmland of Taoyuan are $4.4 \text{ LU} \cdot \text{hm}^{-2}$, $8.7 \text{ LU} \cdot \text{hm}^{-2}$, $14.6 \text{ LU} \cdot \text{hm}^{-2}$ and 1.4, 0.7, 0.4 respectively. When the input of manure P_2O_5 accounted for 30%, 60% and 100% of total input of P_2O_5 in cropland, the carrying capacities of livestock in the farmland of Yucheng are $6.7 \text{ LU} \cdot \text{hm}^{-2}$, $13.5 \text{ LU} \cdot \text{hm}^{-2}$, $22.5 \text{ LU} \cdot \text{hm}^{-2}$ and the corresponding load indexes of the farmland are 1.3, 0.7, 0.4. Those in the farmland of Taoyuan are $2.5 \text{ LU} \cdot \text{hm}^{-2}$, $5.1 \text{ LU} \cdot \text{hm}^{-2}$, $8.5 \text{ LU} \cdot \text{hm}^{-2}$ and 2.4, 1.2, 0.7 respectively. The results show that the carrying capacity of livestock in farmland of Yucheng depending on nitrogen budget is smaller than depending on phosphorus budget and the load index by nitrogen budget is higher than by phosphorus budget, and that of Taoyuan are opposite with Yucheng. Furthermore, the obvious differences existed among townships within the two areas. Therefore, to prevent regional environment from livestock manure related pollution the livestock density and the quantity of manure should be restricted based on the assimilative capacity of cropland to nutrition. Nitrogen balance in Yucheng and phosphorus balance in Taoyuan should be paid special attention to separately; and the livestock and manure should be distributed evenly within each region.

Key words: carrying capacity of livestock; loading index of cropland; Yucheng County, Shandong Province; Taoyuan County, Hunan Province