

基于农田氮磷收支的区域养殖畜禽容量分析 ——以山东禹城为例

武兰芳, 欧阳竹

(中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101)

摘要 根据区域生态环境健康控制评价指标层次结构, 利用农田养分平衡理论基础, 逐级测算了区域农田土壤承载畜禽粪便量, 进而确定区域农田畜禽承载量及承载力。在禹城目前种养结构和产出水平条件下, 基于农田 N 收支状况分析表明: 当农田施用粪便 N 分别占总施 N 的 100%、60% 和 30% 时, 禹城全区平均耕地畜禽承载容量分别为 13.8、8.3 和 4.1 $\text{LU} \cdot \text{hm}^{-2}$, 相应其耕地畜禽负载指数分别是 0.7、1.1 和 2.2; 基于 P 收支状况分析表明: 当农田施用粪便 P_2O_5 分别占总施入 P_2O_5 的 100%、60% 和 30% 时, 禹城全区平均耕地畜禽承载容量分别为 22.5、13.5 和 6.7 $\text{LU} \cdot \text{hm}^{-2}$, 相应其耕地畜禽负载指数分别是 0.4、0.7 和 1.3。由此可见, 基于 N 收支的耕地畜禽承载容量小于基于 P 收支的耕地畜禽承载容量, 相应基于农田 N 收支的耕地畜禽负载指数明显大于基于农田 P 收支的耕地畜禽负载指数, 而且, 当前各乡镇之间的耕地畜禽负载指数差异较大, 说明禹城地区今后在制定减少农田环境污染对策时, 可优先从着重考虑粪便 N 数量和农田 N 收支管理出发确定适宜的畜禽养殖规模, 并且在乡镇之间进行协调平衡。

关键词 畜禽密度; 承载容量; 负载指数; 区域尺度; 山东禹城

中图分类号 S181 文献标志码 A 文章编号 1672-2043(2009)11-2277-09

Regional Livestock Density Under Environmental Capacity Based on Nitrogen and Phosphorus Budget of Farmland: A Case Study of Yucheng County in Shandong Province

WU Lan-fang, OUYANG Zhu

(Institute of Geographical Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

Abstract Livestock manure provides a valuable nutrient source for crop and substitute for chemical fertilizer. However, the environmental risks of livestock manure have increased in regions where livestock manure is overproduced compared to land capacity. According to the nutrients demand and available losses of current cropping system, livestock density under environmental capacity in Yucheng County, Shandong province was analyzed on the basis of nutrition budget of cropland by different input scenarios of manure N and manure P_2O_5 . Nutrient needs were calculated by multiplying the output of each crop with the standard amount of nutrients needed for each crop and summing up individual crops. Nutrients input mainly consist of the amount of chemical fertilizer and the amount of organic fertilizer converted from livestock manure. When the input of manure N accounted for 100%, 60% and 30% of total input of N in cropland, the carrying capacity of livestock on the farmland was 13.8 $\text{LU} \cdot \text{hm}^{-2}$, 8.3 $\text{LU} \cdot \text{hm}^{-2}$ and 4.1 $\text{LU} \cdot \text{hm}^{-2}$ and the corresponding load index of the farmland was 0.7, 1.1 and 2.2 respectively. When the input of manure P_2O_5 accounted for 100%, 60% and 30% of total input of P_2O_5 in cropland, the carrying capacity of livestock on the farmland was 22.5 $\text{LU} \cdot \text{hm}^{-2}$, 13.5 $\text{LU} \cdot \text{hm}^{-2}$ and 6.7 $\text{LU} \cdot \text{hm}^{-2}$ and the corresponding load index of the farmland was 0.4, 0.7 and 1.3 respectively. Those showed that the carrying capacity of livestock depending on soil-surface nitrogen budget was smaller than the carrying capacity of livestock depending on soil-surface phosphorus budget; meanwhile the load index by nitrogen budget was higher than load index by phosphorus budget. Furthermore, the obviously differences were existed among township regions of Yucheng County. Therefore, to prevent environment from deterioration with respect to livestock manure in the region the livestock density and the quantity manure should be restricted base on the assimilative capacity of the cropland to nitrogen, also the livestock and manure should be distributed evenly within the region.

Keywords livestock density; carrying capacity; load index; regional scale; Yucheng County, Shandong Province

收稿日期 2009-05-30

基金项目 中国科学院知识创新工程重要方向性项目(Kscx2-Yw-N-022, Kscx2-Yw-N-46-01)

作者简介 武兰芳(1963—), 女, 博士, 副研究员, 主要从事区域农业可持续发展与农田生态方面研究。E-mail: wulf@igsnrr.ac.cn

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,营养盈余问题就会显现^[1]。特别是在畜禽养殖增长较快的地区,粪便产生的环境风险呈增加趋势,畜禽密度越高产生的环境风险就越大,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,必须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(carrying capacity)^[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]。为了控制畜禽粪便污染,欧盟委员会把投入农田的粪便氮作为评价氮素环境污染的一个指标,确定了其投入的最高限额为 $170 \text{ kgN} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ^[5]。还有一些国家同时制定了每年粪便磷的施用限量^[6],如挪威、瑞典和爱尔兰分别规定每年粪便磷的最高施用量为 35、22 和 $40 \text{ kgP} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ^[7]。在荷兰,利用规定的 N、P 施用限量标准已经成为立法方针,根据不同类型土壤制定了氮磷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氮磷用量低于政府规定限量标准,而那些没有耕地的猪、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须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^[3],但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^[6]。例如,欧盟规定最大养殖密度为 $2.0 \text{ LU} \cdot \text{hm}^{-2}$,相当于每年施用粪便 N 控制在 $170 \text{ kgN} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 以下,维持饮用水中的硝酸盐含量低于 $50 \text{ mgNO}_3 \cdot \text{L}^{-1}$ 、 P_2O_5 低于 $5000 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$;德国根据规定农田 N 的最高施用量为每年 $240 \text{ kgN} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,确定各州的最大养殖密度为 $3.5 \sim 4.5 \text{ LU} \cdot \text{hm}^{-2}$,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^[2]。

畜禽养殖是我国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施用的足够土地。所以,粪便随意堆放和农田过量施用成为环境的重要污染源之一。随着畜禽养殖所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力^[10-12],但是尚未见关于耕地承载粪便容量的相关研究报道,也没有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道。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,分析确定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,为我国治理环境污染提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域背景

山东禹城(县级市)位于东经 $116^{\circ}23' \sim 116^{\circ}45'$,北纬 $36^{\circ}40' \sim 37^{\circ}12'$,居于黄淮海平原中部(图 1)。属黄河冲积平原,地势平缓。在气候上属于暖温带季风气候区,四季分明,气候温和,光照充足,年平均降雨量 593 mm,降雨多集中在 6、7、8 月份,呈现春旱、夏涝、晚秋旱的规律。境内 20 多条河流纵横交错,地下水较充裕,并有“引用黄河水”灌溉条件,目前水浇地面积和有效灌溉面积分别占总耕地面积的 95%和 82%以

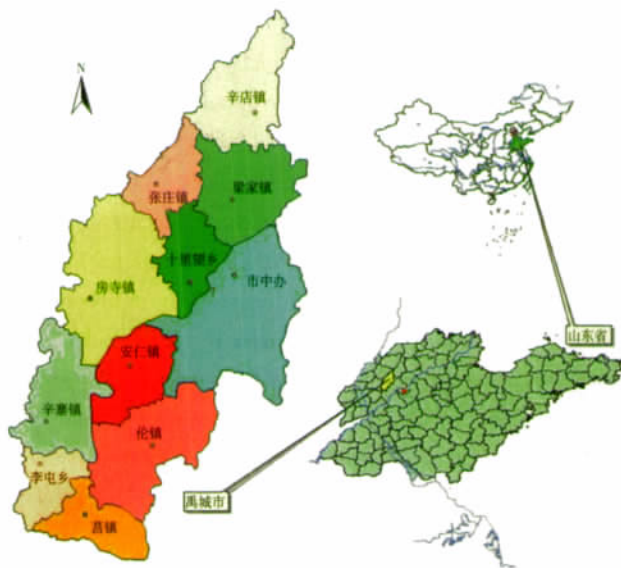


图 1 禹城区位示意图

Figure 1 The sketch of location for Yucheng

上。由于土地、水利和光热资源优势,非常适合农业生产,是典型的农业主产区。20 世纪 80 年代以来,在持续提高粮食单产和增加总产的同时,积极调整农业生产结构,农业生产结构逐步由单一粮棉生产转向农牧结合,畜牧业产值占农业总产值的比重由不足 10% 增加到 35% 以上,畜禽数量增长迅速。目前,种植业以小麦、玉米为主,养殖业以牛、猪和鸡为主。禹城农业生产的资源条件、发展水平及其生态系统特性在黄淮海平原具有典型性和代表性。

1.2 分析方法

根据 Scröder 等(2004)^[6]提出的区域生态环境健康控制评价指标层次结构(图 2),利用农田养分平衡理论基础,逐级测算区域农田系统土壤承载或可消纳粪便 N(或 P)、承载畜禽粪便量、进而确定区域农田畜禽承载量及承载力。

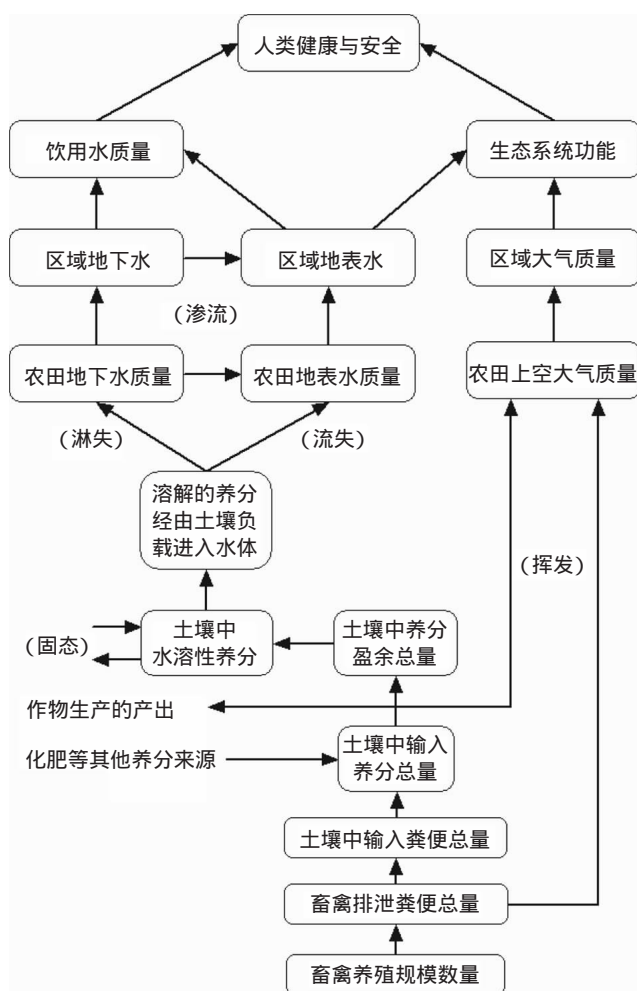


图 2 区域生态环境健康评价控制指标的层次结构^[6]

Figure 2 Hierarchy of indicators to assess and control the impact of nutrient loss from agriculture on the quality of drinking water and ecosystems

(1)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确定^[13-14]。2005 年禹城农田系统的种植结构及产出水平,每年单位耕地输出 N 平均为 $300 \text{ kgN} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 左右,输出 P_2O_5 平均为 $150 \text{ kgP}_2\text{O}_5 \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 左右。N、P 容许的最大损失量参考荷兰限量标准^[8,15],可接受的 N 损失量为 $100 \sim 150 \text{ kgN} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,可接受的 P 的损失量为 $20 \sim 30 \text{ kgP}_2\text{O}_5 \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,本文分别按 $150 \text{ kgN} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 和 $30 \text{ kgP}_2\text{O}_5 \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 计算。

(2)耕地可消纳粪便 N 或 P:耕地 N 或 P 最大施用量×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的比例设置 100%、60%和 30% 3 种状况,粪便 N 的 3 种状况分别用状况 1、状况 2 和状况 3 表示,粪便 P 的 3 种状况分别用状况 4、状况 5 和状况 6 表示。

(3)耕地可消纳粪便量:耕地可消纳粪便 N 或 P/粪便 N、P 含量系数,粪便 N、P 含量系数及畜禽粪便排泄系数参考^[12]。同时,为了便于比较,根据不同畜禽粪便的 N 素含量,利用牛粪当量系数把不同种类畜禽粪便量折算成统一的牛粪当量(表 1)。

(4)耕地畜禽承载容量(Carrying capacity):耕地可消纳粪便量/畜禽粪便排泄量,粪便排泄量计算方法见文献^[14]。同时,为了便于不同地区及不同畜禽之间相互比较,通过利用 LU 折算系数^[16],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、AU)。

(5)耕地畜禽承载量(Carrying amount):畜禽养殖数量/耕地面积。

(6)耕地畜禽负载指数(Load index):耕地畜禽承载量/耕地畜禽承载容量。

2 结果与分析

2.1 基于农田 N、P 收支的畜禽承载力

根据禹城目前的种植结构及产出水平条件下农田 N 收支状况计算表明:

(1)当耕地施用 N 占总施用 N 的 100%时,禹城农田系统对畜禽粪便的平均消纳力最高为 $126.6 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 牛粪当量,对应的耕地畜禽承载容量为 $13.8 \text{ LU} \cdot \text{hm}^{-2}$,其 11 个乡镇的农田粪便消纳力为 $105.5 \sim 150.3 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 牛粪当量,其中粪便消纳力最低的是辛店镇,折牛粪为 $105.5 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,对应的耕地畜禽承载容量是 $11.5 \text{ LU} \cdot \text{hm}^{-2}$,耕地粪便消纳力最高的是李屯乡,折牛粪为 $150.3 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,相应其耕地畜禽

表 1 畜禽种类及其粪便产出系数
Table 1 Animals and their excreta coefficient

畜禽种类	粪便排泄量 Animal excretion/kg unit ⁻¹ ·a ⁻¹	氮含量 N concentration/N%	磷含量 P concentration/P ₂ O ₅ %	牛粪当量系数 Equivalent coefficient of cattle dung	
				基于 N Base on N	基于 P ₂ O ₅ Base on P ₂ O ₅
役用牛 Power cattle	10 100	0.351	0.188	1.0	1.0
肉牛 Beef cattle	7 700	0.351	0.188	1.0	1.0
奶牛 Dairy cattle	19 400	0.351	0.188	1.0	1.0
马 Horse	5 900	0.378	0.176	1.08	0.94
驴、骡 Donkey and Mule	5 000	0.378	0.176	1.08	0.94
猪 Pig	5.3	0.238	0.169	0.68	0.90
羊 Sheep	870	1.014	0.495	2.89	2.63
肉鸡 Meat chicken	0.10	1.032	0.946	2.94	5.03
蛋鸡 Egg chicken	53.3	1.032	0.946	2.94	5.03

承载容量为 16.3 LU·hm⁻²。

(2)当耕地施用畜禽粪便 N 占到耕地输入 N 总量的 60%时,禹城全区农田系统对畜禽粪便的平均消纳力下降为 76.0 t·hm⁻²·a⁻¹ 牛粪当量,耕地畜禽承载容量应为 8.3 LU·hm⁻²,各乡镇农田的粪便消纳力折合牛粪为 63.3~90.2 t·hm⁻²·a⁻¹,对应的耕地畜禽承载容量为 6.9~9.8 LU·hm⁻²。

(3)当畜禽粪便 N 占到耕地投入 N 总量的 30%时,全区平均农田系统对畜禽粪便的平均消纳力只有 38.0 t·hm⁻²·a⁻¹ 牛粪当量,相应耕地畜禽承载容量只有 4.1 LU·hm⁻²,各乡镇农田对粪便消纳力下降为 31.6~45.1 t·hm⁻²·a⁻¹ 牛粪当量,耕地畜禽容量下降为 3.4~4.9 LU·hm⁻²(表 2)。

从表 3 可知,在目前的种植结构及产出水平条件下,基于农田 P 收支状况的计算结果表明:

(1)当耕地施用 P 为 100%来自粪便时,禹城农田系统对畜禽粪便的消纳力达到最高 224.8 t·hm⁻²·a⁻¹ 牛粪当量,对应的耕地畜禽承载容量为 22.5 LU·hm⁻²,各乡镇农田对畜禽粪便的最大消纳力为 158.7~285.9 kgP₂O₅·hm⁻²·a⁻¹ 牛粪当量,相应最大耕地畜禽承载容量为 15.9~28.6 LU·hm⁻²,各乡镇之间存在较大差异,以辛寨镇最高、辛店乡最低。

(2)当施用的粪便 P₂O₅ 占到耕地投入 P₂O₅ 总量的 60%时,禹城全区农田系统畜禽粪便的平均消纳力下降为 134.9 t·hm⁻²·a⁻¹ 牛粪当量,对应的平均耕地畜禽承载容量为 13.5 LU·hm⁻²,各乡镇耕地粪便消纳力

表 2 基于农田 N 收支的禹城耕地畜禽承载容量
Table 2 Carrying capacity of livestock on the base of nitrogen budget in Yucheng farmland

地点	需求氮 N demand/ kgN·hm ⁻² ·a ⁻¹	投入氮 N input/kg N·hm ⁻² ·a ⁻¹	可消纳粪便氮 Manure N can be inputted/kgN·hm ⁻² ·a ⁻¹			可消纳粪便量(折牛粪)Manure (converted to cattle dung)/t·hm ⁻² ·a ⁻¹			耕地畜禽承载容量 Carrying capacity for livestock/LU·hm ⁻²		
			状况 1 Scenario 1	状况 2 Scenario 2	状况 3 Scenario 3	状况 1 Scenario 1	状况 2 Scenario 2	状况 3 Scenario 3	状况 1 Scenario 1	状况 2 Scenario 2	状况 3 Scenario 3
禹城市 Yucheng	294.5	444.5	444.5	266.7	133.4	126.6	76.0	38.0	13.8	8.3	4.1
市中办 Shizhongban	293.8	443.8	443.8	266.3	133.1	126.4	75.9	37.9	13.7	8.2	4.1
十里望 Shiliwang	312.2	462.2	462.2	277.3	138.7	131.7	79.0	39.5	14.3	8.6	4.3
安仁 Anren	283.4	433.4	433.4	260.0	130.0	123.5	74.1	37.0	13.4	8.1	4.0
伦镇 Lunzhen	353.5	503.5	503.5	302.1	151.0	143.4	86.1	43.0	15.6	9.4	4.7
莒镇 Jvzhen	273.9	423.9	423.9	254.4	127.2	120.8	72.5	36.2	13.1	7.9	3.9
李屯 Litun	377.6	527.6	527.6	316.6	158.3	150.3	90.2	45.1	16.3	9.8	4.9
辛寨 Xinzhai	332.0	482.0	482.0	289.2	144.6	137.3	82.4	41.2	14.9	9.0	4.5
房寺 Fangsi	281.0	431.0	431.0	258.6	129.3	122.8	73.7	36.8	13.3	8.0	4.0
张庄 Zhangzhuan	271.8	421.8	421.8	253.1	126.5	120.2	72.1	36.0	13.1	7.8	3.9
梁家 Liangjia	275.2	425.2	425.2	255.1	127.5	121.1	72.7	36.3	13.2	7.9	3.9
辛店 Xindian	220.2	370.2	370.2	222.1	111.1	105.5	63.3	31.6	11.5	6.9	3.4

表 3 基于农田 P 收支的禹城耕地畜禽承载容量

Table 3 Carrying capacity of livestock on the base of phosphorus budget in Yucheng farmland

地点	需求磷 P_2O_5 demand/ $kgP_2O_5 \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1}$	投入磷 P_2O_5 input/ $kgP_2O_5 \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1}$	可消纳粪便磷 Manure P_2O_5 can be inputted/ $kgP_2O_5 \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1}$			可消纳粪便量(折牛粪)Manure (converted to cattle dung)/ $t \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1}$			耕地畜禽承载容量 Carrying capacity for Livestock/ $LU \cdot hm^{-2}$		
			状况 4 Scenario 4	状况 5 Scenario 5	状况 6 Scenario 6	状况 4 Scenario 4	状况 5 Scenario 5	状况 6 Scenario 6	状况 4 Scenario 4	状况 5 Scenario 5	状况 6 Scenario 6
禹城市 Yucheng	154.3	184.3	184.3	110.6	55.3	224.8	134.9	67.4	22.5	13.5	6.7
市中办 Shizhongban	154.6	184.6	184.6	110.8	55.4	225.1	135.1	67.5	22.5	13.5	6.8
十里望 Shiliwang	166.0	196.0	196.0	117.6	58.8	239.0	143.4	71.7	23.9	14.3	7.2
安仁 Anren	138.1	168.1	168.1	100.8	50.4	205.0	123.0	61.5	20.5	12.3	6.1
伦镇 Lunzhen	161.9	191.9	191.9	115.2	57.6	234.0	140.4	70.2	23.4	14.0	7.0
莒镇 Jvzhen	128.6	158.6	158.6	95.2	47.6	193.5	116.1	58.0	19.3	11.6	5.8
李屯 Litun	185.9	215.9	215.9	129.6	64.8	263.4	158.0	79.0	26.3	15.8	7.9
辛寨 Xinzhai	204.4	234.4	234.4	140.7	70.3	285.9	171.5	85.8	28.6	17.2	8.6
房寺 Fangsi	153.6	183.6	183.6	110.2	55.1	223.9	134.4	67.2	22.4	13.4	6.7
张庄 Zhangzhuan	156.2	186.2	186.2	111.7	55.8	227.0	136.2	68.1	22.7	13.6	6.8
梁家 Lijia	154.9	184.9	184.9	111.0	55.5	225.5	135.3	67.7	22.6	13.5	6.8
辛店 Xindian	100.1	130.1	130.1	78.1	39.0	158.7	95.2	47.6	15.9	9.5	4.8

下降为 $95.2 \sim 171.5 kgP_2O_5 \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1}$ 牛粪当量, 相应的耕地畜禽承载容量为 $9.5 \sim 17.2 LU \cdot hm^{-2}$ 。

(3) 当施用的粪便 P_2O_5 下降到耕地投入 P_2O_5 总量的 30% 时, 禹城全区农田平均对畜禽粪便的消纳力只有 $67.4 kgP_2O_5 \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1}$, 对应的平均耕地畜禽容量只有 $6.7 LU \cdot hm^{-2}$, 各乡镇耕地粪便消纳力下降到 $47.6 \sim 85.8 kgP_2O_5 \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1}$ 牛粪当量, 相应的耕地畜禽承载容量也只有 $4.8 \sim 8.6 LU \cdot hm^{-2}$ 。

比较表 2 和表 3 可知, 基于 N 收支的农田粪便消纳能力和耕地畜禽承载容量明显低于基于 P 收支

状况的农田粪便消纳力和畜禽承载容量。

2.2 畜禽承载量与负载指数

表 4 表明, 禹城全区平均耕地畜禽承载量为 $9.0 LU \cdot hm^{-2}$, 乡镇间差异很大, 畜禽承载量最小的伦镇只有 $3.5 LU \cdot hm^{-2}$, 畜禽承载量最大的房寺达到 $18.2 LU \cdot hm^{-2}$ 。对比表 2 可知, 禹城全区的平均畜禽承载量介于状况 1 和状况 2 之间, 而在其 11 个乡镇中, 有 2 个乡镇的畜禽承载量低于状况 3, 有 3 个乡镇的畜禽承载量介于状况 2 和 3 之间, 5 个乡镇的畜禽承载量介于状况 1 和 2 之间, 1 个乡镇的畜禽承载量大大超

表 4 禹城畜禽及粪便承载量

Table 4 Carrying amounts of livestock and excretes in Yucheng farmland

地点	耕地面积 Farmland area/ hm^2	畜禽总量 Livestock amounts/ $\times 10^4 LU$	耕地畜禽承载量 Carrying amounts of livestock/ $LU \cdot hm^{-2}$	粪便产出总量(折牛粪)Total excretes amount (converted to cattle dung)/ $\times 10^4 t \cdot a^{-1}$		耕地粪便承载量(折牛粪)Carrying amounts of excretes/ $t \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1}$	
				基于 N Base on N	基于 P_2O_5 Base on P_2O_5	基于 N Base on N	基于 P_2O_5 Base on P_2O_5
禹城市 Yucheng	53 246	48.07	9.0	440.7	480.2	82.8	90.2
市中办 Shizhongban	7 428	4.66	6.3	43.2	44.9	58.2	60.4
十里望 Shiliwang	2 893	3.26	11.3	31.2	33.5	107.7	115.7
安仁 Anren	3 233	3.71	11.5	34.1	36.4	105.3	112.4
伦镇 Lunzhen	6 223	2.21	3.5	21.4	22.9	34.4	36.8
莒镇 Jvzhen	3 107	1.77	5.7	15.3	16.3	49.4	52.5
李屯 Litun	2 718	1.20	4.4	9.3	11.1	34.3	40.7
辛寨 Xinzhai	5 485	6.33	11.5	55.0	66.5	100.3	121.2
房寺 Fangsi	8 394	15.28	18.2	142.3	154.1	169.5	183.5
张庄 Zhangzhuan	3 159	3.17	10.0	31.5	32.0	99.6	101.4
梁家 Liangjia	5 360	2.96	5.5	29.5	30.6	55.0	57.0
辛店 Xindian	4 580	3.60	7.9	28.6	33.0	62.5	72.1

过了其耕地最大承载容量,对比表 3 可知,禹城全区的平均畜禽承载量介于状况 5 和 6 之间,在其 11 个乡镇中,有 5 个乡镇的畜禽承载量低于状况 6,有 4 个乡镇的畜禽承载量介于状况 5 和 6 之间,有 1 个乡镇的畜禽承载量介于状况 4 和 5 之间。由此可见,基于农田 N 收支状况来看,禹城有一半以上乡镇的耕地畜禽承载量已接近甚至超过其耕地的畜禽容量,存在较大的环境风险;而基于农田 P 收支状况来看,禹城大部分乡镇还没有达到其耕地承载畜禽的最大容量,还有一定的畜禽粪便消纳能力。

耕地畜禽承载量或粪便承载量的大小间接反映了一个地区的畜禽养殖密度,耕地承载畜禽容量或粪便消纳力是由一个地区农田种植制度及其产出水平的综合反映。不同区域畜禽或粪便承载量相同,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和粪便消纳力会存在较大差异。因此,耕地畜禽承载量或粪便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,我们引入一个耕地负载指数用以表示耕地畜禽或粪便承载程度。

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,负载指数越小,说明对环境的污染风险越低;负载指数 >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,负载指数越大对环境的污染风险就越高。

基于农田 N 收支状况分析表明,在状况 1 条件下,当施用 N 全部来源于粪便 N 时,禹城全区耕地平均畜禽负载指数为 0.7,在 11 个乡镇中有 1 个乡镇的耕地畜禽负载指数为 1.4,超过了 1,其余 10 个乡镇的耕地畜禽负载指数均小于 1;在状况 2 条件下,当施用的畜禽粪便 N 占农田施用 N 的 60%时,禹城全区平均耕地畜禽负载指数为 1.1,11 个乡镇中有 5 个乡镇的耕地畜禽负载指数小于 1,其他 6 个乡镇的耕地畜禽负载指数均大于 1,其中房寺镇的耕地畜禽负载指数达到了 2.3;在状况 3 条件下,当施用的畜禽粪便 N 为农田施用 N 的 30%时,禹城全区平均耕地畜禽负载指数都已经接近 1 或大于 1,甚至超过 2.0,如房寺镇高达 4.6,此时对环境构成严重威胁(图 3)。

基于农田 P 收支状况的分析表明,在状况 4 条件下,当农田施用 P 全部由粪便供给时,禹城全区平均

耕地畜禽负载指数为 0.4,各乡镇的耕地畜禽负载指数均在 1.0 以下,其中只有房寺镇和安仁镇的耕地畜禽负载指数在 0.5~1.0 之间,在状况 5 条件下,当施用畜禽粪便 P_2O_5 为农田施用 P_2O_5 的 60%时,除房寺镇的耕地畜禽负载指数达到 1.4 外,其余乡镇的耕地畜禽负载指数还是均在 1.0 以下;在状况 6 条件下,当施用的粪便 P_2O_5 占农田总施用 P_2O_5 的 30%时,有 5 个乡镇的耕地畜禽负载指数在 1.0 以下,其他 6 个乡镇的耕地畜禽负载指数均超过了 1.0,其中有 1 个乡镇的耕地畜禽负载指数大于 2.0(图 4)。

比较图 3 和图 4 明显可见,就禹城目前的种养结构及产出水平而言,基于农田 N 收支的耕地畜禽负载指数明显大于基于农田 P 收支的耕地畜禽负载指数,进一步证明基于 N 收支的耕地畜禽承载容量小于基于 P 收支的耕地畜禽承载容量,说明禹城地区今后在制定减少农田环境污染对策时,应首先考虑农田 N 素收支及粪便 N 的有效管理,通过适当减少化肥用来增加对畜禽粪便的施用转化数量,根据农田对粪便 N 的消纳力来确定适宜的养殖规模与畜禽结构,同时,在乡镇之间加强粪便产出与施用的合理调配管理。

3 结论与讨论

基于 N 收支状况分析表明,当农田施用粪便 N 分别占总投入 N 的 100%、60%和 30%时,禹城全区平均耕地畜禽承载容量分别为 13.8、8.3 和 4.1 $LU \cdot hm^{-2}$,耕地负载畜禽负载指数分别是 0.7、1.1 和 2.2;基于 P 收支状况分析表明,当农田施用粪便 P_2O_5 分别占总施入 P_2O_5 的 100%、60%和 30%时,禹城全区平均耕地畜禽承载容量分别为 22.5、13.5 和 6.7 $LU \cdot hm^{-2}$,相应耕地畜禽负载指数分别是 0.4、0.7 和 1.3。由此可见,就禹城目前的种养结构及产出水平而言,基于 N 收支的耕地畜禽承载容量小于基于 P 收支的耕地畜禽承载容量,相应基于农田 N 收支的耕地畜禽负载指数明显大于基于农田 P 收支的耕地畜禽负载指数,而且,当前各乡镇之间的耕地畜禽承载量和负载指数差异较大,说明禹城地区今后在制定减少农田环境污染对策时,应首先考虑农田 N 素收支及粪便 N 的有效管理与利用,并要在乡镇之间进行协调平衡。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^[17]。如此看来,如果单从环境健康角度出发,目前禹城全区的养殖规模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,不但总体上

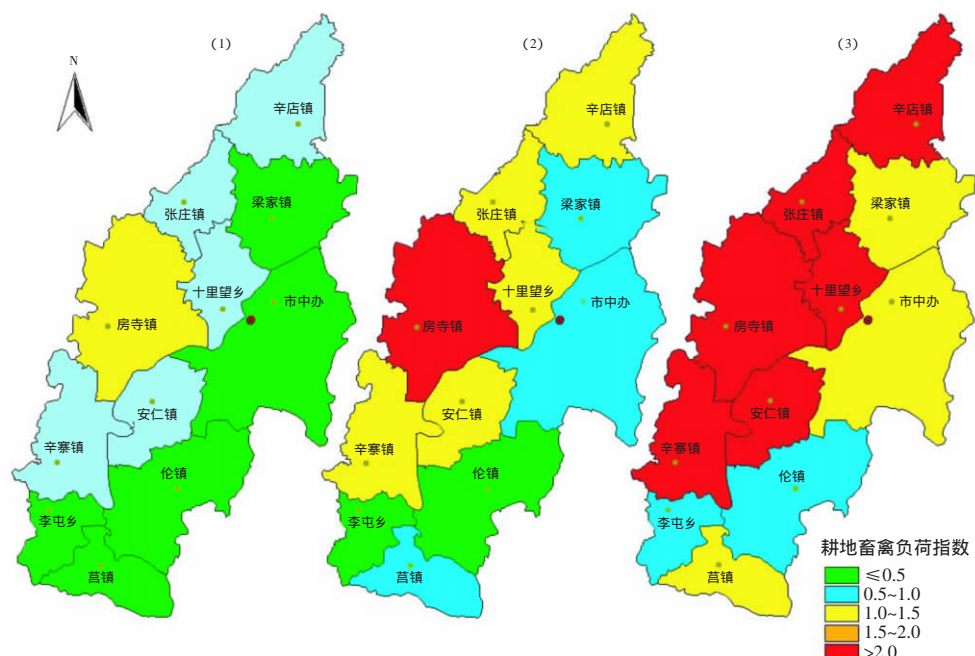


图 3 基于农田 N 收支的禹城耕地畜禽负载指数

Figure 3 Loading index of livestock in Yucheng farmland on the base of nitrogen budget

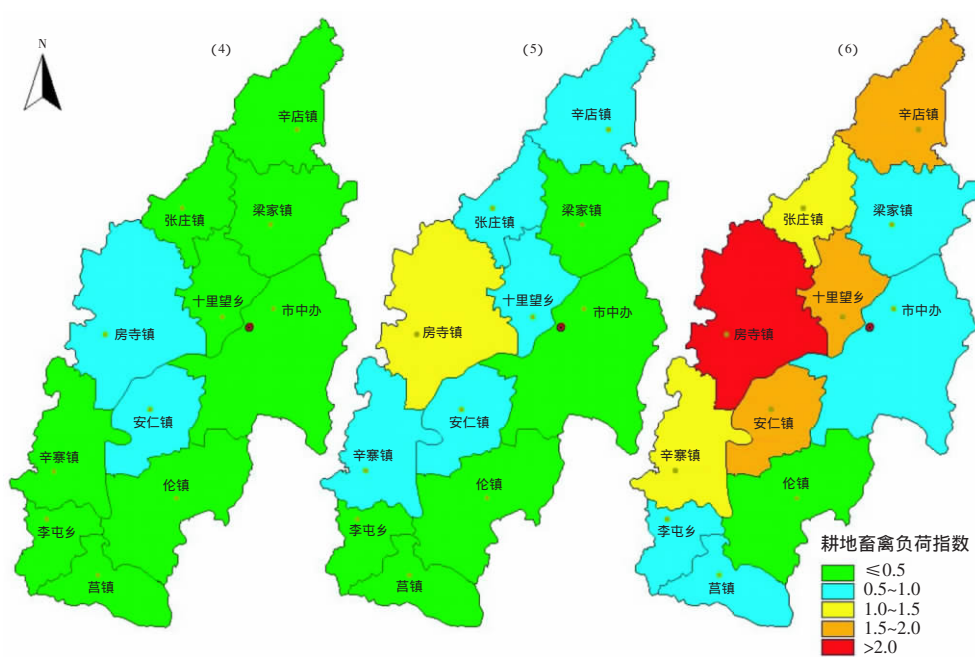


图 4 基于农田 P 收支的耕地畜禽负载指数

Figure 4 Loading index of livestock in Yucheng farmland on the base of phosphorus budget

不宜再增加畜禽数量,而且需把局部超载地区的粪便转运到邻近承载量较低的农田。但是,通过调整种养结构、加强粪便排泄管理和开发发展其他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。

表 5 为禹城与中国及世界主要养殖国家单位耕地面积上畜禽密度的比较。荷兰和比利时因为地少而

畜禽养殖数量大,从上世纪 90 年代便开始采用各种政策措施限制畜禽数量,以减轻畜禽养殖业造成的环境负担。2003 年比 1996 年的畜禽密度有所下降^[2]。禹城地区和我国平均水平,2005 年与 1996 年相比畜禽养殖密度呈现增长趋势,虽然我国的平均畜禽养殖密度低于世界养殖发达国家,但禹城的畜禽养殖密度仅猪、牛总量平均为 $7.8 \text{ LU} \cdot \text{hm}^{-2}$,全部总量平均达 $9.0 \text{ LU} \cdot \text{hm}^{-2}$,明显高于全国平均水平和养殖业发达的荷兰和比利时。

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,所以规定粪便的许可产出量不能超过 $125 \text{ kgP}_2\text{O}_5 \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,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 P_2O_5 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 年将减少三分之一^[2]。

表 6 是荷兰规定的 N、P 最大施用量和损失量,具有耕地的农民不得不想方设法使氮磷用量低于政府规定限量标准,那些没有耕地的猪、禽养殖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须保持在限量标准以下或必须签订粪便处理协议。

尽管要把表 6 中的这些数据转换成单位面积上的畜禽单位是很困难的,但是,最近还是有学者设计

表 5 主要养殖国家和地区畜禽密度比较

Figure 5 Comparison of livestock density between representative countries and areas

国家或地区	农田面积 Farmland area/ $\times 1\,000 \text{ hm}^2$	养殖量 Animal number/ $\times 1\,000$		畜禽单位 ⁽¹⁾ LU/ $\times 1\,000$	/LU $\cdot \text{hm}^{-2}$ in 1996	/LU $\cdot \text{hm}^{-2}$ in 2003
		牛 Cattle	猪 Pig			
荷兰 Netherlands	1 933	3 735	10 766	6 965	4.4	3.6
比利时 Belgium	1 390	2 684	6 366	4 594	3.7	3.3
韩国 Korea	1 846	1 998	9 230	4 767	2.7	2.6
丹麦 Denmark	2 694	1 681	12 969	5 572	2.0	2.1
日本 Japan	4 726	4 563	9 725	7 481	1.5	1.6
德国 Germany	17 038	13 386	26 495	21 335	1.3	1.3
美国 U.S.A.	215 676	96 100	59 513	113 954	0.6	0.5
澳大利亚 Australia	461 486	27 215	2 940	28 097	0.1	0.1
中国 China	122 067	159 475	503 348	310 479	1.9	2.5 ⁽²⁾
禹城 Yucheng of China	53	331.5	285.3	417.1	6.3	7.8 ⁽²⁾

注 (1)畜禽单位(LU)折算系数牛为 1,猪为 0.3 (2)为 2005 年数据。

Note (1)Livestock Unit is calculated as counting cattle 1, pig 0.3 and the number of poultry is not considered here. (2)Data in 2005.

表 6 N 和 P_2O_5 的容许最大施用量和损失量^[3] ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)Figure 6 Maximum application rate and losses of N and P_2O_5 ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)

项目		1998 年 In 1998	2000 年 In 2000	2002 年 In 2002	2005 年 In 2005
P_2O_5 供给	耕地 arable	100	85	80	80
P_2O_5 supply	草地 grassland	120	85	80	80
P_2O_5 损失	耕地 arable	40	35	30	20
P_2O_5 loss	草地 grassland	40	35	30	20
N 供给	耕地 arable			190	170
N supply	草地 grassland			300	250
N 损失	耕地泥炭土 arable peat	175	150	110	100
N loss	耕地粘土 arable clay	175	150	150	100
	耕地沙土 arable dry	175	150	100	60
	草地 grassland	300	275	220	180
	草地粘土 grassland clay	300	275	220	180
	草地沙土 grassland dry	300	275	190	140

了在泥炭土和粘土土壤上的一种典型奶牛生产系统,在这个系统中按投入 $250 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 和 $0 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 、年产 $14\,000 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 牛奶计,奶牛养殖的最大密度为 $1.81 \text{ AU} \cdot \text{hm}^{-2}$ 是可行的,即使在欧洲工业化生产的国家,大部分奶牛养殖场按单头牛平均的产奶量均较低,所以,在欧洲生产条件下奶牛养殖的最大密度为 $2 \text{ LU} \cdot \text{hm}^{-2}$ 似乎是恰当的^[3]。按照这一数据,表5中荷兰、比利时、丹麦和韩国4个国家的平均畜禽密度均超过土壤承载容量,我国禹城更是如此。在一些养殖密度较小的国家和地区,粗略看似乎没有什么大问题,然而,畜禽密度在局部也有可能超过土壤承载容量,所以,是否引起严重的环境问题,还取决于在可运输的距离内是否具有充足的农田^[3]。

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^[2]。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,但与此同时,可消纳粪便的耕地面积却从 $130\,039.2 \times 10^3 \text{ hm}^2$ 减少到 $121\,800.0 \times 10^3 \text{ hm}^2$,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。

参考文献:

- [1] 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, Schölefield 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 (Suppl. 1): 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[G]. Fressingfield, United Kingdom: WRENmedia, 1997.
- [10] 曹宁,曲东,陈新平,等.西北地区农田土壤氮、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[J]. *Jour of Northwest Sci-Tech Univ of Agri and For(Nat Sci Ed)*, 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[J]. *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 effects in China[J]. *China Environmental Science*, 2006, 26(5): 614-617.
- [13] 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[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2008, 27(4): 1312-1319.
- [14] 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 system area: A case study of Yucheng County in Shandong Province[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(7): 1444-1450.
- [15] Oenema O, Oudendag D, Velthof G L. Nutrient losses from manure management in the European Union[J]. *Livestock Science*, 2007, 112(3): 261-272.
- [16] 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. Evaluation method and application of protein and energy balance of forage resources, [M]. Beijing: China Agricultural University Press, 2000: 203.
- [17] 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-yong, 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 $\text{NO}_3\text{-N}$ [J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2008(6): 11-14.