

# 小清河流域畜禽养殖结构变化及其粪便氮素污染负荷特征分析

王立刚,李 虎,王迎春,邱建军\*

(中国农业科学院农业资源与农业区划研究所,北京 100081)

**摘 要** :在分析小清河流域 1991—2007 年间畜禽养殖总量和结构变化态势的基础上,估算该流域畜禽养殖粪便总量和氮素污染负荷量及其空间分布特征。结果表明:该流域畜禽养殖粪便量(以氮含量为标准的猪粪当量计)呈现增加-下降-增加-下降的趋势,基本上是随着畜禽养殖总体数量的变化而变化。小清河流域上游地区畜禽养殖产生的粪便量最大,约占整个流域地区的 58%,对小清河流域氮素污染起到主要作用。该流域畜禽粪便平均氮素污染负荷为  $116 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,但流域各县粪便氮素污染负荷量则差异较大。负荷量大的县(区)主要集中在小清河流域的上游地区(槐荫区除外),其氮素污染负荷均高于  $250 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$  欧盟的最高限制标准,尤其是历下区和天桥区的氮素污染负荷最为突出,对小清河流域水体环境影响极大。

**关键词** :畜禽养殖结构;氮污染;小清河流域

中图分类号:X522 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2011)05-0986-07

## Changes in Livestock Operation Systems and Their Contributions to Manure Nitrogen Pollution Loading in Xiaoqinghe Watershed, China

WANG Li-gang, LI Hu, WANG Ying-chun, QIU Jian-jun\*

(Institute of Natural Resources and Regional Planning, CAAS, Beijing 100081, China)

**Abstract** :During the time period of 1991—2007, animal types and population of the livestock operation systems in the Xiaoqinghe River watershed experienced changes. Based on the statistical data collected at county scale, we analyzed the change trends of manure production as well as nitrogen(N) pollution loading rate in time and space for the watershed. The results indicated that the annual manure productions (counted in pig manure equivalent) varied year-by-year basically following the pattern of changes in the livestock population. The livestock operation systems located along the upstream of the Xiaoqinghe River produced about 58% of the watershed manure production, and hence dominated the watershed N pollution. The livestock-oriented N loading rate was  $116 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$  in average although the rates varied greatly across the counties within the watershed. A large number of counties or districts located in the upstream of the watershed had the N pollution loading rates higher than the EU threshold level ( $250 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$ ). Especially in Lixia and Tianqiao districts, the N loading rates were as high as  $2\,000 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$ . The livestock manure contamination has formed a severe threat for the water use safety for the region.

**Keywords** :livestock raising structure; nitrogen pollution; Xiaoqing River basin

畜禽养殖业快速发展的同时也对生态环境构成了严重威胁,畜禽养殖污染作为农业非点源污染的主要组成部分已经成为世界普遍关注的环境问题<sup>[1-3]</sup>。在美国大约 60% 的河流受到农业生产尤其是畜禽养殖

的污染<sup>[4]</sup>,我国畜禽粪便 2002 年的产生总量达到 37 亿 t,已成为与工业废水、生活污水相并列的三大污染源之一,成为我国水体污染的主要污染源之一<sup>[5-6]</sup>,其中畜禽粪便氮素对环境污染问题尤其突出<sup>[7-8]</sup>。目前,我国全年畜禽粪便的氮素养分总量约为 16 亿 t,但是仅有 50% 的粪便氮素养分还田利用,15% 的氮素养分挥发损失,22% 的氮素养分进入水体污染环境,13% 的氮素养分堆置废弃,氮素流失总量高达  $7.8 \times 10^5$  万 t<sup>[2,9]</sup>,约是化肥流失量的 122%<sup>[10]</sup>。

收稿日期:2010-11-06

基金项目:公益性行业(农业)科研专项(201103039,200803036)

作者简介:王立刚(1974—),男,内蒙古赤峰市人,博士研究生,主要从事农业生态系统碳氮平衡研究。E-mail: wlg@caas.net.cn

\* 通讯作者:邱建军 E-mail: qiujj@caas.net.cn



畜禽粪便年排放量=存栏量×日排泄参数×养殖周期

再根据各类畜禽粪便的猪粪当量换算系数(以含氮量为标准<sup>[24]</sup>),分别计算其猪粪当量(表3)。

表1 畜禽养殖周期(d)

Table 1 The breeding lifecycle of livestock(d)

牛	羊	猪	家禽
365	365	199	55

表2 畜禽粪便日排泄参数(kg·d<sup>-1</sup>)

Table 2 The excretion parameter of livestock manure(kg·d<sup>-1</sup>)

牛粪	牛尿	猪粪	猪尿	羊粪	羊尿	鸡粪
28.07	12.8	2.65	3.6	1.6	0.7	0.11

表3 畜禽粪便含氮量与猪粪当量换算系数

Table 3 The conversion coefficient of N content of manure to pig manure equivalent

项目	猪粪	猪尿	牛粪	牛尿	羊粪	羊尿	鸡粪
含氮量/%	0.58	0.26	0.38	0.5	1.01	0.59	1.24
换算系数	1	0.45	0.66	0.86	1.74	1.02	2.14

目前,畜禽粪便处理的主要出路是作为有机肥料还田,国外许多发达国家也将农田作为畜禽粪便的负载场所加以消化。因此,计算畜禽粪便负荷量则以农田耕地面积作为实际的负载面积<sup>[23-25]</sup>。以畜禽饲养量和当年耕地面积为准,计算1991—2007年小清河流域18个县市畜禽粪便负荷量。计算公式为:

$q=Q/S=\sum XT/S$

式中 q 为畜禽粪便以猪粪当量计的负荷量 t·hm<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>; Q 为各类畜禽粪便猪粪当量总量 t·a<sup>-1</sup>; S 为有效耕地面积 hm<sup>2</sup>; X 为各类畜禽粪便量 t·a<sup>-1</sup>; T 为各类畜禽粪便换算成猪粪当量的换算系数。

## 2 结果与讨论

### 2.1 小清河流域畜禽养殖结构的变化

小清河流域1991—2007年间畜禽养殖总量呈现“快速增加—缓慢下降”的变化态势,1991年随着当地农村经济的发展,畜禽养殖总量快速增加,在1996—1997年达到养殖高峰,之后呈现波动性的下降(图2)。对于不同畜种,家禽的变化与畜禽养殖总量的变化趋势一致,牛、猪、羊等牲畜则呈现“增加—降低—增加—降低”的波动性变化态势。截止到2007年,牛养殖数达到74.36万头,生猪饲养达到266.55万头,羊饲养141.69万头,家禽养殖数达到3078.47万只。

不同畜禽种类在流域内每个县(区)的畜禽养殖数量变化呈现不同的变化态势。牛养殖呈现“个别县集中养殖,其他县零散养殖”的格局。1997年前后以章丘和高青养殖量较高,章丘牛养殖量达到27万头,占全流域牛养殖量的1/4,到2007年章丘和高青的养殖量逐渐下降,而长清的养殖量逐渐增加到28万头,占全流域养殖量的38%。与牛养殖格局不同,生猪养殖呈现“众多县集中养殖”的格局,主要集中在历城、章丘、长清、邹平、青州和寿光等地区。羊养殖量主要集中在历城、章丘、长清等地区,近几年其他地区羊养殖数量呈现不断增长的态势。肉鸡养殖由1991年的各个县分散养殖向长清和周村等几个养殖大县集中养殖转变,其中长清和周村的养殖量达到全流域地区养殖总量的51%。

### 2.2 小清河流域畜禽粪便产生量

1991—2007年小清河流域畜禽养殖粪便量(猪粪当量,下同)呈现增加—下降—增加—下降的趋势,基本上随着畜禽养殖总体数量的变化而变化(图3)。从变化趋势上可以看出,由于牛的排泄量较大,牛粪

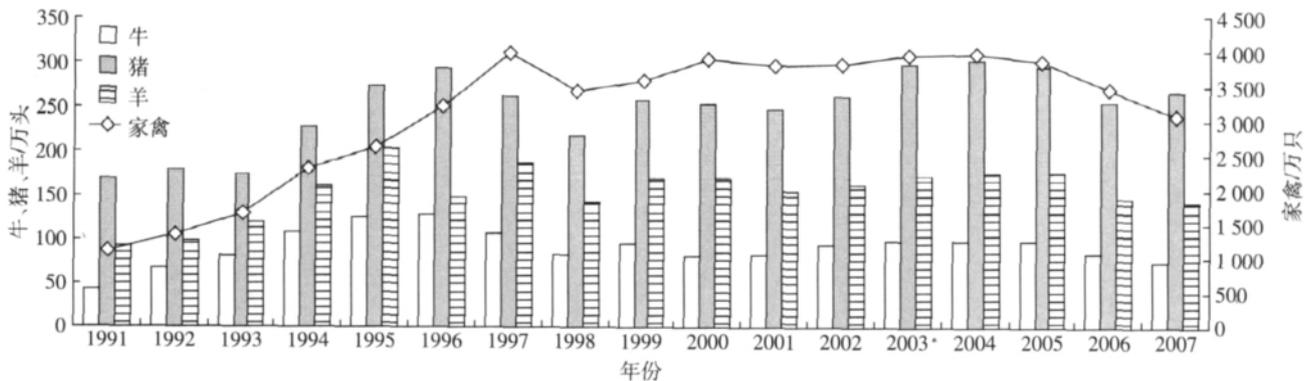


图2 小清河流域1991—2007年畜禽养殖数量的变化

Figure 2 The change in the livestock numbers from 1991 to 2007 in Xiaoqing River basin

便量大于其他畜种,而总畜禽养殖粪便量变化态势与牛粪便量变化态势基本一致,两者之间呈现较好的相关性(相关系数为0.92),也就是牛粪便量决定整体养殖粪便量的变化。

从目前各县(区)畜禽养殖粪便量分布来看(图4),牛产生的粪便量主要集中在长清、历城、章丘和高青等县,其中长清的牛养殖所产生的粪便量最大,达到12900万t,占全流域牛粪便量的38%;猪粪便量主要集中在长清、历城、章丘和寿光等县,粪便产生量都在2000t以上;羊粪便量主要集中在长清、历城和

章丘3县,粪便量为流域羊粪便总量的62%;鸡粪便量则主要产生在长清、历城和邹平等县。从以上分布情况可以看出,在小清河流域上游地区(主要为济南市郊、长清、历城、章丘等县)畜禽养殖产生的粪便量最大,约占整个流域地区的58%,这对小清河流域氮素污染将起到主要作用。

### 2.3 小清河流域氮素污染负荷分析

国际上畜禽粪便处理的主要出路是作为有机肥料直接还田,因此,统计分析流域单位耕地面积上畜禽粪便负荷量可以间接衡量当地畜禽饲养密度及畜

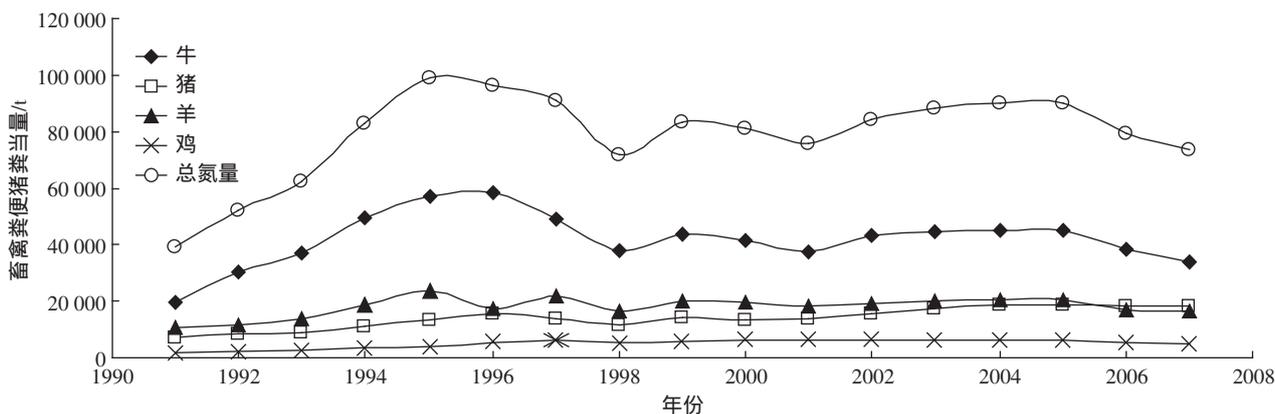


图3 小清河流域1991—2007年畜禽粪便猪粪当量变化

Figure 3 The change in pig manure equivalent from 1991 to 2007 in Xiaoqing River basin

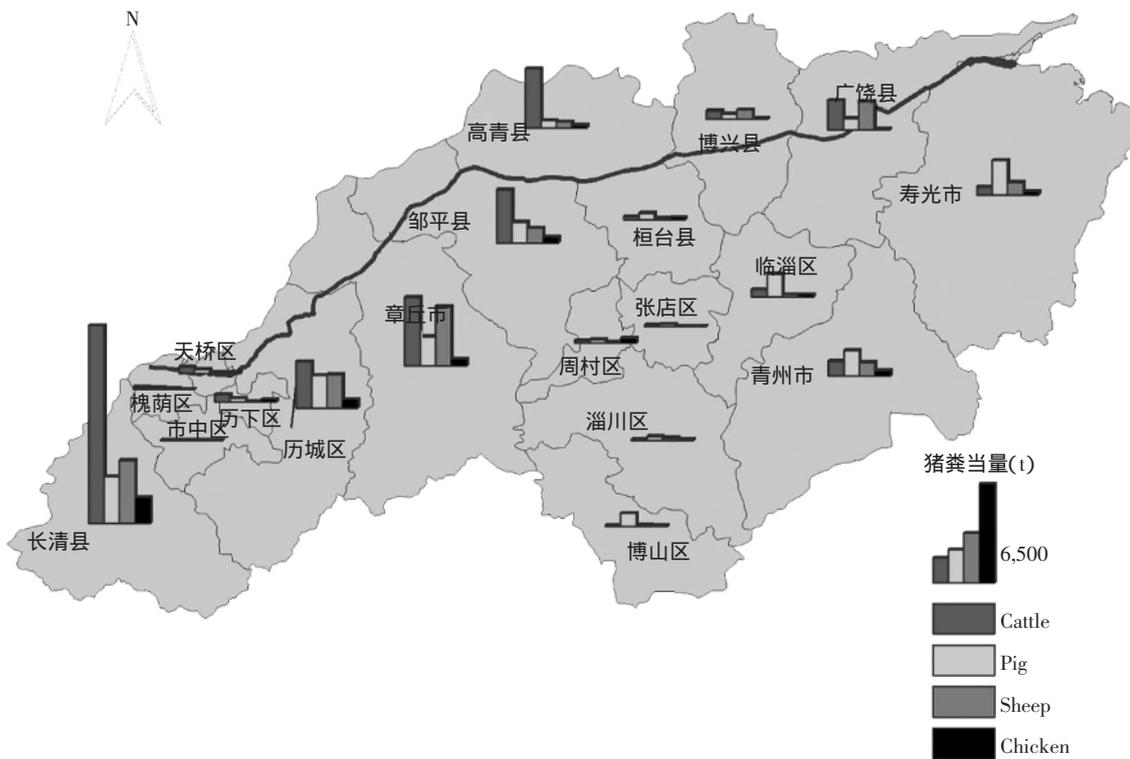


图4 小清河流域各县(区)畜禽养殖粪便量分布(以猪粪当量计)

Figure 4 The distribution of manure in Xiaoqing River basin(counted in pig manure equivalent)

禽养殖业布局的合理性。小清河流域 1991—2007 年单位面积平均畜禽粪便负荷量与畜禽养殖粪便总量呈现同样的变化态势(图 5)。1991 年随着畜禽养殖量的增加平均负荷量也逐渐增加,到 1995 年达到  $140 \text{ kgN}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$  峰值以后虽然有所下降,但也是在  $100\sim 140 \text{ kgN}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$  之间波动,到 2007 年平均负荷量达到  $116 \text{ kgN}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$  比 1991 年增加了 1.07 倍。

从空间尺度上分析,流域各县畜禽粪便负荷量则差异较大。小清河流域畜禽粪便平均氮污染负荷为  $116 \text{ kgN}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ , 低于滇池( $335 \text{ kgN}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ )、巢湖( $133 \text{ kgN}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ )、山东南四湖( $238 \text{ kgN}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ )的畜禽粪便氮素污染负荷,与 2000 年太湖( $119 \text{ kgN}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ )氮素污染负荷相当<sup>[19]</sup>。负荷量大的县区主要集中在小清河流域的上游地区。以历下区畜禽粪便负荷量最大,超过了  $3\ 000 \text{ kgN}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ , 其次是天桥区,超过了  $2\ 000 \text{ kgN}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ , 历城区、章丘和长清 3 县(区)则达到了  $250 \text{ kgN}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$  以上。中游和下游其他各县负荷量都不大。

根据众多研究者提出的畜禽粪便负荷警报值分级标准,本研究用畜禽粪便猪粪当量负荷量同当地农田以猪粪当量计的有机肥理论最大适宜施肥量(取  $250 \text{ kgN}\cdot\text{hm}^{-2}$ ) 的比值  $r$  来间接表达各地区畜禽粪便

负荷量承受程度,即为各地区畜禽粪便农田负荷风险指数。在一般的条件和合理施用情况下,当预警值  $r < 0.4$  时,该地区畜禽粪便可完全被农田环境所消纳和承受,对环境不构成污染威胁。由此将畜禽粪便负荷警报值分为 5 级:  $r \leq 0.4$  为 1 级,无污染;  $0.4 < r \leq 0.7$  为 2 级,稍有污染;  $0.7 < r \leq 1.0$  为 3 级,有污染;  $1.0 < r \leq 1.5$  为 4 级,污染较严重;  $r > 1.5$  为 5 级,污染严重<sup>[19,24]</sup>。由此可见,虽然小清河流域整体  $r$  仅为 0.47,处于 2 级稍有污染状态,但在各区域分析,对环境构成最大威胁的为历下区,  $r$  达到了 12.78,已经大大高于 1.5,属于污染严重地区。天桥区的  $r$  达到了 8.08,也属于对环境威胁很大的地区。历城区、章丘和长清 3 县(区)  $r$  分别为 1.01、1.14 和 1.15,处于 4 级,对水体环境的威胁也较大。其他地区的  $r$  均小于 0.7,对环境的威胁较小。从整个流域生态环境来看,上游地区畜禽养殖氮素污染风险最大,减小上游高污染、高负荷区域养殖业的管理迫在眉睫。

以畜禽粪便污染物进入水体流失率 1%~5% 计算<sup>[26]</sup>,分析畜禽粪便氮素流失到流域水体中的总量可知,2007 年小清河流域畜禽养殖粪便氮素流入水体内量为  $2\ 209.5 \text{ t}$  ( $736.58\sim 3\ 682.89 \text{ t}$ ),大约占到整个流域农业面源氮素污染排放总量( $6\ 202 \text{ t}$ )的 36%,并且

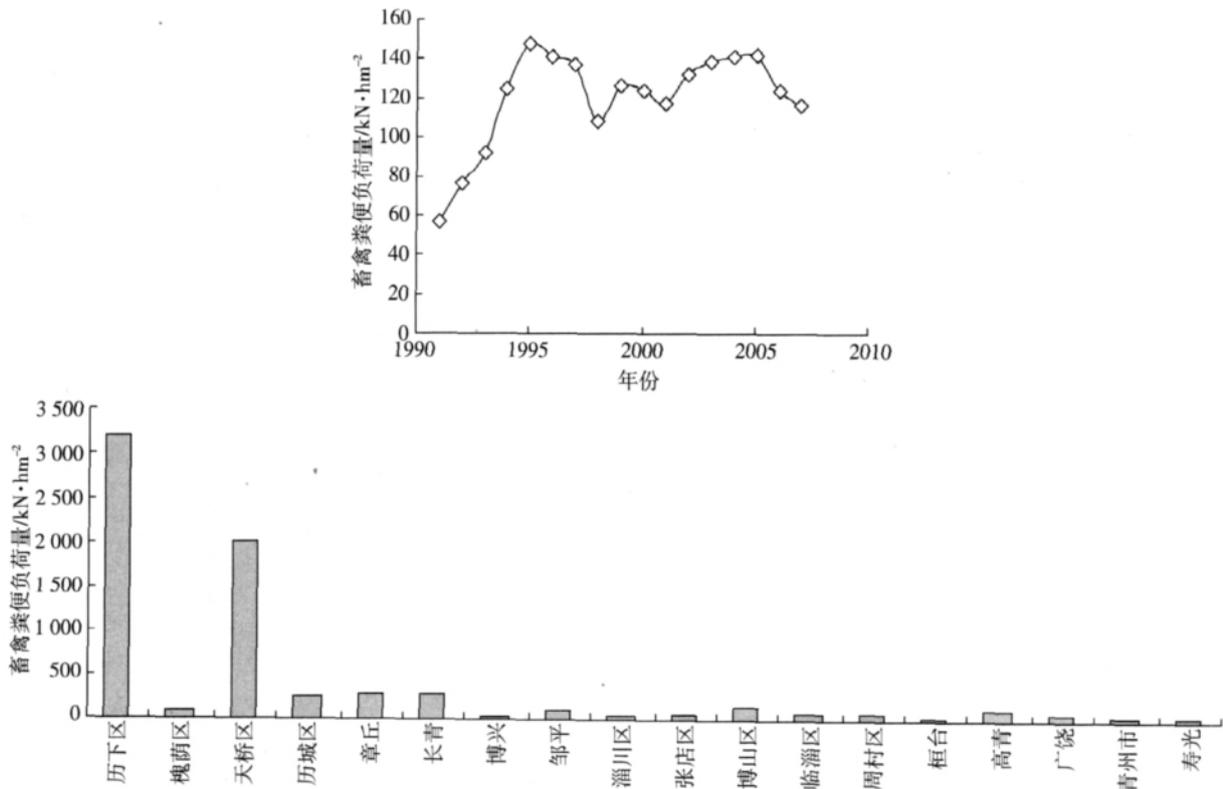


图 5 小清河流域畜禽粪便负荷量年度变化态势(上图)与各县 2007 年负荷量(下图)

Figure 5 The annual change of manure load(up) and the manure load of each county in 2007(down) in Xiaoqing River basin

以上游济南市各县(区)畜禽养殖氮素的贡献最大,大约占到畜禽粪便氮素进入水体的58%。这与小清河流域各个水文监测点监测到的氮素污染含量比例相吻合,说明本研究结果还是基本准确的。

### 3 结论

(1)小清河流域1991—2007年间畜禽养殖总量呈现“快速增加—缓慢下降”的变化态势。2007年牛养殖主要集中在长清、章丘和高青,生猪养殖呈现“众多县集中养殖”的格局,主要集中在历城、章丘、长清、邹平、青州和寿光等地区,羊养殖主要集中在历城、章丘、长清等地区,肉鸡以长清的养殖量最大。

(2)1991—2007年小清河流域畜禽养殖猪粪当量呈现增加—下降—增加—下降的趋势,基本上是随着畜禽养殖总体数量的变化而变化。在小清河流域上游地区(主要济南市郊、长清、历城、章丘等县)畜禽养殖产生的粪便量最大,约占整个流域地区的58%,在小清河流域畜禽养殖氮素污染中起到主导作用。

(3)2007年小清河流域畜禽粪便平均氮污染负荷为 $116 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,流域各县粪便氮污染负荷量则差异较大。负荷量大的县区主要集中在小清河流域的上游地区(槐荫区除外),其氮素污染负荷均高于 $250 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$ 欧盟的最高限制标准,尤其以历下区和天桥区的氮素污染负荷最为突出。

### 参考文献:

- [1] 孔源, 韩鲁佳. 我国畜牧业粪便废弃物的污染及其治理对策的探讨[J]. 中国农业大学学报, 2002, 7(6): 92-96.  
KONG Yuan, HAN Lu-jia. Environmental contamination from animal faeces in China and control countermeasures[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2002, 7(6): 92-96.
- [2] 刘晓利, 许俊香, 王方浩, 等. 我国畜禽粪便中氮素养分资源及其分布状况[J]. 河北农业大学学报, 2005, 28(5): 27-32.  
LIU Xiao-li, XU Jun-xiang, WANG Fang-hao, et al. The resource and distribution of nitrogen nutrient in animal excretion in China[J]. *Journal of Agricultural University of Hebei*, 2005, 28(5): 27-32.
- [3] Schou J S, Skop E, Jensen J D. Integrated agri-environmental modelling a cost-effectiveness analysis of two nitrogen tax instruments in the Veijle Fjord watershed, Denmark[J]. *Journal of Environmental Management*, 2000, 58: 199-212.
- [4] Environmental Protection Agency. National pollutant discharge elimination system permit regulation and efficient limitation guidelines and standards for concentrated animal feeding operations Proposed regulation[J]. *Federal Register*, 2001, 66: 2960-3145.
- [5] 王凯军. 畜禽养殖污染防治技术与对策[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004.

- WANG Kai-jun. Livestock pollution control technologies and strategy [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2004.
- [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] Giles, J. Nitrogen study fertilizes of pollution[J]. *Nature*, 2005, 433: 791.
  - [8] Hollinger E, Cornish P S, Baginska B, et al. Farm-scale storm water losses of sediment and nutrients from a market garden near Sydney, Australia[J]. *Agricultural Water Management*, 2001, 47(3): 227-241.
  - [9] 赵青玲, 杨继涛, 李遂亮, 等. 畜禽粪便资源化利用技术的现状及展望[J]. 河南农业大学学报, 2003, 37(2): 184-187.  
ZHAO Qing-ling, YANG Ji-tao, LI Sui-liang, et al. The present situation and prospect of resource technology on the feces of livestock and poultry[J]. *Journal of Henan Agricultural University*, 2003, 37(2): 184-187.
  - [10] 国家环境保护总局自然生态司. 全国规模化畜禽养殖业污染情况调查及防止对策[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.  
State Environmental Protection Administration Department of Nature and Ecology Conservation. Investigation and prevention countermeasures of pollution from scaled livestock and poultry in China[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2002.
  - [11] 王建平, 苏保林, 贾海峰, 等. 密云水库及其流域营养物集成模拟的模型体系研究[J]. 环境科学, 2006, 27(7): 1286-1291.  
WANG Jian-ping, SU Bao-lin, JIA Hai-feng, et al. Integrated model of nutrients for the Miyun Reservoir and its watershed[J]. *Environmental Science*, 2006, 27(7): 1286-1291.
  - [12] 苑韶峰, 吕军. 流域农业非点源污染研究概况 [J]. 土壤通报, 2004, 35(4): 507-511.  
YUAN Shao-feng, LU Jun. A general introduction of agricultural non-point source pollution in watersheds[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2004, 35(4): 507-511.
  - [13] Campbell J L, Hornbeck J W, McDowell W H, et al. Dissolved organic nitrogen budgets for upland, forested ecosystems in New England[J]. *Biogeochemistry*, 2000, 49: 123-142.
  - [14] 赵章元, 孔令辉. 渤海海域环境现状及保护对策[J]. 环境科学研究, 2000, (13)2: 23-27.  
ZHAO Zhang-yuan, KONG Ling-hui. Environmental status quo and protection countermeasures in Bohai Marine Areas[J]. *Research of Environmental Science*, 2000, (13)2: 23-27.
  - [15] 单志欣, 郑振虎. 渤海莱州湾的富营养化及其研究[J]. 海洋湖沼通报, 2000(2): 41-46.  
SHAN Zhi-xin, ZHENG Zhen-hu. Study on eutrophication in Laizhou Bay of Bohai[J]. *Transaction of Oceanology and Limnology*, 2000(2): 41-46.
  - [16] 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[J]. *China Environmental Science*, 2006, 26(5) :614-617.
- [17] 黄现民, 王洪涛. 山东省环渤海地区农业面源污染防治对策研究[J]. *安徽农业科学*, 2008, 36(15) :6300-6303.  
HUANG Xian-min, WANG Hong-tao. Research on the prevention and cure countermeasure of agricultural non-point source pollution around Bohai Region in Shandong[J]. *Journal of Anhui Agri Sci*, 2008, 36(15) : 6300-6303.
- [18] 温萌芽, 赖格英, 刘胤文. 赣江流域畜禽养殖营养物质潜在排放量的估算与分析[J]. *水资源与水工程学报*, 2007, 18(4) :48-52.  
WEN Meng-ya, LAI Ge-ying, LIU Yin-wen. Estimation and analysis for the latent quantity of the poultrys excretion in the Ganjiang River Basin[J]. *Journal of Water Resources & Water Engineering*, 2007, 18(4) :48-52.
- [19] 武淑霞. 我国农村畜禽养殖业氮磷排放变化特征及其对农业面源污染的影响[D]. 北京: 中国农业科学院博士论文, 2005.  
WU Shu-xia. The spatial and temporal change of nitrogen and phosphorus produced by livestock and poultry & their effects on agricultural non-point pollution in China[D]. Beijing: The Chinese Academy of Agricultural Sciences Dissertation for Doctor Degree in Plant Nutrition Science, 2005.
- [20] 高定, 陈同斌, 刘斌, 等. 我国畜禽养殖业粪便污染风险与控制策略[J]. *地理研究*, 2006, 25(2) :311-319.  
GAO Ding, CHEN Tong-bin, LIU Bin, et al. Releases of pollutants from poultry manure in China and recommended strategies for the pollution prevention[J]. *Geographical Research*, 2006, 25(2) :311-319.
- [21] 刘更另. 中国有机肥料[M]. 北京: 中国农业出版社, 1991.  
LIU Geng-ling. China organic fertilizer[M]. Beijing: China Agricultural Press, 1991.
- [22] 张绪美, 董元华, 王辉, 等. 江苏省农田畜禽粪便负荷时空变化[J]. *地理科学*, 2007, 27(4) :597-601.  
ZHANG Xu-mei, DONG Yuan-hua, WANG Hui, et al. Spatial and temporal variation in farm land load of livestock feces in Jiangsu Province[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2007, 27(4) :597-601.
- [23] Hoar B R, Atwill E R, Farver T B. Estimating maximum possible environmental loading amounts of cryptosporidium parvum attributable to adult beef cattle[J]. *Quantitative Microbiology*, 2000, 2 :21-36.
- [24] 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.
- [25] 王晓燕, 汪清平. 北京市密云县耕地畜禽粪便负荷估算及风险评估[J]. *农村生态环境*, 2005, 21(1) :30-34.  
WANG Xiao-yan, WANG Qing-ping. Livestock manure load of farm-land in Miyun County and its environmental risk assessment[J]. *Rural Eco-Environment*, 2005, 21(1) :30-34.
- [26] 李荣刚, 夏源陵, 吴安之, 等. 江苏太湖地区水污染物及其向水体的排放量[J]. *湖泊科学*, 2000, 12(2) :147-153.  
LI Rong-gang, XIA Yuan-ling, WU An-zhi, et al. Pollutants sources and their discharging amount in Taihu Lake Area of Jiangsu Province [J]. *Journal of Lake Science*, 2000, 12(2) :147-153.