中国生态农业学报 2018 年 12 月 第 26 卷 第 12 期
Chinese Journal of Eco-Agriculture, Dec. 2018, 26(12): 1898−1907

DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.180174

王忙生, 张双奇, 杨继元, 杨雷. 丹江上游商洛市畜禽粪便排放量与耕地污染负荷分析[J]. 中国生态农业学报, 2018, 26(12): 1898−1907
WANG M S, ZHANG S Q, YANG J Y, YANG L. Livestock manure emission and cultivated land pollution load in the midst upstream of Danjiang River in Shangluo City[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2018, 26(12): 1898−1907

丹江上游商洛市畜禽粪便排放量与耕地污染负荷分析*

王忙生[1], 张双奇[1], 杨继元[2], 杨 雷[3]

(1. 商洛学院 商洛 726000; 2. 商洛市农业局 商洛 726000; 3. 商洛市畜牧产业发展中心 商洛 726000)

摘 要: 南水北调中线上游水源地保护与水质持续安全一直是研究的重点之一。商洛市辖商州区、丹凤县和商南县被规划为丹江流域上游“水源地安全保护区”。掌握该地区畜牧养殖业发展情况、估算畜禽粪便的排放量、分析该地区常用耕地对畜禽粪便及其污染物的消纳能力、评估畜禽粪便可能造成的污染风险等是科学管控畜牧养殖业和有效实施水源地保护的基础性研究。目前, 该地区尚无这些方面具体的成果和资料。本研究采用畜禽粪便排泄系数方法, 估算了丹江上游流域自上游至下游的商洛市辖商州区、丹凤县、商南县 2014—2016 年各类畜禽粪便排放量, 依据 3 区县的常年耕地面积分析了畜禽粪便猪粪当量耕地负荷, 确定了当前商洛地区畜禽粪便猪粪当量最大适宜耕地负荷标准, 并评估了 3 区县畜禽粪便耕地负荷的污染风险。结果表明: 1)商州区、丹凤县和商南县年度平均畜禽粪便排放量猪粪当量分别为 5.732×10^5 $t\cdot a^{-1}$、9.321×10^5 $t\cdot a^{-1}$ 和 1.274×10^6 $t\cdot a^{-1}$; 其中猪与禽的粪便占到总粪便排放量的 68.06%。2)3 区县畜禽粪便排放量猪粪当量耕地负荷依次为 27.04 $t\cdot hm^{-2}\cdot a^{-1}$、76.72 $t\cdot hm^{-2}\cdot a^{-1}$ 和 90.10 $t\cdot hm^{-2}\cdot a^{-1}$。3)商洛市畜禽粪便排放量猪粪当量最大适宜耕地负荷标准为 61.22 $t\cdot hm^{-2}\cdot a^{-1}$。4)3 区县畜禽粪便耕地负荷的污染风险警报级别分别是: 商州区为Ⅱ级, 稍有污染风险; 丹凤县和商南县均为Ⅳ级, 有较严重的污染风险。5)商州区、丹凤县和商南县的总氮平均耕地负荷分别为 159 $kg\cdot hm^{-2}\cdot a^{-1}$、450 $kg\cdot hm^{-2}\cdot a^{-1}$ 和 530 $kg\cdot hm^{-2}\cdot a^{-1}$, 总磷平均耕地负荷分别是 51 $kg\cdot hm^{-2}\cdot a^{-1}$、179 $kg\cdot hm^{-2}\cdot a^{-1}$ 和 199 $kg\cdot hm^{-2}\cdot a^{-1}$, 生化需氧量平均耕地负荷分别为 716 $kg\cdot hm^{-2}\cdot a^{-1}$、2 275 $kg\cdot hm^{-2}\cdot a^{-1}$ 和 2 595 $kg\cdot hm^{-2}\cdot a^{-1}$, 化学需氧量平均耕地负荷分别为 768 $kg\cdot hm^{-2}\cdot a^{-1}$、2 345 $kg\cdot hm^{-2}\cdot a^{-1}$ 和 2 667 $kg\cdot hm^{-2}\cdot a^{-1}$, NH_3-N 平均耕地负荷分别为 65 $kg\cdot hm^{-2}\cdot a^{-1}$、201 $kg\cdot hm^{-2}\cdot a^{-1}$ 和 232 $kg\cdot hm^{-2}\cdot a^{-1}$。总之, 商洛市商州区、丹凤县和商南县的畜禽养殖总量大, 养殖结构不合理; 商洛市常用耕地面积相对较少, 畜禽粪便的耕地负荷及其污染物负荷均较大, 且形成自上游到下游急剧增加的态势; 商洛市超量污染物排放会造成氮素和磷素等成分的淋溶和流失, 对于南水北调水源地的水质安全构成较大的潜在威胁。

关键词: 丹江; 畜禽粪便; 耕地负荷; 排泄系数; 养殖结构
中图分类号: X713; X522 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-3990(2018)12-1898-10

Livestock manure emission and cultivated land pollution load in the midst upstream of Danjiang River in Shangluo City*

WANG Mangsheng[1], ZHANG Shuangqi[1], YANG Jiyuan[2], YANG Lei[3]

(1. Shangluo University, Shangluo 726000, China; 2. Shangluo Agricultural Bureau, Shangluo 726000, China; 3. Center of Shangluo Animal Husbandry Industry Development, Shangluo 726000, China)

* 陕西省科学技术研究发展计划项目(2012K02-05)和商洛学院根植地方行动计划项目(GZ16046)资助
王忙生, 主要研究方向为畜牧养殖与环境资源关系。E-mail: wangjiang6005@163.com
收稿日期: 2018-02-22 接受日期: 2018-06-30
* This study was supported by the Shaanxi Sci-tec Research Development Program Project (2012K02-05) and the Project of Regional Act Program of Shangluo University (GZ16046).
Corresponding author: WANG Mangsheng, E-mail: wangjiang6005@163.com
Received Feb. 22, 2018; accepted Jun. 30, 2018

Abstract: Persistent water quality safety and protection have been a hot research in the upstream region of the middle route of China's South-to-North Water Diversion Project. Shangzhou District, Danfeng County and Shangnan County, which are governed by Shangluo City, have already delineated the zone for water source protection in the upstream reach of Danjiang River. There is a need of basic research on scientific management of livestock and efficient implementation of research on water source protection area. It is also necessary to understand development status of livestock, estimate livestock manure emission, analyze absorption capacity of cultivated lands, and evaluate pollution risk caused by the emission. Until now, less data or literature has existed on this field of research. In this study, the emission of livestock manure was estimated using the livestock manure emission coefficient method from 2014 to 2016 in the upstream region of Danjiang River in Shangluo City, including Shangzhou District, Danfeng County and Shangnan County along the river direction. Then the maximum cultivated land load of pig-waste equivalent was confirmed according to cultivated area and pollution risk of cultivated land due to livestock manure in the three districts was evaluated. The results showed that annual pig-waste equivalents of livestock manure in Shangzhou, Danfeng and Shangnan were respectively 5.732×10^5 t·a^{-1}, 9.321×10^5 t·a^{-1} and 1.274×10^6 t·a^{-1}, with livestock manure emissions from pig and poultry accounting for up to 68.06% of the total. The cultivated land load of pig-waste equivalents for livestock manure were respectively 27.04 t·hm^{-2}·a^{-1}, 76.72 t·hm^{-2}·a^{-1} and 90.10 t·hm^{-2}·a^{-1} in Shangzhou, Danfeng and Shangnan. The maximum standard of cultivated land load of pig-waste equivalent of livestock manure was 61.22 t·hm^{-2}·a^{-1} for Shangluo City. Pollution risks were level Ⅱ for Shangzhou (moderate risk), and level Ⅳ for both Danfeng and Shangnan (severe risk). The average cultivated land loads for total nitrogen were respectively 159 kg·hm^{-2}·a^{-1}, 450 kg·hm^{-2}·a^{-1} and 530 kg·hm^{-2}·a^{-1} in the three districts; for total phosphorus were 51 kg·hm^{-2}·a^{-1}, 179 kg·hm^{-2}·a^{-1} and 199 kg·hm^{-2}·a^{-1}; for biochemical oxygen demand (BOD) were 716 kg·hm^{-2}·a^{-1}, 2 275 kg·hm^{-2}·a^{-1} and 2 595 kg·hm^{-2}·a^{-1}; for chemical oxygen demand (COD) were 768 kg·hm^{-2}·a^{-1}, 2 345 kg·hm^{-2}·a^{-1} and 2 667 kg·hm^{-2}·a^{-1}; and for NH_3-N were 65 kg·hm^{-2}·a^{-1}, 201 kg·hm^{-2}·a^{-1} and 232 kg·hm^{-2}·a^{-1}. It was concluded that the number of livestock bred was large and the husbandry structure unreasonable in the three districts of Shangluo City. Because of the limited cultivated land, cultivated land loads and livestock manure pollution were pretty heavy, with increasing risks from upstream to downstream reaches. Excessive pollutants caused loss of nitrogen and phosphorus, which severely threatened water source safety of the South-to-North Water Diversion Project.

Keywords: Danjiang River; Livestock manure; Cultivated land load; Emission coefficient; Husbandry structure

南水北调工程对于缓解北方水资源严重短缺，改善生态环境，提高人民生活水平具有重大意义。中线工程自2014年12月12日正式通水以来，已经惠及京津冀豫沿线5 300多万居民，已成为京津两市主要的饮用水水源[1]。但中线工程水源地(包括库内)水质安全却是自工程建设至今研究的核心问题之一。许多研究表明，农业面源污染是中线库区的主要污染物来源，而畜禽养殖业是排在第1位的污染源[2-3]。

近年来，陕西省商洛市养殖业规模一直处于上升趋势[4]。仅2016年，商洛市出栏生猪就达233.9万头，全市生猪、肉鸡、蛋鸡集约化规模养殖比例分别达42%、90%、95%，但超过50%的规模养殖场缺乏必要的污水处理设备；配套建设沉淀池、进行干湿分离、有机肥生产并达到污水处理的养殖场只占调查总量的7.41%[5]。在《陕西省'十三五'畜牧业发展规划》(下简称《畜牧发展规划》)中，商洛市(包括汉中市和安康市)又被规划为陕西省生猪养殖的主要分布区，其中洛南县、丹凤县、商南县和山阳县被规划为重点养猪基地[6]。随着畜禽养殖量的增加，如何处理大量的畜禽粪便，提高畜禽粪便资源化开发利用率就成了亟待解决的重要问题。

商洛市地处秦岭东南部，属于南北气候的过渡带，山大沟深，坡地多平地少，土壤类型复杂(有8个土类)[7]。常用耕地面积占全市总面积不到10%，川道滩地土壤较为肥沃，但坡地土壤较为瘠薄，且容易发生有机质等成分的流失。据瞿晓苍等[8]统计，自20世纪90年代以来，商洛市有机肥施用面积和数量锐减，到2014年全市有机肥施用面积和数量分别占播种面积和需用量的19.8%和7.1%，不合理施肥和过量化肥施用造成土壤肥力严重下降。利用现有耕地实行种养结合，扩大有机肥生产与施用，是消纳畜禽粪便最有效和最持久的途径。探讨当地常用耕地对畜禽粪便的消纳与负荷能力，是进行畜禽粪便有效处理及资源化利用的基础研究。

发源于商洛市商州区西部秦岭南麓的丹江，流经商洛市辖商州区、丹凤县和商南县大约250 km；丹江从商南县汪家店乡月亮湾流出境，至丹江口水库中线陶岔渠首的直线距离也只有150 km左右(图1)。区域地理位置的特殊性，使得商洛市畜禽养殖业肩负着更重要的环保责任。在《丹江口库区及上游水污染防治和水土保持'十三五'规划》(下简称《丹江水规划》)中，商洛市商州区、丹凤县和商南县被明确列在"水源地安全保护区"之内。《丹江水规划》同时要求全面削减各类污染负荷，治理不达标入库

河流，强化水污染风险管控[9]。

基于上述背景，本研究根据商洛市辖商州区、丹凤县和商南县2014—2016年度的畜禽养殖基本数据，采用畜禽粪便排泄系数法，估算3区县畜禽粪便的排放量；同时，参照当地耕地土壤与种植业特点，重点分析并确定当地耕地畜禽粪便最大适宜负荷标准；通过评估各区县常用耕地畜禽粪便负荷及其污染物负荷分布，进而判断畜牧养殖业对丹江流域水质潜在的影响；最后，对3区县的畜禽粪便耕地负荷进行风险判断。研究结果可为商洛市畜牧养殖业结构调整、畜禽粪便资源化利用提供基础数据，特别是对于南水北调中线水源地保护和建设提供参考依据。

1 研究方法

1.1 数据来源与处理

依据“农业部畜牧业统计监测系统”的商洛市2014—2016 年度的养殖业基本数据，选择与丹江上游直接相关的商州区、丹凤县和商南县养殖业数据(表 1)估算畜禽粪便排放量，再依据《陕西省区域统计年鉴》，以各区县 2013—2015 年末的常用耕地面积为基准估算污染负荷。因为当地奶牛养殖数量极少(仅个别区县有数十头或几百头)，列表时归入黄牛数量；兼用型鸡的养殖时间或多半年或超过 1 年，在估算时用当年出栏数与年末存栏数的平均值，且同蛋鸡合并估算；另外，区域面积来自各地方政府网站。

表 1 2014—2016 年度商洛市辖商州区、丹凤县、商南县畜禽养殖基本数据与常用耕地面积

Table 1 Basic data of livestock breeding and cultivated land area of Shangzhou, Danfeng and Shangnan in Shangluo City from 2014 to 2016 10^4 head

畜禽种类 Livestock species		商州区 Shangzhou		丹凤县 Danfeng		商南县 Shangnan	
		当年出栏数 Slaughter number (2014/2015/2016)	年末存栏数 Total inventory (2014/2015/2016)	当年出栏数 Slaughter number (2014/2015/2016)	年末存栏数 Total inventory (2014/2015/2016)	当年出栏数 Slaughter number (2014/2015/2016)	年末存栏数 Total inventory (2014/2015/2016)
大牲畜 Big livestock	黄牛 Cattle	0.92/0.88/0.83	2.08/1.94/1.85	1.28/1.94/0.78	1.60/1.95/1.45	1.03/1.11/1.10	2.26/2.47/2.39
猪 Pig		26.72/24.85/25.60	22.74/21.25/20.82	46.51/49.11/24.50	31.60/31.25/13.51	62.06/70.43/71.49	31.56/35.23/39.51
羊 Sheep	山羊 Goat	2.23/2.14/2.03	3.74/3.56/3.38	3.69/4.34/3.58	3.65/4.41/3.65	6.44/6.45/6.59	7.60/7.60/7.66
家禽 Poultry	专用型蛋鸡 Layer	51.16/56.72/53.88	61.48/61.14/65.19	51.62/76.05/71.99	62.00/61.18/52.77	160.75/179.00/206.45	179.20/213.50/237.33
	专用型肉鸡 Broiler	24.00/23.69/16.99	12.30/12.45/7.62	3 326.13/3 893.91/2 288.22	737.16/883.12/310.29	140.00/150.00/167.68	70.20/80.00/95.60
	兼用型鸡 Dual-purpose hen	22.56/21.18/20.01	23.00/22.13/20.16	55.72/57.49/41.80	59.07/44.80/45.63	140.05/174.08/147.53	103.20/123.80/112.36
常用耕地面积 Cultivated land area (hm^2)		21 378/21 230/20 972		12 185/12 163/12 163		14 153/14 138/14 126	
区域面积 Region area (km^2)		2 672		2 438		2 307	

1.2 畜禽粪便排泄量估算

1.2.1 估算公式

关于估算畜禽粪便排泄量的方法，国家生态环境部提出了畜禽粪便排泄量计算方法：饲养存栏量×日排泄系数(单个动物每天排出的粪便的数量)×饲养周期[10]；也有人提出新的算法：(当年出栏量+年末存栏量)×日排泄系数×饲养周期[11]。前者是以畜禽饲养周期为标准，但有些畜禽养殖不足 1 年，只估算存栏数，就会使结果偏小；后者则会对超过 1 年饲养期的畜禽造成重复计算，估计量就会偏大。在目前我国养殖水平下，关于畜禽养殖周期研究有许多探讨[12-13]。结合商洛地区养殖实践，大牲畜(主要指黄牛)和羊(实际只有山羊)的养殖周期均超过了 1 年，蛋鸡多实行全进全出养殖方式，一般超过 72 周龄，所以牛、羊、蛋鸡都以年末存栏量为估算基准，并以 365 d 为周期比较合适。肉鸡实行全进全出养殖方式，养殖周期为 55 d，故以当年出栏数为基准。商洛地区目前育肥猪养殖周期为 180 d。需要说明的是，母猪的存栏数是保持养猪数量稳定的关键因素。母猪一般养殖时间都在两年左右，应选 365 d 作为估算基准，而母猪存栏数量可以按照我国目前每头母猪能够育肥出栏 14 头仔猪的标准折算[14]。这样，育肥猪按照出栏数计算，而母猪则按照存栏数计算。本研究所选用的不同畜禽粪便排泄量估算公式详见表 2。

1.2.2 畜禽粪便排泄系数的确定依据

畜禽粪便排泄系数与畜禽种类、养殖方式、生长发育阶段以及环境因素等有较大关系。董红敏等[15]分析了猪的保育、育肥、妊娠等不同阶段排污系数，发现不同生理条件下排污系数差异明显，宏观分析中不易参照。庄犁等[16]分析了国内外研究概况，比

照了国内不同地域畜禽排污系数, 认为养殖地区不同, 研究方法不同, 则畜禽排污系数具有较大差异。其实, 排泄系数更符合畜禽的消化代谢生理以及饲养阶段和水平, 而排污系数更符合养殖条件和管理水平, 目前在排泄系数和排污系数的使用上互相借用, 并进行适当调整。白明刚[17]综合多人的研究结果, 提出的畜禽粪便排泄系数具有一定的普适性。商洛地区养猪场规模适中, 另有许多养猪专业户, 而且大多数以干出粪(即直接清扫或刮板清除粪便)与漏缝地板相结合的饲养方式。由于封山育林政策, 传统的放牧养牛、养羊也已大多转为舍饲形式。蛋鸡和肉鸡养殖多采用干出粪的笼养或平养形式。参考周媛媛等[18]对重庆畜禽粪便排污研究, 经过调整的畜禽排泄系数如表 2 所述。

表 2　畜禽粪便排泄量计算公式与粪尿排泄系数

Table 2　Computational formula of livestock manure emissions and manure emission coefficient

畜禽种类 Livestock species	计算公式 Computational formula	粪排泄系数 Fecal emission coefficient ($kg \cdot head^{-1} \cdot d^{-1}$)	尿排泄系数 Urinary emission coefficient ($kg \cdot head^{-1} \cdot d^{-1}$)
猪 Pig	(年出栏量×180 d+年出栏量/14×365 d)×排泄系数 (Slaughter number × 180 d + slaughter number / 14 × 365 d) × emission coefficient	2.69	3.30
大牲畜 Big livestock	年末存栏量×365 d×排泄系数 Total inventory × 365 d × emission coefficient	22.50	10.55
羊 Goat	年末存栏量×365 d×排泄系数 Total inventory × 365 d × emission coefficient	1.98	0.53
蛋鸡 Layer	年末存栏量×365 d×排泄系数 Total inventory × 365 d × emission coefficient	0.12	—
肉鸡 Broiler	年出栏量×55 d×排泄系数 Slaughter number × 55 d × emission coefficient	0.08	—

1.2.3　畜禽粪便污染物含量(系数)的选择

畜禽粪便污染物的多少取决于粪便排泄总数量。而重点是粪便中总氮(TN)、总磷(TP)、生化需氧量(BOD)、重铬酸钾法化学需氧量(CODcr)以及氨氮(NH_3-N)排放量对养殖所在区县土壤及地表水质的影响。之所以将粪便中含有的各种物质定义为污染物质, 是基于环境及水质资源保护的理念, 以便于比较和分析。综合前人[9-13,15-18]的研究, 选择经调整归纳的畜禽粪尿污染物平均含量(表 3)作为污染物排放量和耕地负荷研究的基础参数。

表 3　畜禽粪尿污染物平均含量

Table 3　Average pollution contents of livestock manure emission

畜禽粪便种类 Type of livestock manure	总氮(TN) Total nitrogen ($kg \cdot t^{-1}$)	总磷(TP) Total phosphorus ($kg \cdot t^{-1}$)	生化需氧量(BOD) Biochemical oxygen demand ($kg \cdot t^{-1}$)	化学需氧量(CODcr) Chemical oxygen demand ($kg \cdot t^{-1}$)	NH_3-N ($kg \cdot t^{-1}$)
猪粪 Pig manure	5.88	3.41	57.03	52.00	3.08
猪尿 Pig urine	3.30	0.52	5.00	9.00	1.43
大牲畜粪 Big livestock manure	4.37	1.18	24.53	31.00	1.71
大牲畜尿 Big livestock urine	8.00	0.40	4.00	6.00	3.47
羊粪 Goat manure	7.50	2.60	4.10	4.63	0.80
羊尿 Goat urine	14.00	1.96	4.10	4.63	0.80
鸡粪 Poultry manure	9.84	5.37	47.87	45.00	4.78

1.3　耕地畜禽粪便污染负荷计算

依据《全国规模化畜禽养殖业污染情况调查及其防治对策》的规定, 畜禽粪便负荷也称为畜禽粪便耕地负荷。该指标主要是比较当地养殖业与可用于消纳畜禽粪便的有效耕地之间的关系, 依此分析畜禽养殖业对当地农田耕地的承载力及其影响。

1.3.1　畜禽粪便负荷计算方法

$$q = Q/S = \sum X \times T / S \tag{1}$$

$$\gamma = q/P \tag{2}$$

式中: q 为以猪粪便为当量的农田负荷, $t \cdot a^{-1} \cdot hm^{-2}$; Q 为各类畜禽粪便的猪粪当量, $t \cdot a^{-1}$; S 为有效耕地面积, hm^2; X为各类畜禽粪便量, $t \cdot a^{-1}$; T为各类畜禽粪便换算成猪粪当量的系数; r 是畜禽粪便负荷警报值[12](表 4), 用于分析耕地负荷对环境造成的威胁等级; P 是当地畜禽粪便排放量猪粪当量的最大适宜耕地负荷, $t \cdot a^{-1} \cdot hm^{-2}$。本研究依据表 3 中畜禽粪便的氮含量进行猪粪当量系数折算, 结果见表 5。

表 4 畜禽粪便耕地负荷警报值分级

Table 4 Alarm value classifications of the livestock manure loads of farmland

警报值(r) Alarm value	≤0.4	0.4~0.7	0.7~1.0	1.0~1.5	1.5~2.5	>2.5
级别 Class	Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ	Ⅳ	Ⅴ	Ⅵ
对环境的污染威胁 Pollution risk to environment	无 No	稍有 Slight	有 Normal	较严重 Slightly serious	严重 Serious	很严重 Strongly serious

表 5 畜禽粪便含氮量及换算成猪粪当量的换算系数

Table 5 Nitrogen content and conversion coefficient of pig-waste equivalents of livestock manures

畜禽粪便种类 Type of livestock manure	氮含量 Nitrogen content (%)	换算系数 Conversion coefficient
猪粪 Pig manure	0.588	1.000
猪尿 Pig urine	0.330	0.561
大牲畜粪 Big livestock manure	0.437	0.743
大牲畜尿 Big livestock urine	0.800	1.361
羊粪 Goat manure	0.750	1.276
羊尿 Goat urine	1.400	2.381
鸡粪 Poultry manure	0.984	1.673

1.3.2 畜禽粪便各类污染物质的负荷计算方法

该计算方法与上述畜禽粪便负荷计算方法相同，即衡量粪便中各种污染物质的负荷情况。要分析某地畜禽粪便污染物的耕地负荷，就要分别计算各类畜禽产生的各种污染物数量，然后合并后估算出本地区的污染物负荷量。所用计算公式如下：

$$Q_{mj} = \sum W_{mi} T_{ij} / A_m \tag{3}$$

式中：Q_{mj} 是 m 区域年产生 j 污染物耕地负荷，$kg \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1}$；$W_{mi}$ 是 m 区域畜禽 i 产生粪便量，$10^4\ t \cdot a^{-1}$；T_{ij} 是 i 畜禽粪便产生 j 污染物的平均含量，$kg \cdot t^{-1}$；A_m 是 m 区域有效耕地(本研究使用年鉴中的常用耕地)面积，hm^2。

2 结果与分析

2.1 丹江上游商洛市辖 3 区县畜禽粪便排泄量猪粪当量与耕地负荷的区域分布

根据上述基本数据和研究方法，利用公式(1)，估算丹江上游商洛市辖商州区、丹凤县和商南县 2014—2016 年度的畜禽粪便排泄量猪粪当量，以及各年度畜禽粪便猪粪当量耕地负荷等(表 6)。

表 6 2014—2016 年商洛市辖 3 区县畜禽粪便猪粪当量与耕地负荷

Table 6 Equivalents of pig-waste of livestock manure and cultivated land load in three districts of Shangluo City from 2014 to 2016

畜禽粪便种类 Type of livestock manure	畜禽粪便排泄量猪粪当量 Equivalent of pig-waste for livestock manure ($10^4\ t \cdot a^{-1}$)			畜禽猪粪当量比重 Proportion of equivalents of pig-waste for livestock manure (%)
	商州区 Shangzhou (2014/2015/2016)	丹凤县 Danfeng (2014/2015/2016)	商南县 Shangnan (2014/2015/2016)	
猪粪 Pig manure	25.00/23.26/23.96	43.52/45.96/22.93	58.07/65.91/66.91	45.04
大牲畜粪 Big livestock manure	23.59/22.01/20.98	18.14/22.11/16.44	25.63/28.01/27.11	24.47
羊粪 Goat manure	5.16/4.38/4.66	5.36/6.09/5.06	10.51/10.51/10.59	7.47
蛋鸡粪 Poultry manure	6.17/6.07/6.26	8.75/8.23/7.08	22.05/26.55/26.92	14.16
肉鸡粪 Broiler manure	0.18/0.17/0.12	24.48/28.66/16.85	1.04/1.10/1.24	8.86
年度猪粪当量 Annual equivalent of pig-waster	60.10/55.89/55.98	100.25/111.03/68.36	117.30/132.08/132.77	—
年度耕地负荷 Annual cultivated land load ($t \cdot a^{-1} \cdot hm^{-2}$)	28.11/26.33/26.69	82.27/91.29/56.61	82.88/93.42/93.99	—
平均耕地负荷 Average cultivated land load ($t \cdot a^{-1} \cdot hm^{-2}$)	27.04	76.72	90.10	
耕地负荷比重 Proportion of cultivated land load (%)	13.96	39.53	46.51	100.00

由表 6 数据可以得出, 商州区、丹凤县和商南县年度平均畜禽粪便排放量猪粪当量分别为 5.732×10^5 $t\cdot a^{-1}$、9.321×10^5 $t\cdot a^{-1}$ 和 1.274×10^6 $t\cdot a^{-1}$。尽管 3 个区县的养殖结构不同, 但各区县年度间的畜禽养殖结构变化不大(丹凤县 2016 年养殖总量调整较大)。从连续养殖和耕地连续消纳畜禽粪便的角度, 对各区县 3 年畜禽粪便耕地负荷进行简单平均(有效耕地年度变化<1%), 以此代表各区县畜禽粪便耕地负荷的基本情况。由表 6 可知, 商州区、丹凤县和商南县畜禽粪便猪粪当量平均耕地负荷分别为: 27.04 $t\cdot hm^{-2}\cdot a^{-1}$、76.72 $t\cdot hm^{-2}\cdot a^{-1}$ 和 90.10 $t\cdot hm^{-2}\cdot a^{-1}$(3 区县年度间耕地负荷变异系数分别为: 3.3%、23.4%和 6.9%)。可见, 沿着丹江上游到下游的 3 个区县, 其畜禽粪便的耕地负荷越来越大(图 1)。从畜禽种类看, 丹凤县和商南县禽类(蛋鸡+肉鸡)的猪粪当量都占有较大份额(分别为 25.03%和 21.03%), 而各区县的生猪粪便当量又占据绝对优势(商州区 3 年平均占 42.01%、丹凤县占 39.55%、商南县占 49.94%)。如果把生猪、蛋鸡和肉鸡的粪便猪粪当量按年度合并考虑, 其平均值将分别占到各区县畜禽粪便猪粪当量的 59.70%、73.24%和 70.40%, 3 区县猪禽粪便平均比例也占到总畜禽粪便猪粪当量的 68.06%。因此, 对于非主产粮区的商洛市而言, 这种非节粮型的畜禽养殖结构需要尽快给予调整。

从各区县年度耕地负荷来看, 尽管年度间的养殖数量有所变化, 但并没有影响各区县的养殖结构, 各区县的耕地负荷也呈现明显的区域差异性。从整体上看, 商州区耕地负荷占 13.96%的比重, 而丹凤县和商南县分别占有 39.53%和 46.51%的比重。其原因除了是丹凤县和商南县的有效耕地面积较少外, 主要还是两个县养殖总量较大造成的。

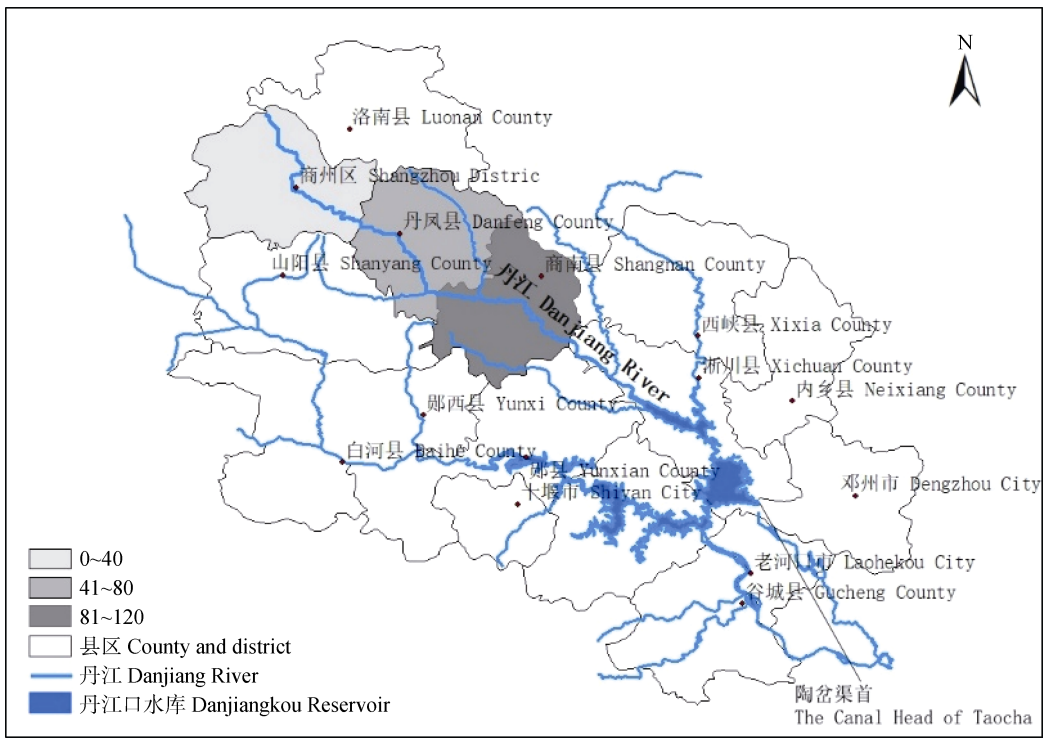

图 1　丹江上游商洛市辖 3 区县位置图及其畜禽粪便猪粪当量负荷分布($t\cdot hm^{-2}\cdot a^{-1}$)

Fig. 1　Locations of three districts of Shangluo City at the upstream of Danjiang River and distribution of load of equivalents of pig-waste for livestock manure ($t\cdot hm^{-2}\cdot a^{-1}$)

2.2　丹江上游商洛市辖 3 县区畜禽粪便污染物耕地负荷分布

基于不同畜禽粪便实际产生的污染物质不同, 利用各区县实际产生的各种畜禽粪便排泄量, 参照表 3 和公式(3)估算出畜禽粪便污染物质数量及其耕地负荷(表 7)。

表 7 显示, 畜禽粪便污染物排放量在丹江上游 3 区县呈依次增加的趋势, 即商州区<丹凤县<商南县, 这与畜禽粪便分布是一致的。由于 3 区县的养殖结构中猪禽的比例较大, 而猪禽粪便的 TN、TP 以及 BOD 和 CODcr 含量又较高(表 3), 造成各区县这些污染物质数量剧增。例如, 商州区 TN 平均耕地负荷为 159 $kg\cdot hm^{-2}\cdot a^{-1}$, 但丹凤县、商南县则分别达 450 $kg\cdot hm^{-2}\cdot a^{-1}$ 和 530 $kg\cdot hm^{-2}\cdot a^{-1}$。同样, 3 区县的 TP 平均耕地负荷分别为 51 $kg\cdot hm^{-2}\cdot a^{-1}$、179 $kg\cdot hm^{-2}\cdot a^{-1}$ 和 199 $kg\cdot hm^{-2}\cdot a^{-1}$, BOD 平均耕地负荷分别为 716 $kg\cdot hm^{-2}\cdot a^{-1}$、2 275 $kg\cdot hm^{-2}\cdot a^{-1}$ 和 2 595 $kg\cdot hm^{-2}\cdot a^{-1}$, CODcr 平均耕地负荷分别为 768 $kg\cdot hm^{-2}\cdot a^{-1}$、2 345

kg·hm^{-2}·a^{-1} 和 2 667 kg·hm^{-2}·a^{-1}, NH_3-N 平均耕地负荷分别为 65 kg·hm^{-2}·a^{-1}、201 kg·hm^{-2}·a^{-1} 和 232 kg·hm^{-2}·a^{-1}。经过比较, 3 区县畜禽粪便氮磷耕地负荷远远超过了陈生婧[19]总结的陕西 2006—2010 畜禽粪便排泄 TN(54.1~103.6 kg·hm^{-2}·a^{-1})和 TP(19.3~55.1 kg·hm^{-2}·a^{-1})负荷量, 也超过了全国平均单位耕地面积的畜禽氮污染负荷(138.13 kg·hm^{-2})[20]。这种畜禽粪便污染物耕地负荷剧增趋势有养殖业总量增加因素, 也受计算方法、排泄系数选择和样品大小等因素影响。尽管商州区和丹凤县年度间养殖数量有一些波动, 但其污染物负荷量仍在较高的水平, 仅商南县 2014—2016 年, TN 和 TP 负荷就分别增加 13.6%和 15.5%。TN、COD 和 NH_3-N 是《丹江水规划》中主要控制目标, 而表 7 显示这些指标是偏高的。过量的氮素和磷素进入土壤, 都会通过雨水等淋洗作用造成水体的富营养化; NH_3-N 排放不仅影响空气质量, 进入水体也会增加富营养化作用; CODcr、BOD 含量越大说明有机污染物质含量越高, 对水质污染的威胁越大[21]。3 区县的养殖总量较大和养殖结构的不合理是造成污染物增加的最主要原因。

表 7 2014—2016 年商洛市辖 3 区县畜禽粪便污染物排放量分布及其耕地负荷

Table 7 Distribution of livestock manure pollutants emissions and cultivated land load in three districts of Shangluo City from 2014 to 2016

	污染物 Pollutant	商州区 Shangzhou (2014/2015/2016)	丹凤县 Danfeng (2014/2015/2016)	商南县 Shangnan (2014/2015/2016)
排放量 Emission (10^4 kg·a^{-1})	总氮(TN) Total nitrogen	355.48/328.69/329.12	587.83/653.11/401.97	689.24/776.68/780.73
	总磷(TP) Total phosphorus	110.26/104.53/106.28	237.23/260.45/156.28	255.91/291.71/294.94
	生化需氧量(BOD) Biochemical oxygen demand	1 582.40/1 482.42/1 492.45	2 939.77/3 213.91/2 170.51	3 352.06/3 798.67/3 855.95
	化学需氧量(CODcr) Chemical oxygen demand	1 698.02/1 589.64/1 593.94	2 981.74/3 664.43/1 917.80	3 449.39/3 922.82/3 942.02
	NH_3-N	143.50/126.94/139.97	266.09/293.67/176.41	299.76/340.97/343.14
平均耕地负荷 Average cultivated land load (kg·hm^{-2}·a^{-1})	总氮(TN) Total nitrogen	159	450	530
	总磷(TP) Total phosphorus	51	179	199
	生化需氧量(BOD) Biochemical oxygen demand	716	2 275	2 595
	化学需氧量(CODcr) Chemical oxygen demand	768	2 345	2 667
	NH_3-N	65	201	232

2.3 丹江上游商洛市辖 3 区县畜禽粪便污染风险

对于畜禽粪便的污染风险评估, 首先是要确定区域耕地的最大适宜畜禽粪便施用量, 其次是明确畜禽粪便耕地负荷的风险等级划分。目前, 因为各地土壤条件、种植种类和方法的差异较大, 我国尚没有耕地面积畜禽粪便施用量统一规定, 也没有畜禽粪便中 TN、TP 养分施用量的国家标准。兰勇等[22]利用养分平衡原理, 确定了湖南单位耕地畜禽粪便猪粪当量的环境适宜负荷量为 21 515 kg·hm^{-2}·a^{-1}, 但这是在设定每年一定氮肥(化肥)施用量情况下估算的, 没能反映最大畜禽粪便施用量。国家生态环境部[10]推荐的适宜畜禽粪便施用量是 35~45 t·hm^{-2}·a^{-1}, 但时间背景过早。欧盟[23]规定粪肥年施用氮标准限量为 170 kg·hm^{-2}·a^{-1}, 如果折合猪粪当量应不超过 28.91 t·hm^{-2}·a^{-1}(按表 5 中猪粪当量的含氮量折算: 170/0.588%), 但欧盟的土壤较为肥沃, 与我国各地普遍缺少氮肥实际有较大差距。侯彦林等[24]综合全国不同地域农田氮的面源污染研究, 指出我国大田作物无污染的施氮量标准为 150~225 kg·hm^{-2}·season^{-1}(其平均数为 180 kg·hm^{-2}·season^{-1}, 在此范围的施氮量不会引起氮素的明显淋失)。陕西被区划为中南部地区, 认为当施肥量超过“平均适宜施氮量”后, 污染很容易发生(陕西省 1997 年平均施氮量达 182 kg·hm^{-2}·season^{-1}, 到 2002 年已经达 213 kg·hm^{-2}·season^{-1})。如果按照这个氮素施用范围分析, 商洛市一般是一年两季种植, 对应年度施氮量标准应为 300~450 kg·hm^{-2}·a^{-1}。那么, 假设商洛市辖 3 区县的畜禽粪便全部施用于当地农田, 只有商州区的氮量负荷较为安全(159 kg·hm^{-2}·a^{-1}); 丹凤县已达到上限(负荷为 450 kg·hm^{-2}·a^{-1}), 而商南县则明显地超过了安全负荷上限(负荷为 530 kg·hm^{-2}·a^{-1})。还需要说明的是, 商洛市处于秦岭山区, 常年降雨量平均为 710~930 mm, 山坡地较多, 肥瘠不等, 土壤中的氮素淋失更为容易(特别是硝酸盐的淋失), 加之较为平坦的川道耕地又多以河水灌溉为主, 进一步增加了氮素淋失的外部动力[25]。再考虑到畜禽粪便有机质更容易淋溶流失等因素, 商洛市大田作物无污染氮素上限应以 360 kg·hm^{-2}·a^{-1} 为宜, 并以此指标作为畜禽粪便氮量施用的限量标准。

依据上述分析, 用单位猪粪当量的总氮含量(表5), 即可估算商洛地区畜禽粪便猪粪当量的最大适宜耕地负荷, 估算结果为 61.22 $t\cdot hm^{-2}\cdot a^{-1}$。当然, 该耕地负荷标准是以土壤氮素最大承载力为标准估算的, 具有显著代表性, 但也只是一维参数分析, 理论上应当建立土壤和畜禽粪便有效成分等多维参数模型, 甚至还应考虑畜禽粪便不同处理后成分变化特点[26]。此方面有待进一步研究。按照表 4 划定的畜禽粪便耕地负荷警报值分级, 丹江上游商洛市辖 3 区县的畜禽粪便耕地负荷警报值(r)分别是: 商州区为 0.44(Ⅱ级), 有一定环境污染威胁; 丹凤县为 1.24(Ⅳ级), 环境污染威胁较为严重; 商南县为 1.47(Ⅳ级), 环境污染威胁更为严重。据调查, 商洛市 2014 年化肥施用量为 355.5 $kg\cdot hm^{-2}$, 有机肥施用面积只占总需要面积的 19.8%[8]。如果不加大畜禽粪便的综合治理, 扩大有机肥的施用量(实际增加土壤有机质), 减少化肥施用量, 大量畜禽粪便将有可能对丹江河流水质安全造成较大的威胁。

3　结论与建议

3.1　结论

商洛市畜禽养殖业在陕西省畜牧业产业布局中占有特殊的地位。商州区、丹凤县和商南县养殖量较大,其畜禽粪便排放量猪粪当量年度平均分布为 5.732×10^5 $t\cdot a^{-1}$、9.321×10^5 $t\cdot a^{-1}$ 和 1.274×10^6 $t\cdot a^{-1}$。3 区县猪禽粪便当量平均比例占到总畜禽粪便当量的 68.06%, 养殖结构不够合理。

虽然 3 区县畜禽养殖结构不尽相同, 但各区县年度间结构变化不大, 因为各区县耕地面积相对稳定, 商州区、丹凤县和商南县平均畜禽粪便猪粪当量耕地负荷分别为 27.04 $t\cdot hm^{-2}\cdot a^{-1}$、76.72 $t\cdot hm^{-2}\cdot a^{-1}$ 和 90.10 $t\cdot hm^{-2}\cdot a^{-1}$。由于不同畜禽粪便污染物质含量不同, 而生猪和禽类养殖比例较大, 所以造成了 3 区县畜禽粪便排泄物中 TN、TP、BOD、CODcr、NH_3-N 等总数量都偏大。

商洛市大田作物无污染氮素施用上限设定为 360 $kg\cdot hm^{-2}\cdot a^{-1}$, 依此确定商洛市畜禽粪便猪粪当量耕地负荷标准为 61.22 $kg\cdot hm^{-2}\cdot a^{-1}$。商州区畜禽粪便耕地负荷是相对安全(Ⅱ级)的, 丹凤县和商南县都处于较高危险水平(Ⅳ级), 污染风险是明显的。该结果印证了《丹江水规划》中提出的在丹江商南县界做到“总氮控制、风险防范、水土流失治理”的目标和要求。

本研究结果主要源于当地养殖大数据及其评估方法。在没有区分具体养殖方式以及粪便是否进行了适当处理的背景下, 粗略估算的数据主要是为了分析畜禽养殖业对丹江上游水质潜在影响。但从当地养殖业发展的趋势看, 畜禽粪便的污染负荷估算结果基本说明了商洛市丹江上游流域养殖业问题的严重性。这种较高的畜禽粪便耕地负荷存在, 势必对丹江上游水质安全构成较大的潜在威胁。

3.2　建议

商洛市耕地不足区域面积的 1/10, 如此少的耕地是难于消纳养殖业所造成的庞大粪便污染的。特别是在优质耕地日益减少, 山坡地又无种植积极性, 以及退耕还林、禁止放牧等政策影响下, 应寻求综合性措施, 以防范和减少畜禽养殖所带来的丹江上游水源地的污染风险。为此, 笔者建议:

第一, 调整养殖规模和结构, 减少畜禽粪便的产生量。研究表明, 商洛市辖 3 区县的畜禽养殖规模较大、结构不合理, 是造成畜禽粪便耕地负荷较大的根本原因。所以, 首先要减少养殖的总规模, 特别是要减少丹凤县和商南县的养殖总量。积极落实农业农村部 2015 年 11 月 27 日颁布的《关于促进南方水网地区生猪养殖布局调整优化的指导意见》(下简称《指导意见》)[27]。商洛市虽不是南方水网地区, 但却属于《指导意见》划定的丹江口水库库区的上游, 在有效耕地少、地形条件复杂的商洛山区并不适合大型或特大型养猪场, 应以年出栏 500~1 000 头生猪的中小型猪场为好。其次是调整和完善《畜牧发展规划》, 减少生猪和家禽数量, 适当增加节粮型草食家畜的数量。以便促进当地草山草坡、作物秸秆的资源利用, 同时减少畜禽粪便的排泄总量。

第二, 积极推进畜禽粪便资源化利用, 变废为宝。加快实施《国务院办公厅关于加快推进畜禽养殖废弃物资源化利用的意见》(下简称《意见》)[28], 该《意见》是对目前养殖业带来的畜禽粪便污染进行资源化利用的纲领性文件。商洛市辖 3 区县的畜禽养殖粪便负荷较大, 种养矛盾突出, 必须加大畜禽粪污的综合处理, 大力发展畜禽粪便有机肥生产, 促使大量粪肥施入农田。同时, 要积极推行畜禽粪便干湿分离和沼气技术。这样, 既可以减少粪便污染物质的直接排放, 又可以增加养殖综合效益。

第三, 大力推行畜牧业清洁生产技术和生态养殖理念。畜牧业清洁生产是基于养殖业各个环节的资源节约、减少污染物排放、降低对环境和人类的危害等技术原理, 应当积极推行。另外, 在丹江水源地上游发展畜牧养殖业, 还应推广生态养殖理念, 养殖场应当远离丹江及有关支流水域, 杜绝粪便及污染物的直接排放, 树立环境友好型生产意识。要

以清洁生产为基础，探讨养殖业—种植业—能源(沼气)利用—环境综合治理的区域发展机制，从养殖业细节和源头上做好南水北调的水质安全保障工作。

参考文献 References

[1] 张乐群，吴敏，万育生. 南水北调中线水源地丹江口水库水质安全保障对策研究[J]. 中国水利, 2018, (1): 44–47
ZHANG L Q, WU M, WAN Y S. Study on countermeasures for water quality security of the Danjiangkou Reservoir[J]. China Water Resources, 2018, (1): 44–47

[2] 姜世英，韩鹏，贾振邦，等. 南水北调中线丹江口库区农业面源污染 PSR 评价与基于 GIS 的空间特征分析[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(11): 2153–2162
JIANG S Y, HAN P, JIA Z B, et al. Evaluation with PSR model and GIS analysis of agricultural non-point source pollution in Danjiangkou Reservoir of the mid-route of the South-to-North Water transfer project[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2010, 29(11): 2153–2162

[3] 王蕾，关建玲，丁强，等. 南水北调中线陕西水源区污染源变化特征[J]. 干旱区资源与环境, 2015, 29(10): 80–85
WANG L, GUAN J L, DING Q, et al. The variation characteristics of water pollution sources for water source area of the middle route of South-to-North Water diversion project in Shaanxi[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2015, 29(10): 80–85

[4] 王忙生，张双奇，杨亚丽，等. 浅析商洛山区发展节粮型畜牧业存在的困惑和解决的途径[J]. 陕西农业科学, 2013, (3): 113–116
WANG M S, ZHANG S Q, YANG Y L, et al. A brief analysis of the perplexity and the solution to the development of grain-saving type livestock husbandry in Shangluo District[J]. Shaanxi Journal of Agricultural Sciences, 2013, (3): 113–116

[5] 李象鼎，赵仓安. 商洛市生态畜牧业发展思路[J]. 中国畜牧业, 2017, (15): 73–75
LI X D, ZHAO C A. Developing thinking of ecological animal husbandry in Shangluo City[J]. China Animal Industry, 2017, (15): 73–75

[6] 陕西省畜牧兽医局办公室. 陕西省“十三五”畜牧业发展规划[R/OL]. (2016-08-10)[2018-06-08]. http://www.shanmuxie. com/index.php?m=content&c=index&a=show&catid=214&id=3797
Animal Husbandry and Veterinary Bureau of Shaanxi Province. Development plan of animal husbandry in Shaanxi Province during the 13th Five-Year Plan[R/OL]. (2016-08-10)[2018-06-08]. http://www.shanmuxie.com/index.php?m=content&c=index&a=show&catid=214&id=3797

[7] 张晓虎. 商洛市中药材种植土壤肥料信息系统功能[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2009
ZHANG X H. Function of soil and fertilizer information system of Chinese traditional medicine for Shangluo City[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2009

[8] 瞿晓苍，李存玲，李拴曹，等. 商洛市化肥减量施用探析[J]. 中国农技推广, 2016, 32(2): 51–54
QU X C, LI C L, LI S C, et al. Analysis of descending use of chemical fertilizer in Shangluo City[J]. China Agricultural Technology Extension, 2016, 32(2): 51–54

[9] 国家发展改革委. 关于印发丹江口库区及上游水污染防治和水土保持“十三五”规划的通知[A/OL]. (2018-01-05) [2018-05-06]. http://www.gov.cn/xinwen/2018-01/05/content_ 5253642.htm
National Development and Reform Commission. “13th Five-Year Plan” for water pollution prevention and soil & water conservation in the reservoir area and the upstreams[A/OL]. (2018-01-05)[2018-05-06]. http://www.gov.cn/xinwen/2018-01/05/content_5253642.htm

[10] 国家环境保护总局自然生态保护司. 全国规模化畜禽养殖业污染情况调查及防治对策[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2002
State Environmental Protection Administration of Nature and Ecology Conservation. National-Scale Livestock and Poultry Pollution Investigation and Prevention Measures [M]. Beijing: China Environmental Press, 2002

[11] 刘培芳，陈振楼，许世远，等. 长江三角洲城郊畜禽粪便的污染负荷及其防治对策[J]. 长江流域资源与环境, 2002, 11(5): 456–460
LIU P F, CHEN Z L, XU S Y, et al. Waste loading and treatment strategies on the excreta of domestic animals in the Yangtze Delta[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2002, 11(5): 456–460

[12] 程波. 畜禽养殖业规划环境影响评价方法与实践[M]. 北京: 中国农业出版社, 2012: 37–38
CHENG B. Evaluating Methods and Practices for Environmental Influence from Planning of Livestock and Poultry Industry[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2012: 37–38

[13] 景栋林，陈希萍，于辉，等. 佛山市畜禽粪便排放量与农田负荷量分析[J]. 生态与农村环境学报, 2012, 28(1): 108–111
JING D L, CHEN X P, YU H, et al. Analysis on the total amount of domestic animal excrement and the load in farmland in Foshan[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2012, 28(1): 108–111

[14] 冯光德. 构建高效养猪模式[J]. 中国猪业, 2015, (7): 22–25
FENG G D. Constructing efficient pig raising model[J]. China Swine Industry, 2015, (7): 22–25

[15] 董红敏，朱志平，黄宏坤，等. 畜禽养殖业产污系数和排污系数计算方法[J]. 农业工程学报, 2011, 27(1): 303–308
DONG H M, ZHU Z P, HUANG H K, et al. Pollutant generation coefficient and discharge coefficient in animal production[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(1): 303–308

[16] 庄犁，周慧平，张龙江. 我国畜禽养殖业产排污系数研究进展[J]. 生态与农村环境学报, 2015, 31(5): 633–639
ZHUANG L, ZHOU H P, ZHANG L J. Advancement in research on pollutants producing and discharging coefficients of livestock and poultry breeding industry in China[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2015, 31(5): 633–639

[17] 白明刚. 河北畜禽养殖污染评价及对策研究[D]. 保定: 河北农业大学, 2010
BAI M G. Research on the Evaluation and countermeasures of the pollution from livestock and poultry breeding in Hebei[D].

Baoding: Agricultural University of Hebei, 2010

[18] 周媛媛, 殷捷, 杨志敏, 等. 重庆市畜禽粪污的区域分布及其水环境响应特征分析[J]. 中国生态农业学报, 2016, 24(6): 811–818
ZHOU Y Y, YIN J, YANG Z M, et al. Regional distribution of livestock manure and response characteristics of water environment in Chongqing[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2016, 24(6): 811–818

[19] 陈生婧. 陕西省畜禽粪便污染及氮磷负荷时空分布特征研究[D]. 西安: 长安大学, 2013
CHEN S J. Temporal and spatial distribution of livestock and poultry manure pollution and potential nitrogen and phosphorus load in Shaanxi Province[D]. Xi'an: Chang'an University, 2013

[20] 杨飞, 杨世琦, 诸云强, 等. 中国近 30 年畜禽养殖量及其耕地氮污染负荷分析[J]. 农业工程学报, 2013, 29(5): 1–11
YANG F, YANG S Q, ZHU Y Q, et al. Analysis on livestock and poultry production and nitrogen pollution load of cultivated land during last 30 years in China[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(5): 1–11

[21] 易秀, 叶凌枫, 刘意竹, 等. 陕西省畜禽粪便负荷量估算及环境承受程度风险评价[J]. 干旱地区农业研究, 2015, 33(3): 205–210
YI X, YE L F, LIU Y Z, et al. Estimations of livestock manure load and risk assessment of environmental tolerance in Shaanxi Province[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2015, 33(3): 205–210

[22] 兰勇, 刘舜佳, 向平安. 畜禽养殖家庭农场粪便污染负荷研究——以湖南省县域样本为例[J]. 经济地理, 2015, 35(10): 187–193
LAN Y, LIU S J, XIANG P A. Quantifying the pollution loading from livestock and poultry of family farm — Based on the sample of counties in Hunan Province[J]. Economic Geography, 2015, 35(10): 187–193

[23] 陶秀萍, 董红敏. 畜禽废弃物无害化处理与资源化利用技术研究进展[J]. 中国农业科技导报, 2017, 19(1): 37–42
TAO X P, DONG H M. Research progress on animal waste treatment and recycling technology[J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2017, 19(1): 37–42

[24] 侯彦林, 周永娟, 李红英, 等. 中国农田氮面源污染研究: Ⅰ 污染类型区划和分省污染现状分析[J]. 农业环境科学学报, 2008, 27(4): 1271–1276
HOU Y L, ZHOU Y J, LI H Y, et al. Nitrogen non-point field pollution in China: Ⅰ regionalization of pollution types and pollution analysis in different provinces[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2008, 27(4): 1271–1276

[25] 侯彦林, 李红英, 周永娟, 等. 中国农田氮面源污染研究: Ⅱ 污染评价指标体系的初步制定[J]. 农业环境科学学报, 2008, 27(4): 1277–1282
HOU Y L, LI H Y, ZHOU Y J, et al. Nitrogen non-point field pollution in China: Ⅱ establishment of index system for evaluation of pollution degree[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2008, 27(4): 1277–1282

[26] 盛婧, 周炜, 王子臣, 等. 畜禽养殖粪污工程化处理对污水理化性状的影响[J]. 中国生态农业学报, 2018, 26(6): 877–883
SHENG J, ZHOU W, WANG Z C, et al. Effect of engineering treatment on the physical and chemical properties of livestock slurry[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2018, 26(6): 877–883

[27] 农业部. 农业部关于促进南方水网地区生猪养殖布局调整优化的指导意见[EB/OL]. (2015–11-27)[2018-02-12]. http://www.moa.gov.cn/govpublic/XMYS/201511/t20151127_4917216.htm
Ministry of Agriculture. Instruction of promoting the distribution of adjustment and optimizing of pig breeding in southern water network region[EB/OL]. (2015-11-27)[2018-02-12]. http://www.moa.gov.cn/govpublic/XMYS/201511/t20151127_4917216.htm

[28] 国务院. 国务院办公厅关于加快推进畜禽养殖废弃物资源化利用的意见[EB/OL]. (2017-06-12)[2018-05-13]. http://www.gov.cn/ zhengce/content/2017-06/12/content_5201790.htm
State Council. Instruction by general office of the state council on accelerating the recycling of livestock and poultry breeding [EB/OL]. (2017-06-12)[2018-05-13]. http://www.gov.cn/ zhengce/content/2017-06/12/content_5201790.htm