

陕西省养殖业畜禽粪便氮磷耕地负荷的时空分布

易秀^{1,2}, 陈生婧¹, 田浩¹

(1. 长安大学 环境科学与工程学院, 陕西 西安 710054; 2. 旱区地下水文与生态效应教育部重点实验室, 陕西 西安 710054)

摘要: [目的] 探明畜禽粪便资源对耕地土壤和环境造成的潜在污染风险, 为评价和防治畜禽养殖业造成的面源污染提供科学依据。[方法] 以陕西省为研究区, 通过计算陕西省畜禽粪便中氮磷耕地负荷, 分析了其时空变化特征。[结果] (1) 陕西省各市区畜禽粪便氮磷耕地负荷从 2006—2007 年达到最大, 到 2008 年急剧下降为最低, 之后逐年增加。2008—2010 年, 氮负荷平均值增加了 73.0%, 磷负荷增加了 59.4%; 2008—2010 年, 延安、渭南两市畜禽粪便氮磷耕地负荷虽然居于全省最后, 但增长率最快。(2) 对比 2008 年和 2010 年的畜禽粪便氮磷耕地负荷空间分布变化, 汉中市氮磷耕地负荷最大, 延安市和渭南市最小。2010 年各市畜禽粪便氮磷负荷平均值依次为: 汉中 > 安康 > 榆林 > 宝鸡 > 咸阳 > 商洛 > 铜川 > 西安 > 延安 > 渭南; 磷耕地负荷平均值依次为: 汉中 > 商洛 > 宝鸡 > 榆林 > 咸阳 > 西安 > 安康 > 铜川 > 延安 > 渭南。[结论] 针对陕西省畜禽粪便氮磷耕地负荷的时间、空间分布变化, 应加大汉中、安康、商洛、宝鸡、榆林等区域畜禽粪便的处理力度, 降低畜禽粪便造成水土资源污染的风险。

关键词: 畜禽粪便; 氮磷耕地负荷; 时空变化; 氮磷污染风险

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2016)03-0235-06

中图分类号: X501

文献参数: 易秀, 陈生婧, 田浩. 陕西省养殖业畜禽粪便氮磷耕地负荷的时空分布[J]. 水土保持通报, 2016, 36(3): 235-240. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2016.03.040

Temporal and Spatial Distribution of Nitrogen and Phosphorus Cropland Load of Livestock Manure in Breeding Industry of Shaanxi Province

YI Xiu^{1,2}, CHEN Shengjing¹, TIAN Hao¹

(1. College of Environmental Science and Engineering, Chang'an University, Xi'an, Shaanxi 710054, China;
2. Key Laboratory of Subsurface Hydrology and Ecology in Arid Areas, Ministry of Education, Xi'an, Shaanxi 710054, China)

Abstract: [Objective] Investigating the potential pollution risks of livestock manure to soil and other environment in order to provide a scientific basis for prevention and control non-point source pollution caused by breeding industry. [Methods] Taking Shaanxi Province as an example, nitrogen and phosphorus cropland load of livestock manure were calculated and the spatial and temporal distribution features were analyzed. [Results] (1) Nitrogen and phosphorus cropland load of livestock manure in Shaanxi Province reached to the maximum in the period from 2006 to 2007, while decreased dramatically to the minimum in 2008, and then increased gradually. From 2008 to 2010, the average value of nitrogen and phosphorus cropland load increased by 73.0% and 59.4%, respectively. Although nitrogen and phosphorus cropland load of livestock manure in Yan'an and Weinan City was the lowest among all the cities, the growth rate was the fastest. (2) According to the spatial distribution of nitrogen and phosphorus cropland load between 2008 and 2010, nitrogen and phosphorus cropland load was the maximum in Hanzhong City, while it was the minimum in Yan'an and Weinan City. In 2010, the average value of nitrogen cropland load showed as: Hanzhong > Ankang > Yulin > Baoji > Xianyang > Shangluo > Tongchuan > Xi'an > Yan'an > Weinan, and the average value of phosphorus cropland load showed as: Hanzhong > Shangluo > Baoji > Yulin > Xianyang > Xi'an > Ankang > Tongchuan > Yan'an > Weinan. [Conclusion] Based on a comprehensive analysis in Shaanxi

收稿日期: 2015-07-14

修回日期: 2015-08-13

资助项目: 国家自然科学基金项目“耦合于生态单元的秦巴山区乡村聚落结构形态研究 111 学科创新引智项目”(51378067); 高等学校学科创新引智计划资助项目(B08039)

第一作者: 易秀(1965—), 女(汉族), 青海省西宁市人, 博士, 教授, 主要从事水土资源环境污染防治的教学与科研工作。E-mail: yixiu@chd.edu.cn.

Province, it suggests that livestock manures should be disposed intensively in Hanzhong, Ankang, Shangluo, Baoji and Yulin City, so that the pollution risks of soil and water resource can be decreased.

Keywords: livestock manure; nitrogen and phosphorus load of cropland; temporal and spatial distribution; pollution risk of nitrogen and phosphorus

畜禽养殖业的迅猛发展,促进了农村经济繁荣,丰富了城乡居民的“菜篮子”。畜禽养殖在提供大量肉食产品的同时,也为农作物生产提供了大量有机肥。但由于大部分养殖场未能对畜禽粪便进行有效的处理和利用,因此畜禽养殖产生的污染已经成为中国农村地区的主要污染源^[1-7]。畜禽粪便排放量、农地畜禽粪便承载量、畜禽粪便对环境的污染以及畜禽粪便管理等问题越来越引起国内外学者的重视^[8-14]。

目前在畜禽养殖排放物中,氮、磷元素的排放和流失严重影响土壤资源污染的程度,并通过径流、淋溶等作用危及地表水和地下水,从而进一步造成水资源的短缺^[15-17]。1978—2011年,中国畜禽粪便的产生量和化学需氧量 COD(chemical oxygen demand)含量分别增加了 1.35 和 0.91 倍,至 2011 年分别达 25.45 和 2.33×10^8 t,畜禽粪便氮、磷产生量也均呈上升趋势,分别增加了 1.39 和 1.66 倍^[16]。2010 年畜禽养殖业的化学需氧量、氨氮排放量占全国排放总量的比例分别为 45% 和 25%,分别为当年工业源排放量的 3.23 和 2.30 倍^[18]。

这一问题在欧美等发达国家已引起了高度重视,并制定了相应的法律法规对畜禽污染进行控制。如欧盟的硝酸盐法规中明确规定了粪尿肥氮投入量不能超过 170 kg/hm^2 的限制^[19]。中国还没有全国性的单位面积耕地土壤畜禽粪便氮、磷养分限量标准。为了探明畜禽粪便对耕地土壤的污染风险,本文拟以陕西省为研究区,通过计算陕西省畜禽粪便单位面积氮、磷耕地负荷,分析其时空变化特征,阐明陕西省畜禽粪便资源对环境的潜在污染,从而为评价和防治陕西省畜禽养殖业造成的面源污染提供科学依据。

1 研究区概况

陕西省位于中国西北地区东部的黄河中游,东经 $105^{\circ}29'$ — $110^{\circ}15'$,北纬 $31^{\circ}42'$ — $39^{\circ}35'$ 之间,60% 的面积属于黄河流域,土地总面积 $2.06 \times 10^5 \text{ km}^2$,占全国土地总面积的 2.145%。陕西境内山塬起伏,河川纵横,地形复杂。以北山和秦岭为界,全省可分为陕北高原、关中平原和秦巴山地 3 大地貌区。

陕西省畜牧业发展迅速,初步形成了陕南生猪产业带、关中奶畜产业带、陕北肉羊产业带。2009 年,陕西省启动的百万头生猪大县工程是推动生猪产业规模化、标准化发展的一个重要举措。2010 年陕西

省投资 1.2 亿元新建的奶牛中心以及很多企业投资新建的大型生猪养殖、肉牛养殖场成为行业龙头,这些养殖场已成为陕西省畜牧养殖规模化、集约化、标准化的标志。目前陕西生猪和奶牛的规模化养殖率已达 62% 和 50%。

2 陕西省畜禽粪便氮磷耕地负荷计算

本文以陕西省现有 10 个市所辖地区的猪、牛、羊、家禽、兔为研究对象,以各市为单元,估算 2006—2010 年猪、牛、羊、家禽、兔的粪便排放量、猪粪当量负荷及其有机污染物含量^[20]。

2.1 数据来源

陕西省各市的耕地面积数据来自陕西省统计年鉴;各市畜禽养殖基础数据来自各市的统计年鉴和农业部门的统计数据。收集的数据包括生猪、牛(区分肉牛和奶牛)、羊、家禽和兔的年末存栏数、当年出栏数 2 部分。

2.2 畜禽粪便中氮磷含量计算

畜禽粪便中氮磷含量^[20-21]的计算公式如下:

$$M=Q \times c \quad (1)$$

式中: M ——畜禽粪便中氮或磷含量(kg); Q ——各类畜禽粪便排放量(t); c ——各类畜禽粪便中氮或磷含量(kg/t)。

2.3 畜禽粪便氮磷耕地负荷计算

目前,中国畜禽粪便处理主要是作为肥料直接还田,国外许多发达国家也将农田作为畜禽粪便的负载场所^[22]。所以,计算农田畜禽粪便氮磷负荷时以有效农田耕地面积为实际负载面积。

畜禽粪便中氮磷耕地负荷计算公式如下:

$$q=M/S \quad (2)$$

式中: q ——畜禽粪便中氮或磷负荷量(kg/hm²); M ——畜禽粪便中氮或磷含量(kg); S ——陕西省各市区计算年份有效耕地面积(hm²)。

3 结果分析

3.1 畜禽粪便氮磷耕地负荷空间变化分级方法

农业耕地是畜禽氮磷消纳的主要场地,深入分析单位耕地面积的氮磷污染负荷更能客观反映畜禽养殖的污染风险^[23]。畜禽粪便氮磷年施用量与土壤质地、肥力、元素自身的性质、气候等自然条件有关。本

研究中畜禽粪便氮磷耕地负荷空间分布用等分法将其分为5级,此方法被称作自然分裂法^[24]。采取这种等分法,主要考虑目前全国没有统一的农耕地畜禽粪便氮磷施入量限制标准,陕西省的畜牧业发展水平和养殖业污染情况与其他地区不一样,各有特点。若按全国其他省份标准划分,可能得出陕西省不存在污染或污染很严重的结论,同时也不容易看出陕西省2006—2010年的污染变化程度。

3.2 陕西省畜禽粪便氮素耕地负荷的时空变化

3.2.1 陕西省畜禽粪便氮素耕地负荷的时间变化

陕西省畜禽养殖以家禽、猪、羊、牛、兔为主,根据畜禽粪便日排泄量、饲养期,按粪便排放量,得出陕西省各类畜禽粪便产生量(表1)^[20]。

表1 陕西省各类畜禽粪便产生量 10^4 t

污染物	畜禽名称	年份				
		2006	2007	2008	2009	2010
粪	猪	564.9	617.1	463.3	566.7	648.2
	牛	2 490.2	2 329.9	890.6	1 753.7	1 956.4
	羊	949.5	1 001.0	718.0	894.0	987.6
	家禽	138.2	148.7	118.9	134.3	149.6
	兔	2.5	3.1	3.3	3.0	3.8
尿	猪	932.1	1 018.2	764.4	935.1	1 069.5
	牛	1 245.1	1 165.0	445.3	876.8	978.2

从表1可以看出,陕西省各类畜禽粪便产生量在2008年中处于低谷,之后呈现快速增长的趋势。畜禽粪便产生量多少主要是由饲养量的多少来衡量的。兔的粪便产生量变化不大,猪、牛、羊、家禽变化较大。2010年猪、牛、羊、家禽、兔粪便产生量总量为 5.79×10^7 t,各类畜禽较2008年分别增长39.9%,119.7%,37.5%,25.8%,13.2%,与其他学者研究结果基本一致^[4];各类畜禽中猪、牛的年粪尿产生量最大,占全部年粪尿总量的75%以上。按年粪便产生量多少排序,依次为:牛>羊>猪>家禽>兔。

畜禽粪便氮耕地负荷的大小与畜禽粪便产生量、粪便种类和计算年份的有效耕地面积有关。2006—2010年全省在有效耕地面积基本保持稳定的情况下,陕西省畜禽粪便氮耕地负荷的大小主要与当年畜禽粪便量有关。从陕西省畜禽粪便氮耕地负荷年际变化(图1)可以看出,各市区畜禽粪便氮耕地负荷从2006—2007年达到最大,2007年平均值为 116.8 kg/hm^2 ,到2008年急剧下降为最低,平均值 57.8 kg/hm^2 ,主要原因是畜禽养殖数量下降,之后又逐年增加,虽未及2007年水平,但2008—2010年,全省畜禽粪便氮负荷平均值由 57.8 kg/hm^2 增至

100.0 kg/hm^2 ,增加了73.0%;2006—2010年,各市区畜禽粪便氮耕地负荷的变异系数在17.9%~47.2%,铜川市最大,安康市最小。其中铜川市畜禽粪便氮耕地负荷由 150.0 kg/hm^2 增加至 167.0 kg/hm^2 ,到2010年又降至 87.0 kg/hm^2 ;2008—2010年,延安、渭南两市畜禽粪便氮耕地负荷增长幅度最大。2010年,两市的畜禽粪便氮耕地负荷分别为72.4,53.3 kg/hm^2 ,各自分别是2008年的1.91和1.17倍;2009年陕西省各市区氮耕地负荷在49.5~135.4 kg/hm^2 之间,平均值为 90.6 kg/hm^2 ,与其他学者的统计结果基本一致,而2009年全国的平均单位耕地面积氮污染负荷已达到 138.36 kg/hm^2 ^[23]。

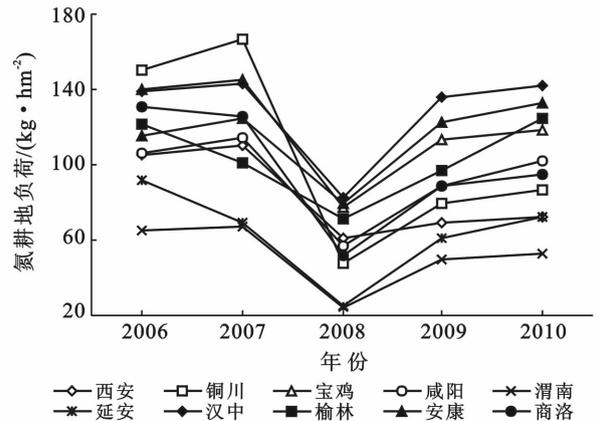


图1 陕西省各市区畜禽粪便氮耕地负荷年变化

中国目前还没有全国性的单位面积耕地土壤畜禽粪便氮、磷养分限量标准,根据欧盟制订的农田有机肥氮的限制标准(170 kg/hm^2)^[19],2006—2010年陕西省各市区畜禽粪便氮负荷都未超出这一限值,但整体都有增加趋势,考虑到各市的畜禽粪便直接还田施用,可以认为畜禽粪便氮素已对全省的耕地产生了环境影响。

3.2.2 陕西省畜禽养殖粪便氮耕地负荷的空间变化

通过对比陕西省畜禽养殖粪便氮耕地负荷的空间变化(图2)可以发现,全省氮耕地负荷平均值2010年比2008年整体有所增加,增幅73.0%。各地区的空间分布格局为,2008年,汉中市区的畜禽粪便氮耕地负荷最大,延安市和渭南市最小。主要原因是汉中市城市建设及经济发展速度很快,并辐射至周边地区,使农用地面积大幅度减少,消纳畜禽养殖废弃物的负载场相对减少,导致汉中市畜禽粪便氮素负荷量的增加,同时带动邻近安康等市区的经济发展,氮耕地负荷也有提高;延安市由于经济发展水平等原因,限制了畜禽养殖业的发展,导致该市畜禽粪便氮素负荷量增加缓慢;渭南市以饲养奶牛为主,牛的排泄物中氮素含量较低,因此,渭南市氮素的耕地负荷较低。从

2010年的畜禽粪便氮耕地负荷空间分布图可以看出,汉中市畜禽粪便氮耕地负荷仍然保持最大,达到 142.0 kg/hm^2 ,毗邻的安康市和陕北的榆林市氮耕地负荷也较大,与汉中市处于同一等级范围;除西安、铜川、渭南、延安、商洛5市外,其他各市均超过了陕西省畜禽粪便氮耕地负荷平均值(94.0 kg/hm^2),各市氮耕地负荷由大到小依次为:汉中>安康>榆林>宝鸡>咸阳>商洛>铜川>西安>延安>渭南。

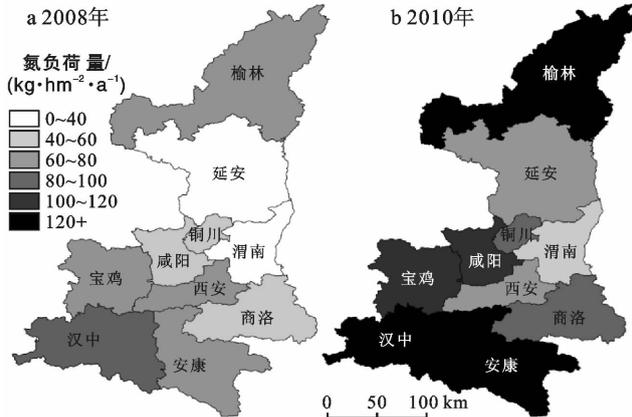


图2 2008年和2010年陕西省畜禽粪便氮耕地负荷空间分布对比

3.3 陕西省畜禽养殖粪便磷耕地负荷时空变化

畜禽粪便中磷素的流失途径主要包括粪肥还田、露天堆放和贮存中被雨水冲刷淋失、饲养圈舍清洗过程中的冲洗水等。由于畜禽养殖的发展模式造成养殖专业户集中于某些区域,畜禽养殖粪便与农田的距离不断拉大,再加上城镇化发展建设用地,使得可有效消纳畜禽废弃物的农田面积不断减少,大部分畜禽粪便集中在养殖场附近有限的农田,导致土壤中大量磷素累积。

3.3.1 陕西省畜禽养殖粪便磷耕地负荷时间变化

从2006—2010年陕西省畜禽粪便磷耕地负荷时间变化趋势图可以看出,与氮耕地负荷变化基本一致(图3),全省畜禽粪便磷耕地负荷平均值2008年最低,为 27.1 kg/hm^2 ,2007年最高,为 49.4 kg/hm^2 ;2006—2010年,各市区畜禽粪便磷耕地负荷年际变化变异系数在 $14.7\% \sim 40.5\%$ 之间,铜川变化最大,2007—2008年磷耕地负荷由 55.1 kg/hm^2 降到 19.3 kg/hm^2 ,下降了 65.0% ,2010年与2008年相比又增长了 76.7% ;2008—2010年,延安、渭南两市畜禽粪便磷耕地负荷呈快速增长的态势。2010年,两市的畜禽粪便磷耕地负荷分别为 $30.8, 26.0 \text{ kg/hm}^2$,分别是2008年的1.46和0.93倍,其他各市区畜禽粪便磷耕地负荷增长幅度不大。

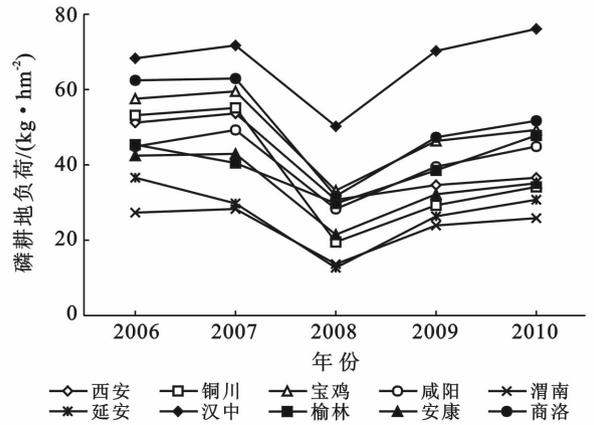


图3 陕西省各市畜禽粪便磷耕地负荷年变化

3.3.2 陕西省畜禽养殖粪便磷耕地负荷空间变化

对比2008和2010年陕西省畜禽粪便磷耕地负荷空间分布图可看出(图4),全省畜禽粪便磷耕地负荷均呈现增长的趋势,平均增加了 59.4% 。从区域分布上看,2008年畜禽粪便磷耕地负荷汉中市最高,为 50.3 kg/hm^2 ,渭南最低,为 13.5 kg/hm^2 ;2010年畜禽粪便磷耕地负荷汉中仍然保持最高,为 76.0 kg/hm^2 ,渭南最低,为 26.0 kg/hm^2 。这是因为汉中市以饲养猪、家禽为主,猪、家禽粪便中磷含量较高,对畜禽粪便磷耕地负荷贡献率最大^[20]。一般认为土壤中畜禽粪便年施磷量(P_2O_5)不能超过 80 kg/hm^2 (约合纯P为 35 kg/hm^2)^[25],过量的磷素会通过土壤的淋洗而进入地表径流造成水体的富营养化。参考这一限值,2008年陕西省只有汉中市超标,到2010年,陕西省畜禽粪便磷耕地负荷平均值高达 44.7 kg/hm^2 ,除了铜川、延安和渭南3市外,其他市全部超出上述磷的限值。各市磷耕地负荷由大到小依次为:汉中>商洛>宝鸡>榆林>咸阳>西安>安康>铜川>延安>渭南。因此,陕西省畜禽粪便中磷素已经对环境构成威胁,应加大力度采取相应的措施,防止畜禽粪便中磷素对环境的污染。

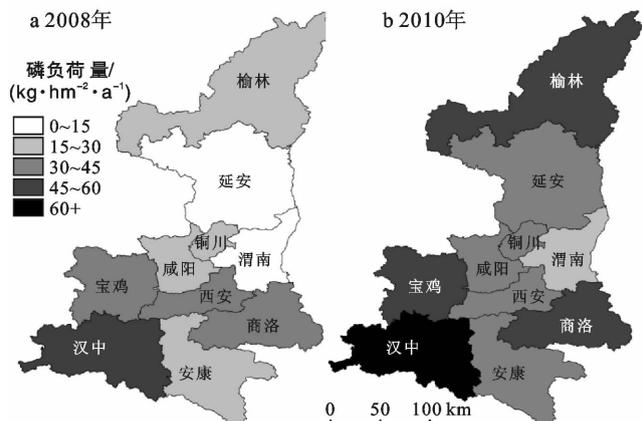


图4 2008年和2010年陕西省畜禽粪便磷耕地负荷空间分布对比

4 讨论与结论

4.1 讨论

从陕西省畜禽粪便氮磷耕地负荷在2006—2010年各地区的分布变化看出,氮素虽然未超出欧盟制订的农田有机肥氮的限制标准,但整体上都有增加趋势,而磷素到2010年,除了铜川、延安和渭南3市外,其他市全部超出畜禽粪便磷素养分施用量限值,因此畜禽粪便磷素引起的农业面源污染风险不可忽视。建议有关部门应及时调整畜牧业生产布局,同时加大汉中、安康、商洛、宝鸡、榆林等区域畜禽粪便的处理力度。陕西畜禽粪便的资源化利用率较低,规模养殖场畜禽粪便的无害化处理率不足20%,散养农户大多采取弃置和传统堆肥等方式,存在环境隐患^[26]。因而针对规模化养殖大户和散养农户要分别制定畜禽粪便资源化、无害化处理的不同技术策略;从技术和区域公平等角度出发,建立长效管理机制和价格税收等经济杠杆的调节机制,应适当提高畜产品价格,或者向畜牧业产品的主要消费地区征收一定的环保税,解决畜禽污染治理的区域不平衡问题。通过技术和政策两方面引导,降低畜禽粪便造成水土资源污染的风险。

本文在没有考虑氮、磷养分累积的情况下,计算出陕西省各市年畜禽粪便氮磷耕地负荷已接近或超过相关的标准限值。但在实际生产中,土壤—农作物系统对畜禽粪便养分消纳能力较低,82%的农田处于中下水平,另外氮磷在土壤中利用率较低,长期将大量的畜禽粪便作为肥料施入农田土壤中,必然导致土壤中氮磷的高度富集,对土壤环境及地表水体造成严重污染。

本研究是从全省各市的畜禽粪便产生量相对有效耕地面积来进行分析,实际上对于每一个地区,畜禽养殖业的分布相对比较集中,这样导致畜禽粪便产生量也相对集中,加之农村劳动力缺乏,畜禽粪便很难大面积和远距离的被土地利用,使得在养殖业集中的地区,单位面积土地的畜禽粪便氮磷负荷比理论统计值更大,可能远远超过土地的消纳能力,其环境污染风险很大,必须加以重视。

4.2 结论

(1) 陕西省畜禽粪便氮磷耕地负荷年际变化表明,在各市区有效耕地面积相对稳定的情况下,各市畜禽粪便氮磷耕地负荷从2006—2007年达到最大,到2008年急剧下降至最低,之后逐步增加,反映了各市区畜禽养殖数量的变化;2008—2010年,全省畜禽粪便氮磷耕地负荷平均值增加了73.0%,磷负荷平均值

增加了59.4%;2006—2010年,各市畜禽粪便氮磷耕地负荷的变异系数在17.9%~47.2%之间,磷耕地负荷年际变化变异系数在14.7%~40.5%之间,铜川变化最大;2008—2010年,延安、渭南两市畜禽氮磷耕地负荷虽然居于全省最后,但增长率最快。2010年,延安、渭南的畜禽粪便氮磷耕地负荷分别是2008年的1.91和1.17倍,磷耕地负荷分别是2008年的1.46和0.93倍。2006—2010年陕西省各市畜禽粪便氮磷负荷都未超出有关环境标准限值,但各市区都有增加趋势;而畜禽粪便磷负荷在2010年除了铜川、延安和渭南3市外,其他市全部超出畜禽粪便磷素养分施用量限值,有潜在的氮磷污染风险。

(2) 通过对比2008和2010年陕西省畜禽粪便氮磷耕地负荷的空间变化可以发现,2008年,汉中市畜禽粪便氮磷耕地负荷最大,分别为82.6, 50.3 kg/hm²,延安市和渭南市最小。2010年汉中市氮磷耕地负荷仍然保持最大,达到142.0, 76.0 kg/hm²; 2010年各市畜禽粪便氮磷耕地负荷平均值由大到小依次为:汉中>安康>榆林>宝鸡>咸阳>商洛>铜川>西安>延安>渭南。各市磷耕地负荷平均值由大到小依次为汉中>商洛>宝鸡>榆林>咸阳>西安>安康>铜川>延安>渭南。各地区需调整畜牧业生产布局,从技术和政策层面引导,降低畜禽粪便造成水土资源污染风险。

[参 考 文 献]

- [1] 董洪梅, 王大娟. 畜禽养殖废水处理技术研究进展[J]. 现代农业技术, 2011(13): 260-262.
- [2] 吕文魁, 王夏晖, 孔源, 等. 基于保障畜禽养殖产业可持续发展的环境保护战略[J]. 中国人口·资源与环境, 2013, 23(11): 73-77.
- [3] 曹芹, 殷伟庆. 集约化畜禽养殖对环境的污染及防治研究[J]. 环境科学与管理, 2014, 39(1): 111-112, 139.
- [4] 仇焕广, 廖绍攀, 井月, 等. 我国畜禽粪便污染的区域差异与发展趋势分析[J]. 环境科学, 2013, 34(7): 2766-2774.
- [5] Mishima S I, Kimura S D, Eguchi S, et al. Estimation of the amounts of livestock manure, rice straw, and rice straw compost applied to crops in Japan: A bottom-up analysis based on national survey data and comparison with the results from a top-down approach[J]. Soil Science and Plant Nutrition, 2012, 58(1): 83-90.
- [6] Arthur R, Baidoo M F. Harnessing methane generated from livestock manure in Ghana, Nigeria, Mali and Burkina Faso [J]. Biomass & Bioenergy, 2011, 35(11): 4648-4656.
- [7] Cambra-Lopez M, Aarnink A J A, Zhao Y, et al. Air-

- borne particulate matter from livestock production systems: A review of an air pollution problem[J]. *Environmental Pollution*, 2010,158(1):1-17.
- [8] 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.
- [9] 张晖. 中国畜牧业面源污染研究[D]. 南京:南京农业大学,2010.
- [10] 高懋芳,邱建军,李长生,等. 应用 Manure-DNDC 模型模拟畜禽养殖氮素污染[J]. *农业工程学报*,2012,28(9):183-189,294.
- [11] 李艳霞,李帷,韩伟,等. 基于 GIS 的东北农田畜禽粪便施用适宜性分析[J]. *环境科学*,2010,31(4):1092-1100.
- [12] 王奇,陈海丹,王会. 基于土地氮磷承载力的区域畜禽养殖总量控制研究[J]. *中国农学通报*,2011,27(3):279-284.
- [13] Fisher G, Ermolieva T, Sun L X. Environmental pressure from intensification of livestock and crop production in China: Plausible trends towards 2030[R]. Amsterdam: CATSEI Project Report, 2010:1-29.
- [14] Zervas G, Tsiplakou E. An assessment of GHG emissions from small ruminants in comparison with GHG emissions from large ruminants and monogastric livestock [J]. *Atmospheric Environment*, 2012(49):13-23.
- [15] 宋大平,庄大方,陈巍. 安徽省畜禽粪便污染耕地、水体现状及其风险评价[J]. *环境科学*,2012,33(1):110-116.
- [16] 朱建春,张增强,樊志民,等. 中国畜禽粪便的能源潜力与氮磷耕地负荷及总量控制[J]. *农业环境科学学报*,2014,33(3):435-445.
- [17] 朱梅,吴敬学,张希三. 海河流域畜禽养殖污染负荷研究[J]. *农业环境科学学报*,2010,29(8):1558-1565.
- [18] 中华人民共和国环境保护部. 全国畜禽养殖污染防治“十二五”规划[EB/OL]. (2012-12-31)[2013-04-25] http://sts.mep.gov.cn/gzdt/201212/t20121231_244521.htm.
- [19] De C P, Gertsis A C, Hofman G. Nutrient management legislation in European countries[M]. Netherland: Wageningen Press, 2001.
- [20] 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.
- [21] 王辉,董元华,张绪美,等. 江苏省集约化养殖畜禽粪便盐分含量及分布特征分析[J]. *农业工程学报*,2007,25(11):229-232.
- [22] Mallin M A, Cahoon L B. Industrialized livestock production: A major source of nutrient and microbial pollution to aquatic ecosystems[J]. *Population and Environment*, 2003,24(5):369-385.
- [23] 杨飞,杨世琦,诸云强,等. 中国近 30 a 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.
- [24] 马林,王芳浩. 中国东北地区中长期畜禽粪尿资源与污染潜势估算[J]. *农业工程学报*,2006,22(8):170-174.
- [25] Oenema O, Van Liere L, Plette S, et al. Environmental effects of manure policy options in the Netherlands [J]. *Water Science & Technology*, 2004,49(3):101-108.
- [26] 朱建春,李荣华,杨香云,等. 陕西畜禽粪便的时空分布、氮磷负荷及利用策略[J]. *可再生能源*,2012,30(12):117-121.