基于网格的中国耕地畜禽养殖废弃物氮负荷估算

阎波杰[1,2]，潘瑜春[3]

(1. 闽江学院 地理科学系，福建 福州 350108；2. 福建省测绘工程技术研究中心，福建 福州 350108；3. 国家农业信息化工程技术研究中心，北京 100097)

摘　要：[目的] 估算网格化的中国耕地畜禽养殖废弃物氮负荷，以期准确分析中国畜禽养殖废弃物对环境的污染威胁。[方法] 基于统计数据进行行政区域的畜禽养殖废弃物氮养分量的估算，并利用面积权重内插法和 GIS 空间分析技术进行中国耕地畜禽养殖废弃物氮负荷估算及网格化研究。[结果] 网格化后的畜禽养殖废弃物耕地氮负荷基本保持了以各省区为单元数据的基本特征，不再是以行政边界为划分不同畜禽养殖废弃物氮养分负荷的依据，更接近于实际情况，并以河南省为例进行了验证。[结论] 从整体空间分布角度看，2010 年中国畜禽养殖废弃物氮负荷量空间分布其高值范围与低值范围的界线近似于中国 400 mm 等降水量线。从各省域空间分布范围分析，氮负荷量高的主要集中在广东省、北京市、四川省及湖南省范围，而蒙古、新疆、西藏及青海这 4 个区域范围内的氮负荷量都较低。

关键词：耕地；氮负荷；网格；空间分析

文献标识码：B　　**文章编号**：1000-288X(2015)05-0133-05　　**中图分类号**：X713，P208，S87

DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2015.05.090

Estimation of Nitrogen Pollution Load of Farmland from Livestock Manure in China Based on Grid

YAN Bojie[1,2], PAN Yuchun[3]

(1. *Department of Geography, Minjiang University, Fuzhou, Fujian* 350108, *China*; 2. *Surveying Engineering and Technology Research Center of Fujian Province, Fuzhou, Fujian* 350108, *China*; 3. *National Engineering Research Center for Information Technology in Agriculture, Beijing* 100089, *China*)

Abstract: [Objective] The paper aims to estimate nitrogen pollution load in farmland in order to analyze environment pollution caused by livestock and poultry in China. [Methods] This paper estimated the amount of nitrogen nutrient of livestock and poultry based on statistical data. Then, the estimation and gridding of nitrogen pollution load of farmland were done using the method of area weighted interpolation and spatial analysis of GIS. [Results] The gridding of nitrogen pollution load of farmland was consistent with the basic characteristics of provincial data and the administrative boundary was no longer used as a basis for the division of nitrogen pollution load. The paper then used He'nan Province as s case study to verify the precision of gridding of nitrogen pollution load of farmland in China. [Conclusion] The dividing line of high value and low value of nitrogen pollution load of farmland coincided with the 400 mm isohyet. Among provinces in China, the higher nitrogen pollution load of farmland mainly occurred in Beijing City, Guangdong, Sichuan and Hu'nan Province. The lower nitrogen pollution load of farmland mainly occurred in Inner Mongolia Autonomous Region, Xinjiang Uygur Autonomous Region, Tibet Autonomous Region and Qinghai Province.

Keywords: farmland; nitrogen load; grid; spatial analysis

随着中国畜禽养殖业的过快发展，畜禽养殖废弃物越来越多，这些畜禽养殖废弃物若处置得当就可作为一种良好的有机养分资源，但若处置不当，就可能对环境造成不同程度的污染。目前，畜禽养殖废弃物作为有机肥还田施用是最理想的出路，但是，当一定区域内畜禽养殖废弃物超过农田消纳容量，将可能造成较严重的环境污染问题[1-2]。

畜禽养殖对环境的污染威胁已引起了国内外研

收稿日期：2014-12-10　　修回日期：2015-01-13

资助项目：国家自然科学资助项目“基于混合地理权重回归的土壤性质空间预测模型研究”(41271232)，(41271354)；福建省教育厅科技项目(JB11151)；福建省中青年教师教育项目(JA13259)；福州市科技项目(2013-S-109)；闽江学院科技项目(MYK14012)

第一作者：阎波杰(1981—)，男(汉族)，浙江省宁波市人，博士，副教授，主要从事地理信息系统应用及农业信息化研究。E-mail：bnunercita@163.com。

究的重视，如 Provolo[3] 以单位面积的氮素负荷作为指标，实现粪肥管理实施进行评价分析。王晓燕等[4]以土壤—植物营养学原理和科学施肥理论为指导，根据作物所需畜禽粪尿肥的最大量，估算了密云县各乡镇耕地的畜禽粪便最大负荷量，并对密云县各乡镇畜禽养殖规模进行潜在环境风险评价；张绪美等[5]以农田耕地面积作为实际的畜禽养殖废弃物负载面积，分别计算了 1997—2004 年江苏省各地区和全国各省级的畜禽养殖废弃物负荷量。王方浩等[6]、杨飞等[7]也分别对中国区域的耕地畜禽污染负荷进行研究。基于养分平衡理论，Song 等[8]利用畜禽养殖统计数据以镇行政区域为单元研究和评价了上海地区畜禽养殖废弃物中氮、磷养分对环境的影响。由于畜禽养殖属于社会经济活动，数据来源及分布是按行政单元进行的。因此，目前大部分研究主要集中在以各级行政区域为研究单位进行的。而畜禽养殖废弃物还田施用中引起的环境污染已成为中国农村地区主要的农业非点源污染源之一，非点源污染分布及影响范围不是简单的按行政单元可以表征，更多的是以流域为单位进行表征的，如孟岑等[9]以湖南省长沙县典型亚热带流域为研究单元，分析了亚热带丘陵区的非点源污染分布现状及畜禽养殖业的环境承载力。高懋芳等[10]利用最新版 Manure—DNDC 模型，以山东小清河流域为例，模拟分析各主要类型畜禽污染物产生量，以及粪便管理过程中的氮素流失量，并综合评价畜禽养殖氮素污染的时空分布特征。

目前，很多学者在人口密度、粮食产量等社会经济数据方面进行了网格化的研究，但鲜见关于畜禽养殖废弃物氮负荷量网格化的相关报道。因此，本研究尝试以行政区域的畜禽养殖废弃物养分负荷的基础，利用面积权重内插法和 GIS 空间分析技术进行基于网格的中国耕地畜禽养殖废弃物氮负荷估算研究，以期为网格化多因素（降水、地形、土地利用等）分析和研究畜禽养殖对环境污染影响、区域畜禽养殖规划等提供理论依据。

1 资料与方法

本研究中相关的畜禽养殖统计数据、耕地及牧草地数据来源于《中国畜牧业年鉴 2011》、《中国农村统计年鉴 2011》和《中国统计年鉴 2011》，河南省相关的畜禽养殖统计数据来源于《河南统计年鉴 2011》，在统计各种畜禽养殖量的时候，将家禽、猪和肉牛按年末出栏量统计，其他的大牲口，包括奶牛、水牛、黄牛、羊、马、驴、骡等按年末存栏量统计。参考国内外相关文献确定猪的饲养期为 180 d[11]，肉牛的饲养期为 300 d，按年末存栏统计的畜禽饲养期按 365 d 进行统计，家禽的饲养期为 210 d，兔的饲养期为 180 d[6]。由于新疆、内蒙古、西藏、青海这 4 省区牛、羊和其它大牲畜主要采取草原放养方式，其畜禽养殖废弃物除了由耕地消纳外，主要由牧草地消纳，因此计算这 4 个省区的氮负荷时候，除统计耕地面积外，也统计牧草地的面积[12]。各种畜禽养殖废弃物排泄系数主要参考国内外相关文献[13-14]（表 1），畜禽养殖废弃物养分含量采用《中国有机肥料养分志》中的数据[15]。

表 1 畜禽粪便日排泄系数及其中养分含量

粪便种类	D/d	U/（kg·d^{-1}）	氮含量/（g·kg^{-1}）
猪 粪	199	3.58	5.47
奶牛粪	365	25.00	3.83
肉牛粪	300	20.00	3.50
黄牛、水牛粪	365	20.00	3.50
羊 粪	365	2.60	10.14
马 粪	365	9.70	4.37
驴 粪	365	8.47	4.91
骡 粪	365	8.47	3.12
兔 粪	90	0.16	8.74
家禽粪	210	0.13	7.61
猪 尿	199	5.80	1.70
奶牛尿	365	13.00	5.00
肉牛尿	300	10.00	5.00
黄牛、水牛尿	365	10.00	5.00
马 尿	365	5.00	6.90

注：D 表示养殖周期；U 表示畜禽粪便日系数。

文中涉及到的中国各省区空间数据主要采用 ArcGIS 9.3 软件进行中国行政区域地图数字化、投影变换、拼接、属性编辑等处理与分析，并与畜禽养殖相关的统计数据进行关联，实现空间数据与属性数据一体化。此外，涉及的主要计算方法如下：

（1）畜禽养殖废弃物氮养分量＝饲养量×饲养日期×畜禽养殖废弃物日排泄系数×畜禽养殖废弃物养分含量。

（2）耕地畜禽养殖废弃物氮负荷＝畜禽养殖废弃物氮养分量×养分损失量/耕地面积。

注：粪便中氮损失率分别为 5%～15%[16]，为降低环境污染，统一采用最低养分损失进行计算。

（3）面积权重内插法。面积权重内插法是以面积作为权重，通过在源数据区域叠加目标数据区域，利用每个源数据区域落在某一目标区域的面积比例，根据面积比例分配属性值[17]。

$$Q_{\text{target}}=\frac{\sum_{i=1}^{n}(Q_i\times S_i)}{\sum_{i=1}^{n}S_i} \quad (1)$$

式中:Q_{target}——目标区域属性值;Q_i——各源区域属性值;S_i——各源区域的面积(m^2);n——目标区域涉及到的源区域数。

(4) 格网大小确定。设 S_i 为各省区的面积,定义空间化应用中最小的地理单元的面积为 S_{min},则最小格网大小面积对应的图斑面积 $S_{min}=\min(S_i)$,为确保任一研究的地理单元不会完全落入一个格网,格网大小计算公式为[18]:

$$g=\mathrm{INT}\left(\sqrt{\frac{S_{min}}{\pi}}\right) \tag{2}$$

式中:g——格网大小(m);S_{min}——空间化应用中最小的地理单元的面积(m^2)。

具体的计算步骤:①网格的大小确定:格网越小精度越高,也更逼近实际情况,但实际上只要达到一定大小就可满足实际的需要。本研究的对象是整个中国区域,由于各省区面积最小的是上海市,其面积为 6.24×10^9 m^2,因此按式(2)可计算得到的格网边长大小最小应取 44 673 m。②网格创建:利用 ArcGIS 9.3 软件中 Create Fishnet 功能创建边长为 44 673 m 的格网。产生的格网是属于 Polyline 类型(线状),并将其转换为 Polygen 类型(面状),并计算每个网格的面积;③GIS 叠加分析:将生成的面状网格与中国行政区域空间数据(包含畜禽粪便氮养分量、耕地面积、耕地畜禽粪便氮负荷量、行政区域面积等属性)进行叠加分析,进行拓扑重建后获得中国行政区域空间数据网格化要素图层,并计算每个网格要素的面积;④面积权重内插法:利用面积权重内插法计算每个网格要素的耕地畜禽粪便氮负荷量值;⑤将面积权重内插法的结果与中国行政区域空间数据网格化图层通过关键词段的 Join 操作,实现将格网之间耕地畜禽粪便氮负荷量的连接,可得到每个网格的耕地畜禽粪便氮负荷量。

2　结果与讨论

2.1　中国畜禽养殖废弃物氮养分产生量

按照畜禽养殖废弃物养分量计算公式,结合 2010 年中国畜禽养殖统计数据,获得 2010 年中国畜禽养殖废弃物氮养分产生量。全国总体来看,2010 年中国畜禽养殖废弃物氮养分比较多,全国畜禽养殖废弃物氮总产生量已经达 1.21×10^{10} kg。其中猪粪氮 2.35×10^9 kg;奶牛粪氮 4.96×10^8 kg;肉牛粪氮 9.91×10^8 kg;黄水牛粪氮 6.30×10^8 kg;羊粪氮 2.70×10^9 kg;马粪氮 1.05×10^8 kg;驴粪氮 $9,71\times10^7$ kg;骡粪氮 2.55×10^7 kg;兔粪氮 1.17×10^8 kg;家禽粪氮 2.29×10^9 kg;猪尿氮 1.18×10^8 kg;奶牛尿氮 3.37×10^8 kg;肉牛尿氮 7.08×10^8 kg;黄水牛氮 5×10^4 kg;马尿氮 8.53×10^7 kg。从畜禽养殖废弃物氮养分产生量分析,产生畜禽养殖废弃物氮养分较多的分别为羊粪、猪粪和家禽,约占总数的 60.59%,缘于全国范围内这 3 种畜禽养殖品种最普遍且数量大,而其中家禽和羊的废弃物中氮的含量普遍比较高。

2010 年各省区的畜禽养殖废弃物氮养分具体产生量见表 2。从中国各省区(除台湾、香港和澳门)分析,山东、河南、四川和内蒙古的所占份额较大,上述 4 个省份总额占全国总畜禽养殖废弃物氮养分产生量的 32.09%。但畜禽养殖废弃物氮养分产生量估算结果主要受饲养周期、日排泄量及畜禽养殖废弃物中的各种养分含量存在一定的差异,因此同样数目的畜禽养殖量可能计算的畜禽养殖废弃物氮养分不一致,尤其是日排泄量和畜禽养殖废弃物养分含量跟畜禽个体大小、饲料成分、气候、管理水平等因素密切相关[1,6]。因此,本文畜禽养殖废弃物养分量估算结果与实际情况可能会存在一定的偏差。

2.2　网格化的畜禽养殖废弃物氮负荷量分析

考虑到目前中国对于畜禽养殖废弃物处理的主要方式是作为肥料还田,因此单位面积耕地畜禽养殖废弃物负荷量可以反映该地区耕地承担畜禽养殖废弃物的水平[5]。假设畜禽养殖废弃物全部均匀施用于耕地,按照畜禽养殖废弃物养分量计算方式可得到 2010 年中国各省区畜禽养殖废弃物氮负荷量。2010 年全国的平均单位耕地面积畜禽养殖废弃物氮负荷量已达到 90.54 kg/hm^2,但低于欧盟的限量标准(单位面积耕地氮负荷为 170 kg/hm^2)[19]。从全国各省区看,有 17 个省份耕地单位面积畜禽养殖废弃物氮负荷量超过全国平均值。其中北京市和广东省分别达到了 260.00 kg/hm^2 和 173.53 kg/hm^2,超过了限量标准,四川省也已接近限量标准,其耕地畜禽养殖废弃物氮负荷量达到 162.35 kg/hm^2。以 2010 年中国各省区畜禽养殖废弃物氮负荷量分布图为基础,利用面积权重内插法进行中国畜禽养殖氮养分负荷网格化研究,结果见图 1。从图 1 可知,经网格化的畜禽养殖废弃物氮负荷量基本保持了基于各省区为单元数据的空间特征,并以网格为单位形成畜禽养殖废弃物氮负荷空间梯度,不再是以省区界为划分不同畜禽养殖废弃物氮负荷值的边界,使得从一个省区变换到另一个省区不至于都是突变,尤其是畜禽养殖废弃物氮负荷从高值省区向低值省区的过渡优于基于行政单元的表征结果。

表 2 2010 年中国各省区的主要畜禽养殖废弃物的氮负荷量

省 区	畜禽粪便氮养分量/10^7 kg	百分比/%	耕地面积/10^6 hm^2	耕地畜禽粪便氮负荷量/(kg·hm^{-2})
北 京	5.98	0.49	0.23	260.00
天 津	5.30	0.44	0.44	120.45
上 海	2.89	0.24	0.24	120.42
重 庆	20.42	1.69	2.24	91.16
新 疆	54.59	4.51	10 407.28	0.05
黑龙江	43.18	3.56	11.83	36.50
吉 林	33.25	2.74	5.53	60.13
河 北	68.29	5.64	6.32	108.05
内蒙古	90.09	7.44	204 434.70	0.004
辽 宁	51.08	4.22	4.09	124.89
宁 夏	9.05	0.75	1.11	81.53
山 东	103.19	8.52	7.52	137.22
陕 西	17.62	1.45	4.05	43.51
山 西	16.18	1.34	4.06	39.85
青 海	23.79	1.96	361.60	0.66
甘 肃	28.50	2.35	4.66	61.16
河 南	98.83	8.16	7.93	124.63
江 苏	38.91	3.21	4.76	81.74
西 藏	27.03	2.23	6 605.31	0.04
安 徽	39.43	3.25	5.73	68.81
湖 北	42.06	3.47	4.66	90.26
浙 江	17.60	1.45	1.92	91.67
四 川	96.60	7.97	5.95	162.35
江 西	30.64	2.53	2.83	108.27
贵 州	25.06	2.07	4.49	55.81
湖 南	53.55	4.42	3.79	141.29
福 建	18.04	1.49	1.33	135.64
云 南	43.65	3.60	6.07	71.91
广 西	50.61	4.18	4.22	119.93
广 东	49.11	4.06	2.83	173.53
海 南	6.93	0.57	7.28	95.19
全 国	1 211.45	1	221 925.00	

注:新疆、内蒙古、西藏和青海统计耕地面积加上了牧草地的面积。

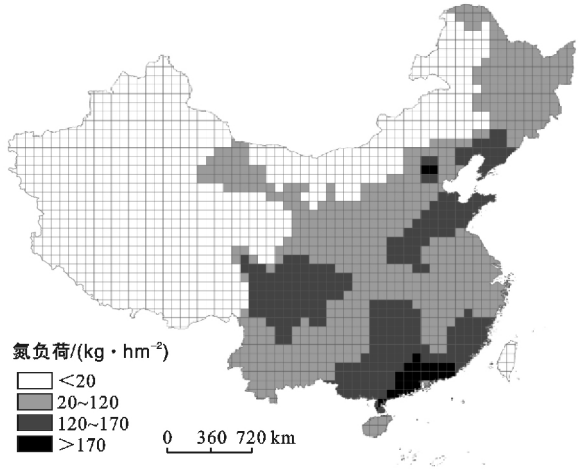


图 1 中国各省区畜禽养殖废弃物氮负荷网格化结果

从空间的角度分析,整体上,2010 年中国畜禽养殖废弃物氮负荷量空间分布其高值范围与低值范围的界线近似于中国 400 mm 等降水量线。从大区域看,西北地区氮负荷量普遍较小,华南地区氮负荷量总体偏高,华中区域的氮负荷量总体也较高,华北地区除山西和内蒙古外,氮负荷量总体也偏高。西南地区除贵州和西藏外,其氮负荷量也较高。华东地区,除上海和福建区域的氮负荷量较高外,其他区域相对较低。东北区域除辽宁外,其他省域范围也较低。从各省域空间分布范围分析,氮负荷量高的主要集中在广东省、北京市、四川省及湖南省范围,其值都超过了140 kg/hm^2,而北京市和广东省的氮负荷量甚至都超过了 170 kg/hm^2,福建、广西、辽宁、上海、河南及山东这些省市区域也较高,氮负荷量范围在 120~140 kg/hm^2,尤其山东和河南区域,网格化后的氮负荷量在空间分布上已经过渡成一个整体区域,内蒙古、新疆、西藏及青海 4 个区域范围内氮负荷量都较低,整体范围内氮负荷量未超过 20 kg/hm^2,除上述区域 外,其余省份范围氮负荷量处于中间范围,其值都处于 20~120 kg/hm^2。沿海地区的各省市域范围的氮负荷量普遍较高,究其原因,可能与社会经济发展有关。随着经济水平的提高,沿海地区的居民消费能力进一步增强,其食物消费结构升级,对肉、蛋、奶等畜禽产品的需求快速增长,导致畜禽饲养量快速增长,相应的畜禽养殖废弃物排放量增加。

2.3 网格化精度检验

由于对中国各省区的畜禽养殖废弃物氮负荷量网格化研究是基于各行政区域的畜禽养殖统计数据,因此网格化前后的畜禽养殖统计量应该是一致的。本文将各网格的氮养分量以各省区为单位进行汇总,并将汇总结果跟基于各省区的统计数据进行比较,结果完全一致,说明网格化后的畜禽养殖废弃物氮养分量能准确地还原原始数据。

为了进一步验证网格化精度及探讨其在不同尺度上的可应用性,选择典型的畜禽养殖区域且在畜禽养殖统计口径与基于各省区的基本一致的区域分析网格化结果在地级市域上的精度和应用性。由于 2010 年河南省各地级市统计的畜禽品种与 2010 年中国畜禽养殖统计的畜禽品种大部分数据基本一致,其中驴、骡、马、羊、奶牛、猪(出栏)、肉牛(出栏)的数据基本一致。而兔、役牛和家禽的统计数据有差异,相比于中国畜禽养殖统计量,河南省各地级市畜禽养殖统计量中兔的养殖量少了 1 295.3 万只,家禽的养殖量少了 22 997.26 万只,役牛的养殖量少了 90.47 万头。但在省域尺度上,这些差异不会影响最终的结

果。其具体的检验步骤如下:首先基于网格化的2010 年中国各省区的畜禽养殖废弃物氮负荷量的结果,进行 2010 年河南省各地级市畜禽养殖废弃物氮养分量汇总统计,获得河南省 18 个地级市的畜禽养殖废弃物氮养分量;其次,以河南省 2010 年各地级市畜禽养殖统计数据为基础,按照本文的计算方法获得2010 年河南省 18 个地级市畜禽养殖废弃物氮养分量。以上两种不同方式计算河南 18 个地级市畜禽养殖废弃物氮养分量时各种参考系数都一致(包括统计的畜禽养殖种类,畜禽养殖排泄系数、畜禽养殖周期等);最后,以畜禽养殖统计数据的河南省各地级市氮养分量为横坐标,以网格化统计的河南省各地级市氮养分量为纵坐标绘制散点图(图 2)。从图中可以看出,网格化统计的河南省各地级市畜禽养殖废弃物氮养分量较好地反映了以地级市进行畜禽养殖统计数据的分布规律,二者呈现较明显的线性关系。通过相关分析得到其相关系数达到 0.82,为显著相关。表明网格化的中国各省区的畜禽养殖废弃物氮负荷量能在地级市域尺度上较好地重现原始地级市的畜禽养殖统计数据的分布规律。但受限于畜禽养殖统计数据,尤其是小尺度单元的畜禽养殖统计数据,本文对畜禽养殖废弃物氮负荷量网格化研究使用的行政单元数据的空间尺度是基于省域尺度,该数据尺度分辨率不够高,若提高网格单元的分辨率和行政单元数据的空间尺度,如镇、村域尺度,畜禽养殖废弃物氮负荷量网格化的结果可获得更令人满意的效果。

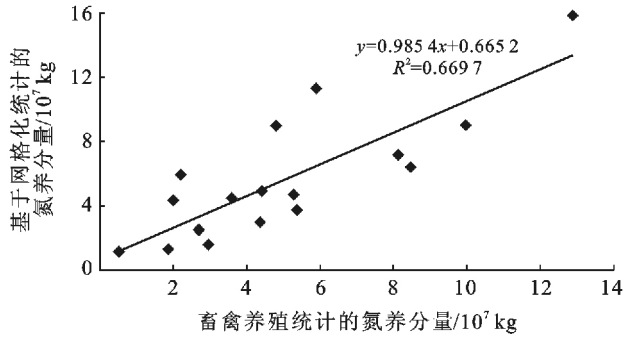


图 2　基于网格化统计和畜禽养殖统计数据的河南省各地级市氮养分量

3　结 论

虽然耕地畜禽养殖废弃物氮负荷量能反映畜禽养殖的对环境污染的影响,尤其是其空间分布更能直观可视化的显示中国各省区的畜禽养殖的对环境污染的风险情况。但耕地畜禽养殖废弃物氮负荷量的空间分布应该是渐变而非突变的,不同行政区单元应该有个渐变的过程,而不是以行政区边界为界限进行的突变。传统的把畜禽养殖废弃物氮负荷量按不同的行政单元进行表达的方式不完全符合实际情况。因此为了更好地显示畜禽养殖废弃物氮负荷量空间渐变分布的规律,本文在耕地畜禽养殖废弃物氮负荷估算的基础上,以 44 673 m 为格网边长利用面积权重内插法和 GIS 空间分析技术,进行了中国耕地畜禽养殖废弃物氮负荷网格化研究。结果表明网格化后的畜禽养殖废弃物耕地氮负荷基本保持了以各省区为单元数据的基本特征,并以网格为单位形成畜禽养殖废弃物氮负荷空间梯度,不再是以行政边界为划分不同畜禽养殖废弃物氮养分负荷的依据,尤其是畜禽养殖废弃物氮负荷从高值省区向低值省区的过渡优于基于行政单元的表征结果。并以河南省为例验证了网格化的中国各省区的畜禽养殖废弃物氮负荷量能在地级市域尺度上较好地重现原始地级市的畜禽养殖统计数据的分布规律。

从整体空间分布角度看,2010 年中国畜禽养殖废弃物氮负荷量空间分布其高值范围与低值范围的界线近似于中国 400 mm 等降水量线。广东省、北京市、四川省及湖南省范围内的畜禽养殖废弃物氮负荷量较高,尤其是北京市和广东省的氮负荷量都超过了 170 kg/hm^2,福建、广西、辽宁、上海、河南及山东这些省市区域的畜禽养殖废弃物氮负荷量也较高,畜禽养殖废弃物氮负荷量较低的范围主要集中在蒙古、新疆、西藏及青海这 4 个省域范围。此外,沿海地区的各省市域范围的畜禽养殖废弃物氮负荷量普遍较高,可能与该区域的社会经济发展息息相关。该研究结果是进行畜禽养殖多源数据的综合分析、畜禽养殖非点源污染等研究的重要基础,对于表征畜禽养殖引起的环境污染时空分布特征,开展畜禽养殖对环境污染影响、区域畜禽养殖可持续发展等有重要的意义。但由于受限于小尺度上的畜禽养殖统计数据(全国县域、镇域及村域等),以省域尺度研究畜禽养殖废弃物氮负荷量网格化,数据精度有待于进一步提高。

[参 考 文 献]

[1] 王新谋. 家畜粪便学[M]. 上海:上海交通大学出版社,1997.

[2] 阎波杰,潘瑜春,赵春江. 畜禽养殖废弃物养分资源合理分配方法研究[J]. 资源科学,2010,32(5):951-958.

[3] Provolo G. Manure management practices in Lombardy(Italy)[J]. Bioresource Technology, 2005,96(2):145-152.

[4] 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价[J]. 生态与农村环境学报,2005,21(1):30-34.

(下转第 143 页)

[4] 马克明,傅伯杰,黎晓亚. 区域生态安全格局:概念与理论基础[J]. 生态学报,2004,24(4):761-768.

[5] Environment Auency. River habitat survey: 1997 field survey guidance manual incorporating SERCON[R]. Center for Ecology and Hydrology, National Environment Research Council, UK, 1997.

[6] Kleynhans C J. A qualitative procedure for the assessment of the habitat integrity status of the Luvuvhu River: Limpopo system, South Africa[J]. Aquatic Ecosystem Health, 1996,5(1):41-54.

[7] 蒋卫国,潘英姿,侯鹏,等. 洞庭湖区湿地生态系统健康综合评价[J]. 地理研究,2009,28(6):1665-1672.

[8] 高占国,朱坚,翁燕波,等. 多尺度生态系统健康综合评价:以宁波市为例[J]. 生态学报,2010,30(7):1706-1717.

[9] Conway T M, Lathrop R G. Modeling the ecological consequences of land-use policies in an urbanizing region[J]. Environmental Management, 2005,35(3):278-291.

[10] Saroinsong F, Harashina K, Arifin H, et al. Practical application of a land resources information system for agricultural landscape planning[J]. Landscape and Urban Planning, 2007,79(1):38-52.

[11] PANG Ai'ping, LI Chunhui, WANG Xuan, et al. Land use/cover change in response to driving forces of Zoige County, China[J]. Procedia Environmental Sciences, 2010(2):1074-1082.

[12] 蔡崇玺,陈燕. 生态安全的研究进展与展望[J]. 环境科学与管理,2010,35(2):126-129.

[13] 李秀珍,布仁仓,常禹,等. 景观格局指标对不同景观格局的反应[J]. 生态学报,2004,24(1):123-134.

[14] 梁国付,丁圣彦. 河南黄河沿岸地区景观格局演变[J]. 地理学报,2005,60(4):665-672.

[15] 陈志科,吕宪国. 两个时期若尔盖草原沼泽湿地景观格局的对比研究[J]. 湿地科学,2010,8(1):8-14.

[16] Ye Hua, Ma Yan, Dong Limin. Land ecological security assessment for Bai Autonomous Prefecture of Dali based using PSR model: With data in 2009 as Case[J]. Energy Procedia, 2011,5(23):2172-2177.

[17] Montague C L, Ley J A. A possible effect of salinity fluctuations on abundance of benthic vegetation and associated fauna in northeastern Florida Bay[J]. Estuaries, 1993,8(16):707-717.

(上接第 137 页)

[5] 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.

[6] 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.

[7] 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.

[8] Song K Y, Li Y, Ouyang W, et al. Manure nutrients of pig excreta relative to the capacity of cropland to assimilate nutrients in China[J]. Procedia Environmental Sciences, 2012(13):1846-1855.

[9] 孟岑,李裕元,许晓光,等. 亚热带流域氮磷排放与养殖业环境承载力实例研究[J]. 环境科学学报,2013,33(2):635-643.

[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.

[11] 张克强,高怀有. 畜禽养殖业污染物处理与处置[M]. 北京:化学工业出版社,2004.

[12] 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.

[13] 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.

[14] 彭里,王定勇. 重庆市畜禽粪便年排放量的估算研究[J]. 农业工程学报,2004,20(1):288-292.

[15] 全国农业技术推广服务中心. 中国有机肥料养分志[M]. 北京:中国农业出版社,1999.

[16] 陈微,刘丹丽,刘继军,等. 基于畜禽粪便养分含量的畜禽承载力研究[J]. 中国畜牧杂志,2009,45(1):46-50.

[17] 闫庆武,卞正富,赵华. 人口密度空间化的一种方法[J]. 地理与地理信息科学,2005,21(5):45-48.

[18] 阎波杰,吴文英,潘瑜春,等. 畜禽养殖废弃物统计数据空间化方法[J]. 江南大学学报:自然科学版,2011,10(6):653-657.

[19] Oenema O, Van Liere L, Plette S, et al. Environmental effects of manure policy options in the Netherlands[J]. Water Sci. Technol., 2004,49(3):101-108.