中国生态农业学报(中英文)
Chinese Journal of Eco-Agriculture
中文核心期刊
中国科技核心期刊
中国精品科技期刊
百种中国杰出学术期刊
中国科学引文数据库源刊

省域农用地猪粪负荷强度时空演变分析

余文梦， 孙小霞， 苏时鹏

引用本文:
余文梦, 孙小霞, 苏时鹏. 省域农用地猪粪负荷强度时空演变分析[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2019, 27(3): 494−506.

在线阅读 View online: https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.180709

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

四川省土地整治项目时空分异格局分析

Spatio−temporal variation of land consolidation projects in Sichuan Province

中国生态农业学报. 2017, 25(12): 1858−1869 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.170310

基于植被初级生产力的农用地理论和可实现产能核算研究

Using vegetation net primary productivity to determine theoretical and achievable farmland productivity

中国生态农业学报. 2015(1): 119−126 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.140573

“乡土”农用地评价:以山西省河曲县沙坪村为例

Indigenous evaluation of farmlands:A case study in Shaping Village in Hequ County, Shanxi Province

中国生态农业学报. 2015(2): 239−245 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.140957

丹江上游商洛市畜禽粪便排放量与耕地污染负荷分析

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

中国生态农业学报. 2018, 26(12): 1898−1907 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.180174

2000—2016年四川省耕地种植指数时空变化及其自然潜力分析

Spatio−temporal evolution and potential analysis of cropping index in Sichuan Province during 2000−2016

中国生态农业学报. 2018, 26(8): 1206−1216 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.171086

DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.180709

余文梦, 孙小霞, 苏时鹏. 省域农用地猪粪负荷强度时空演变分析[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2019, 27(3): 494−506
YU W M, SUN X X, SU S P. Temporal and spatial changes in pig manure load in agricultural lands in China[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2019, 27(3): 494−506

省域农用地猪粪负荷强度时空演变分析*

余文梦, 孙小霞, 苏时鹏**

(福建农林大学可持续发展研究所 福州 350002)

摘 要: 种养循环是解决农业面源污染, 促进化肥减量化以及种植业和养殖业可持续发展的重要途径。测算并合理利用农用地粪便承载力是促进区域种养业循环的基础。为了通过种养业循环解决生猪养殖污染问题, 本文运用排放系数法测算 2007—2016 年中国 31 个省(市、自治区)农用地猪粪负荷强度和承载潜力, 并利用 ArcGIS 空间统计模型分析其时空格局演变特征, 运用多元线性回归模型探讨农用地猪粪负荷强度时空分异的主要影响因素。研究结果表明: 1)2007—2016 年中国农用地猪粪负荷强度总体上并不高, 平均值为 4.148 $t \cdot hm^{-2}$, 但省际差异较大。2)负荷强度总体上呈现先增后降特征, 其中, 青海和西藏呈现持续上升态势, 新疆呈现“降-升-升”态势, 宁川黔冀 4 个省域呈现持续降低态势, 上海等 12 个省域呈现“升-升-降”, 重庆等 6 个省市呈“升-降-降”态势, 内蒙古等 6 个省域呈现“降-升-降”态势。负荷强度整体上表现出显著的空间自相关性, 自相关性呈现先减弱后增强变动态势。热点区域呈向北部、西部转移趋势。3)城乡收入比、上一年成本利润率、人均猪肉消费量、人口密度、区位、人均农作物面积、河网密度和河流截面水质优良比例等因素对农用地猪粪负荷强度产生了显著影响。其主要通过市场规律、供给-需求关系、环境承载力、养殖规制和政府政策影响负荷强度变化。4)提出根据省域负荷强度热点北移西进的态势以及各地承载潜力, 制定生猪养殖业区域规划和负面清单政策, 引导种养业在一定区域内实现循环耦合等政策建议。

关键词: 农用地; 猪粪; 负荷强度; 面源污染
中图分类号: X713 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-6237(2019)03-0494-13

Temporal and spatial changes in pig manure load in agricultural lands in China*

YU Wenmeng, SUN Xiaoxia, SU Shipeng**

(Institute of Sustainable Development, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China)

Abstract: Crop-livestock and poultry farming cycle is an important way of solving agricultural non-point source pollution, promoting chemical fertilizers reduction and enhancing sustainable development of agriculture. Rational utilization of manure in agricultural lands is the basis of regional crop-livestock and poultry farming cycle. In order to control the pollution of breeding pigs through crop and pig farming cycle, we used the emission coefficient method to calculate the load intensity and carrying capacity of pig manure in agricultural lands in 31 provinces (municipalities) in China for the period 2007–2016. The spatial statistical model in ArcGIS was

* 教育部人文社科项目(15YJCZH153)、国家水体污染控制与治理科技重大专项计划(2012ZX07601003)、福建省软科学项目(2018R0010)和福建省社科规划重大项目(FJ2017Z003)资助

** 通信作者: 苏时鹏, 主要从事资源与环境管理研究。E-mail: sushipeng@tsinghua.org.cn
余文梦, 主要从事资源与环境管理研究。E-mail: 876204629@qq.com

收稿日期: 2018-07-29 接受日期: 2018-09-30

* The research was supported by the Humanities and Social Sciences Project of the Ministry of Education of China (15YJCZH153), the Major Special Project of National Water Pollution Control and Governance Science and Technology of China (2012ZX07601003), the Soft Science Project of Fujian Province (2018R0010), and the Social Science Planning Major Project of Fujian Province (FJ2017Z003).

** Corresponding author, E-mail: sushipeng@tsinghua.org.cn

Received Jul. 29, 2018; accepted Sep. 30, 2018

used to analyze temporal and spatial patterns of the evolution of pig manure load intensity in farmlands during the investigated decade. Then the multivariate linear regression model was used to explore the main driving factors of temporal and spatial differences in load intensity of pig manure in farmlands. The results showed that the load intensity of pig manure in China's agricultural lands in 2007–2016 was low, which was 4.148 $t \cdot hm^{-2}$ averagely with obvious inter-provincial variations. The load intensity generally increased first and decreased then. There were five evolution patterns of pig manure load intensity in farmlands in 31 provinces. They were continuous upward trend in Qinghai and Tibet; down-up-up trend in Xinjiang; continuous downward trend in 4 province of Ningxia, Sichuan, Guizhou and Hebei; up-up-down trend in 12 provinces including Shanghai; up-down-down trend in 6 provinces including Chongqing; and down-up-down trend in 6 provinces including Inner Mongolia. The load intensity of pig manure in farmland showed significant spatial autocorrelation on the whole, which initially decreased and then increased during the decade. The hotpot regions of load intensity of pig manure apparently shifted to the north and west from the east and south. The multivariate linear regression analyses showed that urban-rural income ratio, crop area per capita and proportion of sections with excellent water quality had negative effects, while profit rate in the last year, annual pork consumption per capita, population density, river network density had positive effects on pig manure load intensity in farmland. These factors affected load intensity mainly through market rules, supply-demand relationship, environmental carrying capacity, livestock and poultry farming regulations and government policies. Finally, policy recommendations were put forward based on the results, such as formulating regional plans and negative list policies based on provincial shift of load intensity hotspots and carrying capacity of pig manure in farmlands, establishing cycle-coupling industries of crop farming and livestock/poultry in a certain area.

Keywords: Farmland; Pig manure; Load intensity; Non-point source pollution

中国猪肉消费量和生猪养殖量均居世界首位，分别占世界总量 49.6%和 56.6%。因过于强调规模化、集约化、专业化发展，造成种养高度分离，带来了严重养殖污染问题。实施种养循环是促进化肥减量化，减少养殖污染的重要途径[1]，对新时代农业面源污染治理和乡村人居环境治理至关重要。土地承载畜禽粪污能力具有一定的阈值，种养循环的关键是种植业和养殖业在一定空间内合理配比。农用地作为猪粪便的主要消纳地，其负荷强度衡量了一个地区农用地承担猪粪便量水平，被广泛作为测量猪粪排放污染风险的重要指标[2]。近年来，随着农村畜禽养殖污染防治工作的推进，猪粪农用地负荷强度在时间和空间上产生了变化；研究其时空演变规律，并厘清其主要影响因素，对促进种养循环、防治畜禽养殖污染和化肥减量化具有重要意义。

通常农用地面积变化相对较小，而农用地猪粪负荷强度问题的关键在于猪粪产生量。相关研究表明，中国畜禽养殖业已进入现代发展阶段，养殖量和粪便量大幅增加，2009 年全国畜禽养殖粪便量达 32.64 亿 t[3]。受饲养规模、人均播种面积、收入水平、环境污染治理政策等影响，畜禽粪便还田率不断下降[4-6]，且养殖量呈现出较高的空间异质性[7]。王军霞等[8]基于对 1992 年、2002 年和 2012 年全国各省市畜禽养殖总量进行空间热点比较分析，提出养殖热点省份相应的污染排放较为集中。张绪美等[9]研究发现，我国畜禽粪便的负荷量由西北向东南递增，仅有 8 个省份处于负荷阈值之内。王爽等[10]对黑龙江省近 35 年来畜禽数量的时空分布变化进行研究，提出畜禽粪肥的数量在地理上呈由东向西、从边界向内陆增长，缘于区域专业化生产及相关政策的差异。阎波杰等[11]对安徽省耕地畜禽养殖粪便负荷时空演变进行研究，并测出负荷热点区域。有研究提出畜禽粪污产生量变动呈倒 U 型，并受经济结构[12]、人口[13]、收入、贸易和消费[14]、发展战略和环境规制[15-17]等因素的影响较大。潘丹[18]提出不同区域的农户对畜禽粪便治理政策偏好不同。在研究方法方面，大部分研究运用排放系数法[19-22]计算粪便排放量；采用聚类分析[8,23-24]和 Logit 模型[18]等对畜禽粪便排放及处理进行评价与分析；研究范围涉及全国[3]、区域[5]、省[19]等。笔者发现从省域层面分析农用地畜禽养殖粪便负荷强度的时空演变规律及其影响因素的研究并不多。考虑到畜禽粪便种类不同，无害化利用的难易程度差异较大，故有必要分类进行讨论。

我国生猪养殖量大，粪便排放量大，无害化利用的难度较大，且已造成较为严重的污染。推动生猪养殖与种植业的区域耦合，促进种养循环对生猪养殖业和生态农业的可持续发展具有重要的现实意义。省域是种养循环政策较为适宜的尺度。本文在测算省域农用地猪粪负荷强度的基础上，分析其空间分布特征和时空演变情况，探讨其关键影响因素，以期揭示生猪养殖业时空演化规律，为种养业空间布局优化提供依据。

1 分析方法与数据来源

1.1 农用地猪粪负荷强度测算方法与变量说明

农用地猪粪便负荷强度(C)的计算公式[5]为:

$$C_{i,n}=\frac{Q_{i,n}\times T_{i,n}\times e_i}{S_{i,n}} \tag{1}$$

式中: $C_{i,n}$为 i 省份第 n 年农用地猪粪便负荷强度; $Q_{i,n}$为 i 省份第 n 年农村生猪养殖年出栏数量; e_i为生猪养殖每单位每天粪便排放量, 由于没有统一的标准, 综合相关研究结果, 如表 1 所示, 取平均值 5.9 kg·d^{-1} 作为本研究的排放量参数; $S_{i,n}$为 i 省份第 n 年农用地总面积; $T_{i,n}$为 i 省份第 n 年农村生猪养殖平均出栏天数, 计算公式为:

$$T_{i,n}=365\times\frac{H_{i,n-1}+H_{i,n}}{2Q_{i,n}} \tag{2}$$

式中: $H_{i,n-1}$为 i 省份农村生猪养殖第 n 年前一年年末存栏量, $H_{i,n}$为 i 省份农村生猪养殖第 n 年年末存栏量, $Q_{i,n}$为 i 省份第 n 年农村生猪年出栏数量。

表 1 单位猪产品粪便排放系数(e)

Table 1 Fecal emission coefficient of unit pig products (e) kg·d^{-1}

系数值(e) Coefficient value	5.9	10.0	5.3	4.0	5.3	5.1	5.9
文献出处 Document source	[7]	[19]	[20]	[21]	[22]	[7]	本文取均值 Mean value

1.2 空间相关性测算方法与变量说明

农用地猪粪便负荷强度在全局空间上的相关程度, 即空间相邻或相近区域的单元属性值在整个研究区域内空间相关性的总体趋势[25]用 Global Moran's I 指数法测度。在给定的显著水平下, 若 Moran's I 值为正, 表示负荷强度呈显著的空间集聚; 反之, 若 Moran's I 值为负, 则表明负荷强度呈显著的空间分异。全局 Moran's I 指数计算公式为:

$$I=\frac{\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}W_{ij}\left(X_i-\overline{X}\right)\left(X_j-\overline{X}\right)}{S^2\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}W_{ij}} \tag{3}$$

式中: n 为研究省份的个数; X_i和 X_j分别为 i、j 省域的观测值; W_{ij}为空间权重矩阵, 若两省域相邻为 1, 若不相邻为 0; S^2为观测值的方差; $\overline{X}$为观测值的平均值。

局部空间自相关特征用热点分析 G_i^*指数进行测算[13], 计算公式为:

$$G_i^*(d)=\sum_{j=1}^{n}W_{ij}(d)X_j\Big/\sum_{j=1}^{n}X_j \tag{4}$$

式中: W_{ij}为空间权重矩阵, 若两省域相邻为 1, 不相邻为 0。若 G_i^*指数为正显著, 说明 i 省周围值相对较高, 属于热点区; 反之, 则说明 i 省周围值相对较低, 属于冷点区。

1.3 农用地猪粪负荷强度影响因素测算方法与变量说明

应用多元线性回归模型分析寻找影响农用地猪粪负荷强度的关键因素。以省(市、自治区)为样本, 因变量为农用地猪粪负荷强度。农用地猪粪负荷强度反映生猪养殖量与种植业之间的配比关系, 这一关系受到当地经济、社会与资源环境禀赋的影响。从经济方面来看, 城乡收入比越大的省, 农民越可能从事回报率相对较低的种植业, 农用地猪粪负荷强度可能越小; 人均地区生产总值越高, 经济发展水平越高, 农民从事养殖业的比例可能越高; 上一年成本利润率越高, 本年养猪量可能越多, 农用地猪粪负荷强度越大; 年人均猪肉消费量越大, 生猪养殖量可能越多。从社会方面来看, 人口密度越高, 城镇化率越高, 对猪肉的需求量越大, 不考虑外地贸易的情况下, 单位面积土地承载的生猪养殖量越大; 低保人口率越高, 越多的人没有能力从事一定规模的生猪养殖, 农用地猪粪负荷强度越低。从资源环境禀赋方面来看[22], 东部人多地少、水多, 气候适合养猪, 农用地猪粪负荷强度更高; 人均作物面积越大, 河网密度越低, 断面水质优良率越高, 农民养猪量同种植面积的比值越低, 农用地猪粪负荷强度越低。因而, 从经济、社会和自然禀赋等方面选择 11 个可能的影响因素作为自变量, 见表 2。具体实证计量模型为:

$$Y=\alpha+\beta_1X_1+\beta_2X_2+\beta_3X_3+\cdots+\beta_{11}X_{11}+\varepsilon \tag{5}$$

式中: Y 为各省域农用地猪粪便负荷强度, a 为回归常数项, β_1、β_2、…、β_{11}为各解释变量的回归系数, X_1、X_2、…、X_{11}为解释变量, ε 为随机干扰项。

1.4 农用地猪粪负荷强度时空演变分析框架

以省(市、自治区)为样本, 先运用猪粪排放系数测算不同年份各省域猪粪排放量, 并根据各省份农用地面积测算负荷强度; 再分析 2007—2016 年负荷强度变化情况及承载潜力, 并应用 ArcGIS 进行可视化分析, 运用地理统计分析的应用 Global Moran's I 指数分析农用地猪粪负荷强度全局空间关联和差异特征, 应用热点分析 G_i*指数[8]分析农用地猪粪负荷强度局部空间差异特征及时空演变情况; 最后利用多元线性回归模型分析寻找农用地猪粪负荷强度时空演变的关键影响因素, 分析框架如图 1 所示。

表 2　省域农用地猪粪负荷强度时空演变的变量说明与统计

Table 2　Variables and statistics of temporal and spatial changes of pig manure load intensity in agricultural land in provinces of China

变量 Variable		变量解释 Variable interpretation	均值 Mean	标准差 Std. dev.	作用方向预测 Effect prediction
因变量 Dependent variable	负荷强度 Load intensity	各省不同年份单位面积农用地猪粪负荷量 Pig manure load per unit area of agricultural land in different years of each province (t·hm^{-2})	4.148	2.879	
自变量 Independent variable	城乡收入比 Urban-rural income ratio	城镇居民人均可支配收入/农村居民人均可支配收入 Urban disposable incomes / rural disposable income	2.936	0.563	–
	人均地区生产总值 GDP per capita	人均地区生产总值 GDP / population (¥·person^{-1})	41 171.520	22 018.700	+
	上年利润率 Profit rate in the last year	上一年生猪养殖利润额/成本×100 Pig farming profit / cost in the last year (%)	11.940	12.914	+
	年人均猪肉消费量 Annual pork consumption per capita	猪肉消费量/总人口 Annual pork consumption / total population (kg·person^{-1})	14.583	7.319	+
	人口密度 Population density	总人口/研究区面积 Population / area (persons·km^{-2})	438.405	657.873	+
	城镇化率 Urbanization rate	城镇人口/总人口 Urban population / total population	52.867	14.160	+
	低保人口率 Rate of lowest living population	农村低保人口占农村人口比率 Rural subsistence allowance population / rural population	0.149	1.064	–
	区位 Location	东部=1, 中部=2, 西部=3 East China = 1, Middle China = 2, West China = 3	1.774	0.751	–
	人均农作物面积 Crop area per capita	农作物播种面积/总人口 Crop planting area / total population (hm^2·person^{-1})	0.124	0.069	–
	河网密度 River network density	单位面积内的河流总长度 Total river network length per unit area (km·km^{-2})	0.492	0.247	+
	断面水质优良比例 Proportion of sections with excellent water quality	主要河流断面监测水质优良(Ⅰ～Ⅱ类)比例 Sections with excellent water quality (Class I – Class II) / total sections number	0.644	0.229	–

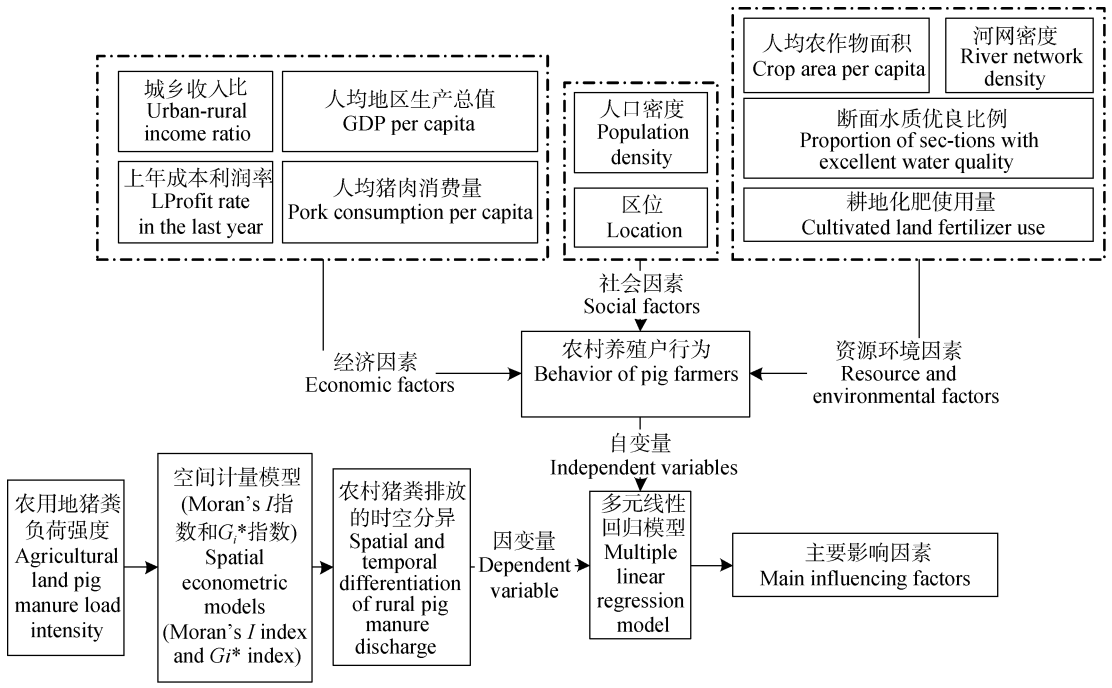

图 1　农用地猪粪负荷强度时空演变分析框架

Fig. 1　Analytical framework for spatial and temporal evolution of pig manure load intensity in agricultural land

1.5　数据来源

本研究数据来源于《中国农村统计年鉴》(2007—2017 年)、《中国统计年鉴》(2007—2017 年)、《中国环境状况公报》(2007—2017 年)、《各省环境状

况公报》(2007—2017 年)和《全国主要流域重点断面水质周报》(2007—2016 年), 31 个省市(港澳台数据缺失)10 年共形成 310 个样本。

2 结果与分析

2.1 农用地猪粪负荷强度总体情况

根据公式(1)对我国 2007—2016 年各省(市、自治区)农用地猪粪负荷强度进行测算, 结果如图 2 所示。分析可知, 全国省域农用地猪粪负荷强度并不高, 平均为 4.148 t·hm^{-2}, 位于农用地承载力 129.21 t·hm^{-2} 范围内[26]。理论上说, 将所有的猪粪还田仍不会超出农用地的承载力, 既有利于改善土壤肥力, 又可以促进化肥的减量化, 还可以减少水体污染的负荷量。目前, 生猪养殖粪便导致水污染的主要原因是种养分离, 粪便还田比例过低, 未经有效处理直接排至自然水体的比例较高[27-28]。由此可见, 促进区域内种养业循环势在必行、十分迫切且切实可行。负荷强度的省际差异较大, 标准差达 2.879 t·hm^{-2}。上海、河南和重庆 3 个省域的负荷强度最大, 河南和重庆 10 年间皆位于 8 t·hm^{-2} 以上, 远超其他省份平均水平, 新疆、内蒙古和西藏 3 个省域的负荷强度最小。这表明各省种养业配比差异较大, 推进种养循环的潜力和难易程度差异较大。从种养循环的成本效益来看, 在不增加养殖成本和生态安全风险的情况下, 引导生猪产业向种植业大省转移具有一定的合理性。

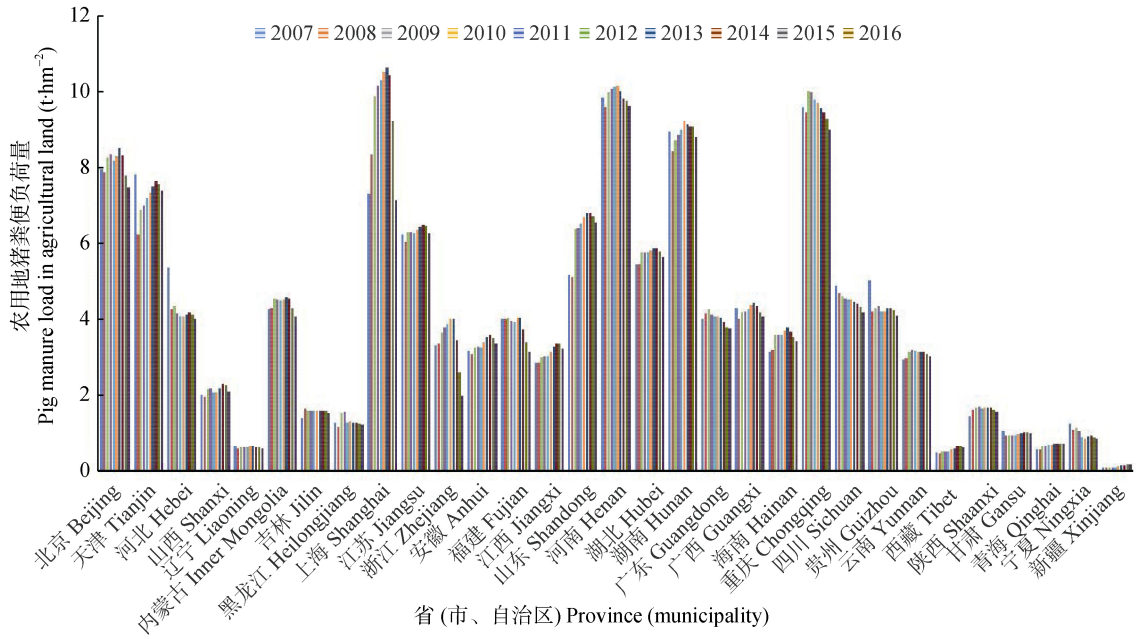

图 2 2007—2016 年各省(市、自治区)农用地猪粪负荷强度情况

Fig. 2 Pig manure load intensities in agricultural land in different provinces (municipalities) of China during 2007–2016

2.2 农用地猪粪负荷强度时空变动分析

2007—2016 年间各省(市、自治区)农用地猪粪负荷强度变化情况如表 3 所示。总体上, 大多数省域农用地猪粪负荷强度呈现先增后降态势。从纵向上看, 2007—2010 年, 20 个省域负荷强度增加, 11 个省域下降, 变化幅度较大, 平均负荷强度变动量为 0.152 t·hm^{-2}, 平均变动率为 0.040。2010—2013 年, 21 个省域增加, 10 个省域下降, 但变化速率放缓, 平均负荷强度变动量为 0.080 t·hm^{-2}, 平均变动率为 0.035。2013—2016 年变动, 3 个省域增加, 28 个省域下降, 且下降的幅度很大, 平均负荷强度变动量为–0.402, 平均变动率为 0.072。青海和西藏两个省域处于持续上升态势, 其主要原因是当地负荷强度的基期值很低。宁夏、四川、贵州和河北 4 个省域呈持续降低态势。上海、山东、浙江、海南、北京等 12 个省域的负荷呈现“升-升-降”态势, 此类省域多数为东部沿海发达省份, 其主要原因是东部省份具有养猪的比较优势, 不少地方政府将本省养猪作为“菜篮子工程”的重要任务来抓, 养殖业与种植业比重逐步提高, 而 2013 年以后, 在减排任务、农业面源污染治理和环保督查的压力下, 地方政府逐步控制本省养殖量。重庆、黑龙江、河南、广东等 6 个省域的负荷强度呈现“升-降-降”态势, 其主要原因既包括西南、西北、东北地区的农村劳动力大量转移, 也包括广东更早推动养殖产业向内地转移。内

蒙古、福建等 6 个省域的负荷强度呈现“降-升-降”态势。新疆的负荷强度呈现“降-升-升”态势。

从横向上看, 2007—2010 年上海负荷强度增量最大, 为 2.824 t·hm^{-2}, 变动率为 0.385; 河北减量最大, 为–1.201 t·hm^{-2}, 变动率–0.224。2010—2013 年天津负荷强度增量最大, 为 0.511 t·hm^{-2}; 新疆变动率增量最大, 为 0.533; 重庆减量最大, 变动值为–0.429 t·hm^{-2}; 黑龙江变动率减量最大, 为–0.175。2013—2016 年, 只有西藏、新疆和青海 3 省的负荷强度增加, 依次为 0.040 t·hm^{-2}、0.016 t·hm^{-2} 和 0.014 t·hm^{-2}, 变动率依次为 0.064、0.096 和 0.019; 上海、浙江和北京减量最大, 变动值为–3.500 t·hm^{-2}、–2.032 t·hm^{-2} 和–1.034 t·hm^{-2}, 浙江、上海和福建的变动率减量最大, 为–0.503、–0.329 和–0.223。

2.3 省际间农用地猪粪负荷强度时空格局演化特征

2.3.1 总体时空格局演化特征

为了分析 10 年间省域农用地猪粪负荷强度总体格局演变特征, 本文应用 ArcGIS 10.2 软件计算

表 3　2007—2016 年各省(市、自治区)农用地猪粪负荷强度变动情况

Table 3　Changes in pig manure load intensities in agricultural land in different provinces (municipalities) of China during 2007–2016

省(市、自治区) Province (municipality)	2007—2010		2010—2013		2013—2016	
	变动值 Change value (t·hm^{-2})	变动率 Change rate	变动值 Change value (t·hm^{-2})	变动率 Change rate	变动值 Change value (t·hm^{-2})	变动率 Change rate
上海 Shanghai	2.824	0.385	0.483	0.048	–3.500	–0.329
山东 Shandong	1.245	0.240	0.389	0.061	–0.257	–0.038
浙江 Zhejiang	0.484	0.146	0.233	0.061	–2.032	–0.503
海南 Hainan	0.443	0.141	0.207	0.058	–0.373	–0.098
重庆 Chongqing	0.414	0.043	–0.429	–0.043	–0.572	–0.060
北京 Beijing	0.389	0.049	0.154	0.018	–1.034	–0.121
湖北 Hubei	0.320	0.059	0.100	0.017	–0.207	–0.035
黑龙江 Heilongjiang	0.283	0.218	–0.275	–0.175	–0.070	–0.054
辽宁 Liaoning	0.263	0.061	0.062	0.014	–0.505	–0.110
云南 Yunnan	0.249	0.084	–0.050	–0.016	–0.126	–0.040
陕西 Shaanxi	0.241	0.164	–0.006	–0.004	–0.117	–0.069
河南 Henan	0.235	0.024	–0.069	–0.007	–0.393	–0.039
吉林 Jilin	0.212	0.151	0.007	0.004	–0.066	–0.041
江西 Jiangxi	0.175	0.061	0.239	0.078	–0.043	–0.013
山西 Shanxi	0.163	0.080	0.005	0.002	–0.091	–0.041
广东 Guangdong	0.117	0.029	–0.095	–0.023	–0.292	–0.072
安徽 Anhui	0.104	0.033	0.272	0.083	–0.179	–0.050
青海 Qinghai	0.088	0.147	0.044	0.065	0.014	0.019
江苏 Jiangsu	0.075	0.012	0.134	0.021	–0.166	–0.026
西藏 Tibet	0.022	0.045	0.097	0.188	0.040	0.064
新疆 Xinjiang	–0.009	–0.075	0.057	0.533	0.016	0.096
内蒙古 Inner Mongolia	–0.009	–0.013	0.005	0.007	–0.045	–0.067
福建 Fujian	–0.059	–0.015	0.075	0.019	–0.900	–0.223
湖南 Hunan	–0.081	–0.009	0.291	0.033	–0.359	–0.039
广西 Guangxi	–0.095	–0.022	0.236	0.056	–0.377	–0.085
甘肃 Gansu	–0.114	–0.106	0.054	0.056	–0.016	–0.016
宁夏 Ningxia	–0.222	–0.174	–0.131	–0.125	–0.066	–0.071
四川 Sichuan	–0.342	–0.070	–0.063	–0.014	–0.285	–0.064
贵州 Guizhou	–0.687	–0.136	–0.035	–0.008	–0.203	–0.047
天津 Tianjin	–0.811	–0.104	0.511	0.073	–0.137	–0.018
河北 Hebei	–1.201	–0.224	–0.037	–0.009	–0.105	–0.025
均值 Mean	0.152	0.040	0.080	0.035	–0.402	–0.072

2007—2016 年各省域农用地猪粪负荷强度的 Global Moran's *I* 指数, 如表 4 所示。

由表 4 可知, 2007—2016 年省域农用地猪粪负荷强度的 Moran's *I* 指数均在 1%水平上显著, 通过显著性检验, 表示负荷强度呈现正向空间自相关性; 且 *Z* 得分皆为正值, 说明各省域负荷强度高(低)与相邻的省域表现出集聚模式。2007—2016 年 Moran's *I* 指数从 0.259 降至 0.219 后升至 0.242, 呈现出先降后升的趋势, 表明自 2007 年以来, 省域农用地猪粪负荷强度的空间自相关性先减弱后增强, 呈现出集聚势态。从总体看 Moran's *I* 指数的变化不大, 说明省域农用地猪粪负荷强度空间分布格局相对稳定。

表 4 2007—2016 年各省(市、自治区)农用地猪粪负荷强度 Global Moran's *I* 指数值

Table4 Global Moran's *I* indexes of pig manure load intensities in agricultural land in different provinces (municipalities) of China during 2007–2016

年份 Year	Moran's *I* 指数 Moran's *I* index	预期指 Expectations index	方差 Variance	*Z* 得分 *Z* score	*P* 值 *P* value
2007	0.259	–0.030	0.007	3.557	0.000
2008	0.220	–0.030	0.007	3.082	0.002
2009	0.220	–0.030	0.007	3.087	0.002
2010	0.219	–0.030	0.007	3.072	0.002
2011	0.219	–0.030	0.007	3.071	0.002
2012	0.222	–0.030	0.007	3.105	0.002
2013	0.230	–0.030	0.007	3.213	0.001
2014	0.238	–0.030	0.007	3.311	0.001
2015	0.240	–0.030	0.007	3.325	0.001
2016	0.242	–0.030	0.007	3.348	0.001

2.3.2 局部时空格局演化特征

利用 Arc GIS 10.2 软件的空间统计工具(spatial statistics tools)计算出负荷强度省域空间的 G_i^*指数, 并采用自然断点法将 G_i^*值由高到低分为 7 类: 负荷强度热点(99%置信)、负荷强度热点(95%置信)、负荷强度热点(90%置信)、不显著、负荷强度冷点(90%置信)、负荷强度冷点(95%置信)和负荷强度冷点(99%置信)。2007—2016 年全国各省域农用地猪粪负荷强度空间格局局部集聚演变如表 5 所示。

从整体上来看, 10 年间省际农用地猪粪负荷强度总体空间格局变化不大, 但部分区域存在明显变化。从表 5 可知 10 年间省域农用地猪粪负荷强度热点区主要分布在华中和华北地区, 其中长江中下游地区尤为显著, 一直处于排放热点区的省份有上海、江苏、安徽、湖北、陕西和湖南。冷点区主要集中在西部和西北部地区, 一直处于冷点区的省份有青海和西藏。排放热(冷)点不显著区主要分布在东南、西南和东北等地区。

10 年间负荷强度热(冷)点主要经历了以下变化: 2007—2010 年, 北京、天津和河北从不显著升为 90%置信热点, 陕西省从 99%置信热点降为 95%置信热点, 整体上热点区域数量上升。2010—2013 年, 山东、江西从不显著升为 90%置信热点, 山西降回不显著, 新疆从 90%置信冷点变为不显著, 整体上热点区域扩大。2013—2016 年, 山西从不显著上升为 95%置信热点, 陕西从 95%置信热点升到 99%置信热点, 山东从 90%置信热点降为不显著, 西藏从 95%置信冷点降为 90%置信冷点, 整体上热点程度上升。综合分析可知, 我国省域猪粪负荷强度热点程度不断加深, 并呈现出北移和西进的趋势。

2.4 省域农用地猪粪承载潜力变动情况

根据 2018 年农业部公布的《畜禽污染土地承载力测算技术指南》[26], 本文采用我国种植面积较大的水稻和小麦粪肥养分平均需求量, 作为单位农用地粪肥养分需求量; 依据粪肥全部就地利用的土地承载力计算[水稻: 16.5 猪当量·hm^{-2}·季$^{-1}$、小麦: 18 猪当量·hm^{-2}·季$^{-1}$ (猪当量·hm^{-2}·季$^{-1}$: 每季 1 hm^2 该农作物可承载的粪肥量折算的生猪数量)], 并与实际各省(市、自治区)实际负荷强度相减得出负荷强度潜力值, 结果如表 6 所示。

由表6可知, 从整体上看, 10年间大部分省域猪粪负荷强度均未超过农用地承载力标准, 存在一定潜力, 但负荷潜力总体呈波动下降趋势。从局部看, 西部和东北地区表现出较高的负荷强度潜力, 其原因可能为该地区生猪养殖量少, 并拥有大面积农用地; 长江中下游、京津冀和西南地区实际负荷强度与承载力标准较接近, 表现出较低的潜力, 其中湖南、重庆和河南 3

省最低, 接近承载力标准临界点。10 年间, 湖北、河北、江苏、吉林、陕西和西藏等省份负荷强度潜力波动下降明显, 山东、贵州、四川、江西、福建、重庆和北京等省份负荷强度潜力波动上升明显。

表 5　2007—2016 年各省(市、自治区)农用地猪粪负荷强度局部空间格局

Table 5　Spatial distribution of pig manure load intensities in agricultural land in different provinces (municipalities) of China during 2007–2016

省(市、自治区) Province (municipality)	热(冷)点置信度 Hot (cold) point confidence coefficient			
	2007	2010	2013	2016
上海 Shanghai	99%	99%	99%	99%
湖北 Hubei	99%	99%	99%	99%
陕西 Shaanxi	99%	95%	95%	99%
安徽 Anhui	99%	99%	99%	99%
江苏 Jiangsu	99%	99%	99%	99%
湖南 Hunan	99%	99%	99%	99%
山西 Shanxi	90%	90%	不显著 No significant	95%
山东 Shandong	不显著 No significant	不显著 No significant	90%	不显著 No significant
浙江 Zhejiang	不显著 No significant	不显著 No significant	不显著 No significant	不显著 No significant
海南 Hainan	不显著 No significant	不显著 No significant	不显著 No significant	不显著 No significant
重庆 Chongqing	不显著 No significant	不显著 No significant	不显著 No significant	不显著 No significant
北京 Beijing	不显著 No significant	90%	90%	90%
黑龙江 Heilongjiang	不显著 No significant	不显著 No significant	不显著 No significant	不显著 No significant
辽宁 Liaoning	不显著 No significant	不显著 No significant	不显著 No significant	不显著 No significant
云南 Yunnan	不显著 No significant	不显著 No significant	不显著 No significant	不显著 No significant
河南 Henan	不显著 No significant	不显著 No significant	不显著 No significant	不显著 Not significant
吉林 Jilin	不显著 No significant	不显著 No significant	不显著 No significant	不显著 No significant
江西 Jiangxi	不显著 No significant	不显著 No significant	90%	90%
广东 Guangdong	不显著 No significant	不显著 No significant	不显著 No significant	不显著 No significant
内蒙古 Inner Mongolia	不显著 No significant	不显著 No significant	不显著 No significant	不显著 No significant
福建 Fujian	不显著 No significant	不显著 No significant	不显著 No significant	不显著 No significant
广西 Guangxi	不显著 No significant	不显著 No significant	不显著 No significant	不显著 No significant
甘肃 Gansu	不显著 No significant	不显著 No significant	不显著 No significant	不显著 No significant
宁夏 Ningxia	不显著 No significant	不显著 No significant	不显著 No significant	不显著 No significant
四川 Sichuan	不显著 No significant	不显著 No significant	不显著 No significant	不显著 No significant
贵州 Guizhou	不显著 No significant	不显著 No significant	不显著 No significant	不显著 No significant
天津 Tianjin	不显著 No significant	90%	90%	90%
河北 Hebei	不显著 No significant	90%	90%	90%
青海 Qinghai	–90%	–90%	–90%	–90%
新疆 Xinjiang	–90%	–90%	不显著 No significant	不显著 No significant
西藏 Tibet	–95%	–95%	–95%	–90%

99%、95%、90%分别表示在 1%、5%、10%水平上热点显著, –99%、–95%、–90%分别表示在 1%、5%、10%水平上冷点显著。99%, 95% and 90% mean significant hot point at 1%, 5% and 10% levels, respectively. –99%, –95% and –90% mean significant cold point at 1%, 5% and 10% levels, respectively.

2.5　负荷强度影响因素分析

为了找出省域农用地猪粪负荷强度存在明显时空差异的关键影响因素, 本文应用 STATA 统计软件对 310 个样本数据进行多元线性回归。为防止数据出现多重共线性问题, 对变量进行方差膨胀因子 VIF 判别法检验。检验结果表明数据不存在多重共线性问题, 该回归结果有效。回归结果如表 7 所示。

由表 7 可知, 经济因素对农用地猪粪负荷强度

变化产生显著影响。其中城乡收入差距对负荷强度存在负向影响，农村年人均猪肉消费量对负荷强度存在正向影响，与预测方向相同。其主要原因是城乡收入比越小，说明该区域城乡经济发展水平越高，人们生活水平的提高对猪肉产品消费量增加，进而通过价格变动激励养殖户生产，促进生猪供给量增加，导致猪粪总量增加。在农用地资源相对稳定的情况下，直接导致农用地猪粪负荷强度增加。与此同时，一个省域猪肉需求量大，会带动邻近省域养殖量增加，以供给该省消费需求，从而形成农用地猪粪负荷强度集聚现象。上一年成本利润率增加对于负荷强度增加影响显著，说明生猪生产存在中(长)期弹性较强的特征。猪肉价格往往围绕价值上下波动，养殖户对于短期价格波动的敏感性较弱，更倾向在一个较长期的价格增长后再将资源投入生猪生产，上一年的价格增加形成了当

表 6 2007—2016 年各省(市、自治区)农用地猪粪负荷强度潜力值

Table 6 Potential values of pig manure load intensities in agricultural land intensity in different provinces (municipalities) of China during 2007–2016 $t \cdot hm^{-2}$

2007		2010		2013		2016	
新疆 Xinjiang	10.079	新疆 Xinjiang	10.088	新疆 Xinjiang	10.030	新疆 Xinjiang	10.015
西藏 Tibet	9.699	西藏 Tibet	9.677	西藏 Tibet	9.579	内蒙古 Inner Mongolia	9.580
青海 Qinghai	9.600	内蒙古 Inner Mongolia	9.540	内蒙古 Inner Mongolia	9.535	西藏 Tibet	9.540
内蒙古 Inner Mongolia	9.531	青海 Qinghai	9.513	青海 Qinghai	9.468	青海 Qinghai	9.454
甘肃 Gansu	9.119	甘肃 Gansu	9.233	宁夏 Ningxia	9.272	宁夏 Ningxia	9.338
宁夏 Ningxia	8.919	宁夏 Ningxia	9.141	甘肃 Gansu	9.179	甘肃 Gansu	9.195
黑龙江 Heilongjiang	8.900	黑龙江 Heilongjiang	8.617	黑龙江 Heilongjiang	8.893	黑龙江 Heilongjiang	8.963
吉林 Jilin	8.798	吉林 Jilin	8.587	吉林 Jilin	8.580	吉林 Jilin	8.646
陕西 Shaanxi	8.732	陕西 Shaanxi	8.491	陕西 Shaanxi	8.497	陕西 Shaanxi	8.615
山西 Shanxi	8.156	山西 Shanxi	7.993	山西 Shanxi	7.987	浙江 Zhejiang	8.191
江西 Jiangxi	7.322	江西 Jiangxi	7.147	云南 Yunnan	7.040	山西 Shanxi	8.079
云南 Yunnan	7.239	云南 Yunnan	6.990	江西 Jiangxi	6.908	云南 Yunnan	7.166
海南 Hainan	7.051	安徽 Anhui	6.912	安徽 Anhui	6.640	福建 Fujian	7.056
安徽 Anhui	7.016	海南 Hainan	6.609	海南 Hainan	6.401	江西 Jiangxi	6.950
浙江 Zhejiang	6.876	浙江 Zhejiang	6.392	浙江 Zhejiang	6.159	安徽 Anhui	6.819
福建 Fujian	6.171	福建 Fujian	6.230	福建 Fujian	6.156	海南 Hainan	6.774
广东 Guangdong	6.160	广东 Guangdong	6.043	广东 Guangdong	6.138	广东 Guangdong	6.431
辽宁 Liaoning	5.922	河北 Hebei	6.028	河北 Hebei	6.065	河北 Hebei	6.170
广西 Guangxi	5.882	广西 Guangxi	5.978	贵州 Guizhou	5.875	广西 Guangxi	6.119
四川 Sichuan	5.304	贵州 Guizhou	5.839	广西 Guangxi	5.742	辽宁 Liaoning	6.102
贵州 Guizhou	5.153	辽宁 Liaoning	5.659	四川 Sichuan	5.710	贵州 Guizhou	6.078
山东 Shandong	5.014	四川 Sichuan	5.646	辽宁 Liaoning	5.598	四川 Sichuan	5.995
河北 Hebei	4.827	湖北 Hubei	4.419	湖北 Hubei	4.319	湖北 Hubei	4.526
湖北 Hubei	4.738	江苏 Jiangsu	3.882	江苏 Jiangsu	3.748	江苏 Jiangsu	3.914
江苏 Jiangsu	3.957	山东 Shandong	3.769	山东 Shandong	3.380	山东 Shandong	3.637
上海 Shanghai	2.861	天津 Tianjin	3.179	天津 Tianjin	2.668	上海 Shanghai	3.054
天津 Tianjin	2.368	北京 Beijing	1.830	北京 Beijing	1.676	天津 Tianjin	2.805
北京 Beijing	2.219	湖南 Hunan	1.322	湖南 Hunan	1.031	北京 Beijing	2.710
湖南 Hunan	1.240	重庆 Chongqing	0.185	重庆 Chongqing	0.614	湖南 Hunan	1.389
重庆 Chongqing	0.599	河南 Henan	0.107	河南 Henan	0.176	重庆 Chongqing	1.186
河南 Henan	0.343	上海 Shanghai	0.036	上海 Shanghai	–0.447	河南 Henan	0.570
均值 Mean	6.122	均值 Mean	5.970	均值 Mean	5.891	均值 Mean	6.292

表 7　省域农用地猪粪负荷强度时空差异影响因素的多元线性回归模型估计结果
Table 7　Estimation results of multiple linear regression models for influencing factors of the temporal and spatial differences of pig manure load intensity in provincial agricultural land

变量 Variable	系数 Coefficient	标准差 Standard deviation	*t* 检验值 *t* test	*P* 值 *P*>|*t*|	预测方向 Direction prediction	检验结果 Result
城乡收入比 Urban-rural income ratio	–1.368***	0.305	–4.480	0.000	–	–
人均地区生产总值 GDP per capita	0.000	0.000	–0.360	0.720	+	不显著 No significant
上年利润率 Profit rate in the last year	0.018*	0.010	1.770	0.077	+	+
年人均猪肉消费量 Annual pork consumption per capita	0.119***	0.018	6.610	0.000	+	+
人口密度 Population density	0.001***	0.000	4.250	0.000	+	+
城镇化率 Urbanization rate	–0.008	0.022	–0.370	0.713	+	不显著 No significant
低保人口率 Rate of lowest living population	0.121	0.107	1.130	0.258	–	不显著 No significant
区位 Location	1.136***	0.182	6.240	0.000	+	+
人均农作物面积 Crop area per capita	–10.839***	2.072	–5.230	0.000	–	–
河网密度 River network density	1.331**	0.673	1.980	0.049	+	+
断面水质优良比例 Proportion of sections with excellent water quality	–1.697**	0.639	–2.660	0.008	–	–
常数 Constant	5.964**	1.837	3.250	0.001		

、**和*分别表示在 1%、5%、10%水平显著。, ** and * mean significant effects of the variables at 1%, 5% and 10% levels, respectively.

年对生产资料流入生猪生产的激励, 因而增加生猪养殖量, 导致猪粪便量增加, 进而增加农用地负荷强度。

从社会因素来看, 人口密度对负荷强度产生正向影响, 与预测方向相同。在我国猪肉产品是最主要的肉食品, 人口密度增加会扩大猪肉需求, 进而影响生猪供给, 导致区域农用地猪粪负荷强度增加; 随着城乡差距的减小, 农用地保护政策的实施, 城镇化率并未造成负荷强度增加。此外, 区位越往中西部负荷强度就越大, 与预测方向相同。这是由于中西部养殖量大, 并在近几年东部发达地区和南方水网密集区实施限、禁养政策, 引发了“南猪北移、西进”的现象; 其次在中西部农村地区仍然存在相当部分的劳动力, 由于生猪养殖业的技术要求较低, 多被农村劳动力选择, 因而导致中西部地区的负荷强度较高。

资源环境因素对农用地猪粪负荷强度变化产生显著影响。其中农作物种植面积对负荷强度存在负向影响, 与预测方向相同。首先, 在目前猪粪资源化利用方式下, 人均农作物的种植面积是主要的消纳地, 其面积增加直接提升猪粪消纳潜力, 减少负荷强度。此外, 河流密度对负荷强度存在正向影响, 与预测方向相同。说明到 2016 年限禁养政策对于南方水网密集区的生猪养殖减量化并未显著体现; 而河流密度越大说明水资源量丰富, 猪粪直接冲洗进入河道的处理方式越普遍, 河流成了天然下水管和化便池, 一定程度上降低劳动力投入, 进而增加养殖量; 其次在我国河网密集区农用地资源相对较少, 致使河网越密集负荷强度越高。河流截面水质对负荷强度存在负向影响, 与预测方向相同。河流水质是一个区域衡量环境状况和承载力的重要指标, 截面水质高低直接影响区域内环保政策制定。在现有的政策环境下, 截面水质越好的区域对应较严格的养殖政策, 严格控制饲养量, 从而减少农用地猪粪负荷强度。

3　讨论与结论

近 10 年来, 随着生猪养殖业专业化、规模化的发展, 种养高度分离, 部分地区面临着农用地生猪粪便超载的局面, 对生态环境造成巨大威胁[27-28], 引起众多学者的关注。在测算技术方面, 学者们采用了不同的方式对于猪粪便的环境负荷量进行测算[5], 但由于学科、角度和测算技术等不同, 使得测算结果差异较大[29]。本研究利用官方统计数据中的生猪年出栏量、年末存栏量和农用地面积, 测算不同省域的出栏周期, 利用排泄系数法测算猪粪便排

放量，并根据农用地面积计算负荷强度，最后按照 2018 年农业部公布的《畜禽污染土地承载力测算技术指南》的标准测算农用地猪粪便负荷潜力。

在空间分布及影响因素方面，许多学者研究表明：我国生猪粪便污染负荷从西北内陆到东南沿海逐步加重，仅有 8 个省域尚处无潜在威胁[9]；生猪养殖的空间布局受区域自然因素、区域经济水平、非农就业机会、畜牧业收益、农业技术进步、人们的消费习惯和政府目标收益的影响[29-31]。本研究结果表明：1)从时间上看，2007—2016 年中国农用地猪粪负荷强度总体上并不高，但省际差异较大。负荷强度总体呈现先增后降特征，但西部部分省份出现持续上升，表现出明显的区域负荷强度变化差异。2)从空间上看，负荷强度整体上表现出显著的空间自相关性，自相关性呈现先减弱后增强变动态势，具有较强的集聚现象。虽然总体负荷量由西北向东南递增，但局部热点区域呈向北部、西部转移趋势；热点省域数量波动上升，说明局部集聚程度不断加深，对集聚区域农用地负荷强度压力加大。3)从负荷潜力看，10 年间中国农用地猪粪负荷潜力先下降后上升，表现出明显的区域差异，西部和东北地区的负荷潜力远高于中、东部。近年来中西部和东北地区负荷潜力下降趋势明显；同时东部地区如闽、浙和沪等地负荷潜力有明显上升。4)从影响因素看，经济与社会因素通过市场规律和供给-需求关系，影响生猪生产，进而影响农用地猪粪负荷强度变化；资源环境状况则通过影响环境承载力、养殖规制和政府政策进而影响农用地猪粪负荷强度变化。

因此，有必要根据省域负荷强度热点北移西进的态势以及各地承载潜力，制定生猪养殖业区域规划和负面清单政策，合理引导生猪养殖业向西北、东北转移，减少农用地猪粪负荷强度空间集聚对环境的压力。制定相应的政策，引导种养业在一定区域内实现循环耦合，推动有机肥还田还林，充分利用农用地负荷潜力，有利于推动化肥减量化、种养业的可持续发展和农业高质量发展。

农用地猪粪负荷强度省域空间格局演变是一个跨学科、时间跨度长、空间跨度大的复杂问题。生猪品种和饲养方式等会对农用地猪粪负荷强度产生较大影响。但由于此类数据很难获得，本文并未分析此类因素的影响。在后续的研究中，有必要选取更小的空间尺度、更长的时间跨度，考虑更多自然、经济、文化、政策因素，进行更加深入的研究。

参考文献 References

[1] 金书秦, 沈贵银, 魏珣, 等. 论农业面源污染的产生和应对[J]. 农业经济问题, 2013, 34(11): 97–102
JIN S Q, SHEN G Y, WEI X, et al. On the emergence and response of agricultural non-point source pollution[J]. Issues in Agricultural Economy, 2013, 34(11): 97–102

[2] 武深树, 谭美英, 黄璜, 等. 湖南洞庭湖区农地畜禽粪便承载量估算及其风险评价[J]. 中国生态农业学报, 2009, 17(6): 1245–1251
WU S S, TAN M Y, HUANG H, et al. Loading capacity estimation and risk assessment of livestock manure in cultivated lands around Dongting Lake[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2009, 17(6): 1245–1251

[3] 张田, 卜美东, 耿维. 中国畜禽粪便污染现状及产沼气潜力[J]. 生态学杂志, 2012, 31(5): 1241–1249
ZHANG T, BU M D, GENG W. Pollution status and biogas-producing potential of livestock and poultry excrements in China[J]. Chinese Journal of Ecology, 2012, 31(5): 1241–1249

[4] 仇焕广, 莫海霞, 白军飞, 等. 中国农村畜禽粪便处理方式及其影响因素——基于五省调查数据的实证分析[J]. 中国农村经济, 2012, (3): 78–87
QIU H G, MO H X, BAI J F, et al. Treatment of livestock manure in rural China and its influencing factors: An empirical analysis based on survey data from five provinces[J]. Chinese Rural Economy, 2012, (3): 78–87

[5] 仇焕广, 严健标, 蔡亚庆, 等. 我国专业畜禽养殖的污染排放与治理对策分析——基于五省调查的实证研究[J]. 农业技术经济, 2012, (5): 29–35
QIU H G, YAN J B, CAI Y Q, et al. Analysis of pollution emissions and countermeasures of specialized livestock and poultry breeding in China: An empirical study based on five provincial surveys[J]. Agrotechnical Economics, 2012, (5): 29–35

[6] 夏晓平, 李秉龙, 隋艳颖. 中国畜牧业生产结构的区域差异分析——基于资源禀赋与粮食安全视角[J]. 资源科学, 2010, 32(8): 1592–1600
XIA X P, LI B L, SUI Y Y. Analysis of regional differentiation of animal husbandry production structure in China from the perspectives of resources endowment and food security[J]. Resources Science, 2010, 32(8): 1592–1600

[7] 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
QIU H G, LIAO S P, JING Y, et al. Regional differences and development tendency of livestock manure pollution in China[J]. Environmental Science, 2013, 34(7): 2766–2774

[8] 王军霞, 徐菲, 刘瑞民, 等. 我国畜禽养殖总量空间热点分析及主要污染物核算[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(7): 1316–1322
WANG J X, XU F, LIU R M, et al. Hotspot analysis and estimation of the main pollutants from livestock in China[J].

Journal of Agro-Environment Science, 2017, 36(7): 1316–1322

[9] 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, 38(6): 1311–1318
ZHANG X M, DONG Y H, WANG H, et al. Structure of livestock and variation of fecal nitrogen pollution load in China[J]. Environmental Science, 2007, 38(6): 1311–1318

[10] 王爽, 孙磊, 金梁, 等. 黑龙江省畜禽养殖量时空分布特征及耕地污染负荷分析[J]. 东北农业大学学报, 2016, 47(12): 38–47
WANG S, SUN L, JIN L, et al. Spatial and temporal distribution features of livestock and poultry production and pollution load of cultivated land in Heilongjiang Province[J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2016, 47(12): 38–47

[11] 阎波杰, 赵春江, 潘瑜春, 等. 规模化养殖畜禽粪便量估算及环境影响研究[J]. 中国环境科学, 2009, 29(7): 733–737
YAN B J, ZHAO C J, PAN Y C, et al. Estimation of the amount of livestock manure and its environmental influence of large-scaled culture based on spatial information[J]. China Environmental Science, 2009, 29(7): 733–737

[12] FRANKLIN R S, RUTH M. Growing up and cleaning up: The environmental Kuznets curve redux[J]. Applied Geography, 2012, 32(1): 29–39

[13] YORK R, ROSA E A, DIETZ T. STIRPAT, IPAT and ImPACT: Analytic tools for unpacking the driving forces of environmental impacts[J]. Ecological Economics, 2003, 46(3): 351–365

[14] TORRAS M, BOYCE J K. Income, inequality, and pollution: A reassessment of the environmental Kuznets curve[J]. Ecological Economics, 1998, 25(2): 147–160

[15] ANDREONI J, LEVINSON A. The simple analytics of the environmental Kuznets curve[J]. Journal of Public Economics, 2001, 80(2): 269–286

[16] HE J, WANG H. Economic structure, development policy and environmental quality: An empirical analysis of environmental Kuznets curves with Chinese municipal data[J]. Ecological Economics, 2012, 76: 49–59

[17] 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

[18] 潘丹. 基于农户偏好的牲畜粪便污染治理政策选择——以生猪养殖为例[J]. 中国农村观察, 2016, (2): 68–83
PAN D. Farmers' preferences for manure pollution control policies: The case of pig breeding[J]. China Rural Survey, 2016, (2): 68–83

[19] 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
PENG L, WANG D Y. Estimation of annual quantity of total excretion from livestock and poultry in Chongqing Municipality[J]. Transactions of the CSAE, 2004, 20(1): 288–292

[20] 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 F H, MA W Q, DOU Z X, 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

[21] 苏丁丁, 曾建国, 伍小松, 等. 湖南省畜禽养殖污染年排放量调查分析[J]. 农业现代化研究, 2011, 32(1): 125–128
SU D D, ZENG J G, WU X S, et al. Investigation and analysis on present condition of livestock excrement and urine pollution in Hunan Province[J]. Research of Agricultural Modernization, 2011, 32(1): 125–128

[22] 刘刚, 沈镭. 中国生物质能源的定量评价及其地理分布[J]. 自然资源学报, 2007, 22(1): 9–19
LIU G, SHEN L. Quantitive appraisal of biomass energy and its geographical distribution in China[J]. Journal of Natural Resources, 2007, 22(1): 9–19

[23] 付强, 诸云强, 孙九林, 等. 中国畜禽养殖的空间格局与重心曲线特征分析[J]. 地理学报, 2012, 67(10): 1383–1398
FU Q, ZHU Y Q, SUN J L, et al. Spatial patterns and gravity centers curve of livestock and poultry breeding in China[J]. Acta Geographica Sinica, 2012, 67(10): 1383–1398

[24] 杨世琦, 韩瑞芸, 刘晨峰. 省域尺度下畜禽粪便的农田消纳量及承载负荷研究[J]. 中国农业大学学报, 2016, 21(7): 142–151
YANG S Q, HAN R Y, LIU C F. Study on the given amount per unit field and load capacity of livestock and poultry manure at provincial scale[J]. Journal of China Agricultural University, 2016, 21(7): 142–151

[25] 张立新, 朱道林, 杜挺, 等. 基于 DEA 模型的城市建设用地利用效率时空格局演变及驱动因素[J]. 资源科学, 2017, 39(3): 418–429
ZHANG L X, ZHU D L, DU T, et al. Spatiotemporal pattern evolvement and driving factors of urban construction land use efficiency using data envelopment analysis[J]. Resources Science, 2017, 39(3): 418–429

[26] 畜禽粪污土地承载力测算技术指南[J]. 甘肃畜牧兽医, 2018, 48(1): 18–20
Technical guide for calculating land carrying capacity of livestock and poultry manure[J]. Gansu Animal and Veterinary Sciences, 2018, 48(1): 18–20

[27] 金书秦, 沈贵银. 中国农业面源污染的困境摆脱与绿色转型[J]. 改革, 2013, (5): 79–87
JIN S Q, SHEN G Y. The dilemma of agricultural non-point source pollution in China and its transformation from green transformation[J]. Reform, 2013, (5): 79–87

[28] 郑黄山, 陈淑凤, 孙小霞, 等. 为什么"污染者付费原则"在农村难以执行?——南平养猪污染第三方治理中养猪户付费行为研究[J]. 中国生态农业学报, 2017, 25(7): 1081–1089
ZHENG H S, CHEN S F, SUN X X, et al. Why polluter-pays principle is difficult to implement in rural areas? — A case study of pig-farmer paying behavior under the third party governance of pig-farming pollution in Nanping[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2017, 25(7): 1081–1089

[29] 刘晓永, 王秀斌, 李书田. 中国农田畜禽粪尿氮负荷量及其还田潜力[J]. 环境科学, 2018, 39(12): 5723–5739

LIU X Y, WANG X B, LI S T. Livestock and poultry faeces nitrogen loading rate and its potential return to farmland in China[J]. Environmental Science, 2018, 39(12): 5723–5739

[30] 杜焱强, 刘平养, 包存宽, 等. 社会资本视阈下的农村环境治理研究——以欠发达地区 J 村养殖污染为个案[J]. 公共管理学报, 2016, (4): 101–112
DU Y Q, LIU P Y, BAO C K, et al. A study on rural environmental governance through the lens of social capital — A case of livestock farming pollution in the undeveloped region[J]. Journal of Public Management, 2016, (4): 101–112

[31] 林丽梅, 刘振滨, 杜焱强, 等. 生猪规模养殖户污染防治行为的心理认知及环境规制影响效应[J]. 中国生态农业学报, 2018, 26(1): 156–166
LIN L M, LIU Z B, DU Y Q, et al. Psychological cognition of pollution prevention of family-oriented scale pig breeders and environmental regulation influence effects[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2018, 26(1): 156–166