



移动扫码阅读

刘存庆,何苗,张翠静,等.基于GIS的菏泽市农业面源污染时空分布[J].能源环境保护,2022,36(6):150-158.

LIU Cunqing, HE Miao, ZHANG Cuijing, et al. Spatial and temporal distribution of agricultural non-point source pollution in Heze City based on GIS[J]. Energy Environmental Protection, 2022, 36(6): 150-158.

基于GIS的菏泽市农业面源污染时空分布

刘存庆^{1,2}, 何苗², 张翠静¹, 朱启运², 胡术刚¹

(1. 山东科技大学 安全与环境工程学院, 山东 青岛 266590; 2. 清华大学 环境学院, 北京 100084)

摘要:为了揭示菏泽市农业面源污染的关键污染源和主要污染区,采用GIS技术分析了菏泽市2012—2021年的统计数据,绘制了污染物空间分布图,核算了污染排放量,分析了农业面源污染的时空分布特征。结果表明:菏泽市化肥施用强度逐年降低,但仍高于国际化肥预警值($225 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$),西北部地区污染较为严重;禽类养殖数量逐渐升高,北部和西部畜禽污染处于中度污染范围;2015年后,化肥和农药的投入量稳步降低,降幅分别达到12.52%和18.91%。

关键词:农业面源污染;GIS;空间分析;分布特征

中图分类号:X382

文献标识码:A

文章编号:1006-8759(2022)06-0150-09

Spatial and temporal distribution of agricultural non-point source pollution in Heze City based on GIS

LIU Cunqing^{1,2}, HE Miao², ZHANG Cuijing¹, ZHU Qiyun², HU Shugang¹

(1. College of Safety and Environmental Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China; 2. School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: In order to reveal the key pollution sources and main pollution areas of agricultural non-point source pollution in Heze City, the statistical data of Heze City from 2012 to 2021 was analyzed with GIS technology. The spatial distribution map of pollutants was drawn, the pollution emissions were calculated, and the temporal and spatial distribution characteristics of agricultural non-point source pollution were analyzed. The results showed that the application intensity of chemical fertilizer in Heze City decreased year by year, but it was still higher than the international early warning value of chemical fertilizer ($225 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$). The chemical fertilizer pollution in the northwest of Heze City was more serious than the other areas. The number of poultry breeding gradually increased. The level of livestock and poultry pollution in the north and west of Heze City was medium pollution. After 2015, the use of chemical fertilizer and pesticide steadily decreased by 12.52% and 18.91%, respectively.

Key Words: Agricultural non-point source pollution; GIS; Spatial analysis; Distribution characteristics

0 引言

我国是农业生产大国,农业面源污染问题不容忽视。《第二次全国污染源普查公报》显示,2017年全国水污染物化学需氧量排放量2 143.98万t、总氮排放量304.14万t、总磷排放量31.54万t,其中农业源排放化学需氧量1 067.13万t、总氮

141.49万t、总磷21.20万t,分别占排放总量的49.77%、46.52%和67.27%^[1]。由此可见,农业面源污染依然是国内河流污染的主要来源。

与点源污染不同,面源污染具有分布随机、成分复杂、难以监测等特点^[2],如不及时管控会对土壤及水源产生污染。因此,农业面源问题越来越受到国内学者的关注,现阶段对农业面源污染的

收稿日期:2022-09-14;责任编辑:蒋雯婷

基金项目:国家重点研发计划基金资助项目(2019YFD1100505);山东省重大科技创新工程项目(2019JZZY020808)

第一作者简介:刘存庆(1999—),男,山东临沂人,硕士研究生在读,主要从事村镇水环境监测技术研究。E-mail:2689335902@qq.com

研究大多集中于对其污染现状、危害、成因以及对策等方面^[3-4];研究方法包括监测法、输出系数法、排污系数法以及模型法等^[5-7];研究范围大多停留在省级、市级,对于县区级的面源污染防控与时空分布的精细化研究较少^[8-10]。因此,从县区层面对农业面源进行时空分析具有更强的针对性和实践指导意义。

为此,本论文在对菏泽市 2012—2021 年间农药、化肥的使用情况及畜禽养殖的污染排放状况研究分析的基础上,运用 ArcGIS 技术,以县区为单位,将典型年份的数据资料空间化和直观化,研讨菏泽市农业面源污染的时间、空间分布格局,为各区县农业面源的治理提供参考依据。

1 研究区域概况及数据来源

1.1 研究区域概况

菏泽市是黄河流入山东后的第一站,市内河流总流域面积 13 000 km²,流域面积在 100 km²以上的支流有 45 条,50~99 km²以上的支流有 41 条,总长度 2 582 km,支流众多,河网灌溉系统发达。菏泽市各区县市累年平均日照时数为 2 317.9~2 556.9 h,平均气温 13.5~14 ℃,年平均降水量 662.7 mm。据《山东统计年鉴》(2021 年)数据显示,山东省内菏泽市农作物播种面积最高,为 155.79 万 hm²,化肥施用量(实物量)137.34 万 t,农药投入量 1.17 万 t。

1.2 数据来源

本研究选取菏泽市内 9 个县为研究对象,制作面源污染分布图。研究区域内各种面源污染数据(如化肥施用量、农药投入量、畜禽养殖量等)均来自 2012—2021 年《菏泽统计年鉴》,另有部分数据来源于网络,见表 1。

表 1 网络数据来源

Table 1 Sources of network data	
数据内容	网络来源
行政区划分	山东省县级分界图_山东地图查询(ps123.net)
社会经济数据	菏泽(山东省辖地级市)_百度百科(baidu.com)
DEM 数据来源	地理空间数据云(gscloud.cn)

1.3 研究方法

以县级为单位,通过 Excel 对收集到的数据进行整理分析,以施肥强度、农药投加强度来表示化肥、农药污染情况,以粪尿排放量表示畜禽养殖面源污染情况;同时应用 ArcGIS10.2 软件绘制菏泽市矢量图。在 Excel 分析数据的基础上,并结合荷

泽市实际情况,判断化肥、农药、养殖污染情况。

(1) 化肥污染评价指标

以国际化肥安全使用量 225 kg·hm⁻²为基础,结合韩书成、林兰稳等人的研究^[12-13],将化肥施用强度划分为轻度污染(225~300 kg·hm⁻²)、中度污染(300~400 kg·hm⁻²)、重度污染(>400 kg·hm⁻²),化肥施用强度计算公式如式(1)。

化肥施用强度=总投入量(折纯量)/播种面积 (1)

(2) 农药污染评价指标

对于农药污染,借鉴叶延琼、葛小君的研究^[14-15],选用单位面积农药投入强度来表示污染情况,结合菏泽市当地农药投入情况,将农药投入强度划分为轻度污染(<5 kg·hm⁻²)、中度污染(5~10 kg·hm⁻²)、重度污染(>10 kg·hm⁻²),农药投入强度计算公式如式(2)。

农药投入强度=总投入量/播种面积 (2)

(3) 畜禽养殖污染评价指标

畜禽养殖污染则用粪尿排泄量表示,即单位土地内的畜禽粪便尿液排放量,结合菏泽市畜禽养殖现状,其畜禽主要包括猪、牛、羊和禽类,将粪尿排泄量划分为 3 个等级^[16-17],分别是粪尿排泄量<1×10⁴ kg·hm⁻²的轻度污染区,1×10⁴~2×10⁴ kg·hm⁻²的中度污染区,以及>2×10⁴ kg·hm⁻²的重度污染区,粪尿排泄量计算公式如下式(3)。

粪尿排泄量=年排泄系数×数量 (3)

年排泄系数采用邓春梅^[16]、刘培芳^[18]的研究方法见表 2,分为生猪、牛、羊、蛋禽和肉禽 5 类,结合菏泽市养殖现状,计算畜禽养殖面源污染粪尿污染排泄量。

表 2 畜禽养殖污染年排泄系数

Table 2 Annual excretion coefficient of livestock and poultry breeding pollution kg/(头·a) ⁻¹					
污染源	猪	牛	羊	肉禽	蛋禽
粪	396.000	10 950.000	870.000	8.250	27.375
尿	522.000	6 570.000	/	/	/
BOD ₅	36.540	293.830	13.920	2.460	0.710
COD _{Cr}	47.880	401.500	19.140	1.640	0.500
氨氮	6.750	4.380	0.220	0.330	0.100

2 结果与分析

2.1 化肥污染时空变化特征解析

随着种植业的不断发展,化肥施用量逐渐增

加。农户因为对科学施肥基础知识缺乏了解,误以为施肥量与作物产量成一定正比关系,导致施肥量增加,不仅造成肥料的浪费,还由此引发一系列环境问题。

姚春霞等人研究表明^[19],化肥流失量占总施用量 15%左右,近十年间化肥施用量及流失量计算结果见表 3。

表 3 2012—2021 年菏泽市化肥施用情况
Table 3 Fertilizer application in Heze City from 2012 to 2021

年份	化肥施用量/ 万 t	播种面积/ hm ²	氮肥/ 万 t	磷肥/ 万 t	钾肥/ 万 t	复合肥/ 万 t	流失总量/ 万 t
2012	157.01	1 493 107	66.08	43.16	13.40	34.36	23.55
2013	157.65	1 499 732	66.30	43.18	13.49	34.68	23.65
2014	157.90	1 522 010	66.39	42.82	13.71	34.98	23.69
2015	158.24	1 535 860	65.99	42.77	13.64	35.83	23.73
2016	158.00	1 543 616	65.29	42.38	13.74	36.59	23.70
2017	157.96	1 544 313	63.43	41.10	13.87	39.55	23.69
2018	157.78	1 542 174	61.39	40.86	13.86	41.67	23.67
2019	151.60	1 547 439	59.70	39.10	13.44	39.36	22.74
2020	142.75	1 545 199	54.85	36.16	12.41	39.32	21.41
2021	137.34	1 557 882	52.08	34.42	12.26	38.58	20.60

由表 3 可知,从时间分布角度来看,2012—2021 年间化肥总流失量与施用量呈现先增加后减少的趋势,氮肥、磷肥、钾肥、复合肥施用量也均表现为先增加后减少,与此同时播种面积在逐年增加。其中,氮肥施用量在 2014 年达到顶峰后逐年降低,直至 2021 年施用量最低为 52.08 万 t,降幅为 21.6%;磷肥施用量在 2013 年达到峰值,先于氮肥,此后施用量逐年降低至 34.42 万 t,降幅 20.3%;钾肥施用量峰值出现在 2017 年,此后逐渐下降;菏泽市现有多家复合肥生产厂家,农民对复合肥认可度和使用量偏高,复合肥施用量在 2018 年达到峰值 41.67 万 t。

根据化肥施用强度图 1 结果显示,各县区化肥污染整体趋势逐年降低。2021 年,重度污染地区完全消失,中度污染县区由 2012 年的 6 个减少至 1 个,减少面积 8 227 km²,总体占比 75.4%。从地区分布来看,2012 年化肥施用强度大于 300 kg·hm⁻²的县区主要集中在牡丹区周围,菏泽市西部、西北部和西南部各县;2015—2018 年间,化肥污染逐步改善,整体施用强度逐年降低,直至 2021 年化肥污染形势大规模改善,东明县、鄄城县、定陶县、曹县整体化肥施用强度降低到 300 kg·hm⁻²以下,均属于轻度污染,但距离国际安全施用标准还有一定差距。

2.2 农药污染时空变化特征解析

化学农药极大程度减少了农业生产活动中的劳动成本,提高了农业生产力及农业产量,但对农

药的不合理利用及盲目依赖也会对环境产生严重污染。有研究表明^[20],农药利用率极低,大部分农药残留会进入土壤、水及大气环境中,进而对人类赖以生存的环境和所必须的农产品产生危害。从时间分布角度来看,图 2 中 2014 年后菏泽市农药投入量整体减少,投入强度也在逐年降低,2018—2021 年间降幅尤为明显。2021 年农药投入量最少,为 0.95 万 t,投入强度属于中度污染范围,较 2012 年减少 0.22 万 t,减幅为 18.92%。

图 3 为菏泽市 2012、2015、2018 和 2021 这 4 年间的农药投入强度分布图。由该图可知,2021 年,全市重度污染区域(巨野县、曹县和东明县)全部消失;中污染地区占绝大多数,整体面积 8 891 km²;轻度污染地区仅有鄄城县和成武县,面积占比 18.51%。从空间分布角度来看。东部巨野县、西部及西南部的东明县、曹县污染情况较为严重,西北部鄄城县和东南部成武县属于轻度污染区域。具体分析来看,巨野县 2012—2015 年间,农药投入强度属于重度污染,此后农药投入量逐渐降低,直至 2018 年间将至中度污染,农药投入量降幅 44.63%;东明县化肥污染在重度污染和中度污染之间波动,2018 年间呈现重度污染,除此之外各年份均属于轻度污染;曹县地区自 2015 年后一直处于中度农药污染;鄄城县 2012—2021 年间农药投入强度均在 3.79~5.66 kg·hm⁻²之间,整体污染程度较轻。

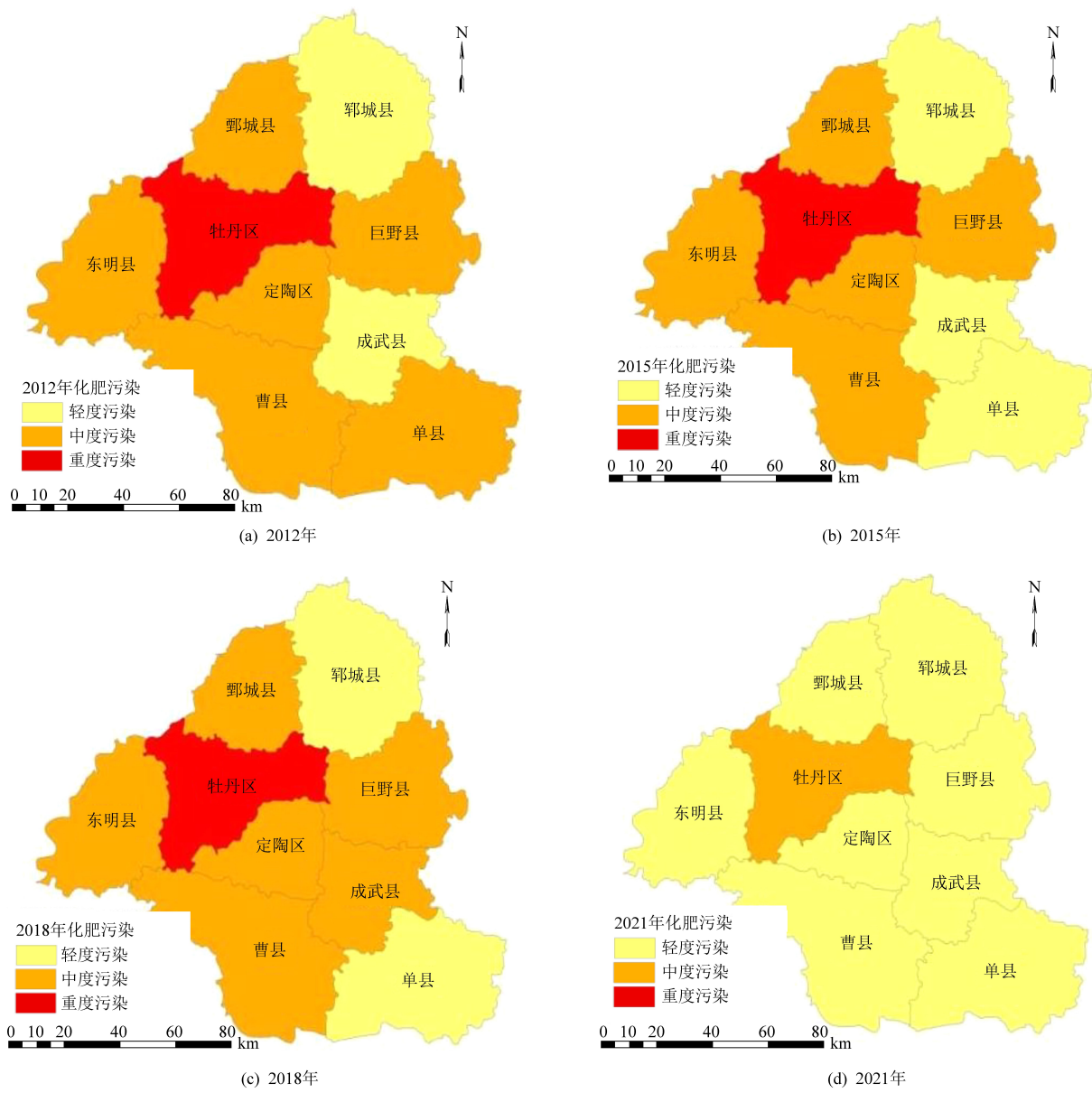


图 1 菏泽市不同年份化肥施用强度分布

Fig.1 Distribution of fertilizer application intensity in Heze City in different years

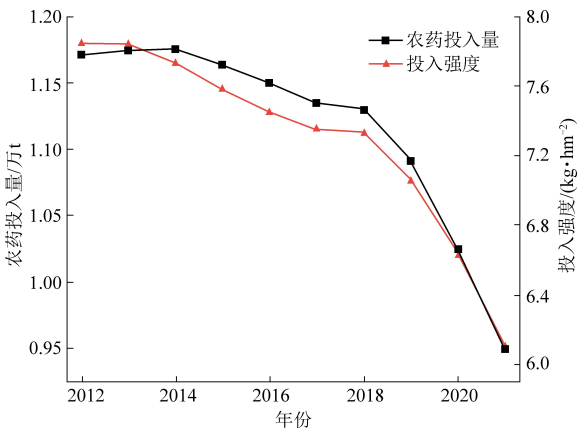


图 2 2012—2021 年菏泽市农药投入情况

Fig.2 Pesticide input in Heze City from 2012 to 2021

2.3 畜禽养殖污染时空变化特征解析

畜禽养殖过程中产生的残料和排泄物也是农业面源的主要成分,我国约有 2/3 的养殖场仍缺乏防污措施,存在处理率低等问题。图 4 为 2012—2021 年菏泽市养殖数量及粪尿排放量。从图 4 中畜禽类别来看,2012—2021 年菏泽市牛的数量呈下降趋势,2021 年牛的数量最少,为 21.9 万头;羊的数量表现为波动下降,2021 年羊的数量为 255.1 万头;猪的数量则趋于稳定,数量变化不明显;禽类的数量先增长,在 2020 年后开始有所减少。从畜禽污染物排放量来看,畜禽粪尿总排放量在 2015 年后逐渐降低,至 2021 年排放量降低至 1 062 万 t,降幅 46.8%。刘培芳等人研究发现^[18],

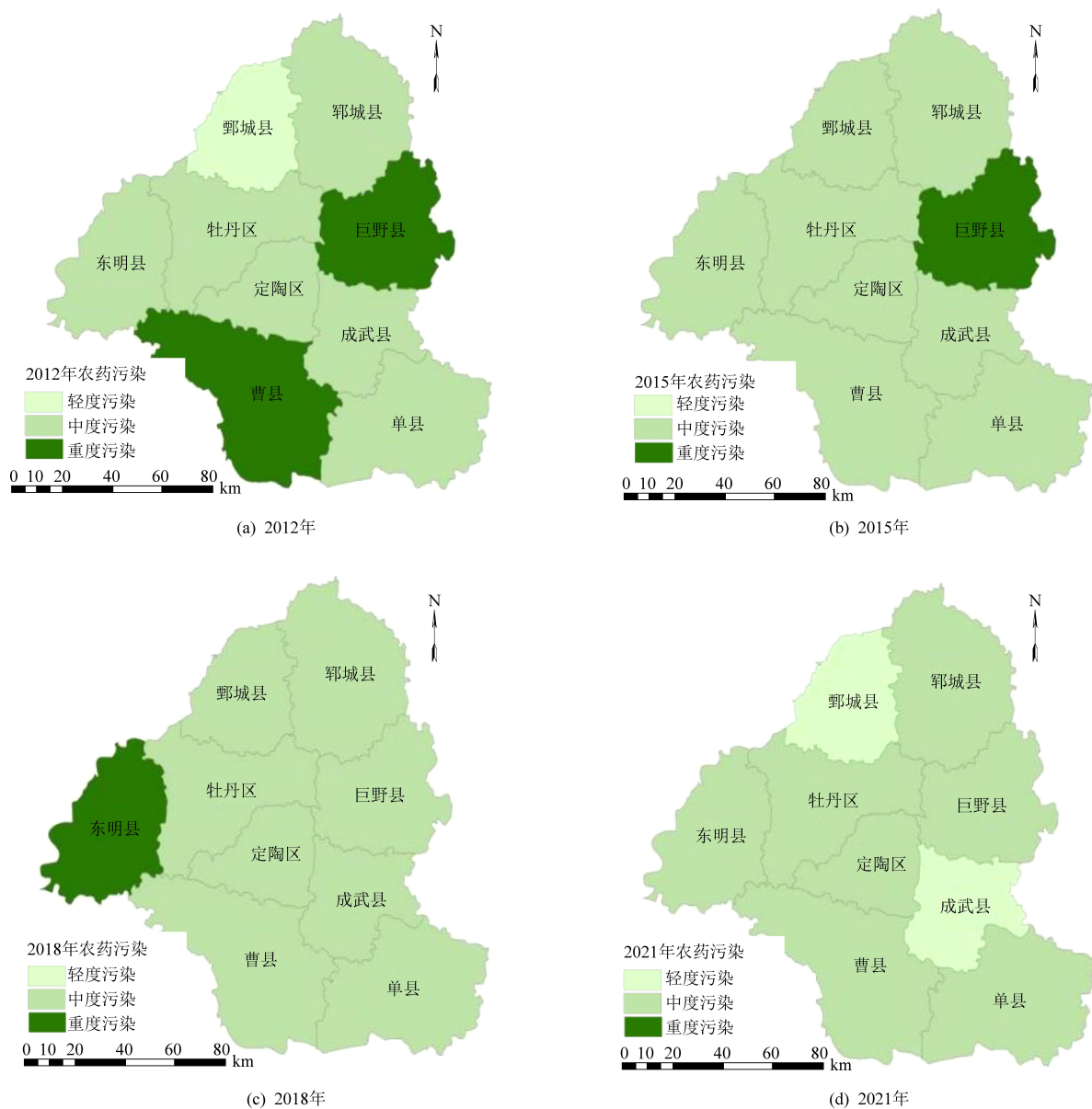


图 3 菏泽市不同年份农药投入强度分布

Fig.3 Distribution of pesticide input intensity in Heze City in different years

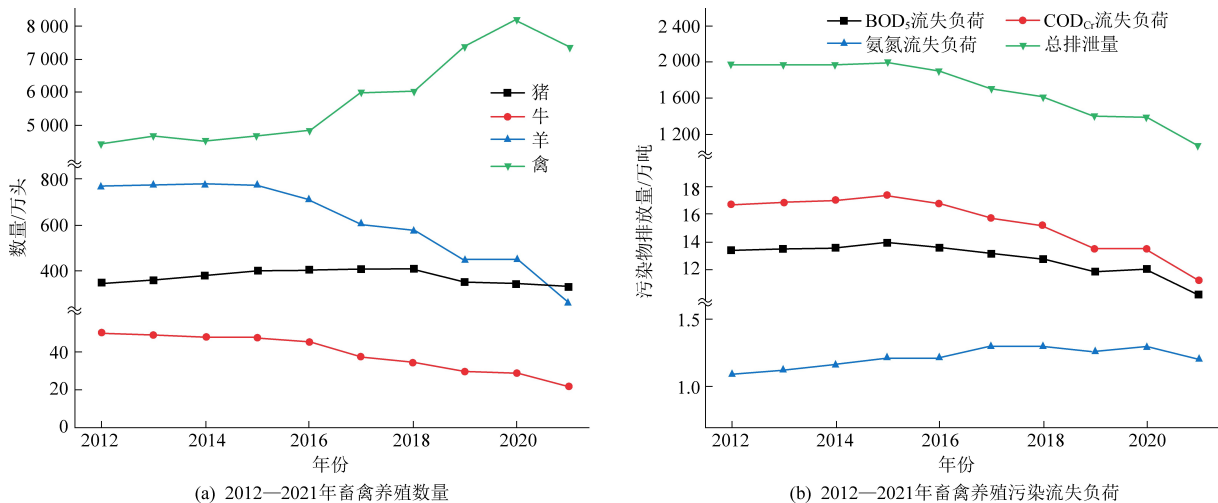


图 4 2012—2021 年菏泽市养殖数量及粪尿排放量

Fig.4 Cultivation quantity,fecal and urine emissions in Heze City from 2012 to 2021

市郊畜禽粪便流失率在 30%~40% 之间,按流失率 30% 计算,2012—2021 年粪便中各污染物流失量结果如图 4。2015 年后,COD_{Cr}、BOD₅ 排放量逐年降低;2016 年后,氨氮排放量受禽类数量影响有所增加。2021 年间,COD_{Cr}、BOD₅、氨氮排放量分别为 10.2 万 t、11.2 万 t、1.2 万 t。

由图 5 可知,菏泽市近年来重度污染区县逐步减少,包括定陶区、曹县在内减少面积 2 815 km²,轻度污染区县增加 3 处,增加面积 3 536 km²。从整体来看,2015 年后,菏泽市畜禽污染呈现逐年降低的趋势。2012—2015 年间曹县和定陶县是重度污染区县,其余区县均为中度污染,2018 年,菏泽全市内不存在畜禽重度污染区

县,直至 2021 年,定陶区、成武县、单县由中度污染转为轻度污染区县,畜禽污染状况进一步好转。从地区分布来看菏泽市畜禽排放强度压力较大的区域分布在北部及西南部,粪尿排放强度相对小的区域位于东南部的成武县及单县。具体分析来看,2021 年成武县猪存栏 21.2 万头、牛存栏 0.5 万头、羊存栏 17.6 万头,猪、牛、羊存栏数在各县中相对较少,属于轻度污染。单县与成武县情况相同,猪、牛、羊存栏数较少,属于轻度污染。2021 年鄆城县猪、牛、羊存栏数分别是 40.1 万头、6.7 万头、31.3 万头,粪尿排放强度为 $1.22 \times 10^4 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,远高于成武县和单县,属于中度污染。

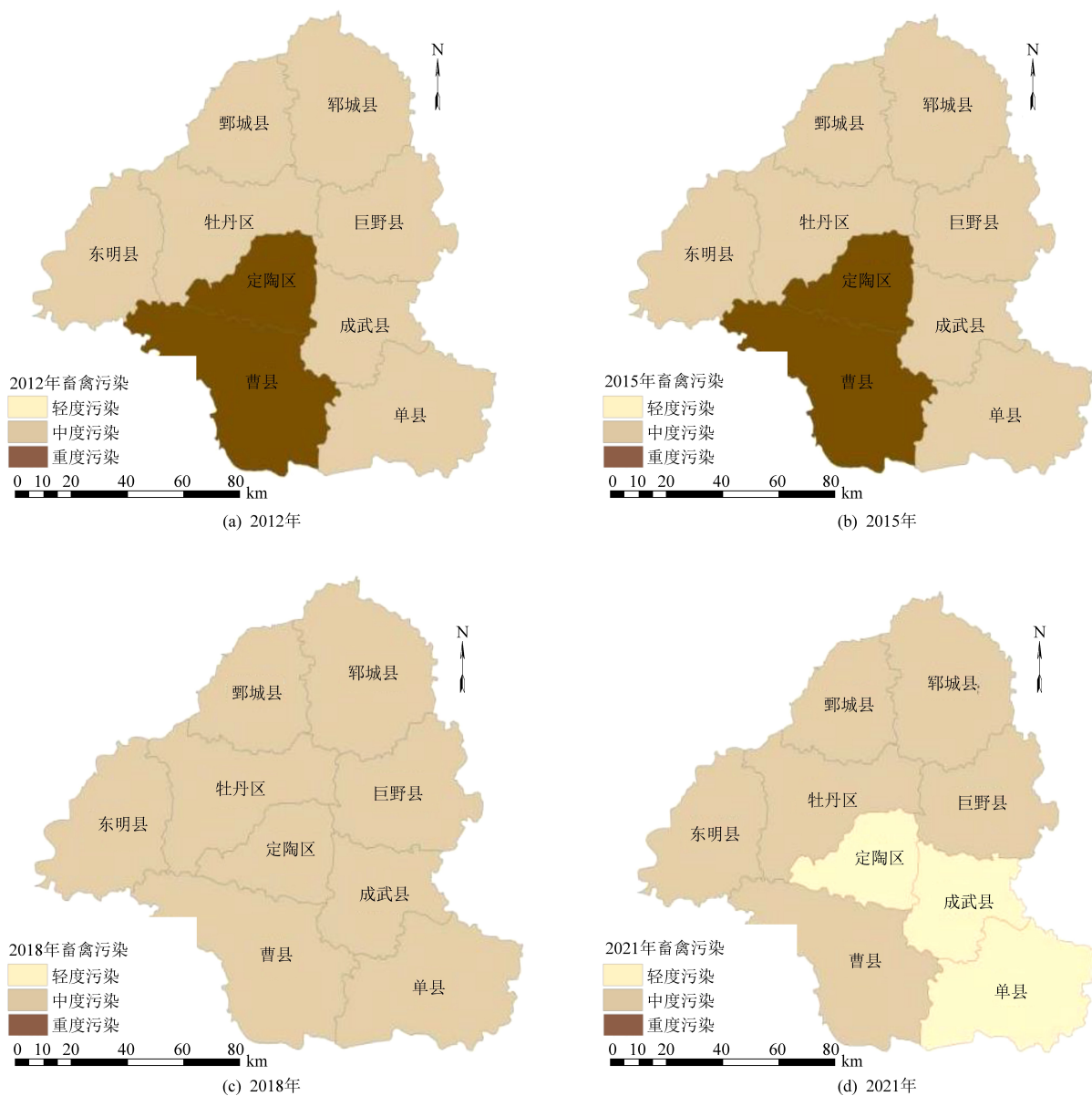


图 5 菏泽市不同年份畜禽粪尿排放强度分布

Fig.5 Distribution of manure and urine emission intensity of livestock and poultry in Heze City in different years

3 讨 论

近十年来,菏泽市面源污染负荷呈现一定阶段化特征,国内经济体制的改革及环保政策的出台是导致污染负荷变化的主要原因。2012—2021年间化肥施用量呈现先增加后减少趋势,2015年后逐渐减少,这与袁旭等人^[21-22]研究一致;2012—2015年随着经济复苏^[23]、城市化进程影响^[24-25]以及有利农业政策的出台^[26],我国化肥污染负荷在2015年前一直处于增长阶段。农药投入量自2014年后开始减少,主要是2015年间,国务院出台了一系列政策,包括《水污染防治行动计划》等,以此为参考,2016年至今菏泽市政府逐步开展化肥减量行动,此后开始逐年制定污染物减量计划,步入化肥、农药减量控制阶段,2017年,菏泽市出台《菏泽市四项举措打响碧水保卫战》,提出从源头上控制化肥和农药使用量,提高利用率,并取得积极成效,2018年后菏泽市化肥农药减量成效明显。菏泽市畜禽养殖汇总牛、羊的数量逐渐减少,牛羊属于大型牲畜,是菏泽市粪尿排泄量的主要来源,尽管其他禽类数量一直在快速增加,但菏泽市畜禽粪尿排放总量在逐步减少。2015年后,菏泽市开展科学划定畜禽养殖禁养区,导致投资较大的牛、羊等大型牲畜数量下降,与陶园等人研究结果相似^[27]。与此同时,当地引进益客集团、重客集团等规模养殖企业,是2016年后禽类数量增加的重要原因。

基于菏泽市面源污染时空分布及变化趋势,对菏泽市农业面源污染问题需针对不同污染来源采取相应的治理措施。相对而言,菏泽市北部、西南部总体污染情况较严峻。在化肥、农药污染的管控方面,应该注重源头上的减量化,加强化肥、农药的监管,结合当地机械化程度,以农业机械驾驶司机为切入点指导施肥数量。在畜禽养殖污染管控方面,增加小规模养殖粪污排放监管力度,逐步完善农业资源化途径,此外要注意生产过程中的新型污染物,如抗生素、微塑料等^[28-29]。

4 结 论

本文选取2012—2021年菏泽市9个县区面板数据,利用GIS技术分析了菏泽市农业面源污染的时间与空间分布特征。

(1)从整体上看,菏泽市由化肥、农药和养殖所造成的农业面源污染均有下降趋势。近十年

来,菏泽市农作物化肥施用强度最低年约 $230.70 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,略高于国际 $225 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 的化肥施用警戒线,整体形势仍需进一步改进。

(2)从空间分布上看,化肥、农药和养殖重度污染地区基本消失。各区县化肥污染基本处于轻度污染范围,高化肥污染区域位于菏泽市西北部;菏泽市西南部、北部农药、养殖大多处于中度污染范围,是菏泽市面源污染的重要来源。

(3)从时间上看,2015年后,菏泽市农业面源污染状况快速好转,化肥和农药的投入量稳步降低,降幅分别达到12.52%和18.91%;近五年来,大型牲口数明显下降,整体粪尿排放强度呈逐年下降趋势,但禽类养殖数量迅速上升,需加强对禽类养殖企业粪便流失的监管。

参考文献

- [1] 中华人民共和国环境保护部, 中华人民共和国国家统计局, 中华人民共和国农业部. 第二次全国污染源普查公报 [EB/OL]. (2022-06-09) [2022-11-08]. https://www.mee.gov.cn/xxgk/2018/xxgk/xxgk01/202006/t20200610_783547.html.
- [2] 王萌, 杨生光, 耿润哲. 农业面源污染防治的监测问题分析 [J]. 中国环境监测, 2022, 38 (2): 61-66.
WANG Meng, YANG Shengguang, GENG Runzhe. Analysis on monitoring and practices of agricultural non-point source pollution control [J]. Environmental Monitoring in China, 2022, 38 (2): 61-66.
- [3] 张友中. 农业面源污染成因及防治措施 [J]. 现代农业科技, 2021 (21): 170-171.
ZHANG Youzhong. Causes and prevention measures of agricultural non-point source pollution [J]. Modern Agricultural Science and Technology, 2021 (21): 170-171.
- [4] 翟紫剑, 苏航, 孟令玺. 农业面源污染的危害与治理 [J]. 生态经济, 2021, 37 (6): 9-12.
ZHAI Zijian, SU Hang, MENG Lingxi. Harm and control of agricultural non-point source pollution [J]. Ecological Economy, 2021, 37 (6): 9-12.
- [5] 王雪莲, 刘波, 赵长森, 等. 北京市面源入河污染物负荷测算方法体系研究 [J]. 环境工程, 2022, 40 (3): 166-172+211.
WANG Xuelian, LIU Bo, ZHAO Changsen, et al. Study on calculation method system of pollutant load from non-point source into rivers in Beijing [J]. Environmental Engineering, 2022, 40 (3): 166-172+211.
- [6] 张立坤, 胡钰. 基于输出系数模型的呼兰河流域非点源污染输出风险分析 [J]. 农业环境科学学报, 2014, 33 (1): 148-154.
ZHANG Likun, HU Yu. Risk assessment of non-point source pollution in Hulan River basin using an output coefficient model [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2014, 33 (1):

- 148-154.
- [7] 贾陈忠, 乔扬源. 基于等标污染负荷法的山西省农业面源污染特征研究 [J]. 中国农业资源与区划, 2021, 42 (3): 141-149.
- JIA Chenzhong, QIAO Yangyuan. The characteristics of agricultural non-point source pollution in shanxi province based on equivalent pollution load method [J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2021, 42 (3): 141-149.
- [8] 于骥, 蒲实, 周灵. 四川省农业面源污染与农业增长的实证分析 [J]. 农村经济, 2016 (9): 56-60.
- YU Ji, PU Shi, ZHOU Ling. Empirical analysis of agricultural non-point source pollution and agricultural growth in Sichuan Province [J]. Rural Economy, 2021, 42 (3): 141-149.
- [9] 陈文胜, 杨顺顺. 农业面源污染的测算与防治——以湖南省为例 [J]. 系统工程, 2015, 33 (6): 91-96.
- CHEN Wensheng, YANG Shunshun. Pollutant calculation, trend analysis, management of agricultural non-point pollution: A case study of Hunan Province [J]. Systems Engineering, 2015, 33 (6): 91-96.
- [10] 尹亚亚. 湖南省农业面源污染治理绩效评价研究 [D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2021: 1-3.
- [11] 廖炜, 李璐, 杨伟, 等. 城镇化过程中的流域面源污染时空变化 [J]. 长江流域资源与环境, 2018, 27 (8): 1776-1783.
- LIAO Wei, LI Lu, YANG Wei, et al. Spatio-temporal change of non-point source pollution loads in the process of urbanization [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2018, 27 (8): 1776-1783.
- [12] 韩书成, 龚亚男, 汤新明. 基于 GIS 的湛江市农业面源污染的时空分析 [J]. 国土资源科技管理, 2018, 35 (6): 1-16.
- HAN Shucheng, GONG Yanan, TANG Xinming. GIS-based spatio-temporal analysis of agricultural non-point source pollution in Zhanjiang City [J]. Scientific and Technological Management of Land and Resources, 2018, 35 (6): 1-16.
- [13] 林兰稳, 朱立安, 曾清萍. 广东省农业面源污染时空变化及其防控对策 [J]. 生态环境学报, 2020, 29 (6): 1245-1250.
- LIN Lanwen, ZHU Lian, ZENG Qingping. Spatial and temporal changes of agricultural non-point source pollution in Guangdong Province and its prevention and control measures [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2020, 29 (6): 1245-1250.
- [14] 叶延琼, 章家恩, 李逸勉, 等. 基于 GIS 的广东省农业面源污染的时空分异研究 [J]. 农业环境科学学报, 2013, 32 (2): 369-377.
- YE Yanqiong, ZHANG Jiaen, LI Mianli, et al. Spatial-temporal variation of agricultural non-point source pollution based on GIS technology in Guangdong Province [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2013, 32 (2): 369-377.
- [15] 葛小君, 黄斌, 袁再健, 等. 近 20 年来广东省农业面源污染负荷时空变化与来源分析 [J]. 环境科学, 2022, 43 (6): 3118-3127.
- GE Xiaojun, HUANG Bin, YUAN Zaijian, et al. Agricultural non-point source pollution load in Guangdong during the past 20 years [J]. Environmental Science, 2022, 43 (6): 3118-3127.
- [16] 邓春梅, 李玉萍, 李茂芬, 等. 基于 GIS 的海南省农业面源污染时空分异研究 [J]. 南方农业学报, 2020, 51 (10): 2580-2587.
- DENG Chunmei, LI Yuping, LI Maofen, et al. Spatio-temporal variation of agriculture non-point source pollution based on GIS technology in Hainan Province [J]. Journal of Southern Agriculture, 2020, 51 (10): 2580-2587.
- [17] 郝守宁, 宗永臣, 董飞. 基于 GIS 的尼洋河流域农业面源污染负荷分布特征 [J]. 灌溉排水学报, 2018, 37 (7): 106-111.
- HAO Shouning, ZONG Yongchen, DONG Fei. Using GIS to analyze spatial distribution of contaminants emanating from nonpoint pollution source in Niyang River basin [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2018, 37 (7): 106-111.
- [18] 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 (5): 456-460.
- LIU Peifang, CHEN Zhenlou, XU Shiyuan, 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 (5): 456-460.
- [19] 姚春霞. 上海市郊旱作农田化肥施用的环境影响研究 [D]. 上海: 华东师范大学, 2005: 112-125.
- [20] Cao Haichao, Yue Chen, Daxia Zhang, et al. Octaphenyl polyoxyethylene regulates the flexibility of pyraclostrobin-loaded soft microcapsules by interfacial polymerization for better foliar adhesion and pesticide utilization [J]. Chemical Engineering Journal, 2022, 439: 135805.
- [21] Zhang J T, Tian H Q, Shi H, et al. Increased greenhouse gas emissions intensity of major croplands in China: Implications for food security and climate change mitigation [J]. Global Change Biology, 2020, 26 (11): 6116-6133.
- [22] 袁旭, 张家安, 常飞杨, 等. 我国肥料施用现状及化肥减量研究进展 [J]. 农业与技术, 2022, 42 (18): 20-23.
- YUAN Xu, ZHANG Anjia, CHANG Feiyang, et al. Current situation of fertilizer application and research progress of fertilizer reduction [J]. Agriculture and Technology, 2022, 42 (18): 20-23.
- [23] Zhang T, Ni J P, Xie D T. Assessment of the relationship between rural non-point source pollution and economic development in the Three Gorges Reservoir Area [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2016, 23 (8): 8125-8132.
- [24] Shao S, Li B L, Fan M T, et al. How does labor transfer affect environmental pollution in rural China? Evidence from a survey [J]. Energy Economics, 2021, 102: 105515.
- [25] Lu H, Xie H L. Impact of changes in labor resources and transfers of land use rights on agricultural non-point source

- pollution in Jiangsu Province, China [J]. Journal of Environmental Management, 2018, 207: 134–140.
- [26] Zhang Y J, Yu Q. Identification of current research intensity and influence factors of agricultural nitrogen loss from cropping systems [J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 276: 123308.
- [27] 陶园, 徐静, 任贺靖, 等. 黄河流域农业面源污染时空变化及因素分析 [J]. 农业工程学报, 2021, 37 (4): 257–264.
- TAO Yuan, XU Jing, REN Hejing, et al. Spatiotemporal evolution of agricultural non-point source pollution and its influencing factors in the Yellow River basin [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2021, 37 (4): 257–264.
- [28] Oberoi A S, Jia Y Y, Zhang H Q, et al. Insights into the fate and removal of antibiotics in engineered biological treatment systems: A critical review [J]. Environmental Science & Technology, 2019, 53 (13): 7234–7264.
- [29] Huang Y, Liu Q, Jia W Q, et al. Agricultural plastic mulching as a source of microplastics in the terrestrial environment [J]. Environmental Pollution, 2020, 260: 114096.

(上接 143 页)

- WAN Jinbao, FU Yu, DENG Mi, et al. Treatment of hogpen biogas slurry by A/O – SBBR – oxidation pondconstructed wetlands [J]. Industrial Water Treatment, 2017, 37 (8): 101–104.
- [10] 胡秀云. BioDopp 工艺在城镇污水处理厂中的应用研究 [D]. 武汉: 武汉科技大学, 2020: 3–10.
- [11] 田海宁, 周成金, 何文杰. 生物倍增工艺实际生产运行工况优化探讨 [J]. 供水技术, 2012, 6 (6): 23–26.
- TIAN Haining, ZHOU Chengjin, HE Wenjie. Discussion on operation optimization of bio-doubling process for practical application [J]. Water Technology, 2012, 6 (6): 23–26.
- [12] 钟明珠, 王全, 王亮, 等. 厌氧消化+A²/O+氧化塘处理猪场粪污水研究 [J]. 中国沼气, 2016, 34 (3): 49–52.
- ZHONG Mingzhu, WANG Quan, WANG Liang, et al. Treatment of swine slurry by anaerobic digestion + A²/O + oxidation pond [J]. China Biogas, 2016, 34 (3): 49–52.
- [13] 邢超, 李红娟, 李殿国, 等. SBR 与生物倍增技术处理丙烯酸污水的对比分析 [J]. 弹性体, 2011, 21 (5): 67–69.
- XING Chao, LI Hongjuan, LI Dianguo, et al. Technical comparison of SBR and Bio-Dopp on disposal of acrylonitrile waste water [J]. China Elastomerics, 2011, 21 (5): 67–69.
- [14] 刘丹. 生物倍增污水处理工艺与 SBR 工艺处理化纤废水的比较 [J]. 科学中国人, 2015 (7): 120–121.
- LIU Dan. Comparison between biological multiplication wastewater treatment process and SBR process for chemical fiber wastewater treatment [J]. Scientific Chinese, 2015 (7): 120–121.
- [15] 曾木海. 污水处理厂污水深度处理工艺综述与案例分析 [J]. 净水技术, 2021, 40 (5): 75–80.
- ZENG Muhai. Overview and case analysis on advanced treatment process in wastewater treatment plant [J]. Water Purification Technology, 2021, 40 (5): 75–80.