

黄奔, 刘君, 朱彩琳, 等. 上海市农业面源污染的年际变化趋势分析[J]. 净水技术, 2025, 44(2): 124-131,180.

HUANG B, LIU J, ZHU C L, et al. Analysis of interannual variation trends of agricultural non-point source pollution in Shanghai City[J]. Water Purification Technology, 2025, 44(2): 124-131,180.

上海市农业面源污染的年际变化趋势分析

黄奔*, 刘君, 朱彩琳, 戚浩强, 吴军新

(上海市水文总站, 上海 200232)

摘要 【目的】为研究近年来上海市农业面源污染的年际变化趋势和规律,分析评估农业面源污染治理成效,提出下一阶段农业面源污染防治对策,为上海农业面源污染防治、实施乡村振兴提供理论依据。【方法】文章通过借鉴清单分析法和等标污染负荷法,研究2011年—2021年上海市农业面源污染污染物排放总量和等标污染负荷量的年际变化趋势,分析了畜禽养殖业、种植业、水产养殖业以及农村生活排污产生的面源污染情况,并核算了各行业和污染物的排放强度。【结果】结果显示:近10多年来,上海市化学需氧量(COD_{Cr})、氨氮、总磷(TN)、总氮(TP)排放量分别下降了53.55%、33.25%、57.69%、57.89%;等标污染负荷量大小排序为:TP > TN > COD_{Cr} > 氨氮;畜禽养殖业、种植业和农村生活排污的排放强度分别下降76.95%、25.92%和19.91%,而水产养殖业污染物排放强度上升了6.99%。当前,COD_{Cr}和氨氮的主要来源是农村生活排污,TN的主要污染来源是种植业和农村生活排污,TP的主要污染来源是种植业。【结论】因此,种植业的TP和TN的排放控制,农村生活排污的COD_{Cr}、氨氮和TN的排放控制,以及水产养殖业的排放强度控制应作为下一阶段农业面源污染控制的重点。

关键词 清单分析法 等标污染负荷 农业面源污染 年际变化 上海

中图分类号: X71 文献标志码: A 文章编号: 1009-0177(2025)02-0124-09

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2025.02.014

Analysis of Interannual Variation Trends of Agricultural Non-Point Source Pollution in Shanghai City

HUANG Ben*, LIU Jun, ZHU Cailin, QI Haoqiang, WU Junxin

(Shanghai Hydrological Administration, Shanghai 200232, China)

Abstract [Objective] In order to study the interannual change trends and laws of agricultural non-point source pollution in Shanghai in recent years, analyze and evaluate the effectiveness of agricultural non-point source pollution control, put forward the next stage prevention and control of agricultural non-point source pollution in Shanghai, so as to provide a theoretical basis for the prevention and control of agricultural non-point source pollution in Shanghai and the implementation of rural revitalization. [Methods] By using inventory analysis approach and equal-standard pollution loading approach, this paper studied the interannual variation trend of the total amount of agricultural non-point source pollution pollutants and the equal-standard pollution loading in Shanghai from 2011 to 2021, analyzed the non-point source pollution of livestock breeding, agricultural planting, aquaculture and rural domestic wastewater, and calculated the emission intensity of pollutants and industry. [Results] The results showed that the emissions of COD_{Cr}, ammonia nitrogen, TN and TP in Shanghai had decreased by 53.55%, 33.25%, 57.69% and 57.89% respectively in the past 10 years. The order of equal-standard pollution loading was TP > TN > COD_{Cr} > ammonia nitrogen. The emission intensity of livestock and poultry breeding, agricultural planting and rural domestic wastewater decreased by 76.95%, 25.92% and 19.91%, while the emission intensity of aquaculture increased by 6.99%. At present, the main source of COD_{Cr} was rural domestic wastewater discharging, the main source of TN was agricultural planting and rural domestic wastewater discharging, and the main source of TP was agricultural planting. [Conclusion] Therefore, the emission control of TP and TN in planting industry, the emission control of COD_{Cr}, ammonia nitrogen and TN in rural domestic wastewater, and the emission intensity control of aquaculture should be the focus of agricultural non-

[收稿日期] 2024-01-15

[通信作者] 黄奔(1993—),男,硕士,研究方向为水环境治理,E-mail:453443072@qq.com。

point source pollution control in next stage.

Keywords inventory analysis approach equal-standard pollution load agricultural non-point source pollution interannual variation Shanghai

近年来,我国的农业绿色发展成效显著,“绿水青山就是金山银山”的发展理念已深入人心。但是,农业领域的发展仍然面临着生态环境与资源条件的双重“紧箍咒”。作为农业绿色发展的重要突破口,农业面源污染防治工作越来越受到社会的格外关注与重视。农业面源污染业已成为影响和制约我国农业高质量发展的关键因素。当前,农业面源污染对生态环境的影响已成为一个全球性问题,对水体质量、生态健康和人类社会都造成了严重威胁^[1],其主要危害包括:导致地表水的水质恶化、引起水体富营养化、水生生物受害、对人类健康构成威胁、水量减少、土壤侵蚀以及生态系统破坏等。2017年,《第二次全国污染源普查公报》显示,农业已超过工业成为我国第一大面源污染来源。

与此同时,农业面源污染问题还是我国广大农村地区目前面对的最大环境问题^[2-3]。相较点源污染,农业面源污染源分布在农村地区,具有影响因子多、分布范围广、潜伏周期长、危害大等特点^[4],主要包括畜禽养殖业、种植业、水产养殖业、农村生活排污等。近年来,经济比较发达地区对农业面源污染问题越来越关注,很多学者开展了大量的研究工作。通过文献调研发现,2016年,姜滢等^[5]研究表明,2004年—2015年苏州农业面源污染排放量减少,但污染来源却逐渐复杂化;2020年,赵吉睿等^[6]研究表明,畜禽养殖及种植业是天津的主要污染来源;2023年,燕琳等^[7]研究表明,同样处于珠江三角洲地区农业生产投入强度呈上升趋势,面对的农业面源污染问题依旧十分严峻。

上海地处河流高度发育的平原河网地区,具有年降雨量大、地下水位高等特征,且大多区域的经济水平较高。在传统农业和现代产业的相互影响下,外来务工人员集聚,上海农业面源污染问题更加复杂、多变,且水环境和生态对农业面源污染的响应更加敏感^[8]。

常见的农业面源污染的分析方法主要包括:综合调查、清单分析、输出系数法、水环境功能区划、地理信息系统(GIS)等方法。其中农业面源污染清单

分析法是指将各类农业污染分解为可合理计量的最小独立单元,并以此为基础,建立单元、污染产生量和污染排放量之间的关系的方法^[9]。相较于其他分析方法,该方法对参数要求低,在实际应用中具有操作性强,数据获取容易以及权威性较好的优势^[10],在缺乏试验条件的情况下,该方法能够较为全面、准确地反映研究区域的污染特征^[11]。故而,本文利用清单分析法和等标污染负荷法,核算了2011年—2021年上海全市农业和农村污染物化学需氧量(COD_{Cr})、氨氮、总氮(TN)和总磷(TP)的排放量、等标污染负荷量以及排放强度,从行业和污染源等角度分析年际变化特点,识别筛选了农村面源污染的重点源,以期今后上海市农业面源污染治理和控制提供借鉴。

1 研究对象及数据来源

1.1 研究对象概况

上海是我国最大的经济中心城市和长江经济带的“龙头”站,同时还是我国城乡区域经济高质量发展的示范地。作为长江三角洲的一部分,上海地处长江入海口和太湖流域东缘,面向太平洋,常年气候温润,属北亚热带季风性气候。上海雨量充沛,2011年—2021年市年降雨量均超1 000 mm。上海河湖众多,水网密布,境内水域面积为697 km²,约占全市总面积的11%。

1.2 数据来源

本文所有农业活动和人居活动涉及基础数据均来源于2012年—2022年《上海市统计年鉴》。

1.3 排放系数

根据《全国污染源普查公报》的农业源产排污系数手册的定义,畜禽规模化养殖排污系数是指养殖场在正常生产和管理条件下,单个畜禽产生的原始污染物未资源化利用的部分经处理设施消减或未经处理利用而直接排放到环境中的污染量。种植业氮磷排放系数指土壤和肥料中的氮磷在降雨或灌溉水作用下溶解或悬浮于径流水中,随径流迁移出田块而导致的农田氮磷流失的发生量,分为主要作物播种的排放(流失)系数和园地排放(流失)系数两部分。水产养殖排污系数是指在正常养殖生产条

件下,养殖生产 1 t 水产品所产生的污染物质中,经不同排放渠道直接排放到湖泊、河流及海洋等(不包括排放到农田及水产养殖再利用等部分)外部水体环境中的污染物质。本文各行业的污染物质

COD_{Cr}、氨氮、TN 和 TP 的排放系数主要参考 2017 年《全国污染源普查公报》的农业源产排污系数手册及相关文献资料^[12-13]等。具体排放系数的数值如表 1 所示。

表 1 污染物排放参数
Tab. 1 Discharge Parameters of Pollutants

参数名称	类型	COD _{Cr}	氨氮	TN	TP
畜禽规模化养殖排污系数/[(kg·头 ⁻¹) 或 (kg·羽 ⁻¹)]	生猪	2.052 7	0.055 6	0.227 9	0.035 6
	奶牛	47.308 7	0.080 5	2.392 1	0.186 6
	羊	4.400 0	0.032 9	2.280 0	0.450 0
	家禽	1.165 0	0.002 5	0.275 0	0.115 0
种植业氮磷排放系数/(kg·hm ⁻²)	主要作物播种过程	-	0.847	6.055	0.767
	园地	-	0.617	10.986	0.179
水产养殖排污系数/(kg·t ⁻¹)	-	34.446	0.655	2.299	0.358
农村生活污水排污系数/(g·人 ⁻¹ ·d ⁻¹)	-	43.1	2.7	4.61	0.31

注:1 hm² = 10 000 m²。

1.4 分析方法

1.4.1 清单分析

本文将上海作为研究对象,结合经典 Jonhes 输出系数模型^[14],对 2011 年—2021 年不同污染账户的 COD_{Cr}、氨氮、TN、TP 的排放量进行计算,并以此分析农业面源污染程度情况以及主要污染物的年际变化趋势。具体分析计算公式如式(1)~式(5)。

$$Q_i = Q_{li} + Q_{ri} + Q_{ai} + Q_{di} \quad (1)$$

$$Q_{li} = X_{Qj} \times \alpha_{ij} \quad (2)$$

$$Q_{ri} = A_g \times e_i \quad (3)$$

$$Q_{ai} = Y_z \times \delta_i \quad (4)$$

$$Q_{di} = N_p \times \varepsilon_i \times 365 \quad (5)$$

其中: Q_i ——农业面源污染 i 的排放量,kg;
 Q_{li} ——畜禽养殖污染 i 的排放量,kg;
 Q_{ri} ——种植业污染 i 的排放量,kg;
 Q_{ai} ——水产养殖污染 i 的排放量,kg;
 Q_{di} ——农村生活污染 i 的排放量,kg;
 X_{Qj} ——畜禽养殖类型 j 的基数,头(羽);
 α_{ij} ——畜禽养殖类型 j 的基数的污染物 i 排放系数,kg/头或 kg/羽;
 A_g ——农作物总播种面积,hm²;
 e_i ——农作物种植过程中污染物 i 排放(流失)系数,kg/hm²;
 Y_z ——水产养殖的产量,t;
 δ_i ——水产养殖业的污染物 i 排污系数;

N_p ——农村常住人口数,人;

ε_i ——污染物 i 的人均排污系数,g/(人·d)。

1.4.2 等标污染负荷法

本文引入采用等标污染负荷^[15]、等标污染负荷比^[11],以同尺度评价农业面源污染物排放核算结果,具体计算如式(6)。

$$P_i = \frac{Q_i}{C_{io}} \times 10^{-3} \quad (6)$$

其中: P_i ——农业面源污染物 i 的等标污染负荷量,m³;

Q_i ——农业面源污染 i 的排放量,kg;

C_{io} ——污染物 i 的Ⅲ类水评价标准的上限值(COD_{Cr} ≤ 20 mg/L,氨氮 ≤ 1.0 mg/L,TN ≤ 1.0 mg/L,TP ≤ 0.2 mg/L),参考《中华人民共和国地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)。

1.4.3 排放强度核算

$$E_{li} = \frac{Q_i}{A_L} \quad (7)$$

其中: E_{li} ——农业面源污染排放强度,kg/hm²;

A_L ——研究区域耕地面积,hm²。

2 结果与分析

根据 2012 年—2022 年《上海市统计年鉴》公布的数据,计算污染物的年际排放量,并以此为基础,

分析评价各行业以及污染物排放特征。通过等标污染负荷法,核算上海市历年各行业以及污染物的等标负荷,进而比较分析行业的污染贡献率。最后,通过核算 2011 年和 2021 年的各行业及污染物排放强度,分析研究污染物变化规律,并结合数据结果,提出针对性的意见建议。

2.1 上海市污染账户年际排放特征

由图 1 可知,2011 年—2021 年上海市各污染物排放总量均呈现下降趋势,通过对下降趋势进行线性拟合发现,关系线均拟合良好 ($R^2 > 0.94$)。2011 年—2021 年,上海市 COD_{Cr} 排放量由 2011 年的

11.69 万 t 下降到 2021 年的 5.43 万 t,降幅为 53.55%;氨氮排放量从 4 090 t 下降到 2 730 t,降幅为 33.25%;TN 排放量从 2.60 万 t 下降到 1.10 万 t,降幅为 57.69%;TP 排放量从 1.14 万 t 下降到 0.48 万 t,降幅为 57.89%。根据《上海市环境状况公报》数据,2021 年,全市主要河湖断面中,优Ⅲ类水质断面占 80.6%,较 2014 年上升了 55.9%。这与文章分析的排放量降幅基本吻合,也从侧面佐证了农业面源污染物排放总量的下降,对地表水环境质量的跨越式提升起到推动作用。

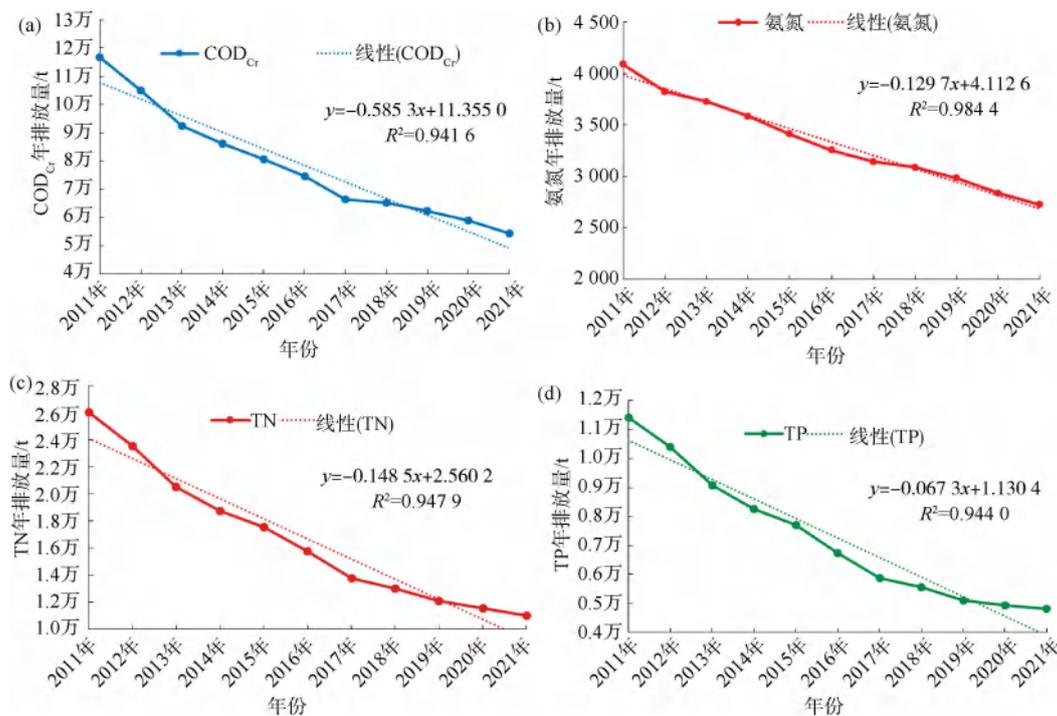


图 1 (a) COD_{Cr} 、(b) 氨氮、(c) TN、(d) TP 排放总量变化趋势

Fig. 1 Trend of Total Amount of (a) COD_{Cr} ; (b) Ammonia Nitrogen; (c) TN; and (d) TP

各行业污染物排放量如图 2~图 5 所示,从图中

可以看出,2011 年—2021 年,畜禽养殖业、种植业、

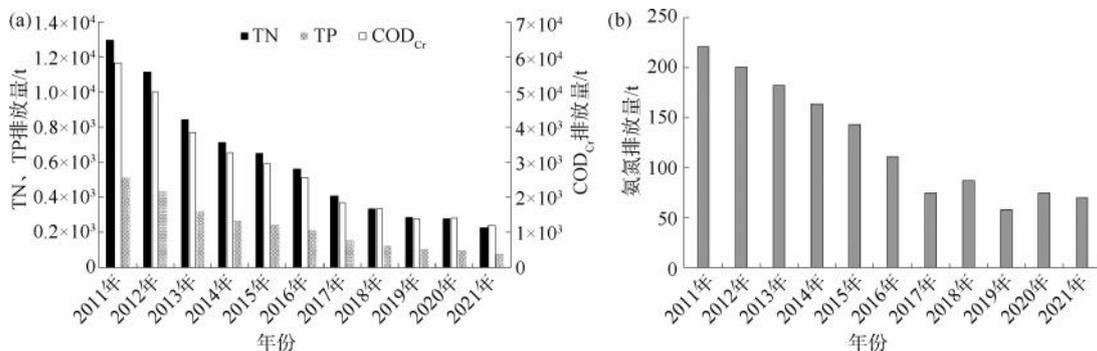


图 2 畜禽养殖业污染物排放量

Fig. 2 Pollutants Discharge of Livestock and Poultry Breeding

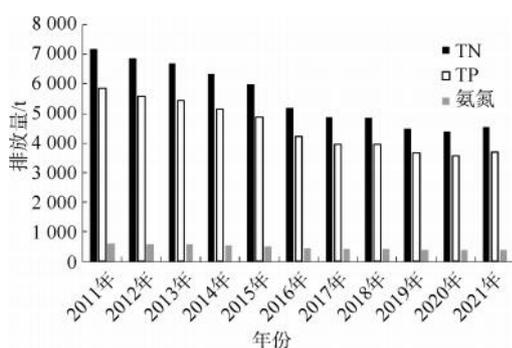


图3 种植业污染物排放量

Fig. 3 Pollutants Discharge of Agricultural Planting

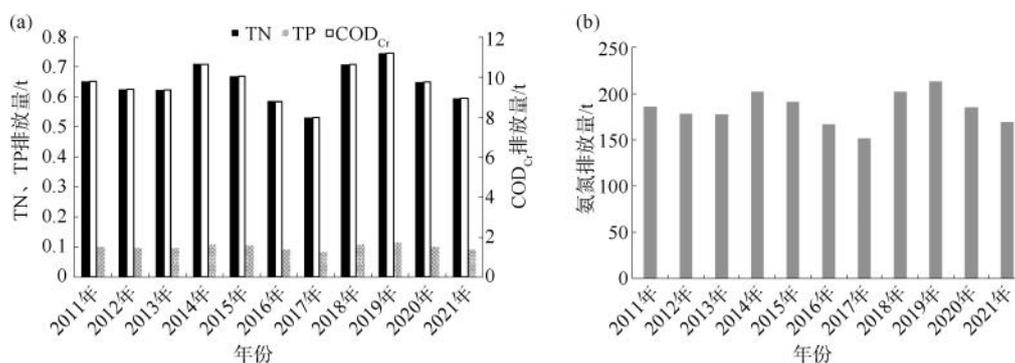


图4 水产养殖业污染物排放量

Fig. 4 Pollutants Discharge of Aquaculture

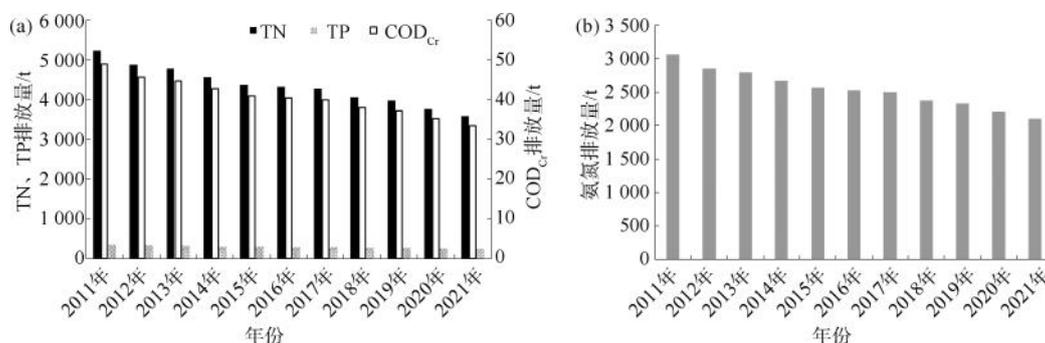


图5 农村生活污染物排放量

Fig. 5 Pollutants Discharge of Rural Domestic Sewage

构调整,从而反映到了氨氮排放量上。种植业排放总量(含 TN、TP、氨氮)从 1.30 万 t 下降到 0.82 万 t,降幅为 36.92%;农村生活排污的排放总量(含 COD_{Cr}、氨氮、TN、TP)从 5.45 万 t 下降到 3.73 万 t,降幅为 31.56%。水产养殖业污染物排放量呈波动态势,其产生的 COD_{Cr}、氨氮、TN 及 TP 排放量分别围绕 9 670、175、650 t 和 100 t 上下波动。

2.2 农业面源污染等标污染负荷分析

如图 6 所示,2011 年—2012 年上海地区农业面源污染等标污染负荷量排序为 TP > TN >

农村生活排污产生的各主要污染物排放总量均呈显著下降趋势。其中,畜禽养殖业总排放量由 2011 年的 7.62 万 t 下降到 2021 年的 1.50 万 t,降幅为 80.31%;值得注意的是,畜禽养殖业的氨氮排放量在 2011 年—2017 年一直处于稳定下降趋势中,2017 年后趋于稳定。出现该现象的原因可能是上海市实行《畜禽养殖业污染物排放标准》(DB31/1098—2018)标准后^[16],一方面,主要大类畜禽品种养殖量得到大幅缩减;另一方面,排污严重且处理设施跟不上的畜禽场进行退养处理,造成了养殖的结

COD_{Cr}>氨氮。畜禽养殖业和农村生活排污产生的 COD_{Cr} 等标污染负荷量呈现显著下降趋势,且畜禽养殖业污染下降最多,水产养殖产生的 COD_{Cr} 等标污染负荷量整体趋于稳定。其中,2011 年—2012 年畜禽养殖业产生的 COD_{Cr} 等标污染负荷量最大。从 2013 年开始,农村生活排污产生的 COD_{Cr} 等标污染负荷量为三者中最多。氨氮等标污染负荷量中,虽然农村生活排污产生量最大,但其一直呈现下降趋势,且其下降绝对量占总下降量占比的贡献最大。这主要得益于上海实施了农

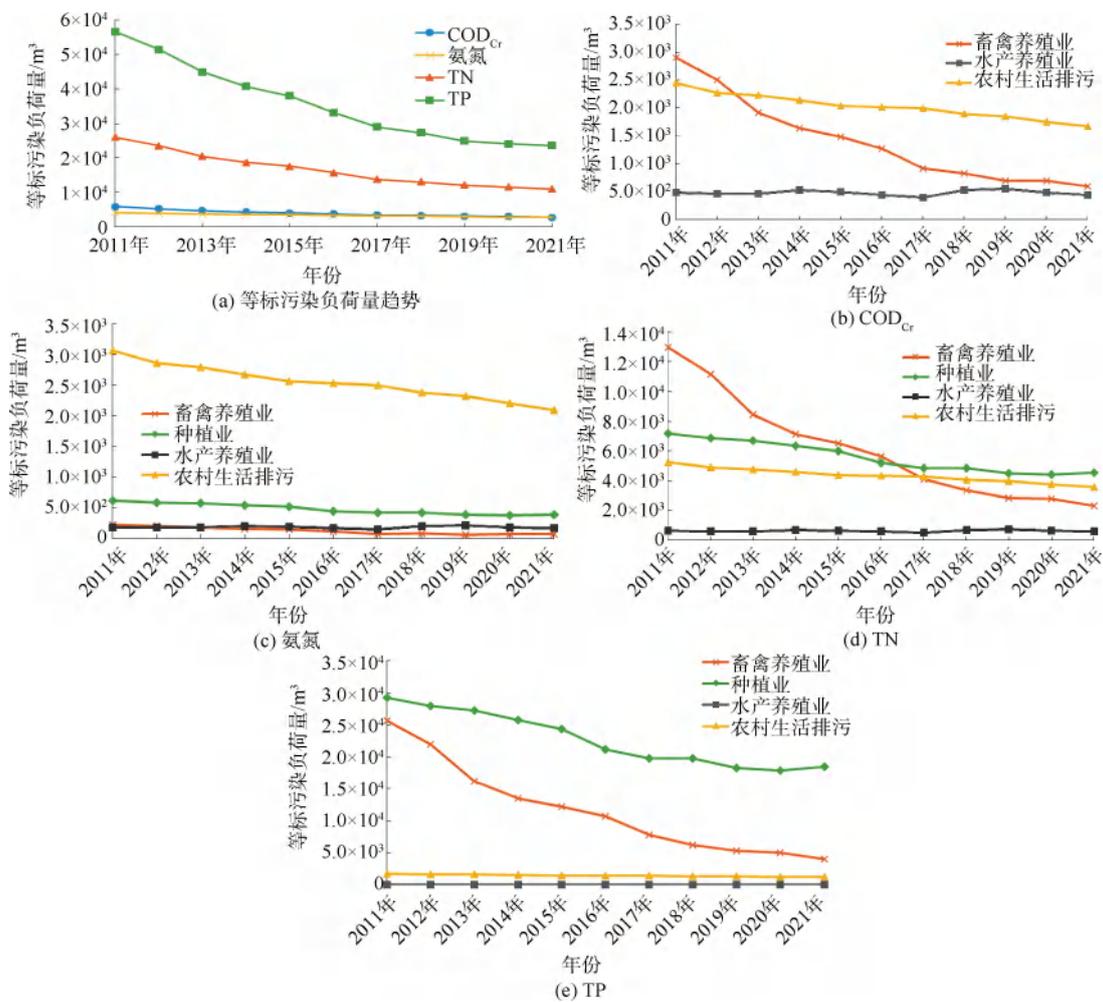


图6 COD_{Cr}、氨氮、TN和TP的等标污染负荷量变化趋势

Fig. 6 Trend of Equal-Standard Pollution Load of COD_{Cr}, Ammonia Nitrogen, TN and TP

村生活污水处理工程^[17],开展了分散式处理工作。畜禽养殖业、种植业和农村生活排污产生的TN等标污染负荷量呈现下降趋势,其中畜禽养殖业的下降最为显著,另外两者趋势较缓。水产养殖业产生的TN等标污染负荷量整体趋于稳定。2011年—2016年,各污染源产生TN等标污染负荷量从大到小排序依次为:畜禽养殖业、种植业、农村生活排污、水产养殖业。随后,从2017年开始,各污染源产生TN等标污染负荷量大小排序更新为:种植业、农村生活排污、畜禽养殖业、水产养殖业。近10年来,种植业和畜禽养殖业产生的TP等标污染负荷量呈现下降趋势,其中,畜禽养殖业的下降程度更为明显。2011年两者产污相当,而到2021年前者是后者的4倍左右,种植业是产生TP等标污染负荷量的最主要污染源。

由图7可知,2011年—2021年上海地区COD_{Cr}的主要来源是畜禽养殖和农村生活排污,水产养殖占比较低。值得注意的是,2015年开始,农村生活排污成为COD_{Cr}等标污染负荷量的主要贡献者,贡献率超50%,2021年达到61.6%。从氨氮等标污染负荷量角度来看,排污结构无显著变化,农村生活排污仍旧是当前主要污染源,污染贡献率多年处于75%以上,说明农村地区的氨氮的减排,工作重点仍应该放置在农村生活排污治理上。TN的主要来源是畜禽养殖业、种植业和农村生活排污,水产养殖占比较低。与2011年相比,2021年畜禽养殖业的TN等标污染负荷贡献率从49.77%下降到20.85%,同期,种植业TN等标污染负荷贡献率从27.61%上升到41.26%。TP的主要来源是种植业和畜禽养殖业,而农村生活排污和水产养殖占比很低。其中,与

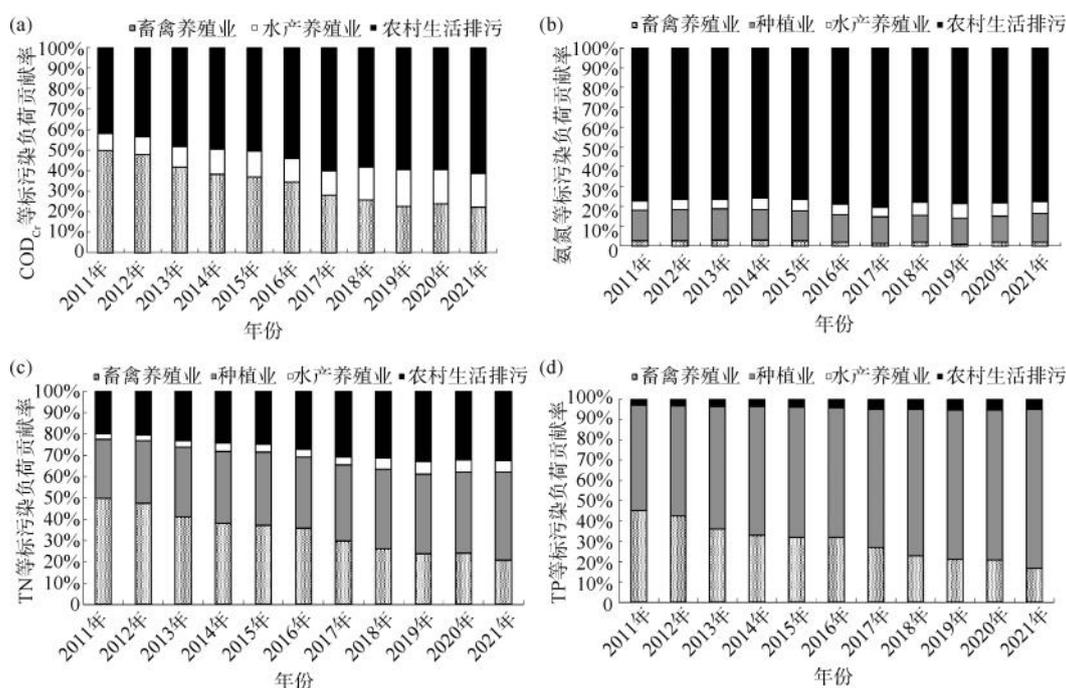


图7 不同污染源等标污染负荷贡献率

Fig. 7 Equal-Standard Pollution Load Contribution Rate of Different Pollutants

2011年相比,2021年畜禽养殖业的TP等标污染负荷贡献率从45.30%下降到16.86%,而种植业TP等标污染负荷贡献率从51.58%上升到78.04%。因此,种植业和农村生活排污是上海市的主要污染来源,与沿海发达区域的珠江三角洲地区和天津市有明显不同。

2.3 排放强度核算

由表2可知,2021年上海地区农业面源污染物总排放强度为433.04 kg/hm²,比2011年下降了46.75%,其中,COD_{Cr}、TN和TP污染物排放强度分别下降45.57%、50.42%、50.52%。从行业角度看,相较2011年,畜禽养殖业、种植业和农村生活排污的排放强度分别下降76.95%、25.92%和19.91%。值得警惕的是,水产养殖业的污染物排放强度有小幅上升,幅度为6.99%。

3 结论及建议

2011年—2021年,上海市农业面源污染排放呈现如下特征。(1)从污染物总量来看,COD_{Cr}、氨氮、TN和TP的总排放量均呈现下降趋势,降幅为依次为53.55%、33.25%、57.69%、57.89%。(2)从污染源角度看,COD_{Cr}和氨氮的主要来源是农村生活排污,TN的主要来源是种植业和农村生活排污,TP的主要来源是种植业。(3)从行业来看,畜禽养殖业、

表2 2011年和2021年农业面源污染物排放强度

Tab. 2 Emission Intensity of Agricultural Non-Point Source Pollution in 2011 and 2021

项目		2011年	2021年
污染物	耕地面积*/hm ²	189 759	161 978
	COD _{Cr} /(kg·hm ⁻²)	615.84	335.21
	TN/(kg·hm ⁻²)	137.20	68.03
	TP/(kg·hm ⁻²)	60.23	29.80
行业	畜禽养殖业/(kg·hm ⁻²)	401.70	92.61
	种植业/(kg·hm ⁻²)	68.68	50.88
	水产养殖业/(kg·hm ⁻²)	55.47	59.35
	农村生活排污/(kg·hm ⁻²)	287.42	230.20

注:*表示2011年耕地面积来源于上海市第二次全国国土调查主要数据公报,2021年耕地面积来源于上海市第三次全国国土调查主要数据公报。

种植业和农村生活排污的总排放量降幅依次为80.31%、36.92%和31.56%,水产养殖业污染物排放量呈波动态势。(4)上海市农业面源污染COD_{Cr}、氨氮、TN和TP的等标污染负荷量也呈下降趋势,其大小排序为:TP > TN > COD_{Cr} > 氨氮。(5)从排放强度来看,仅水产养殖业污染物排放强度有所上升。以上结论与上海市水环境改善情况相符。实践证明,上海市为控制农业面源污染而开展的畜禽养殖

业污染物排放标准提升、农村生活污水处理工程等工作是卓有成效的。

针对上述结论提出 3 点建议,以期面源污染问题得到进一步改善:一是要全面推进农药化肥的减量增效,推广精准施肥,以控制种植业的 TP、TN 排放,尤其是对 TP 的控制;二是要加强农业基础设施建设,扩大农村生活污水治理覆盖面,持续加强农村生活污水的治理,以控制 COD_{Cr}、氨氮及 TN 的排放;三是要推行绿色健康水产养殖政策,鼓励发展循环水养殖等科技赋能高的水产养殖技术,促进水产养殖业的转型升级和绿色发展,从而降低水产养殖业的排放强度。

参考文献

- [1] 程敏. 农业面源污染对农村地表水的影响与对策[J]. 化工设计通讯, 2023, 49(12): 185-187.
CHENG M. The impact and countermeasures of agricultural non-point source pollution on rural surface water [J]. Chemical Engineering Design Communications, 2023, 49(12): 185-187.
- [2] 闵继胜, 孔祥智. 我国农业面源污染问题的研究进展[J]. 华中农业大学学报(社会科学版), 2016, 122(2): 59-66.
MIN J S, KONG X Z. Research development of agricultural non-point source pollution in China [J]. Journal of Huazhong Agricultural University (Social Sciences Edition), 2016, 122(2): 59-66.
- [3] 张中华. 安徽省农业经济增长与农业面源污染关系的实证研究[J]. 山西农业大学学报(社会科学版), 2015, 14(4): 344-350.
ZHANG Z H. An empirical research of the relationship between agricultural economic growth and agricultural non-point source pollution in Anhui Province [J]. Journal of Shanxi Agricultural University (Social Sciences Edition), 2015, 14(4): 344-350.
- [4] 张维理, 徐爱国, 冀宏杰, 等. 中国农村面源污染形势估计及控制对策Ⅲ. 中国农村面源污染控制中存在问题分析[J]. 中国农业科学, 2004, 37(7): 1026-1033.
ZHANG W L, XU A G, JI H J, et al. Estimation of agricultural non-point source pollution in China and the alleviating strategies Ⅲ. Analysis of the main problems in the control of agricultural nonpoint source pollution in China [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2004, 37(7): 1026-1033.
- [5] 姜滢, 尤悦文, 徐杨, 等. 2005~2014 年苏州市农业面源污染源强变化特征[J]. 热带作物学报, 2016, 37(9): 1805-1811.
JIANG Y, YOU Y W, XU Y, et al. Temporal variation characteristics of agricultural non-point source pollution in Suzhou from 2005 to 2014 [J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2016, 37(9): 1805-1811.
- [6] 赵吉睿, 徐媛, 赵薇, 等. 城市尺度农业面源排放特征及污染风险分析——以天津市为例[J]. 中国农村水利水电, 2020(10), 71-76.
ZHAO J R, XU Y, ZHAO W, et al. An analysis of agricultural non-point source pollution characteristics and pollution risk at urban scale: A case study of Tianjin [J]. China Rural Water and Hydropower, 2020(10): 71-76.
- [7] 燕琳, 许衡. 2010—2020 年珠江三角洲地区农业面源污染时空变化研究[J]. 人民珠江, 2024, 45(5): 28-33.
YAN L, XU H. Temporal and spatial variation of agricultural non-point source pollution in the pearl river delta from 2010 to 2020 [J]. Pearl River, 2024, 45(5): 28-33.
- [8] 郭春霞. 平原河网地区农村面源污染重点源和区的识别筛选——以上海青浦区为例[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(8): 1652-1659.
GUO C X. Identification of critical sources and areas of rural non-point source pollution in the plain river network area: A Case Study of Qingpu, Shanghai, China [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2011, 30(8): 1652-1659.
- [9] 陈敏鹏, 陈吉宁, 赖斯芸. 中国农业和农村污染的清单分析与空间特征识别[J]. 中国环境科学, 2006(6): 751-755.
CHEN M P, CHEN J N, LAI S Y. Inventory analysis and spatial feature identification of Chinese agricultural and rural pollution [J]. China Environmental Science, 2006(6): 751-755.
- [10] 熊娜, 崔译丹, 崔海涛, 等. 广西农业面源污染时空演变及其防控对策[J]. 南方农业学报, 2022, 53(5): 1368-1378.
XIONG N, CUI Y D, CUI H T, et al. Spatial-temporal evolution of agricultural non-point source pollution in Guangxi and its prevention and control countermeasures [J]. Journal of Southern Agriculture, 2022, 53(5): 1368-1378.
- [11] 蔡金洲, 范先鹏, 黄敏, 等. 湖北省三峡库区农业面源污染解析[J]. 农业环境科学学报, 2012, 31(7): 1421-1430.
CAI J Z, FAN X P, HUANG M, et al. Sources analysis of agricultural non-point source pollution in the three gorges reservoir area of Hubei Province, China [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2012, 31(7): 1421-1430.
- [12] 邢海虹, 李小燕, 杜建括, 等. 汉中市农村面源污染时空变化研究[J]. 陕西理工大学学报(自然科学版), 2020, 36(4): 76-82.
XING H H, LI X Y, DU J K, et al. Study on temporal and spatial variation of non-point source pollution in rural areas of Hanzhong city [J]. Journal of Shaanxi University of Technology: Natural Science Edition, 2020, 36(4): 76-82.
- [13] 谢飞, 迎玲, 刘家宝. 保山市畜禽养殖污染负荷核算及污染风险评价[J]. 中国畜牧业, 2023(19): 83-84.
XIE F, YING L, LIU J B. Accounting for pollution load and pollution risk assessment of livestock and poultry farming in Baoshan [J]. China Animal Industry, 2023(19): 83-84.

(下转第 180 页)

②通过建立多点多线超越和处理单元串联改并联的运行模式,同时放大设计管渠断面,能够确保构筑物断面超量过水能力,实现雨季水量兜底功能,保障河流断面水质达标。

③通过构筑物组团化立体设计,极致利用平面空间,打造土地高效堆叠利用典范,为土地集约型水质净化厂建设提供了可借鉴的样板。

④从空间布局和操作环境要求来看,土地集约型水质净化厂建设污泥处理工艺建议优选脱水干化一体化设备。

参考文献

- [1] 王殿常, 赵云鹏, 陈亚松, 等. 我国城市水环境治理的现状与困境分析[J]. 给水排水, 2023, 59(11): 25-31.
WANG D C, ZHAO Y P, CHEN Y S, et al. Analysis of present situation and dilemma for treatment of urban water environment of China[J]. Water & Wastewater Engineering, 2023, 59(11): 25-31.
- [2] 吴亚男, 任心欣, 高玉枝, 等. 基于小流域水环境治理探索雨季溢流污染防治的深圳实践[J]. 环境工程, 2023, 41(12): 75-78.
WU Y N, REN X X, GAO Y Z, et al. Shenzhen's practice of pollution prevention and control of rainfall overflow based on water environment governance in small watershed [J]. Environmental Engineering, 2023, 41(12): 75-78.
- [3] 中华人民共和国国家发展和改革委员会, 中华人民共和国住房和城乡建设部, 中华人民共和国生态环境部. 关于推进污水处理减污降碳协同增效的实施意见[EB/OL]. (2023-12-12) [2024-02-08]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/202312/content_6923468.htm.
National Development and Reform Commission of the People's Republic of China, Ministry of Housing and Urban-Rural

- Development of the People's Republic of China, Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China. Implementation opinions on promoting synergistic efficiency of pollution reduction and carbon reduction in wastewater treatment [EB/OL]. (2023-12-12) [2024-02-08]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/202312/content_6923468.htm.
- [4] 罗穆喜, 朱宇峰. 山坡半地下式污水处理厂总体设计方案[J]. 净水技术, 2020, 39(11): 34-38.
LUO M X, ZHU Y F. Overall design scheme of semi-underground WWTP at hillside [J]. Water Purification Technology, 2020, 39(11): 34-38.
- [5] 郝晓地, 于文波, 王向阳, 等. 地下式污水处理厂全生命周期综合效益评价[J]. 中国给水排水, 2021, 37(7): 1-10.
HAO X D, YU W B, WANG X Y, et al. Life cycle comprehensive efficiency assessment on underground wastewater treatment plant[J]. China Water & Wastewater, 2021, 37(7): 1-10.
- [6] 戴仲怡, 李瑞成, 王建兴. 多段强化脱氮 A²/O 工艺用于大型半地下式污水处理厂[J]. 中国给水排水, 2017, 33(16): 75-78.
DAI Z Y, LI R C, WANG J X. Application of multi-stage A²/O process for enhanced nitrogen removal in large semi-underground wastewater treatment plant [J]. China Water & Wastewater, 2017, 33(16): 75-78.
- [7] 王雪, 陈颖童, 戴仲怡. “花园式”大型半地下智慧水质净化厂设计[J]. 中国给水排水, 2023, 39(8): 73-77.
WANG X, CHEN Y T, DAI Z Y. Design of “garden style” large-scale semi-underground intelligent wastewater treatment plant[J]. China Water & Wastewater, 2023, 39(8): 73-77.
- [8] 张岩. 上海中心城区城镇污水水质特性分析[J]. 净水技术, 2023, 42(11): 101-111.
ZHANG Y. Analysis of influent quality characteristics of urban wastewater in Shanghai central districts [J]. Water Purification Technology, 2023, 42(11): 101-111.

(上接第 131 页)

- [14] JOHNES P J. Evaluation and management of the impact of land use change on the nitrogen and phosphorus load delivered to surface waters: The export coefficient modelling approach [J]. Journal of Hydrology, 1996, 183(3): 323-349.
- [15] 王星雨, 马艳. 基于清单分析法的河北省农业面源污染时空特征[J]. 黑龙江农业科学, 2023(11): 113-120.
WANG X Y, MA Y. Spatiotemporal characteristics of agricultural non-point source pollution in Hebei Province based on inventory analysis method [J]. Heilongjiang Agricultural Sciences, 2023(11): 113-120.
- [16] 杨静仁, 王振旗, 沈根祥. 上海市畜禽养殖业污染物排放标

- 准浅析[J]. 环境保护科学, 2024, 50(2): 42-48.
YANG J R, WANG Z Q, SHEN G X. Analysis of the discharge standards of pollutants for livestock and poultry breeding in Shanghai [J]. Environmental Protection Science, 2024, 50(2): 42-48.
- [17] 吴伟峰, 洪宏, 胡昕晔. 上海农村生活污水处理的实践与思考[J]. 中国水利, 2018(5): 42-44.
WU W F, HONG H, HU X Y. Sewage treatment in rural areas of Shanghai municipality [J]. China Water Resources, 2018(5): 42-44.