

山西省农业面源污染时空变化特征及发展趋势预测

乔扬源¹, 张鹏^{1,2}, 党淑青¹

(1.山西电子科技学院 环境科学与工程学院, 山西 临汾 041004; 2.太原理工大学 环境科学与工程学院, 山西 太原 030000)

摘要: [目的] 定量分析山西省 2011—2022 年农业面源污染时空变化特征并预测其发展趋势, 为该省农业面源污染防治工作的开展提供科学参考。[方法] 采用排污系数法和等标污染负荷法定量分析山西省农业面源污染的时空变化特征, 通过建立自回归移动平均的 (ARIMA) 时间序列预测模型对其发展趋势进行预测。[结果] ① 2022 年山西省农业面源污染排放量分别为: 化学需氧量 (COD) 为 4.74×10^5 t, $\text{NH}_3\text{-N}$ 为 5 820 t, TN 为 2.86×10^4 t 和 TP 为 4 180 t。排放量高值区集中在吕梁市和运城市, 低值区集中在太原市和阳泉市。等标污染负荷总量为 3.95×10^{10} m^3 。首要污染物为 TN, 首要污染账户为畜禽养殖账户。② 2011—2022 年, 4 类污染物变化趋势表现出一致性, 总体上表现为波动上升, 且各项污染物最高值均出现在 2022 年。各行政区污染物排放量排序基本稳定, 运城市和吕梁市一直占重要地位。根据等标污染负荷计算结果, 12 a 来 TN 一直是首要污染物, 畜禽养殖一直是首要污染账户, 并且占比仍在不断上升。③ 通过确定模型参数, 建立 ARIMA(1,1,2) 模型进行预测。预测期内山西省农业面源污染会有小幅下降, 之后发展趋势表现为平稳上升。[结论] 需要进一步加强对农业重点污染账户和重点污染物的防治工作, 以降低农业面源污染排放量, 缓解其上升趋势。

关键词: 面源污染; 排污系数; 等标污染负荷; 时空特征; 山西省

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2024)04-0289-09

中图分类号: X501, X52

文献参数: 乔扬源, 张鹏, 党淑青. 山西省农业面源污染时空变化特征及发展趋势预测[J]. 水土保持通报, 2024, 44(4): 289-297. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2024.04.030; Qiao Yangyuan, Zhang Peng, Dang Shuqing. Spatiotemporal characteristics of agricultural non-point source pollution and its development trend forecast in Shanxi Province [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2024, 44(4): 289-297.

Spatiotemporal Characteristics of Agricultural Non-point Source Pollution and Its Development Trend Forecast in Shanxi Province

Qiao Yangyuan¹, Zhang Peng^{1,2}, Dang Shuqing¹

(1. Department of Environmental Science and Engineering, Shanxi

Electronic Science and Technology Institute, Linfen, Shanxi 041004, China; 2. College of

Environmental Science and Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan, Shanxi 030000, China)

Abstract: [Objective] The spatiotemporal characteristics of agricultural nonpoint source pollution in Shanxi Province during 2011—2022 were analysed and its development trends was predicted in order to provide a scientific reference for the prevention and control of agricultural non-point source pollution in the Shanxi Province. [Methods] The spatiotemporal characteristics of agricultural non-point source pollution in Shanxi Province were analysed using the pollution emission coefficient and equivalent pollution load methods, and an autoregressive integrated moving average (ARIMA) model was established to predict the development trend. [Results] ① In 2022, the agricultural non-point source pollution in Shanxi Province produced 4.74×10^5 t of COD (chemical oxygen demand), 5 820 t of $\text{NH}_3\text{-N}$, 2.86×10^4 t of total nitrogen (TN), and 4 180 t of total phosphorus (TP). The high-emission areas were located in Lvliang and Yuncheng City, and the low-emission areas were located in Taiyuan and Yangquan City. The equivalent pollution load was 3.95×10^{10} m^3 . The

收稿日期: 2024-02-24

修回日期: 2024-03-12

资助项目: 国家自然科学基金项目“锰矿区锰与 DOM 的相互作用机制及混凝去除机理研究”(41502331); 山西省高等学校科技创新项目“山西省农业面源污染时空变化特征研究”(2023L461); 山西省自然科学基金项目“复合光引发体系制备高效微藻采收絮凝剂及相关机理研究”(202203021211248)

第一作者: 乔扬源(1987—), 男(汉族), 山西省临汾市人, 硕士, 助教, 主要从事资源与环境方面研究。Email: qiao_yy@126.com。

通信作者: 张鹏(1982—), 男(汉族), 山西省大同市人, 博士, 教授, 主要从事水污染控制理论与技术方面研究。Email: zhangpeng388@126.com。

primary pollutant was TN, and the primary source of pollution was animal husbandry. ② From 2011—2022, the developmental trends of the four types of pollutants were consistent. All showed an increase in fluctuation, and the highest value for each pollutant was observed in 2022. The ranking of pollutants in each region was stable, with Yuncheng and Lvliang City always occupying important positions. TN has been the primary pollutant for 12 years, animal husbandry has been the source of the primary pollutant, and the proportion was still rising. ③ By determining model parameters, the ARIMA (1,1,2) model was established for the forecast. During the forecast period, agricultural non-point source pollution in Shanxi Province decreased slightly, and the development trend showed a steady increase. [Conclusion] It is necessary to strengthen the prevention and control of key agricultural pollution accounts and pollutants, reduce the discharge of agricultural nonpoint source pollution, and mitigate its rising trend.

Keywords: non-point source pollution; pollution emission coefficient; equivalent pollution load; spatiotemporal feature; Shanxi Province

水资源是维持生态系统正常运转和人类社会正常发展的重要组成部分。随着工业源和生活源等点源废水排放治理工作的不断加强,农业面源污染问题更加凸显。《第二次全国污染源普查公报》^[1]显示,2017 年来自于农业源的全国主要水污染物排放量分别为化学需氧量(COD) 1.07×10^7 t、氨氮($\text{NH}_3\text{-N}$) 2.16×10^5 t、总氮(TN) 1.41×10^6 t 和总磷(TP) 2.12×10^5 t,分别占全国水污染物排放总量的 49.77%, 22.44%, 46.52% 和 67.22%。农业面源污染相关研究最早开始于 20 世纪 60 年代,是指在农业生产活动中,氮素和磷素等营养物质、农药以及其他有机或无机污染物,通过农田地表径流和渗漏等方式,造成水环境的污染。主要包括化肥污染、农药污染、集约化养殖场污染等^[2]。随着农药、化肥等应用规模的不断扩大,农业面源污染问题也越来越多地受到人们的关注。中国当前的农业面源污染相关研究多以定量分析为主^[3-7],研究方法主要有输出系数法^[8-11]、单元调查法^[12-14]、清单分析法^[15-16]及源强系数法等^[17-18]。其中,王思如等^[19]采用输出系数法估算了 2016 年全国农业面源污染排放量,并对各行政区的环境影响程度、污染程度及污染排放特征进行了分析。马军旗等^[20]采用单元调查法和空间计量分析法对 2003—2017 年全国农业面源污染的空间差异和影响因素进行了分析。葛小君等^[21]采用清单分析法对 1999—2019 年广东省的农业面源污染时空变化、污染源和各项农业及污染指标间相互关系进行了分析。

受自然环境条件和产业结构特征影响,山西省一直面临着严峻的水质型缺水问题。而针对其农业面源污染状况,缺少定量化以及时间尺度的研究。本文通过对山西省 2011—2022 年农业面源污染状况进行定量分析,揭示其时空变化特征。此外,通过构建 ARIMA 时间序列预测模型对其 2023—2027 年农业面源污染发展趋势进行预测。研究结果能够为山西

省开展农业面源污染防治工作提供可靠的理论依据和数据支撑,对缓解山西省水质型缺水问题和保障黄河流域生态文明建设工作的持续推进具有重要意义。

1 研究区概况

山西省地处黄河流域中部,下辖 11 个设区市,总面积 1.57×10^5 km²。地貌类型复杂多样,地势东北高西南低,属黄土广泛覆盖的山地高原。气候类型属于温带大陆性季风气候,四季分明、雨热同期且南北差异显著,多年平均气温为 4.2~14.2 ℃。全省包含大小河流 1 000 多条,主要分属于海河水系和黄河水系,多年平均水资源总量为 1.24×10^{10} m³,多年平均降水量为 508.8 mm。矿产资源丰富,是资源开发利用大省,在全国矿业经济中占有重要地位。2022 年底,全省常住人口 3.48×10^7 人,其中乡村人口数占 36.04%。2022 年全省农作物种植面积 3.61×10^6 hm²,猪牛羊禽肉类总产量 1.43×10^6 t。

2 研究方法 with 数据来源

2.1 账户建立

依据山西省实际情况,综合考虑数据来源一致性与完整性,将研究区间设定为 2011—2022 年。建立畜禽养殖、农村生活、水产养殖和种植业 4 个污染核算账户,主要污染物包括 COD, $\text{NH}_3\text{-N}$, TN 和 TP,污染账户具体情况如表 1 所示。

2.2 排污系数法

采用排污系数法对山西省 11 个行政区 2011—2022 年农业面源污染数据进行计算。根据《排放源统计调查产排污核算方法和系数手册》提供的产排污核算方法,结合山西省实际进行修正。研究区域各项污染物的排放总量来自于 4 个污染账户排放量总和。计算方法为:

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

式中: Q_i 为污染物 i 的农业面源污染排放量; Q_{di} 为污染物 i 的农村生活账户排放量; Q_{li} 为污染物 i 的

畜禽养殖账户排放量; Q_{ri} 为污染物 i 的种植业账户排放量; Q_{ai} 为污染物 i 的水产养殖账户排放量。

表 1 山西省农业面源污染核算账户清单

Table 1 Agricultural non-point source pollutant accounts of Shanxi Province

账户名称	产污单元	计量指标	计量单位	污染物
农村生活	生活污水	乡村人口	人	COD, NH ₃ -N, TN, TP
水产养殖	水产品	产量	kg	COD, NH ₃ -N, TN, TP
种植业	农作物、园地	面积	hm ²	NH ₃ -N, TN, TP
畜禽养殖	牛、猪、禽类	年末存栏数	头/羽	COD, NH ₃ -N, TN, TP

$$Q_{di} = N_p \times \alpha_i \times 365 \times (1 - \beta) \times 10^{-6} \quad (2)$$

式中: N_p 为农村常住人口; α_i 为某地区污染物 i 的人均产污强度; β 为对生活污水进行处理的行政村、乡比例。

$$Q_{li} = \sum_{j=1}^n Q_{ij} = \sum_{j=1}^n (q_j \times \gamma_{ij}) \times 10^{-3} \quad (3)$$

式中: Q_{ij} 为第 j 类畜禽养殖中第 i 项污染物的年排放量; q_j 为第 j 类畜禽年末存栏量; γ_{ij} 为第 j 类畜禽第 i 项污染物排放系数; n 为畜禽养殖类型数。

$$Q_{ri} = (A_g \times \delta_{gi} + A_y \times \delta_{yi}) \times 10^{-3} \quad (4)$$

式中: A_g 为农作物总播种面积; δ_{gi} 为农作物种植过程中第 i 项目污染物流失系数; A_y 为园地面积; δ_{yi} 为园地第 i 项目污染物流失系数。

$$Q_{ai} = q_a \times \epsilon_i \times 10^{-3} \quad (5)$$

式中: q_a 为水产品产量; ϵ_i 为污染物 i 的排放系数。

2.3 等标污染负荷法

为明确不同污染物对区域农业面源污染的贡献程度以及污染负荷情况,采用等标污染负荷法对各项污染物排放量计算结果进行标准化处理。本文采用《地表水环境质量标准(GB3838—2002)》中的 V 类标准(COD ≤ 40 mg/L, NH₃-N ≤ 2.0 mg/L, TN ≤ 2.0 mg/L, TP ≤ 0.4 mg/L)作为 COD, NH₃-N, TN 和 TP 的阈浓度。计算方法如下^[22]:

$$P_i = \frac{Q_i}{C_{oi}} \times 10^{-2} \quad (6)$$

式中: P_i 为污染物 i 的等标污染负荷; C_{oi} 为污染物 i 的阈浓度。

2.4 ARIMA 时间序列预测

ARIMA 时间序列预测模型,即综合自回归移动平均模型。该模型可以用于对非平稳时间序列进行预测^[23-24],一般表述为 ARIMA(p, d, q)。在进行预测时,需要先根据数据列的表现特征确定 p, d, q 参数取值,之后建立模型,再将数据列带入模型进行预测。本次研究 ARIMA 模型的建立在 SPSS 软件中实现。通过绘制数据序列图观察数据列是否为平稳序列。若其为平稳序列,则差分阶数 d 取值为 0。若

为非平稳时间序列,则需要对其进行若干次差分,直到其转化为平稳时间序列,同时根据差分次数确定差分阶数 d 取值。通过对处理后的平稳数据列进行自相关、偏自相关分析,确定自回归模型阶数 p 和移动平均阶数 q 的取值。各项参数确定后,建立 ARIMA(p, d, q)模型开展数据预测工作,并通过模型拟合度 R^2 取值判断预测结果的可靠性。

2.5 数据来源

本研究基础数据均来源于 2012—2023 年《山西省统计年鉴》。各项产、排污系数等参数取自生态环境部 2021 年发布的《排放源统计调查产排污核算方法和系数手册》,山西省生活污水处理行政村、乡比例取自 2011—2022 年《城市建设统计年鉴》。

3 结果与分析

3.1 山西省农业面源污染空间分布特征

2022 年,山西省农业面源污染排放量分别为:COD 为 4.74×10^5 t, NH₃-N 为 5.82×10^3 t, TN 为 2.86×10^4 t 和 TP 为 4.18×10^3 t。各类污染物的空间分布表现出一致性,污染物空间分布特征与各行政区自然地理环境特征、地区产业布局关系密切。如图 1 所示,4 类污染物排放高值区域主要集中在吕梁市、运城市。其中, COD 排放量最大值 7.96×10^4 t 和 TN 排放量最大值 4.58×10^3 t 均出现在吕梁市。这主要是因为吕梁市地处吕梁山脉,地形上表现为山地为主,沟壑纵横。地广人稀,交通欠发达的特点导致传统农业得到更大发展,与省内其他地区相比,畜禽养殖业和种植业规模更大。NH₃-N 排放量最大值 993.10 t 和 TP 排放量最大值 709.96 t 均出现在运城市。原因是运城市地处山西西南部,平原面积辽阔,水热资源丰富,促进了种植业的规模化发展,产业规模为省内最大。同时,运城市水产养殖业近年来发展迅速,规模远高于省内其他地区。

2022 年农业面源污染排放量低值区域集中在太原市和阳泉市。太原市作为省会城市,由于城市功能性定位,城市化程度高,各农业账户生产规模均小于

省内其他地区,污染物产生量和排放量也相对较少,4类主要污染物排放量分别为 COD 为 1.56×10^4 t, $\text{NH}_3\text{-N}$ 为 213.79 t, TN 为 906.07 t 和 TP 为 115.26 t。2022 年各类污染物排放量最小值均出现在阳泉市,即 COD 为 6.51×10^3 t, $\text{NH}_3\text{-N}$ 为 109.32 t, TN 为

383.75 t 和 TP 为 62.85 t,主要是受阳泉市产业政策的影响。作为全国重要的矿产集中区,阳泉市矿藏资源丰富,经济发展以矿产资源开采及相关产业为主,农业生产在地区经济发展中所占比例较小,生产规模相对较小。

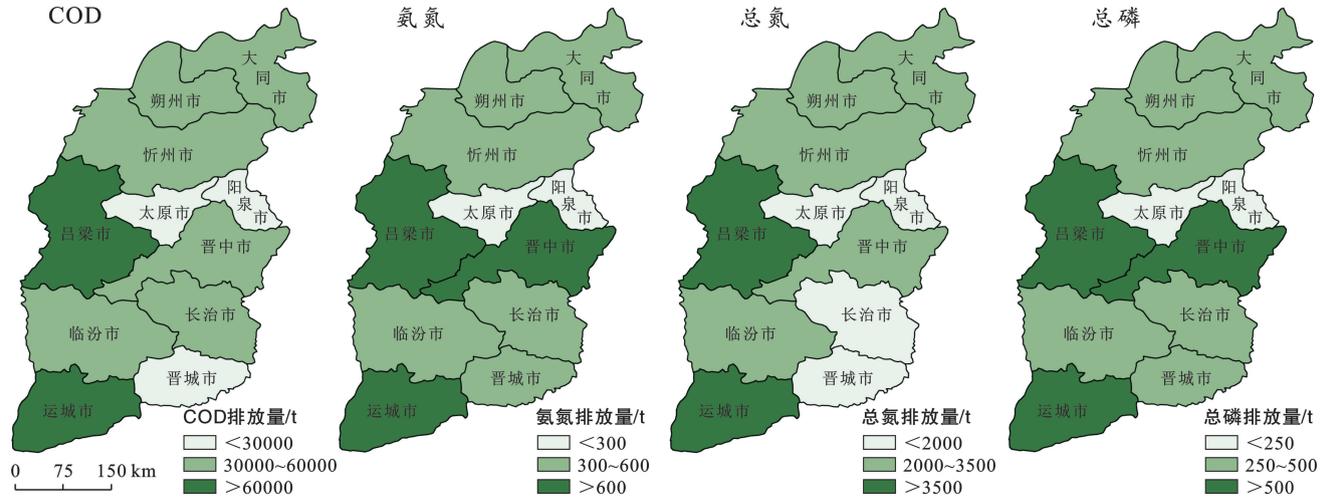


图 1 山西省 2022 年农业面源污染分布

Fig.1 Agricultural non-point source pollution distribution of Shanxi Province in 2022

2022 年山西省总等标污染负荷为 3.95×10^{10} m^3 , 11 个行政区等标污染负荷平均值为 3.59×10^9 m^3 , 最小值是阳泉市 5.66×10^8 m^3 , 最大值吕梁市 6.23×10^9 m^3 是阳泉市的 11 倍,说明由于自然禀赋和地区间产业布局的不同,山西省各地农业规模表现出明显差异,在农业面源污染方面得到直观体现。11 个行政区根据等标污染负荷排序依次为:吕梁市>运城市>晋中市>大同市>忻州市>临汾市>朔州市>长治市>晋城市>太原市>阳泉市(图 2)。

山西省 4 类主要污染物等标污染负荷分别为 COD 1.19×10^{10} m^3 , $\text{NH}_3\text{-N}$ 2.91×10^9 m^3 , TN 1.43×10^{10} m^3 和 TP 1.04×10^{10} m^3 。等标污染负荷占比及排序表现为: TN (36.17%) > COD (30.01%) > TP (26.45%) > $\text{NH}_3\text{-N}$ (7.37%)。11 个行政区中除长治市和晋城市,其余 9 个地区污染物贡献度排序均与全省保持一致。长治市和晋城市表现为: TN > TP > COD > $\text{NH}_3\text{-N}$,如图 3 所示。说明山西省 2022 年各项污染物中 TN 对环境的影响程度最高,其次为 COD 和 TP, $\text{NH}_3\text{-N}$ 贡献程度最小。在开展环境污染治理工作过程中,应进一步加大对 TN 污染的关注力度。

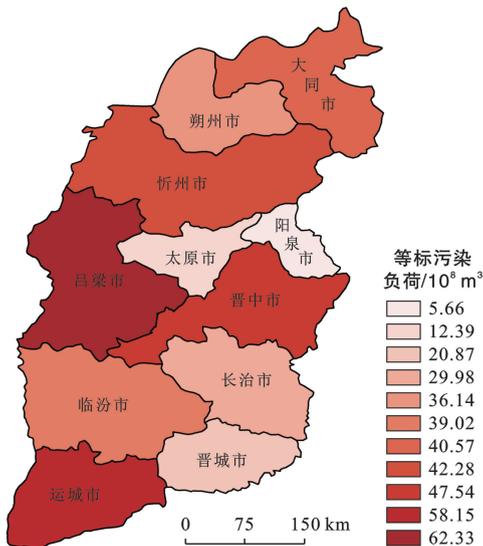


图 2 山西省 2022 年等标污染负荷分布

Fig.2 Equivalent pollution load distribution of Shanxi Province in 2022

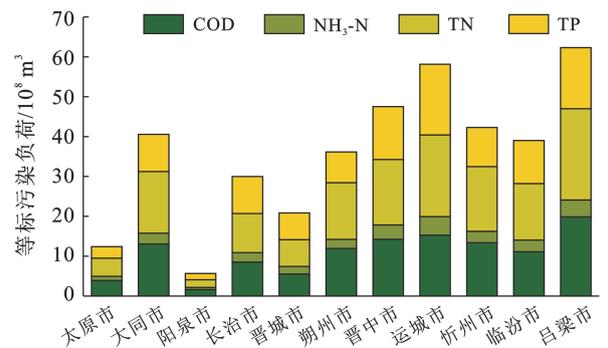


图 3 山西省 2022 年污染物等标污染负荷

Fig.3 Equivalent pollution load of Shanxi Province in 2022

4 个污染账户中,畜禽养殖账户等标污染负荷值最高,达到 3.26×10^{10} m^3 , 占全省等标污染负荷的 82.64%。其次为农村生活账户和种植业账户,农村

生活账户 $3.97 \times 10^9 \text{ m}^3$, 占全省的 10.06%。种植业账户 $2.71 \times 10^9 \text{ m}^3$, 占全省的 6.87%。水产养殖账户等标污染负荷最小, 为 $1.68 \times 10^8 \text{ m}^3$, 仅占全省的 0.43%, 详见表 2。可见 4 个污染账户等标污染负荷差距悬殊, 其中畜禽养殖账户贡献度最大。一方面是因为山西省畜禽养殖业规模相对较大, 各种牲畜年末存栏数量多。另一方面是因为畜禽养殖过程产排污

能力较大, 相应的产排污系数也较高。由于地处内陆地区, 山西省水产养殖业发展受限。虽然近年来随着养殖技术的不断成熟和发展, 省内运城市等地水产养殖业得到快速发展, 但仅限于局部地区, 整体规模上仍难以与传统的种植业、畜禽养殖业比较, 因此从等标污染负荷来看, 水产养殖账户对地区农业面源污染的影响远远小于其他污染账户。

表 2 山西省 2022 年污染账户等标污染负荷

Table 2 Equivalent pollution load of pollution account of Shanxi Province in 2022

 10^8 m^3

污染账户	太原市	大同市	阳泉市	长治市	晋城市	朔州市
农村生活	2.73	2.47	1.33	3.82	2.69	1.89
畜禽养殖	8.95	35.84	3.93	24.02	16.93	32.13
水产养殖	0.11	0.07	0.03	0.18	0.06	0.02
种植业	0.60	2.18	0.38	1.96	1.19	2.10
合计	12.39	40.57	5.66	29.98	20.87	36.14
污染账户	晋中市	运城市	忻州市	临汾市	吕梁市	山西省
农村生活	4.30	7.22	3.60	5.01	4.69	39.74
畜禽养殖	41.00	43.75	35.44	29.65	54.72	326.36
水产养殖	0.13	0.79	0.08	0.19	0.02	1.68
种植业	2.12	6.39	3.16	4.17	2.90	27.14
合计	47.54	58.15	42.28	39.02	62.33	394.93

3.2 山西省农业面源污染时间变化特征

2011—2022 年山西省农业面源污染 4 类污染物排放量详见表 3。4 类污染物总体变化趋势表现出一致性。其中, 2011—2013 年表现为缓慢下降趋势。2014—2018 年表现稳定, 变化幅度较小。2019 年各项污染物排放量均有所下降, 2019—2022 年呈现出上升趋势。12 a 间各项污染物排放量平均值分别为: COD 为 $3.99 \times 10^5 \text{ t}$, $\text{NH}_3\text{-N}$ 为 $5.12 \times 10^3 \text{ t}$, TN 为 $2.38 \times 10^3 \text{ t}$ 和 TP 为 $3.42 \times 10^3 \text{ t}$ 。4 项污染物排放量最大值均出现在 2022 年。COD 和 $\text{HN}_3\text{-N}$ 排放量最小值出现在 2019 年, 分别为 $3.66 \times 10^5 \text{ t}$ 和 $4.61 \times 10^3 \text{ t}$ 。TN 和 TP 排放量最小值则出现在 2012 年, 分别为 $2.17 \times 10^4 \text{ t}$ 和 $3.05 \times 10^3 \text{ t}$ 。可见, 近年来各项污染物均表现出上升趋势, 需要继续提高对农业面源污染问题的重视, 合理布局农业发展, 提高农业污染治理效率。

如图 4 所示, 各行政区 12 a 间各类污染物排放量差异悬殊, 排放量排序则相对稳定, 仅有个别年限出现波动。各污染物 12 a 间排放量最小值均出现在阳泉市, 说明阳泉市的农业生产规模 12 a 来持续保持在较低水平, 污染物排放量远小于省内其他地区。COD 排放量最大值在 2011 和 2012 年出现在运城

市, 之后的 10 a 间一直保持在吕梁市。 $\text{HN}_3\text{-N}$ 和 TP 排放量最大值 12 a 间均出现在运城市。TN 排放量最大值在 2011—2020 年出现在运城市, 2021 和 2022 年则为吕梁市。可见 12 a 间运城市和吕梁市在省内农业面源污染物排放中始终占主要地位。

表 3 山西省 2011—2022 年农业面源污染排放量

Table 3 Agricultural non-point source pollutant discharge in Shanxi Province during 2011—2022

年份	污染物排放量/ 10^3 t			
	COD	$\text{NH}_3\text{-N}$	TN	TP
2011	385.06	5.06	22.43	3.11
2012	368.38	4.92	21.70	3.05
2013	367.41	4.88	21.76	3.05
2014	397.15	5.21	23.45	3.36
2015	398.18	5.18	23.53	3.37
2016	390.28	5.06	23.20	3.36
2017	391.21	5.04	23.45	3.43
2018	391.47	5.04	23.72	3.46
2019	366.23	4.61	22.21	3.15
2020	400.23	4.98	24.25	3.49
2021	459.67	5.67	27.70	4.09
2022	474.10	5.82	28.57	4.18

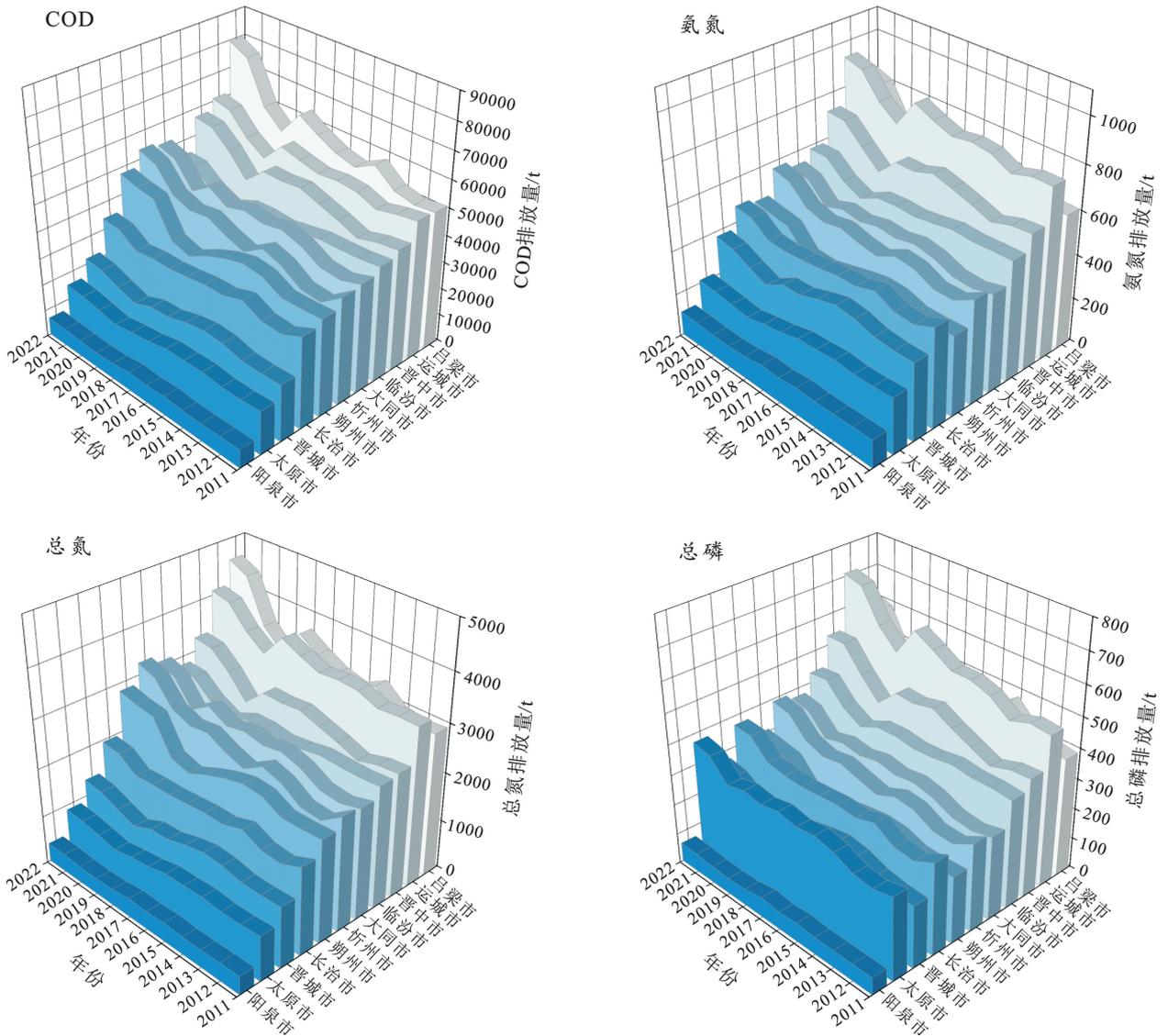


图 4 山西省 2011—2022 年各行政区农业面源污染排放量

Fig.4 Agricultural non-point source pollutant discharge in each regions of Shanxi Province during 2011—2022

山西省 2011—2022 年等标污染负荷变化趋势如图 5 所示。由图 5 可知,总体上表现为波动上升,最低值是 2013 年的 $3.01 \times 10^{10} \text{ m}^3$,最高值是 2022 年的 $3.95 \times 10^{10} \text{ m}^3$ 。从 4 类污染物所占比例来看,自 2011 年的 COD 30.9%, $\text{NH}_3\text{-N}$ 8.12%, TN 36.01% 和 TP 24.97% 变化为 2022 年的 COD 30.01%, $\text{NH}_3\text{-N}$ 7.37%, TN 36.17% 和 TP 26.45%, 各项污染物比例变化幅度较小,表现为 COD 和 $\text{NH}_3\text{-N}$ 略有下降, TN 和 TP 略有上升。且 12 a 间 TN 始终保持比例在首位,说明其对农业面源环境污染的贡献度最高。

12 a 间各污染账户贡献度差距悬殊,贡献度排序均表现为:畜禽养殖业>农村生活>种植业>水产养殖业。从等标污染负荷比来看,畜禽养殖账户 12 a 间所占比例不断上升,从 69.55% 上升至 82.64%,农村生活和种植业比例持续下降,分别从 21.76% 和

8.33% 下降至 10.06% 和 6.87%,水产养殖账户比例较小且相对稳定,不足 1%,详见表 4。说明畜禽养殖作为首要污染账户,污染贡献程度仍在不断加大,需要对其产业发展规模和污染治理情况加大关注力度。

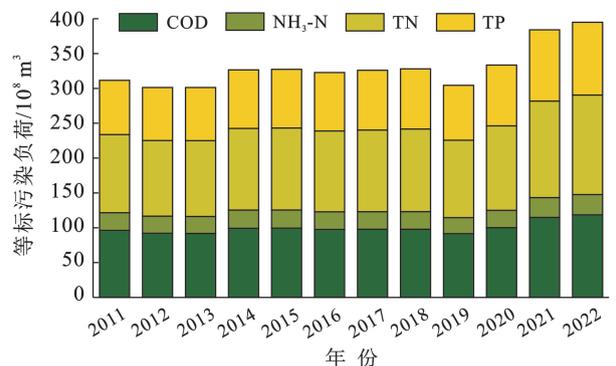


图 5 山西省 2011—2022 年污染物等标污染负荷

Fig.5 Equivalent pollution load of Shanxi Province during 2011—2022

表 4 山西省 2011—2022 年污染账户等标污染负荷比
Table 4 Proportion of equivalent pollution load of pollution account in Shanxi Province during 2011—2022

污染账户	等标污染负荷比/%					
	2011 年	2012 年	2013 年	2014 年	2015 年	2016 年
农村生活	21.76	21.51	20.70	18.50	17.83	16.53
畜禽养殖	69.55	69.41	70.11	73.04	73.82	75.14
水产养殖	0.37	0.43	0.48	0.50	0.49	0.50
种植业	8.33	8.65	8.70	7.96	7.86	7.82

污染账户	等标污染负荷比/%					
	2017 年	2018 年	2019 年	2020 年	2021 年	2022 年
农村生活	14.43	13.89	14.74	12.60	10.32	10.06
畜禽养殖	77.46	77.69	76.09	78.96	82.22	82.64
水产养殖	0.50	0.45	0.47	0.44	0.42	0.43
种植业	7.61	7.98	8.70	8.00	7.04	6.87

如图 6 所示,12 a 间,吕梁市、运城市 and 晋中市等标污染负荷一直保持在全省前 3,说明山西省农业发展格局基本稳定,各地区间农业面源污染贡献程度基本保持不变。地区间差异一直存在,大部分地区发展速率相对一致。从发展趋势来看,12 a 间太原市和阳泉市等标污染负荷略有下降,说明出在当前形势下,两地农业发展规模基本饱和。晋城市和长治市表现稳定,仅有为小幅增长。其他 7 个地区均表现为波动上升的趋势,且普遍在 2021 和 2022 年表现出较大增幅,说明近年来山西省农业发展开始提速,由此引发的农业面源污染问题增幅也在同步加大。

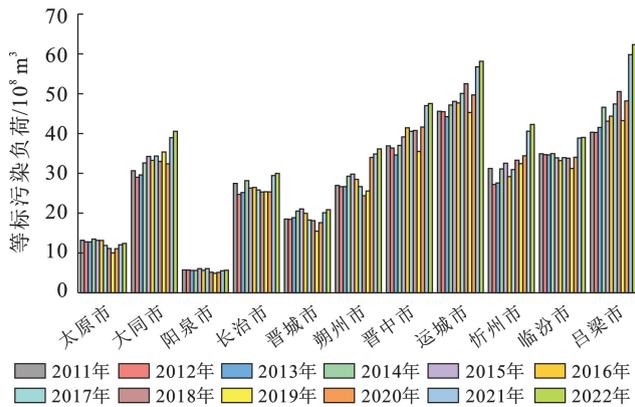


图 6 2011—2022 年山西省各行政区等标污染负荷
Fig.6 Equivalent pollution load in each regions of Shanxi Province during 2011—2022

3.3 山西省农业面源污染发展趋势预测

以山西省 2011—2022 年农业面源污染等标污染负荷作为数据基础,观察发现数据序列表现为非平稳时间序列。经一次差分后,可将数据列转变为平稳时间序列,由此确定差分阶数 d 取值为 1。对完成差分后的数据列进行自相关与偏自相关绘图分析,发现其均表现出拖尾现象,符合 ARIMA 模型预测要求。通过观察自相关与偏自相关图特征,发现其拐点分别出

现在第一项数据和第二项数据之后,确定自回归模型阶数 p 取值为 1,移动平均阶数 q 取值为 2,由此建立 ARIMA(1,1,2)预测模型。将数据带入 ARIMA(1,1,2)模型进行预测,结果显示模型拟合度 R^2 值为 0.71(拟合度 R^2 越接近 1,拟合效果越好),拟合程度较好。预测结果如表 5 所示。预测结果显示,2023—2027 年山西省农业面源污染等标污染负荷分别为 3.88×10^{10} , 3.85×10^{10} , 3.89×10^{10} , 3.95×10^{10} , $4.01 \times 10^{10} \text{ m}^3$ 。可见,预测期内各年变化幅度较小。2023 年预测数据表现出小幅回落,说明在经过 2021 和 2022 年的快速增长期后,山西省农业面源污染可能会出现小规模下降,自 2024 年则进入稳定上升的状态。因此,为进一步改善山西省农业面源污染现状;①需要调整产业结构,在现有基础上做好畜禽养殖等重点污染账户发展规模的规划和管理;②需要加强对农业污染源排污治理工作的推进,进一步减小各产污单元的单位产排污能力。

表 5 山西省等标污染负荷预测

Table 5 Equivalent pollution load forecast of Shanxi Province

年份	等标污染 负荷/ 10^8 m^3	预测值/ 10^8 m^3	预测差值/ 10^8 m^3	95%LCL/ 10^8 m^3	95%UCL/ 10^8 m^3
2011	311.50				
2012	301.34	318	-16.66	263.53	372.47
2013	301.29	306.28	-4.99	252.05	360.51
2014	326.53	314.31	12.22	265.73	362.89
2015	327.40	338.64	-11.24	290.07	387.21
2016	322.82	327.07	-4.25	280.15	373.99
2017	326.00	333.47	-7.47	286.63	380.31
2018	328.06	335.54	-7.48	289.37	381.71
2019	304.38	339.38	-35.00	293.31	385.44
2020	333.44	314.31	19.13	268.58	360.03
2021	384.03	364.55	19.48	318.93	410.17
2022	394.93	386.02	8.91	340.60	431.45
2023		387.99		342.67	433.32
2024		384.98		319.32	450.64
2025		388.88		321.00	456.77
2026		394.68		326.44	462.91
2027		400.99		332.73	469.24

4 结论

(1) 2022 年,山西省 4 类主要污染物的农业面源污染排放量分别为:COD 为 $4.73 \times 10^5 \text{ t}$, $\text{NH}_3\text{-N}$ 为 $5.82 \times 10^3 \text{ t}$, TN 为 $2.86 \times 10^4 \text{ t}$, TP 为 $4.18 \times 10^3 \text{ t}$ 。排放量高值区主要在吕梁市和运城市,低值区主要在太原市和阳泉市,说明山西省农业污染排放空间分布主要受限于地区自然环境条件。全年总等标污染负荷达到 $3.95 \times 10^{10} \text{ m}^3$ 。各类污染物中贡献度最高的

是 TN, 需要提高对 TN 污染的关注程度, 控制含氮肥料的施用, 警惕纳污水体富营养化问题。4 个污染账户中, 畜禽养殖账户比例远高于其他账户, 需要加快推进畜禽集约化养殖, 提高污染物收集和处理能力。

(2) 2011—2022 年, 4 类污染物变化趋势表现出一致性, 各类污染物排放量最高值均出现在 2022 年。12 a 间, 各行政区污染物排放量差距悬殊, 最低值一直保持在阳泉市, 高值区集中在运城市 and 吕梁市。全省等标污染负荷表现出波动上升的趋势。TN 贡献度一直保持在最高水平, 识别为首要污染物。各污染账户贡献度排序表现为: 畜禽养殖业 > 农村生活 > 种植业 > 水产养殖业。畜禽养殖账户一直比例最大, 并且仍在持续上升。12 a 间, 山西省农业污染物排放情况基本稳定, 吕梁市、运城市 and 晋中市等标污染负荷一直保持较高水平, 属重点污染源。需要结合地方自然环境特征, 针对不同污染物和污染账户制定相应的管控措施, 控制农业面源污染排放总量。

(3) 建立 ARIMA(1, 1, 2) 模型 (模型拟合度 $R^2 = 0.71$) 对山西省 2023—2027 年农业面源污染发展趋势进行预测。结果显示: 2023—2027 年山西省等标污染负荷依次为 3.88×10^{10} , 3.85×10^{10} , 3.89×10^{10} , 3.95×10^{10} , $4.01 \times 10^{10} \text{ m}^3$ 。预测期内山西省农业面源污染将表现出小幅回落, 之后保持平稳上升的发展态势。建议依据识别出的重点污染源、污染物和污染账户, 制定有针对性的农业发展和污染管控措施, 避免农业面源污染问题进一步加深。

参考文献 (References)

- [1] 中华人民共和国生态环境部, 国家统计局, 中华人民共和国农业农村部. 关于发布第二次污染源普查公报的公告 [EB/OL]. https://www.mee.gov.cn/xxgk2018/xxgk/xxgk01/202006/t20200610_783547.html, 2020-06-09.
Ministry of Ecology and Environment, National Bureau of Statistics, Ministry of Agriculture and Rural Affairs of the People's Republic of China. Announcement on Issuing the Second Pollution Source Census Bulletin [EB/OL]. https://www.mee.gov.cn/xxgk2018/xxgk/xxgk01/202006/t20200610_783547.html, 2020-06-09.
- [2] 崔键, 马友华, 赵艳萍, 等. 农业面源污染的特性及防治对策 [J]. 中国农学通报, 2006, 22(1): 335-340.
Cui Jian, Ma Youhua, Zhao Yanping, et al. Characteristic and countermeasures for control and prevention of multiple area-pollution in agriculture [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2006, 22(1): 335-340.
- [3] 程红光, 岳勇, 杨胜天, 等. 黄河流域非点源污染负荷估算与分析 [J]. 环境科学学报, 2006, 26(3): 384-391.
Cheng Hongguang, Yue Yong, Yang Shengtian, et al. An estimation and evaluation of non-point source (NPS) pollution in the Yellow River Basin [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2006, 26(3): 384-391.
- [4] 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 Jia'en, Li Yimian, et al. Spatial-temporal variation of agricultural Non-point source pollution based on gis technology in Guangdong Province, China [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2013, 32(2): 369-377.
- [5] 许策, 李晔, 束继年, 等. 汉江流域荆门段面源污染负荷时空分布与污染现状评价 [J]. 水土保持通报, 2017, 37(4): 63-68.
Xu Ce, Li Ye, Shu Jinian, et al. Spatial distribution and evaluation of non-point pollution source in Jingmen Region of Hanjiang watershed [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2017, 37(4): 63-68.
- [6] 谢培, 宫健, 陈诚. 北京市农业面源污染负荷特征分析及控制分区 [J]. 环境工程技术学报, 2020, 10(4): 613-622.
Xie Pei, Gong Jian, Chen Cheng. Analysis of pollution load characteristics and control zones division of agricultural non-point sources in Beijing City [J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2020, 10(4): 613-622.
- [7] 林江彪, 王亚娟, 樊新刚. 宁夏农业面源污染的经济驱动特征研究 [J]. 干旱区资源与环境, 2021, 35(3): 58-65.
Lin Jiangbiao, Wang Yajuan, Fan Xingang. Research on economic driving characteristics of agricultural non-point source pollution in Ningxia [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2021, 35(3): 58-65.
- [8] 武升, 张俊森, 管飞, 等. 安徽省巢湖流域众兴水库小流域农业面源污染调查与评价 [J]. 水土保持通报, 2018, 38(2): 198-203.
Wu Sheng, Zhang Junsen, Guan Fei, et al. Investigation and evaluation of agricultural non-point source pollution in Zhongxing Reservoir small watershed of Chaohu Lake basin, Anhui province [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2018, 38(2): 198-203.
- [9] 李娜, 韩维峥, 沈梦楠, 等. 基于输出系数模型的水库汇水区农业面源污染负荷估算 [J]. 农业工程学报, 2016, 32(8): 224-230.
Li Na, Han Weizheng, Shen Mengnan, et al. Load evaluation of non-point source pollutants from reservoir based on export coefficient modeling [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32(8): 224-230.
- [10] 徐丽萍, 杨其军, 王玲, 等. 新疆地区农业面源污染空间

- 分异研究[J].水土保持通报,2011,31(4):150-153.
- Xu Liping, Yang Qijun, Wang Ling, et al. Spatial variation of agricultural non-point pollution in Xinjiang area [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2011,31(4):150-153.
- [11] 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.
- [12] 葛继红,周曙东.农业面源污染的经济影响因素分析:基于1978-2009年的江苏省数据[J].中国农村经济,2011(5):72-81.
- Ge Jihong, Zhou Shudong. An analysis of the economic determinants to agricultural non-point source pollution-Based on data of Jiangsu Province during 1978-2009 [J]. Chinese Rural Economy, 2011(5):72-81.
- [13] 赖斯芸,杜鹏飞,陈吉宁.基于单元分析的非点源污染调查评估方法[J].清华大学学报(自然科学版),2004,44(9):1184-1187.
- Lai Siyun, Du Pengfei, Chen Jining. Evaluation of non-point source pollution based on unit analysis [J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2004,44(9):1184-1187.
- [14] 陈素琼,刘忠敏.湖南省农业面源污染的地区差异和影响因素研究[J].湖北农业科学,2022,61(21):217-222.
- Chen Suqiong, Liu Zhongmin. Study on regional differences and influencing factors of agricultural non-point source pollution in Hunan Province [J]. Hubei Agricultural Sciences, 2022,61(21):217-222.
- [15] 赵柳惠.浙江省农业面源污染时空特征及经济驱动因素分析[D].浙江 杭州:浙江工商大学,2015.
- Zhao Liuhui. The temporal and spatial characteristic of agriculture non-point source pollution and its economic factors in Zhejiang Province [D]. Hangzhou, Zhejiang: Zhejiang Gongshang University, 2015.
- [16] 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.
- [17] 李小丽,敖天其.缺资料流域农业面源污染负荷研究与综合评价[J].人民长江,2016,47(6):6-11.
- Li Xiaoli, Ao Tianqi. Load study and comprehensive evaluation of agricultural non-point source pollution in ungauged catchments [J]. Yangtze River, 2016,47(6):6-11.
- [18] 代伟.北戴河及相邻地区近岸海域农业面源污染测算及特征分析[J].河南农业科学,2013,42(2):58-61.
- Dai Wei. Estimation of agricultural non-point source pollution emission in Beidaihe coastal waters and its characteristic analysis [J]. Journal of Henan Agricultural Sciences, 2013,42(2):58-61.
- [19] 王思如,杨大文,孙金华,等.我国农业面源污染现状与特征分析[J].水资源保护,2021,37(4):140-147.
- Wang Siru, Yang Dawen, Sun Jinhua, et al. Analysis on status and characteristics of agricultural non point source pollution in China [J]. Water Resources Protection, 2021,37(4):140-147.
- [20] 马军旗,乐章.中国农业面源污染的空间差异与影响因素分析[J].农业现代化研究,2021,42(6):1137-1145.
- Ma Junqi, Le Zhang. The analysis of the spatial difference and its influencing factors of agricultural non-point source pollution in China [J]. Research of Agricultural Modernization, 2021,42(6):1137-1145.
- [21] 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. Temporal and spatial variation characteristics and source analysis of agricultural non-point source pollution load in Guangdong during the past 20 years [J]. Environmental Science, 2022,43(6):3118-3127.
- [22] 叶飞,卞新民,胡大伟,等.江苏省农业非点源污染地区差异评价与控制对策[J].水资源保护,2006,22(6):86-88.
- Ye Fei, Bian Xinmin, Hu Dawei, et al. Regional difference and countermeasures of agricultural non-point source pollution in Jiangsu Province [J]. Water Resources Protection, 2006,22(6):86-88.
- [23] 吴志峰,胡永红,李定强,等.城市水生态足迹变化分析与模拟[J].资源科学,2006,28(5):152-156.
- Wu Zhifeng, Hu Yonghong, Li Dingqiang, et al. Analyzing and modeling temporal variation of water ecological footprint in Guangzhou city of China [J]. Resources Science, 2006,28(5):152-156.
- [24] 张勃,刘秀丽.基于ARIMA模型的生态足迹动态模拟和预测:以甘肃省为例[J].生态学报,2011,31(20):6251-6260.
- Zhang Bo, Liu Xiuli. Dynamic ecological footprint simulation and prediction based on ARIMA Model: A case study of Gansu Province, China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2011,31(20):6251-6260.