



楚天舒, 赖世宣, 杨行, 赵智强, 郭青霞. 基于地表水目标水质的畜禽粪便水环境承载力估算[J]. 中国农业大学学报, 2024, 29(01): 146-156.
CHU Tianshu, LAI Shixuan, YANG Hang, ZHAO Zhiqiang, GUO Qingxia. Estimation of water environmental bearing capacity of animal manure based on surface water target quality[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2024, 29(01): 146-156.
DOI: 10.11841/j.issn.1007-4333.2024.01.14

基于地表水目标水质的畜禽粪便水环境承载力估算

楚天舒^{1,2} 赖世宣³ 杨行³ 赵智强³ 郭青霞^{4*}

- (1. 中国农业大学 资源与环境学院, 北京 100193;
2. 农业农村部规划设计研究院 农村能源与环保研究所/农业农村部 资源循环利用技术与模式重点实验室,
北京 100125;
3. 中国农业大学 工学院, 北京 100083;
4. 山西农业大学 资源环境学院, 山西 太谷 030801)

摘要 针对南方水网地区畜禽养殖业发展受限问题,以浙江省江山港流域为研究对象,实地调研核定流域水污染物来源途径与入河污染负荷量;基于QUAL2K模型,建立地表水水质响应模型,评估江山港流域在达到目标水质时的畜禽粪便水环境承载力;运用情景分析法探究畜禽养殖与地表水水质响应关系。结果表明:1)2020年江山港流域入河负荷量为190.564 t(以氮计),土壤流失、污水处理厂、化肥施用、有机肥施用和水产养殖分别占总负荷的70.0%、14.8%、11.0%、2.8%和1.4%。2)当水质目标设定为达到I类和优于II类时,江山港流域能承载畜禽最大养殖量分别为133.5万和1622.1万头猪当量,当前养殖规模未超载。3)江山港流域地表水水质对畜禽养殖量的响应关系弱,畜禽养殖不是流域水环境保护的制约因素。建议江山港流域加强生态沟渠的建设与管理,协同实现畜禽养殖业发展与水环境保护。

关键词 畜禽粪便; 水环境承载力; 地表水水质; QUAL2K模型; 污染负荷

中图分类号 X03.5 文章编号 1007-4333(2024)01-0146-11 文献标志码 A

Estimation of water environmental bearing capacity of animal manure based on surface water target quality

CHU Tianshu^{1,2}, LAI Shixuan³, YANG Hang³, ZHAO Zhiqiang³, GUO Qingxia^{4*}

- (1. College of Resources and Environmental Sciences, China Agricultural University, Beijing 100193, China;
2. Institute of Rural Energy and Environmental Protection, Academy of Agricultural Planning and Engineering/Key Laboratory of Technologies and Models for Cyclic Utilization from Agricultural Resources, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Beijing 100125, China;
3. College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China;
4. College of Resources and Environment, Shanxi Agricultural University, Taigu 030801, China)

Abstract Aiming at the limited development of livestock and poultry breeding industry in the southern water network region, this study investigated the sources of water pollutants and evaluated the carrying capacity of the water environment in the Jiangshangang watershed in Zhejiang Province. The QUAL2K model was employed to establish a surface water quality response model for livestock and poultry manure, and the scenario analysis was conducted to explore the relationship between livestock and poultry farming and

收稿日期: 2023-05-02

基金项目: 农业农村部资源循环利用技术与模式综合性重点实验室开放课题(KLTMCUAR2021-3); 山西省回国留学人员科研资助项目(2022-111)

第一作者: 楚天舒(ORCID:0000-0003-4143-7017), 助理研究员, 博士, 主要从事农业资源高效利用与环境保护研究, E-mail: chuts@cau.edu.cn

通讯作者: 郭青霞(ORCID:0000-0003-2268-5680), 教授, 主要从事土地利用与规划研究, E-mail: gqx696@163.com

surface water quality response. The results indicated that: The nitrogen pollution load entering the river in the Jiangshangang watershed was 190.564 metric ton in 2020, and the major contributors, soil erosion, wastewater treatment plants, chemical fertilizer, and organic fertilizer application, and aquaculture contributed 70.0%, 14.8%, 11.0%, 2.8% and 1.4% of the total load, respectively. When the water quality target was set to reach Class I or better than Class II, their theoretical maximum carrying capacities of livestock and poultry farming in the watershed were 1.335 million and 16.221 million pig equivalents, respectively. The response relationship between surface water quality and livestock and poultry farming was weak, suggesting that livestock and poultry farming was not a limiting factor for water environment protection. Strengthening the construction and management of ecological channels to achieve the coordinated development of animal husbandry and water environment protection in the region is recommended in this study.

Keywords animal manure; water environmental bearing capacity; surface water quality; QUAL2K model; pollutant load

我国是畜禽养殖大国,2020年奶牛、肉牛、肉羊、生猪、家禽5大畜禽养殖量约为16亿头猪当量^[1]。其中,南方水网地区的畜禽养殖量约占全国总养殖量的43%^[1],是我国畜禽养殖的重要区域。该区域河网稠密、湖泊众多,也是重要的水源地。2013年黄浦江死猪事件震惊全国^[2],畜禽养殖与环境保护的矛盾凸显。随着国家宏观政策对水网地区畜禽养殖规模调控的日益重视,如何科学估算区域畜禽粪便承载力,调整畜禽养殖规模,促进畜禽养殖与环境保护的协调发展,成为该地区农业绿色发展面临的核心问题。

当前,关于畜禽粪便承载力的研究与应用较为丰富。在面向土壤环境方向,主要以作物养分需求与土壤肥力为基础,核算单位面积粪肥施用量与畜禽承载量。我国少数民族聚集地区(云南省、西藏自治区全域以及四川省的凉山、甘孜和阿坝州)的粪肥还田利用可满足该地区作物磷和钾养分需求,但不能满足氮养分需求^[3]。以氮肥供给平衡计算,青州市、莒南县、武强县的畜禽承载力分别为100.9万、225.4万和72.7万头猪当量,多于实际养殖量68.0万、135.3万和23.6万头猪当量,畜牧养殖量增长潜力较大^[4]。在对江苏省沿海13个县的承载力评估中发现,以磷计算的环境风险指数高于以氮计算的,其中大丰区、灌南县高达4.07和2.07,未来须重视磷养分管理^[5]。此外,考虑到土壤重金属^[6]与抗生素^[7]污染风险,已有研究建立了物质流动模型定量评估了黑龙江农垦和新疆生产建设兵团的畜禽粪便农田承载力。在面向水环境方向,Yang^[8]等结合承载力与SWAT模型模拟分析江西省各县农田粪便消纳能力与养分地表径流损失风险时发现,东乡区、信丰县和龙南市粪肥养分过量,容易

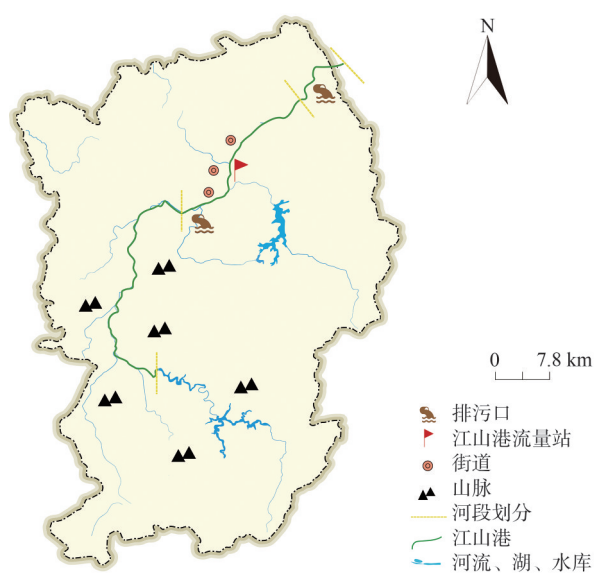
引发地表水水质劣于V类水标准,进而造成水环境污染风险。翟敏婷等^[9]运用QUAL2K模型模拟大连市登沙河流域氨氮、总磷的迁移转化规律发现,畜禽养殖和农田种植分别是氨氮和总磷污染的主要来源。洪夕媛等^[10]运用QUAL2K模型仿真分析了永定河流域张家口流域水环境容量,建议该流域未来采取畜禽粪便综合利用与种植结构优化等措施,从而消减31.8%化学需氧量负荷和62.3%氨氮负荷。而当前研究未能揭示畜禽养殖与地表水水质响应关系,无法科学服务于流域水环境保护与养殖业发展潜力评估。

南方水网地区作为我国重要畜禽养殖区域,如何根据流域地表水环境污染机制,构建面向水环境保护的畜禽粪便承载力模型,是当前亟须解决的科学问题。本研究拟以浙江省江山港流域为研究对象,实地调研确定流域水污染物来源途径,核算入河污染负荷量;基于QUAL2K模型,建立地表水水质响应模型,评估江山港流域在达到目标水质情况下畜禽粪便水环境承载力;运用情景分析法探究畜禽养殖与地表水水质响应关系,以期为南方水网地区畜禽养殖业发展与水环境保护提供参考资料。

1 材料与方法

1.1 研究区域

浙江省江山港干流全长134 km,是钱塘江上游衢江右岸的第一条支流,其所属的江山港流域(118.33°~118.83°(E), 28.25°~28.87°(N))是典型的亚热带季风气候,平均年降水量为1 837.7 mm,流域总面积约为1 946 km²,主要位于江山市内(图1),流域人口约为61万^[11]。在生态环境方面,江山港流域着力于水资源科学利用、水生态保护与水



基于审图号:浙S(2022)34。
Based on drawing review No. 浙S(2022)34.

图1 江山港流域示意图

Fig. 1 Sketch map of Jiangshangang watershed

环境治理,重点开展五水共治工作。在农业生产方面,江山港流域是传统的生猪养殖区,2011年生猪出栏量高达134.87万头,而后受到非洲猪瘟、环保

督察等多方面影响,2020年下降至17.77万头,畜禽粪便量约为70万t^[12]。该流域畜禽养殖业未来是否还有发展潜力,与水生态环境保护是否能协同实现,成为区域农业绿色发展的重要议题。

1.2 研究思路

本研究团队实地调研了江山港流域典型的农田、养殖场、污水处理厂等地,明晰了江山港流域水污染负荷来源(图2)。点源负荷主要来自于工业源与生活源。非点源负荷来源于农田种植与水产养殖,其中农田种植包含土壤流失、化肥施用和有机肥施用。实际生产中,各源头外排水污染物,形成了点源污染负荷和非点源污染负荷,逐级汇合入江山港,导致流域水质变化。因此,本研究从畜禽养殖量和其他来源开始,采用输出系数法推算出非点源污染负荷量;从污水处理厂排放量推算出点源污染负荷量;将各类入河负荷量与计算参数代入响应模型中,模拟江山港流域水质变化。响应模型检验通过后,本研究模拟了畜禽养殖量变化等情景,以探究畜禽养殖量与地表水水质响应关系,为流域畜禽养殖业发展与水环境保护提供参考资料。

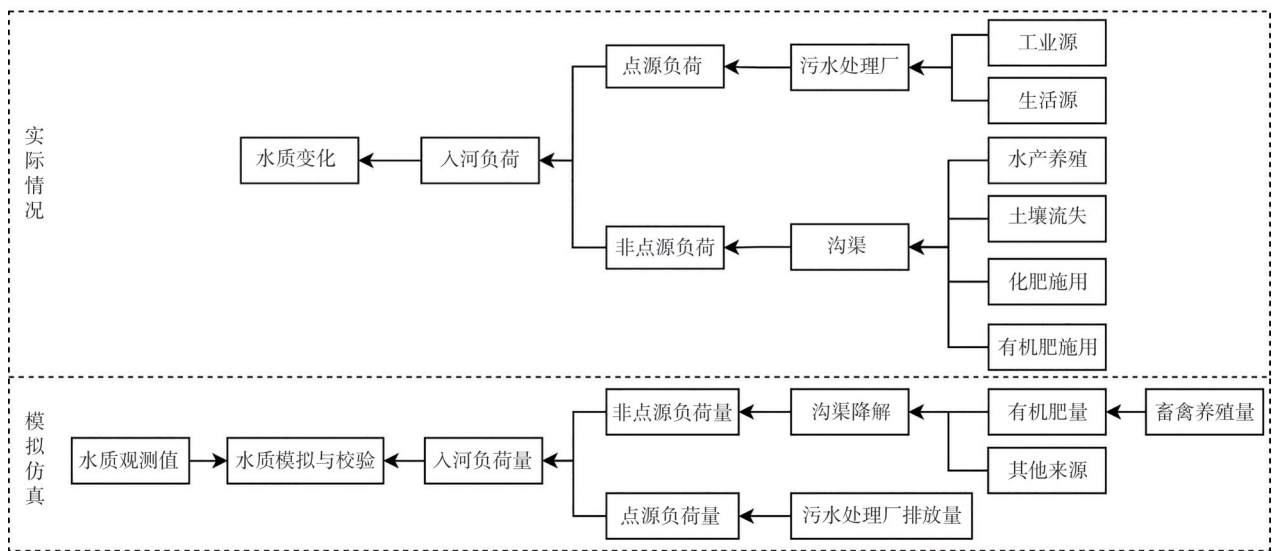


图2 江山港流域水污染负荷实际情况和水质变化模拟仿真流程

Fig. 2 Actual water pollution loads in the Jiangshangang watershed and simulation process for water quality changes

1.3 非点源污染负荷核算

1.3.1 化肥施用

化肥施用导致的非点源污染由化肥施用量与养分地表径流流失系数计算获得:

$$\begin{cases} M_{\text{NOP},\text{S}} = M_{\text{SF}} \times E_{\text{S}} \\ M_{\text{SF}} = M_{\text{SF},1} + M_{\text{SF},2} \times w_{\text{N}} \end{cases} \quad (1)$$

式中: $M_{\text{NOP},\text{S}}$ 为化肥径流产生的非点源污染负荷量,kg; M_{SF} 为化肥的氮量,kg; E_{S} 为化肥氮径流损失

率^[13],%; $M_{SF,1}$ 为氮肥量(以氮元素计)^[12],kg; $M_{SF,2}$ 为复合肥量^[12],kg; w_N 为复合肥中氮元素的质量分数,本研究中取33%^[14]。

1.3.2 有机肥施用

有机肥施用导致的非点源污染由有机肥施用量与养分地表径流流失系数计算获得:

$$\begin{cases} M_{NOP,ON} = M_{ONF} \times E_{ON} \\ M_{ONF} = P \times E_1 \times (1 - R_1) \\ R_1 = R_{dir} + R_{vol} \end{cases} \quad (2)$$

式中: $M_{NOP,ON}$ 为有机肥施用导致的非点源污染负荷量,kg; M_{ONF} 为有机肥的氮量,kg; E_{ON} 为有机肥氮径流损失率^[13],%; P 为畜禽养殖数量^[12],头; E_1 为畜禽的产污系数^[15],kg/头; R_1 为厌氧发酵及储存过程中氮损失率,%; R_{dir} 为硝化反硝化作用导致的氮损失率,本研究中取0.06%^[15]; R_{vol} 为氨挥发作用导致的氮损失率,本研究中取48%^[15]。

1.3.3 土壤流失

土壤流失导致的非点源污染由耕地面积与土壤流失径流系数计算获得:

$$M_{NOP,K} = A \times E_K \quad (3)$$

式中: $M_{NOP,K}$ 为土壤流失产生的非点源污染负荷量,kg; A 为耕地面积^[12],hm²; E_K 为土壤氮流失量^[13],kg/hm²。

1.3.4 水产养殖

水产养殖业非点源污染负荷由水产品产量与排污系数计算获得:

$$\begin{cases} M_{NOP,AQ} = M_{AQ} \times E_{AQ} \\ E_{AQ} = E_2 \times R_1 \times (1 - R_2) \end{cases} \quad (4)$$

式中: $M_{NOP,AQ}$ 为水产养殖业的非点源污染负荷量,kg; M_{AQ} 为水产品产量^[12],kg; E_{AQ} 为单位质量水产品经养殖场末端处理后排入水环境的污水量,kg/kg; E_2 为水产品的产污系数,本研究中取 7.98×10^{-3} kg/kg^[16]; R_1 为水产养殖尾水外排率,本研究中取20.0%^[17]; R_2 为尾水中总氮的去除率,本研究中取52.5%^[18]。

1.3.5 非点源污染负荷核算

非点源负荷经过农田沟渠汇入河流。在沟渠中,因为植物吸附、沉淀等多重作用,部分水污染物被降解。因此,将沟渠降解率纳入核算中:

$$M_{NOE} = (M_{NOP,S} + M_{NOP,ON} + M_{NOP,AQ} + M_{NOP,K}) \times (1 - R_3) \times R_4 \quad (5)$$

式中: M_{NOE} 为非点源污染排放进入河流中的负荷,kg; R_3 为沟渠的总氮降解率,本研究中取19.4%^[19-32]; R_4 为沟渠出水口中氨氮占总氮的质量分数,本研究中取29.3%^[23,33]。

1.4 点源污染负荷核算

点源污染负荷数据来源于浙江省污染源自动监控信息管理平台。目前江山港流域自动监控的排污口为2处污水处理厂排污口,其年出水量详见表1。其中,贺村污水处理厂距河下游断面30.0 km,地理位置118.69°(E)、28.79°(N)^[34];鹿溪污水处理厂距下游断面4.5 km,地理位置118.57°(E)、28.68°(N)^[34](图1)。

表 1 江山港流域贺村和鹿溪污水处理厂的氨氮年排放量

Table 1 Annual ammonia nitrogen discharges from Hecun and Luxi wastewater treatment plant in the Jiangshangang watershed

指标 Index	贺村污水处理厂 Hecun wastewater treatment plant		鹿溪污水处理厂 Luxi wastewater treatment plant	
	2019年	2020年	2019年	2020年
年平均出水量 ^[34] /(L/s)	725	734	1 534	1 636
Average annual effluent discharges				
出水中氨氮的年平均质量浓度 ^[34] /(mg/L)	0.26	0.65	0.43	0.28
Annual average concentration of ammonia nitrogen in effluent				
出水中氨氮的年排放量/kg	5 856	14 942	20 976	14 365
Ammonia in effluent for the whole year				

1.5 地表水水质响应模型构建

QUAL2K 模型是美国环境保护署基于

QUAL2E 更新研制的一维水质模型,由于其适用性广、操作方便等特点,被广泛应用于流域水质模拟

仿真与管理研究^[9,35-36]。因此,本研究以 QUAL2K 模型为基础,构建地表水水质响应模型,定量表征畜禽养殖量与地表水水质的关系。

1.5.1 江山港河段划分

QUAL2K 模型是一维水质模型,其假设在横断面上,污染物在水体中是均匀混合的。在纵向

上,QUAL2K 模型需要对河段进行划分,水文性质(比降、河底宽度等)接近的河段被划分为同一河段,模型将逐段计算水质以提高计算精度。本研究根据江山港流域主要的点源排污口和河道宽度变化情况,把江山港的河段划分成 3 段(表 2 和图 1)。

表 2 QUAL2K 模型中江山港的河段划分结果
Table 2 Section division result of Jiangshangang in QUAL2K model

河段划分位置 Location of the river section	距起点距离/km Distance between starting point	海拔/m Elevation	经度(E)/(°) Longitude	纬度(N)/(°) Latitude
起点 Starting point	0	182	118.53	28.48
1、2 河段交界处 Junction of sections 1 and 2	30.0	111	118.60	28.67
2、3 河段交界处 Junction of sections 2 and 3	55.5	79	118.71	28.82
终点 Ending point	60.0	73	118.74	28.84

1.5.2 水文参数

江山港干流量主要来自于源头来水与由降雨形成的地表径流汇入河流。以研究数据可获得为前提,查阅水文观测资料^[37]获取源头来水量,地表径流量采用 SCS-CN 模型^[38]估算。根据经典水平衡方程与经验推导,获得地表径流量:

$$\begin{cases} Q_d = \frac{(P - 0.2S)^2}{P + 0.8S} \\ S = \frac{25400}{N_c} - 254 \end{cases} \quad (6)$$

式中: Q_d 为地表径流量,mm; P 为降雨量,mm; S 为潜在入渗量,mm; N_c 为径流曲线数^[39]。按照式(6)计算得到,2019 和 2020 年江山港干流年径流量分别为 1.71 亿和 2.77 亿 m^3 ,平均流量为 5.42 和 8.79 m^3/s 。

1.5.3 气象参数

查阅相关资料获得模型所需的气象参数:江山港流域的年均蒸发量为 1 406.8 mm^[39];全年整点平均风速为 8.9 m/s^[40]。2019 和 2020 年,江山港流域的云层覆盖比例分别为 69.0% 和 70.4%^[41];平均温度分别为 18.4 和 18.5 $^{\circ}C$ ^[40];平均相对湿度为 18.4% 和 18.5%^[40];年均露点温度分别为 7.0 和 7.4 $^{\circ}C$ ^[40]。

1.5.4 化学反应动力学

当地生态环境保护“十四五”规划中指出,氨氮和化学需氧量为江山港流域主要污染物控制指标^[42];并且,该流域是浙江省传统的内陆水产养殖区,氨氮对鱼类产生明显的毒性效应^[43],也是渔场重要的水质监测指标。因此,本研究选择氨氮作为定类因子。根据 HJ 2.3—2018《环境影响评价技术导则 地表水环境》^[44]的技术指导,采用化学反应动力学方程式组表征氨氮在溶解相中主要的输入与输出过程:

$$\begin{cases} \rho_{\Delta\text{ammo}} = \rho_{\text{Hydr}} - \rho_{\text{Nitrif}} - \rho_{\text{ammo, loss}} \\ \rho_{\text{Hydr}} = K_1 \times \rho_o \\ \rho_{\text{Nitrif}} = F \times K_2 \times \rho_a \\ K_1 = k_1 \times \theta_1^{(20-t)} \\ K_2 = k_2 \times \theta_2^{(20-t)} \end{cases} \quad (7)$$

式中: $\rho_{\Delta\text{ammo}}$ 为河流中氨氮质量浓度的变化量,mg/L; ρ_{Hydr} 为有机氮水解产生的铵态氮质量浓度,mg/L; ρ_{Nitrif} 为硝化反应减少的氨氮质量浓度,mg/L; $\rho_{\text{ammo, loss}}$ 为氨挥发损失的质量浓度,mg/L,由该软件直接根据气压、温度等参数运用亨利定律计算获得; K_1 为受到温度调控的有机氮水解速率, d^{-1} ; t 为温度, $^{\circ}C$; ρ_o 为有机氮质量浓度^[40],mg/L; F 为氧气

体积分数对硝化作用的减缓比例^[45],%; K_2 为受温度调控的硝化速率^[45], d^{-1} ; ρ_a 为氨氮质量浓度^[40], mg/L ; k_1 和 k_2 为20℃时水解速率和硝化速率^[45], d^{-1} ; θ_1 和 θ_2 为温度修正因子^[45]。

1.6 畜禽粪便水环境承载力估算

根据《浙江省水生态环境保护“十四五”规划》^[46]中的水生态环境保护方案,衢州市出境断面水质将达到或优于Ⅱ类。由于江山港是衢江上游的支流,本研究将江山港流域断面水质目标设定为达到Ⅰ类和优于Ⅱ类2种方案。达到Ⅰ类时,氨氮质量浓度阈值为0.15 mg/L;优于Ⅱ类时,氨氮质量浓度阈值为0.30 mg/L^[47]。在2种水质方案情况下,应用地表水水质响应模型推算出能够承载的畜禽最大养殖量,再与江山港流域2020年畜禽实际养殖量对比,判断是否出现了环境超载的情况。

1.7 情景分析

情景分析法^[48]是在特定情况下,模拟某些因素变化对结果的影响,可为事先决策提供理论依据。本研究采用情景分析法探究畜禽养殖量与地表水水质的响应关系。设立如下2种情景分析内容。

情景分析1:基于地表水水质响应模型,本研究模拟分析生猪养殖量为-50%~50%的变化对流域水质的影响。进而,模拟分析了生猪养殖量恢复到2011年水平^[12]时对流域水质的影响。具体而言,模拟了生猪养殖量增长89%(2011年生猪养殖量的1/4)、279%(2011年生猪养殖量的1/2)、469%(2011年生猪养殖量的3/4)、656%(2011年生猪养殖量)。

情景分析2:基于地表水水质响应模型,本研究模拟分析沟渠降解率在-50%~50%的变化对流域水质的影响。

2 结果与分析

2.1 入河污染负荷量

2019和2020年江山港流域的入河负荷量分别为188.651和190.564 t(以氨氮计,全文同)(图3)。其中,土壤流失量约占总负荷的70.0%,为江山港流域的主要负荷来源途径,这与刘宏斌等^[49]对农田氮磷流失的监控结果相似。污水处理厂、化肥施用和有机肥施用等途径次之,分别约占总负荷的14.8%、11.0%和2.8%。水产养殖排放污染负荷最少,仅占总负荷的1.4%,其原因是江山港流域规模化水产

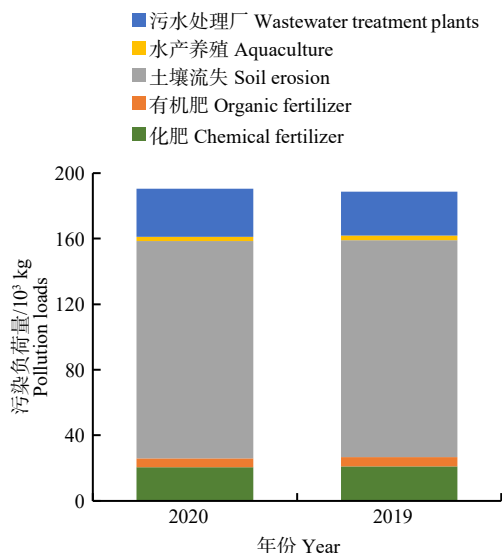


图3 2019和2020年江山港流域入河污染负荷量

Fig. 3 Jiangshangang river pollution load in 2019 and 2020

养殖场的尾水零直排率达80.0%,大部分污染负荷在源头已被有效处理。总的来说,江山港流域农业源污染占主导地位,而生活源与工业源占比较低。

2.2 地表水水质响应模型校验

参考常规建模与校验方法^[50],本研究使用2019年江山港流域年平均数据进行建模与调整参数,并采用2020年年平均数据进行模型精度校验。由地表水水质响应模型模拟结果可知,江山港前30 km左右在丘陵间穿梭,水质优良并且几乎保持不变。此后,水质受到沿岸农田及支流的非点源污染影响,河流中氨氮质量浓度呈现上升趋势,并且在2家污水处理厂所在处加速上升。到流域末端,氨氮质量浓度达到最高值。2019年模拟值与断面监测值的相对误差为0.8%(图4(a))。将2020年江山港流域年平均数据带入模型中,计算获得2020年模拟值,通过断面水质年平均监测值对模型精度进行检验,相对误差仅为-2.7%(图4(b)),这说明模型对江山港水质变化的模拟结果良好。仿真流域污染负荷动态变化,可支撑后续畜禽养殖与地表水水质响应关系分析。

2.3 畜禽粪便水环境承载力评估

当水质目标设定为达到Ⅰ类和优于Ⅱ类时,应用地表水水质响应模型推导计算出江山港流域能够承载的畜禽最大养殖量分别为133.5万和1622.1万头猪当量,分别是2020年江山港流域的实际畜禽养殖量28.4万头猪当量的4.7和57.1倍。当前江山港

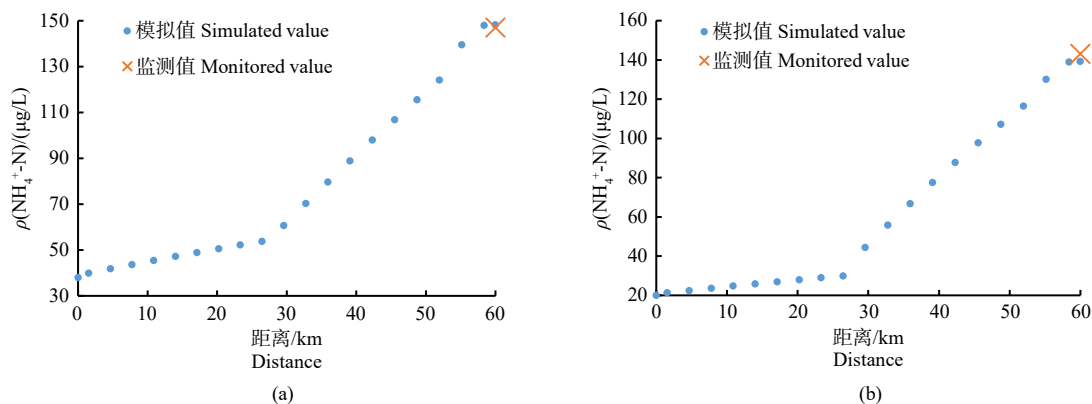


图4 地表水水质响应模型模拟(a)与校验结果(b)

Fig. 4 Modeling result (a) and verification result (b) of surface water quality response model

流域畜禽养殖规模未超过地表水水环境承载力,存在较大的养殖潜力。

2.4 情景分析

按照式(1)~(7)计算可得,生猪养殖量增加50%,流域地表水氨氮质量浓度增大1.05%;生猪养殖量增加656%,氨氮质量浓度仅增大13.62%

(图5(a))。由此可见,江山港流域地表水水质对畜禽养殖量的响应关系弱。其原因是,当地政府在养殖场源头端禁止污水直排,在农田末端实行粪肥还田利用,减少了污染物排放量,弱化了畜禽养殖量与地表水水质的响应关系。因此,当前畜禽养殖不是江山港流域水环境保护的制约因素。

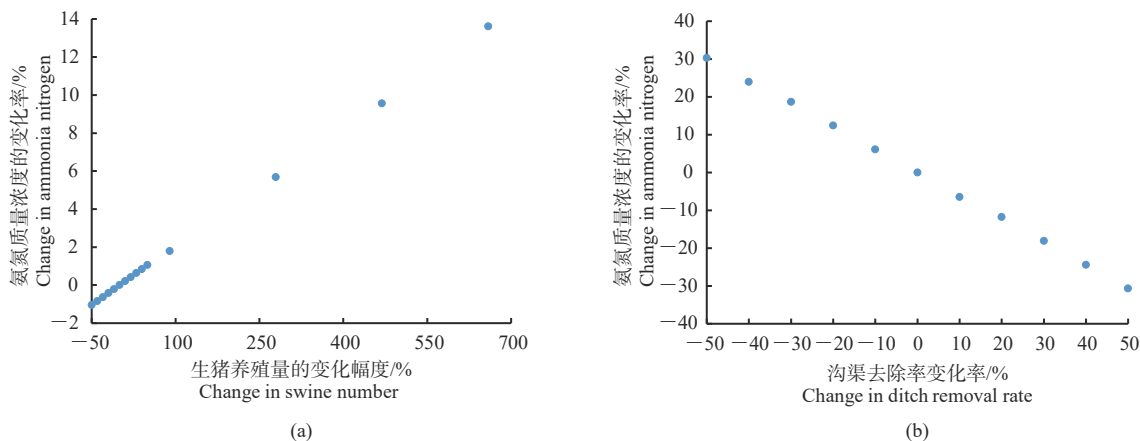


图5 生猪养殖量(a)和沟渠去除率(b)对氨氮质量浓度的影响分析结果

Fig. 5 Influence analysis results of swine number (a) and ditch removal rate (b) on ammonia nitrogen concentration

当沟渠降解率增长50%,流域地表水氨氮质量浓度将下降30.71%(图5(b))。由此可见,江山港流域地表水水质对沟渠降解率的响应关系强。这是因为非点源污染为江山港流域水污染的主要来源,非点源污染形成后经沟渠层层汇入江山港干流,而沟渠降解作用是非点源污染负荷的重要削减途径。因此,未来江山港流域若考虑恢复至畜禽养殖大县的生产水平,则需提升沟渠降解率,从而有效削减入河污染负荷量,保障流域水环境。

3 讨论

3.1 行业标准的承载力测算结果

畜禽粪便承载力作为区域种养结合规划的重要指标,用于调整与优化种养业生产规模。按照现行行业标准NY/T 3877—2021《畜禽粪便土地承载力测算方法》^[51],在粪肥施用比例为50%时,2020年农田承载力为54.66万头猪当量,与当前养殖的28.41万头猪当量相比,未超过环境承载力。本研究结果同样显示,江山港流域未超载,与行业标准

测算结论一致。但从测算方法上讲,本研究是从流域水环境保护的角度出发,探究畜禽养殖与地表水水质的响应关系。而行业标准中的方法是从养分管理的角度出发,以作物养分需求与粪肥养分供给平衡为基准,建立了作物种植与畜禽养殖的响应关系。从研究目标上讲,本研究着重于流域水环境保护,行业标准中的方法立足于农田养分管理。因此,未来研究可根据研究区域的环境特征,从多角度综合估算承载力,考虑方法之间的差异,合理制定种养业发展规划,以促进区域种养深度结合。

3.2 模型的时间尺度选择

水质响应模型的时间尺度可选逐日、逐月或逐年。若时间尺度为逐日,这将对数据的可获得性和模型的稳健性带来巨大挑战,从而不利于研究成果落地推广实施。若时间尺度为逐月,由流域断面水质监测数据可知,12月—来年2月氨氮质量浓度相对较高,3月—11月相对较低,最高月与最低月平均浓度相差6倍。这将导致逐月的畜禽养殖承载力估算结果出现“两极分化”情况。畜禽养殖周期多为1年及以上,采用最高月平均浓度的承载力结果必将严重制约区域畜禽养殖潜力,不利于养殖企业的可持续发展。若时间尺度为逐年,采用年平均浓度计算,基本能表征全年大部分月份的水质情况,减缓最高值对畜禽养殖承载力的约束,释放养殖潜力,故本研究选择时间尺度为逐年。但极值对模拟结果的影响程度还有待深入探究。因此,未来研究还须深入探究时间尺度选择问题,兼顾数据可获得性与变异性、模型适用性等诸多方面。

3.3 生态沟渠的建设与管理

据江山市“十四五”规划显示,力争到2025年生猪年出栏量达到40万头^[52]。结合本研究结果可知,地表水水质目标设定为达到Ⅰ类,江山港流域能承载133.5万头猪当量,并且畜禽养殖对流域水质影响较弱。因此,江山港流域未来能承载更多的生猪饲养,但仍需谨慎防控非点源污染。

据实地调研,江山港流域当前已经理顺了源头减量和末端利用的工作,带来了较好的水环境效益。在未来工作中,过程拦截应作为重点内容。沟渠降解是非点源污染的重要消减与拦截途径(图5(b)),生态沟渠相较于普通沟渠有着更好的拦截效应^[53],可进一步削弱畜禽养殖对地表水水质的影响。因此,建议推进流域重点入河口的生态沟渠建设,强

化沟渠的日常维护与管理,保障流域水生态环境。

4 结 论

本研究构建了地表水水质响应模型评估江山港流域畜禽粪便水环境承载力,运用情景分析法探究未来畜禽养殖业的发展潜力与途径,得到以下结论:

1)2019和2020年江山港流域入河负荷量分别为188.651和190.564 t。其中,土壤流失、污水处理厂、化肥施用、有机肥施用和水产养殖分别占总负荷的70.0%、14.8%、11.0%、2.8%和1.4%。

2)2019和2020年地表水水质响应模型模拟结果与断面监测值的相对误差分别为0.8%和-2.7%,说明模型对江山港水质变化的模拟结果良好。当水质目标设定为达到Ⅰ类和优于Ⅱ类时,地表水水质响应模型推导计算出江山港流域水环境能够承载的畜禽最大养殖量分别为133.5万和1622.1万头猪当量,是实际养殖量的4.7和57.1倍,目前江山市畜禽养殖规模未超过地表水水环境承载力。

3)江山港流域地表水水质对畜禽养殖量的响应关系弱,而对沟渠降解率的响应关系强。畜禽养殖不是江山港流域水环境保护的制约因素。

参考文献 References

- [1] 国家统计局. 中国统计年鉴: 2021[M]. 北京: 中国统计出版社, 2022
National Bureau of Statistics. *China Statistical Yearbook: 2021* [M]. Beijing: China Statistics Press, 2022 (in Chinese)
- [2] 林琳. “黄浦江死猪事件”留下一串问号[N]. 工人日报, 2013-03-26(2)
Lin L. ‘Huangpu River dead pig incident’ leaves a string of question marks[N]. *Workers’ Daily*, 2013-03-26(2) (in Chinese)
- [3] Wang B, Li M, Wen X Y, Yang Y K, Zhu J P, Belzile N, Chen Y W, Liu M Q, Chen S. Distribution characteristics, potential contribution, and management strategy of crop straw and livestock-poultry manure in multi-ethnic regions of China: A critical evaluation [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 274: 123174
- [4] Du Z W, Liu Y X, Ding J T, Zou G Y, Hu Z Y, Zhang R L. Evaluation of the local decoupling of livestock and cropland in the Huang-Huai-Hai region [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2022, 29(60): 90911-90922
- [5] Li J G, Liu L L. Determining the carrying capacity and environmental risks of livestock and poultry breeding in coastal areas of eastern China: An empirical model[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2020, 27(8): 7984-7995
- [6] 楚天舒, 王柄雄, 高思程, 成天一, 杨增玲. 基于农田土壤重金属污染风险筛选值的畜禽粪污农田承载力估算[J]. 中国农业大学学报, 2021, 26(2): 125-138
Chu T S, Wang B X, Gao S C, Cheng T Y, Yang Z L. Estimation on

- farmland carrying capacity for livestock and poultry manure based on risk screening values for farmland soil heavy metal contamination[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2021, 26(2): 125-138 (in Chinese)
- [7] 楚天舒, 王柄雄, 孟坦, 赖世宣, 杨增玲. 基于农田土壤抗生素生态风险值的畜禽粪污农田承载力估算[J]. 中国农业大学学报, 2021, 26(3): 138-151
- Chu T S, Wang B X, Meng T, Lai S X, Yang Z L. Estimation on farmland carrying capacity for livestock and poultry manure based on farmland soil antibiotics ecological risk values [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2021, 26(3): 138-151 (in Chinese)
- [8] Yang N, Chen L, Wang W Z, Shen Z Y. The land carrying capacity and environmental risk assessment of livestock and poultry breeding considering crop planting [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2021, 28(37): 51356-51368
- [9] 翟敏婷, 辛卓航, 韩建旭, 张璐, 张弛. 河流水质模拟及污染源归因分析[J]. 中国环境科学, 2019, 39(8): 3457-3464
- Zhai M T, Xin Z H, Han J X, Zhang L, Zhang C. Water quality simulation and multi-source attribution analysis [J]. *China Environmental Science*, 2019, 39(8): 3457-3464 (in Chinese)
- [10] 洪夕媛, 雷坤, 孙明东, 程全国. 永定河流域张家口段水质模拟及水环境容量研究[J]. 环境污染与防治, 2021, 43(10): 1249-1254, 1262
- Hong X Y, Lei K, Sun M D, Cheng Q G. Water quality simulation and water environmental capacity calculation in Zhangjiakou section of Yongding River Basin [J]. *Environmental Pollution and Control*, 2021, 43(10): 1249-1254, 1262 (in Chinese)
- [11] 浙江省水利厅. 美丽河湖建设行动成果展: 江山江山港[EB/OL]. [2023-05-02]. http://slt.zj.gov.cn/art/2021/1/27/art_1513169_59017073.html
- Water Resources Department of Zhejiang Province. Beautiful river and lake construction action achievement exhibition: Jiangshan Jiangshangang [EB/OL]. [2023-05-02]. http://slt.zj.gov.cn/art/2021/1/27/art_1513169_59017073.html (in Chinese)
- [12] 潘信, 郑红福, 姜理平. 衢州统计年鉴: 2020[M]. 北京: 中国统计出版社, 2021
- Pan J, Zheng H F, Jiang L P. *Quzhou Statistical Yearbook: 2020* [M]. Beijing: China Statistics Press, 2021 (in Chinese)
- [13] 任天志, 刘宏斌, 范先鹏, 邹国元, 刘申. 全国农田面源污染排放系数手册[M]. 北京: 中国农业出版社, 2015
- Ren T Z, Liu H B, Fan X P, Zou G Y, Liu S. National Handbook on Emission Coefficient of Farmland Non-Point Source Pollution [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2015 (in Chinese)
- [14] 楚天舒, 王德睿, 韩鲁佳, 杨增玲. 黑龙江垦区农田土壤养分平衡分析与评价[J]. 农业工程学报, 2020, 36(15): 19-27
- Chu T S, Wang D R, Han L J, Yang Z L. Analysis and evaluation of farmland soil nutrient balance in Heilongjiang Land Reclamation Areas, China [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2020, 36(15): 19-27 (in Chinese)
- [15] IPCC. 2019 refinement to the 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventory[R]. Switzerland: Intergovernmental Panel on Climate Change, 2019
- [16] 全国污染源普查水产养殖业污染源产排污系数测算项目组. 第一次全国污染源普查水产养殖业污染源产排污系数手册[M]. 北京: 中国水产科学研究院, 2010
- National Pollution Source Census Aquaculture Pollution Source Production and Discharge Coefficient Measurement Project Team. *The First National Pollution Source Census Aquaculture Pollution Source Production and Discharge Coefficient Manual* [M]. Beijing: Chinese Academy of Fishery Sciences, 2010 (in Chinese)
- [17] 衢江区农业农村局. 坚决保障农业农村领域安全生产 助力乡村振兴高质量发展[EB/OL]. [2023-05-02]. http://nynct.zj.gov.cn/art/2022/1/24/art_1630346_58939502.html
- Qiujiang Distrital Bureau of Agriculture and Rural Affairs. Resolutely ensure safe production in agriculture and rural areas to help revitalize the countryside with high quality development [EB/OL]. [2023-05-02]. http://nynct.zj.gov.cn/art/2022/1/24/art_1630346_58939502.html (in Chinese)
- [18] 刘梅, 原居林, 倪蒙, 练青平, 郭爱环. “三池两坝”多级组合工艺对内陆池塘养殖尾水的处理[J]. 环境工程技术学报, 2021, 11(1): 97-106
- Liu M, Yuan J L, Ni M, Lian Q P, Guo A H. Treatment of inland pond aquaculture tail water by multi-stage combined process of 'three ponds and two dams' [J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2021, 11(1): 97-106 (in Chinese)
- [19] 何军, 崔远来, 吕露, 易帆, 段中德. 沟渠及塘堰湿地系统对稻田氮磷污染的去除试验[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(9): 1872-1879
- He J, Cui Y L, Lyu L, Yi F, Duan Z D. Experiments on removal effects of ditch-pond wetland system on N and P pollutants from paddy field [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(9): 1872-1879 (in Chinese)
- [20] 刘丰雷. 渔场沟渠水生植物群落结构及部分生物净水效果研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2013
- Liu F L. Studies on the aquatic plant community structure of ditches and water purification effect of some living organisms in the fisheries [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2013 (in Chinese)
- [21] Tang V T, Tran N B, Tang T T S, Le H H. 农田生态沟渠效能研究[J]. 黑龙江生态工程职业学院学报, 2017, 30(5): 5-7, 68
- Tang V T, Tran N B, Tang T T S, Le H H. Study on the effectiveness of farmland ecological ditch [J]. *Journal of Heilongjiang Vocational Institute of Ecological Engineering*, 2017, 30(5): 5-7, 68 (in Chinese)
- [22] 舒同, 周佳林, 段婧婧, 薛利祥, 冯彦房, 薛利红, 杨林章. 黑麦草草帘浮床对农田排水中氮的去除效果[J]. 生态与农村环境学报, 2022, 38(6): 787-794
- Shu T, Zhou J L, Duan J J, Xue L X, Feng Y F, Xue L H, Yang L Z. Study on nitrogen removal effect for farmland drainage by floating ryegrass mat [J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2022, 38(6): 787-794 (in Chinese)
- [23] 王岩, 王建国, 李伟, 薄录吉, 杨林章. 三种类型农田排水沟渠氮磷拦截效果比较[J]. 土壤, 2009, 41(6): 902-906
- Wang Y, Wang J G, Li W, Bo L J, Yang L Z. Comparison on removal of nitrogen and phosphorus from hibernar farmland drainage by three kinds of ditches [J]. *Soils*, 2009, 41(6): 902-906 (in Chinese)
- [24] 胡颖. 河流和沟渠对氮磷的自然净化效果的试验研究[D]. 南京: 河海大学, 2005
- Hu Y. Natural removal effect of nitrogen and phosphorus in river and ditch [D]. Nanjing: Hohai University, 2005 (in Chinese)
- [25] Wang J L, Chen G F, Fu Z S, Song X F, Yang L Z, Liu F X. Application performance and nutrient stoichiometric variation of ecological ditch systems in treating non-point source pollutants from paddy fields [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2020, 299: 106989
- [26] Fu D F, Gong W J, Xu Y, Singh R P, Surampalli R Y, Zhang T C. Nutrient mitigation capacity of agricultural drainage ditches in Tai lake basin [J]. *Ecological Engineering*, 2014, 71: 101-107
- [27] 王岩, 王建国, 李伟, 薄录吉, 杨林章. 生态沟渠对农田排水水中氮磷的去

- 除机理初探[J]. 生态与农村环境学报, 2010, 26(6): 586-590
- Wang Y, Wang J G, Li W, Bo L J, Yang L Z. Initial exploration of mechanism of ecological ditch intercepting nitrogen and phosphorus in drainage from farmland [J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2010, 26(6): 586-590 (in Chinese)
- [28] Wu Y F, Dai H L, Wu J Y. Comparative study on influences of bank slope ecological revetments on water quality purification pretreating low-polluted waters[J]. *Water*, 2017, 9(9): 636
- [29] 田上, 沙之敏, 岳玉波, 袁婧, 卢琳芳, 赵峥, 曹林奎. 不同类型沟渠对农田氮磷流失的拦截效果[J]. 江苏农业科学, 2016, 44(4): 361-365
- Tian S, Sha Z M, Yue Y B, Yuan J, Lu L F, Zhao Z, Cao L K. Interception effect of different types of ditches on nitrogen and phosphorus loss in farmland[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2016, 44(4): 361-365 (in Chinese)
- [30] Cui N X, Zhang X, Cai M, Zhou L, Chen G F, Zou G Y. Roles of vegetation in nutrient removal and structuring microbial communities in different types of agricultural drainage ditches for treating farmland runoff [J]. *Ecological Engineering*, 2020, 155: 105941
- [31] Kumwimba M N, Zhu B, Muyembe D K. Assessing the influence of different plant species in drainage ditches on mitigation of non-point source pollutants: N, P, and sediments in the Purple Sichuan Basin[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2017, 189(6): 267
- [32] 徐红灯. 农田排水沟渠对流失氮、磷的截留和去除效应[D]. 北京: 北京化工大学, 2007
- Xu H D. Interception and removal effect of agriculture drainage ditch on nitrogen and phosphorus[D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2007 (in Chinese)
- [33] 张继宗. 太湖水网地区不同类型农田氮磷流失特征[D]. 北京: 中国农业科学院, 2006
- Zhang J Z. Characteristics of nitrogen and phosphorus losses from different farmlands in Tai Lake riverine area [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2006 (in Chinese)
- [34] 浙江省生态环境厅. 浙江省污染源自动监控信息管理平台[EB/OL]. [2023-05-02]. <https://zxjk.sthjt.zj.gov.cn/zxjk/navigation.jsp>
- Department of Ecology and Environment of Zhejiang Province. Information management platform for automatic monitoring of pollution sources in Zhejiang Province [EB/OL]. [2023-05-02]. <https://zxjk.sthjt.zj.gov.cn/zxjk/navigation.jsp> (in Chinese)
- [35] Dalun H, Abdullah M O. Regional leachate discharge, monitoring and the associated riverine pollutants propagation model simulation of Sungai Sarawak in Malaysia [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 303: 127091
- [36] Pashmchi P, Taheriyoun M, Asghari K. Integrated river water quality and quantity management based on undesirability and cost-effectiveness [J]. *River Research and Applications*, 2022, 38(10): 1843-1859
- [37] 中华人民共和国水利部. 中华人民共和国水文年鉴 2020年 第7卷 浙闽台河流水文资料 第1册[M]. 北京: 中华人民共和国水利部, 2021
- Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. *Hydrological Yearbook of the People's Republic of China Vol. 7, 2020 Hydrological Data of Zhejiang-Fujian-Taiwan Rivers Book 1* [M]. Beijing: Ministry of Water Resources of the People's Republic of China, 2021 (in Chinese)
- [38] 王好芳, 赵天宇, 解明月, 张金存. 基于SCS-CN模型确定山区小流域蓄水容量研究[J]. 农业工程学报, 2018, 34(增刊): 200-206
- Wang H F, Zhao T Y, Xie M Y, Zhang J C. Storage capacity determination of small watershed in hilly regions based on SCS-CN model [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2018, 34(S): 200-206 (in Chinese)
- [39] 毛智军, 柳苗. 近41年浙江衢州地区蒸发量变化特征及影响因素分析[J]. 中国农学通报, 2017, 33(3): 135-142
- Mao Z J, Liu M. Evaporation: variation characteristics and influence factors in Quzhou for nearly 41 years[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2017, 33(3): 135-142 (in Chinese)
- [40] 青悦数据. 气象标准版数据库[EB/OL]. [2022-09-01]. https://data.epmap.org/product/china_weather
- Qingyue Data. Meteorological database: standard edition [EB/OL]. [2022-09-01]. https://data.epmap.org/product/china_weather (in Chinese)
- [41] Harris I, Osborn T J, Jones P, Lister D. Version 4 of the CRU TS monthly high-resolution gridded multivariate climate dataset [J]. *Scientific Data*, 2020, 7(1): 109
- [42] 江山市人民政府. 江山市生态环境保护“十四五”规划[EB/OL]. (2021-01-13). https://zjjcmspublic.oss-cn-hangzhou-zwynet-d01a.internet.cloud.zj.gov.cn/jcms_files/jcms1/web1839/site/attach/0/1202df9270cd461f8e1ae8a36b632b84.pdf
- The People's Government of Jiangshan Municipal. The 14th Five-Year Plan for ecological protection in Jiangshan City [EB/OL]. (2021-01-13). https://zjjcmspublic.oss-cn-hangzhou-zwynet-d01a.internet.cloud.zj.gov.cn/jcms_files/jcms1/web1839/site/attach/0/1202df9270cd461f8e1ae8a36b632b84.pdf (in Chinese)
- [43] 吴雪阳, 郭红会, 况宇, 张策, 杨慧, 汤蓉, 张曦, 李大鹏, 李莉. 氮氨胁迫下不同食性鱼类仔鱼抗氧化和非特异性免疫的差异响应[J]. 水生生物学报, 2022, 46(8): 1237-1248
- Wu X Y, Guo H H, Kuang Y, Zhang C, Yang H, Tang R, Zhang X, Li D P, Li L. Antioxidant and non-specific immune responses of four species of fish larvae under ammonia stress [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2022, 46(8): 1237-1248 (in Chinese)
- [44] HJ 2.3—2018 环境影响评价技术导则 地表水环境[S]. 北京: 中国环境出版集团, 2018
- HJ 2.3—2018 Technical guidelines for environmental impact assessment surface water environment [S]. Beijing: China Environment Publishing Group, 2018 (in Chinese)
- [45] Chapra S C, Pelletier G J, Tao H. QUAL2K: A modeling framework for simulating river and stream water quality, version 2.12: Documentation and user's manual [R]. Massachusetts: Civil and Environmental Engineering Dept., Tufts University, 2012
- [46] 浙江省发展和改革委员会. 省发展改革委 省生态环境厅关于印发《浙江省水生态环境保护“十四五”规划》的通知[EB/OL]. [2021-06-08]. https://www.zj.gov.cn/art/2021/6/8/art_1229203592_2301989.html
- Zhejiang Provincial Development and Reform Commission. Provincial development and reform commission provincial department of ecology and environment on the issuance of *Water Ecological Protection in Zhejiang Province, the 14th Five-Year Plan* notice [EB/OL]. [2021-06-08]. https://www.zj.gov.cn/art/2021/6/8/art_1229203592_2301989.html (in Chinese)
- [47] GB 3838—2002 地表水环境质量标准[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2002
- GB 3838—2002 Environmental quality standards for surface water [S]. Beijing: China Environmental Science Press, 2002 (in Chinese)
- [48] 牛海鹏, 牛鹏程, 肖东洋. 情景模拟下农民土地承包经营权退出决策及影响因素分析[J]. 农业工程学报, 2020, 36(10): 235-244
- Niu H P, Niu P C, Xiao D Y. Decision-making of farmers to exit land contract management right and influencing factors under scenario simulation [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural*

Engineering, 2020, 36(10): 235-244 (in Chinese)

- [49] 刘宏斌, 邹国元, 任天志, 欧阳喜辉, 翟丽梅, 杜连凤, 王洪媛, 施卫明, 黄宏坤, 陈安强, 徐钰, 张富林, 张学军, 张敬锁. 全国农田氮磷流失监控技术研究与应用[R]. 北京: 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 2015
- Liu H B, Zhou G Y, Ren T Z, Ouyang X H, Zhai L M, Du L F, Wang H Y, Shi W M, Huang H K, Chen A Q, Xu Y, Zhang F L, Zhang X J, Zhang J S. Research and application of national farmland nitrogen and phosphorus loss monitoring technology [R]. Beijing: The Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, 2015 (in Chinese)
- [50] Yu C Q, Huang X, Chen H, Godfray H C J, Wright J S, Hall J W, Gong P, Ni S Q, Qiao S C, Huang G R, Xiao Y C, Zhang J, Feng Z, Ju X T, Ciais P, Stenseth N C, Hessen D O, Sun Z L, Yu L, Cai W J, Fu H H, Huang X M, Zhang C, Liu H B, Taylor J. Managing nitrogen to restore water quality in China[J]. *Nature*, 2019, 567(7749): 516-520
- [51] NY/T 3877—2021 畜禽粪便土地承载力测算方法[S]. 北京: 中国农业出版社, 2021
- NY/T 3877—2021 Method for calculating land bearing capacity of animal

manure[S]. Beijing: China Agriculture Press, 2021 (in Chinese)

- [52] 江山市发展和改革委员会. 江山市人民政府关于印发《江山市国民经济和社会发展第十四个五年规划和二〇三五年远景目标纲要》的通知[EB/OL]. [2021-12-31]. http://www.jiangshan.gov.cn/art/2021/12/31/art_1229614893_3650859.html
- Jiangshan Development and Reform Bureau. Notice of the People's Government of Jiangshan City on the issuance of the *Fourteenth Five-Year Plan for the National Economic and Social Development of Jiangshan City and the Outline of the Visionary Goals for 2035* [EB/OL]. [2021-12-31]. http://www.jiangshan.gov.cn/art/2021/12/31/art_1229614893_3650859.html (in Chinese)
- [53] 张树楠, 肖润林, 刘锋, 吴金水. 生态沟渠对氮、磷污染物的拦截效应[J]. *环境科学*, 2015, 36(12): 4516-4522
- Zhang S N, Xiao R L, Liu F, Wu J S. Interception effect of vegetated drainage ditch on nitrogen and phosphorus from drainage ditches [J]. *Environmental Science*, 2015, 36(12): 4516-4522 (in Chinese)

责任编辑: 刘迎春



第一作者简介: 楚天舒, 工学博士, 中国农业大学资源与环境学院助理研究员。主要从事农业资源利用与环境保护研究工作, 结合长期实地调研, 针对土壤环境、水环境与大气环境风险防控, 构建畜禽粪便农田承载力模型, 优化畜禽粪便资源化模式, 促进区域种养平衡。主要参加国家重点研发计划, 主持重点实验室开放基金等项目, 已发表相关论文18篇。



通讯作者简介: 郭青霞, 农学博士, 山西农业大学资源环境学院土地资源管理系教授, 博士生导师。山西省自然资源厅决策咨询顾问, 中国土壤学会会员。参编教材2部, 参编专著1部, 发表论文77余篇, 主持和参与来自国家自然科学基金、山西省等科研项目25余项, 荣获省部级奖励3项。