

中文核公期刊/CSCD

请通过网上投稿系统投稿 网址:http://www.aes.org.cn

巢湖典型农村流域面源氮磷污染模拟及来源解析

高田田,谢晖,万能胜,熊竹阳,胡正华,赖锡军

引用本文:

高田田,谢晖,万能胜,熊竹阳,胡正华,赖锡军.巢湖典型农村流域面源氮磷污染模拟及来源解析[J].农业环境科学学报, 2022, 41(11): 2428-2438.

在线阅读 View online: https://doi.org/10.11654/jaes.2022-0231

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

复杂流域氮磷污染物输出特征及模拟——以南京市云台山河流域为例

任智慧,赵春发,王青青,徐蕴韵,郭加汛,王腊春 农业环境科学学报.2021,40(1):174-184 https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0853

基于人为氮净输入及入河系数的流域河流氮输出负荷估算

凡翔, 吴凤平, 孟岑, 叶磊, 李希, 张满意, 李裕元, 吴根义, 吴金水 农业环境科学学报. 2021, 40(1): 185-193 https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0762

基于输出系数模型的1998—2016年洱海流域磷素时空变化特征分析

韦晓雪,李晓琳,郑毅 农业环境科学学报.2020,39(1):171-181 https://doi.org/10.11654/jaes.2019-0389

分布式水土流失型面源污染模型初探

朱凯航, 陈磊, 王怡雯, 刘国王辰, 颜小曼, 郭晨茜, 张亮, 沈珍瑶 农业环境科学学报. 2022, 41(11): 2382-2394 https://doi.org/10.11654/jaes.2022-0676

亚热带典型农林流域面源磷负荷估算与源解析

李情, 唐代生, 孟岑, 李裕元, 吴金水 农业环境科学学报. 2022, 41(11): 2439-2447 https://doi.org/10.11654/jaes.2022-0806



关注微信公众号,获得更多资讯信息

农业环境科学学报 Journal of Agro-Environment Science

高田田,谢晖,万能胜,等. 巢湖典型农村流域面源氮磷污染模拟及来源解析[J]. 农业环境科学学报, 2022, 41(11): 2428-2438. GAO T T, XIE H, WAN N S, et al. Simulation and source analysis of nonpoint source nitrogen and phosphorus pollution export in a typical agricultural catchment draining to Chaohu Lake[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2022, 41(11): 2428-2438.



巢湖典型农村流域面源氮磷污染模拟及来源解析

高田田1,2, 谢晖2*, 万能胜3, 熊竹阳3, 胡正华1*, 赖锡军2

(1.南京信息工程大学气象灾害预报预警与评估协同创新中心,应用气象学院,南京 210044;2.中国科学院南京地理与湖泊研究 所,中国科学院流域地理学重点实验室,南京 210008;3.安徽省巢湖管理局湖泊生态环境研究院,合肥 238000)

摘 要:为探究巢湖典型农村流域面源氮磷污染特征及来源,以巢湖北岸烔炀河流域为对象,基于2018—2020年监测数据和流域 污染源调查数据,采用改进的输出系数法,模拟了该典型流域氮磷污染输出时空变化。结果表明:2018—2020年烔炀河流域面源 污染氮、磷输出平均值分别为(261.33±173.87)t·a⁻¹和(11.03±9.98)t·a⁻¹,水雨情条件大幅改变造成污染输出的年际差异显著。源 头子流域为流域面源污染总量的首要贡献者,炀河源头子流域的总氮年均输出[(32.76±21.80)t·a⁻¹]和烔河源头子流域总磷年均 输出[(1.81±1.64)t·a⁻¹]最高;生活污水和土地利用的氮磷输出在炀河源头子流域最高,畜禽养殖的最高氮磷输出位于烔河源头子 流域。农田对全流域面源总氮和总磷污染输出的贡献分别高达81%和52%,化肥施用强度高依然是农村流域面源污染的核心问 题。流域污染组成结构的高度异质性表明农村流域面源污染防控应抓住重点,且分区、分类施策。

关键词:输出系数;富营养化;农业面源;降雨;畜禽养殖;生活污水;化肥;营养盐

中图分类号:X52 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2022)11-2428-11 doi:10.11654/jaes.2022-0231

Simulation and source analysis of nonpoint source nitrogen and phosphorus pollution export in a typical agricultural catchment draining to Chaohu Lake, China

GAO Tiantian^{1,2}, XIE Hui^{2*}, WAN Nengsheng³, XIONG Zhuyang³, HU Zhenghua^{1*}, LAI Xijun²

(1. Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters, School of Applied Meteorology, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China; 2. Key Laboratory of Watershed Geographic Sciences, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 3. Institute of Lake Ecology and Environment, Chaohu Lake Bureau of Anhui Province, Hefei 238000, China)

Abstract: To investigate the characteristics and sources of nonpoint source (NPS) nitrogen and phosphorus pollution in a typical agricultural catchment draining to Chaohu Lake, the spatial and temporal variations in nitrogen and phosphorus pollution export from the Tongyang River catchment were simulated using an improved export coefficient model based on monitoring data and survey data from 2018 to 2020. Results showed that the average exports of NPS nitrogen and phosphorus pollution in this catchment were (261.33 ± 173.87) t $\cdot a^{-1}$ and (11.03 ± 9.98) t $\cdot a^{-1}$ during 2018—2020. The significant inter–annual variation was attributed to radical fluctuations in the hydrologic condition. The headwater sub–catchments were the main contributors to the total NPS nitrogen and phosphorus pollution in the Tongyang River catchment. The annual average export of total nitrogen(TN) was (32.76 ± 21.80) t $\cdot a^{-1}$ in the Yang River headwater sub–catchment. The average annual export of total phosphorus(TP) in the Tong River headwater sub–catchment was (1.81 ± 1.64) t $\cdot a^{-1}$, both of which were

收稿日期:2022-03-11 录用日期:2022-04-18

*通信作者:谢晖 E-mail:hxie@niglas.ac.cn; 胡正华 E-mail:zhhu@nuist.edu.cn

作者简介:高田田(1998—),女,江苏徐州人,硕士研究生,主要研究方向为流域面源污染过程。E-mail:1592091442@qq.com

基金项目:国家重点研发计划项目(2021YFD1700600);国家自然科学基金项目(42007362)

Project supported: The National Key Research and Development Program of China(2021YFD1700600); The National Natural Science Foundation of China (42007362)

the highest of all the sub-catchments. The highest exports of TN and TP from domestic sewage and land use were from the Yang River headwater sub-catchment, whereas the highest exports of TN and TP from livestock and poultry breeding were from the Tong River headwater sub-catchment. Croplands contributed 81% and 52% of the NPS nitrogen and phosphorus pollution, respectively. Highintensity fertilizer application was the key issue of NPS pollution in this typical agricultural catchment. The high heterogeneity of the NPS pollution composition indicates the need to focus on critical areas and implement classified measures for controlling NPS pollution in agricultural catchments.

Keywords: export coefficient; eutrophication; agricultural nonpoint source; rainfall; livestock and poultry breeding; domestic sewage; fertilizer; nutrient

氮磷是湖泊生态系统所必需的生源要素,但由于 人类活动加剧导致的过量氮磷入湖极易诱发水体富 营养化和藻华暴发^[1]。随着点源污染得到有效管控, 面源污染开始成为氮磷入湖的重要驱动过程与来源, 阐明入湖流域面源污染机理与调控机制是湖泊污染 治理的关键瓶颈问题,而面源污染模拟则是解决这一 瓶颈问题的重要环节。面源污染的随机性、分散性、 广泛性等复杂特征加大了污染输出核算的难度,仅用 监测手段难以完全反映污染输出在流域尺度上的时 空异质性。现阶段常用的面源污染模型有流域水文 模型和统计型模型。其中常用的流域水文模型包括 SWAT模型、HSPF模型、AnnAGNPS模型、HYPE模型 等四,模型从最初的流域水循环过程模拟,到逐渐耦合 泥沙和营养盐等模块,可对流域子系统内污染物迁移 转化的物理过程进行定量化描述,但此类模型通常包 含较多概念性参数,需要翔实的实测数据对其进行参 数率定以及验证,参数识别复杂^[3]。统计型模型的代 表是输出系数模型14,其方法成熟且应用简单,因此被 国内外学者广泛应用。输出系数模型是基于不同来 源污染物的输出强度对流域内输出总量的多年均化 进行估算,考虑到降雨作为面源污染的直接驱动力以 及地形对面源污染传输路径的重要影响,有研究在输 出系数模型中引入了降雨和地形因子[5-8],这为流域面 源污染的时空差异模拟提供了更为客观的方法。

巢湖是长江中下游大型浅水湖泊,作为我国水污 染防治的重点水体,其富营养化问题一直备受关注, 已有研究表明面源污染是巢湖入湖氮磷污染的主要 贡献源^[9-10]。巢湖入湖流域多为农村流域,农村流域 的面源污染来源广泛、成因复杂、核算难度大。2018— 2020年巢湖流域水雨情变化显著,2019年是巢湖流 域的极枯年,2020年巢湖流域则经历了百年一遇的 特大洪水,这为分析流域面源污染特征在典型水雨情 条件下的差异提供了难得的现实场景。烔炀河作为 直接入湖的重要河流之一,其流域自然地理和社会经 济特征在巢湖农村流域中极具代表性。鉴于此,本文 以烔炀河流域为研究区域,模拟近3a不同典型水雨 情条件下面源污染氮磷输出,分析其时空变化特征, 解析流域分区、分时的污染组成结构与来源,以期为 削减入湖面源污染和保障巢湖水环境健康提供科学 支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

烔炀河流域是巢湖北岸一支入湖农村小流域(图 1a),流域总面积为89.3 km²。流域内的烔河(自西北 向东南)和炀河(自西向东)两条主干河流在入湖口上 游交汇为烔炀河后流入巢湖。根据巢湖小流域划分 及编码技术规定,将烔炀河流域划分为24个子流域 (图1b)。流域总体地势为西北高、东南低,上游以丘 陵岗地为主,中下游的镇区-2号子流域为高密度人 口聚集地,下游烔炀河干流-1号子流域为平原圩区, 其地形地貌在巢湖流域中具有代表性。流域内土地 利用类型以林地和农田为主,种植的主要农作物有水 稻、油菜和小麦等,建设用地主要位于烔炀镇镇区。 烔炀河流域属北亚热带气候区,年均气温约16℃,多 年平均降水量约1030 mm,雨量充沛,汛期时降雨事 件频发,流域面源污染问题突出^四。根据前期调研, 该流域面源氮磷污染输出主要来自于种植业化肥流 失、农村生活污水和畜禽养殖等,具有巢湖农村流域 面源污染的统一特征,因此在该流域研究面源氮磷的 污染特征和组成结构,对治理农村流域面源氮磷污染 和防治巢湖富营养化具有重要意义。

1.2 数据来源和模拟方法

1.2.1 数据来源

(1)气象水文。烔炀河流域内建有烔炀雨量站, 具有连续小时尺度的降雨量数据。笔者前期针对烔 炀河流域已搭建了HSPF水文模型,烔河干流处设有 一处矩形薄壁堰,基于每日河流流量监测值已进行模 型参数率定(模拟值和监测值的纳什系数为0.7)^[11], 因此可获得流域内各河流的模拟流量数据,用于计算

www.aer.org.cn

1<u>3</u>2430

农业环境科学学报 第41卷第11期

该流域入湖污染通量。

(2)下垫面。烔炀河流域数字高程模型(Digital Elevation Model, DEM)数据(图 2a)和土地利用类型图 (图 2b)由当地管理部门提供,精度均为1:10 000,其中土地利用类型划分为水田、旱田、林地、草地、城镇 和水域。

(3)污染源。烔炀河流域内点源污染来自于烔炀 镇污水处理厂,尾水直接排入烔河干流(3号河流)尾 端,通过每日的尾水水质和水量监测数据可计算流域 内点源氮磷污染输出量。流域面源污染源主要考虑 农村生活污水、畜禽养殖和土地利用。农村人口数量 根据自然村位置以及常住人口调研获取,根据现场走 访调研和烔炀镇污染源调查数据得知,研究区内共有 13家畜禽养殖场,养殖种类为羊、肉鸡、蛋鸡和鹅。

(4)水质监测。烔炀河水质自动监测站根据《地 表水自动监测技术规范(试行)》(HJ 915—2017)建设



图1 烔炀河流域地理位置及子流域和水系

Figure 1 Location, sub-catchments, and rivers in the Tongyang River catchment



图 2 烔炀河流域数字高程模型和土地利用类型 Figure 2 DEM and land use type of the Tongyang River catchment

中文核心期刊

并运维,高频观测数据被生态环境部门用于考核烔炀 河流域入湖断面水质达标情况。该自动监测站位于 入湖河段中下游(117°38′10.26″E,31°39′40.20″N), 距离入湖口约700 m,可对总氮、氨氮、总磷、化学需 氧量、pH值、水温等水质指标进行实时监测,监测频 率为每4h一次。根据入湖河流的流量和总氮、总磷 浓度即可计算烔炀河流域氮、磷污染物总量,由于4h 频次的氮、磷监测浓度和日均模拟流量数据存在尺度 差异,因此对每日浓度数据取平均值,再结合日均流 量数据进行入河污染负荷的计算。

1.2.2 面源氮磷污染输出模拟

(1)改进的输出系数模型。输出系数模型是用于 模拟流域面源污染输出的常用方法,其基本原理是基 于不同污染源的源强系数,结合土地利用面积和污染 源单位数量等进行计算。传统的输出系数模型未能 将降雨和地形的影响考虑在内,但这二者是决定流域 面源污染输出的关键因素。本研究采用改进的输出 系数模型,对烔炀河流域面源氮磷输出进行模拟,具 体公式如下:

$$L_i = \alpha \times \beta \times \sum_{j=1}^n E_{i,j} \times A_j \tag{1}$$

式中: L_i 为第i种污染物的输出量,kg; α 为降雨因子; β 为地形因子; $E_{i,j}$ 为第i种污染物第j个污染源的输出系数,kg·hm⁻²·a⁻¹、kg·人⁻¹·a⁻¹或kg·只⁻¹·a⁻¹; A_j 为第j种污染源的土地利用面积、人口数量或畜禽养殖数量等。

(2)降雨因子取值。本研究采用降雨因子表征降 雨年际差异对流域面源污染输出的影响。前期的相 关研究表明面源污染氮磷负荷与降雨量存在一定正 相关性^[12],则第*i*种污染物第*t*年的降雨因子(α_{i,t})可表 示为:

$$\alpha_{i,t} = \frac{L_{i,t}}{\overline{L}_i} = \frac{f_i(r_t)}{f_i(\bar{r})}$$
(2)

式中: $L_{i,i}$ 为第i种污染物第t年的面源污染负荷,kg; \overline{L}_i 为第i种污染物的多年平均面源污染负荷,kg; r_i 为第t年的降雨量,mm; \overline{r} 为多年平均降雨量,mm; f_i 表示第i

种污染物面源污染负荷与降雨量之间的函数关系。 本研究根据入湖口断面处氮磷监测浓度与流量计算 流域氮磷污染负荷总量,再减去点源负荷即可计算烔 炀河流域面源氮磷负荷,并采用2018—2020年烔炀 雨量站月降雨量与月负荷进行拟合,方程如下:

 L_{TN} =0.099 3 r^2 +9.503r+216.8(R^2 =0.86,P<0.05) (3)

$$L_{\text{TP}}$$
=0.011 46 r^2 +0.349 8 r -16.69(R^2 =0.98, P <0.05)

(4)

式中:L_{TN}和L_{TP}分别为总氮和总磷的月负荷,kg;r为月降雨量,mm。

(3)地形因子取值。本研究采用地形因子表征子 流域坡度空间差异对流域面源污染输出的影响。前 期研究表明,流域面源污染输出与坡度存在幂函数关 系^[12],因此地形因子可根据下式进行计算:

$$\beta_{j} = \frac{L_{j}}{\overline{L}} = \frac{f(\theta_{j})}{f(\overline{\theta})} = \frac{c\theta_{j}^{d}}{c\overline{\theta}^{d}} = \frac{\theta_{j}^{d}}{\overline{\theta}^{d}}$$
(5)

式中:L_i为第*j*个子流域的面源污染输出量,kg;θ_i为第 *j*个子流域的坡度,(°);*θ*为研究区平均坡度,(°);*c*和 *d*为常量。根据相关文献*d*取值为0.6104^[13],基于炯 炀河流域的 DEM 数据计算出该流域平均坡度为 3.34°,由此可根据各子流域坡度计算地形因子。

(4)输出系数取值。本研究涉及到的污染源包括 生活污水、畜禽养殖以及土地利用下的地表径流,为 保证输出系数的取值具有相对的准确性,本文选择巢 湖流域以及长江中下游流域的文献作为相关系数的 取值依据。畜禽养殖的氮磷污染输出系数由饲养周 期、粪尿排泄系数、粪尿流失系数以及污染物平均质 量比^[14-16]综合计算获得,生活污水和各类土地利用的 氮磷输出系数参考相关文献^[17-23]取值。烔炀河流域 污染源的具体输出系数汇总如表1所示。

2 结果与讨论

2.1 面源氮磷输出时间变化

传统输出系数模型未能考虑降雨年际差异对流 域面源污染输出的影响,估算结果仅为多年平均值。

表1	炯炀河流域污染源输出系数	
----	--------------	--

Table 1 Export coefficients of different pollution sources in the Tongyang River catchment

污染源 Pollution source	生活污水 - Domestic sewage/ (kg·人 ⁻¹ ·a ⁻¹)	畜禽养殖Livestock and poultry breeding/(kg・只-1・a-1)				土地利用Land use/(kg·hm ⁻² ·a ⁻¹)					
		羊粪 Sheep manure	羊尿 Sheep urine	肉鸡粪 Poultry manure	蛋鸡粪 Laying hens manure	鹅粪 Goose manure	林地 Forest	建设用地 Construction land	草地 Grass	农田 Farmland	水域 Water
总氮	0.142	0.327	3.833	0.004	0.024	0.004	3.27	11	10	29	17.33
总磷	0.018	0.116	0.537	0.002	0.012	0.002	0.154	0.51	0.2	0.596	1.175

本研究针对烔炀河流域近年来雨情年际大幅变化这 一特征,在输出系数模型中引入降雨因子对该流域 2018-2020年的面源污染氮磷输出进行重新模拟, 结果如表2所示。近3a的烔炀河流域面源污染总氮 和总磷输出平均值分别为(261.33±173.87) t·a⁻¹和 (11.03±9.98) t·a⁻¹, 年际差异显著, 这与降雨量的强 变化幅度密切相关。巢湖流域2019年为大旱年,烔 炀河流域全年降雨量不足700 mm,远低于多年平均 水平。而2020年巢湖流域在梅雨季节暴雨事件频发 且强度大,累积降雨量居近30a之首,形成大面积洪 涝灾害[24];烔炀河流域在此期间降雨量高达832.3 mm,全年降雨量为1424.7 mm,约是2019年年降雨量 的两倍。由于面源污染与降雨量的非线性关系[公式 (3)和公式(4)],2020年面源污染总氮输出总量高达 453.53 t · a⁻¹, 为 2019 年的 3.9 倍, 2020 年面源总磷输 出总量为22.20 t·a⁻¹,是2019年的7.4倍,降雨是造成 氯磷输出显著差异的主要原因,国内其他相关研究也 有类似报道。王宏等[25]对2012—2013年间沱江农业 小流域的氮磷排放特征展开研究,结果表明,2012年 7-9月的高降雨量造成该年份氮磷流失量远高于 2013年。张林等[26]通过研究兰陵溪小流域在雨季的 氮磷输出发现,丰水期降雨是土壤中氮磷污染输出的 主要驱动力,期间由降雨径流携带流失的总氮和总磷 负荷分别占雨季氮、磷流失量的88%和90%。降雨量 对面源总磷输出的影响相对于总氮更为明显,磷相比 于氮更容易吸附在颗粒物上,降雨-径流和土壤侵蚀 过程增强了磷的排放与传输[27-29],因此总磷输出对 2020年高降雨量的响应比总氮更敏感。王赵飞等[30] 的研究表明,烔炀河流域中农田颗粒态磷的流失较 高,而流域农田面积占总面积的50%以上,因此应密 切关注强降雨期间的农田总磷流失。

2018—2020年流域面源污染入河量由流域入湖 污染总量与点源尾水入河量相减获得,流域面源污染

= -	偏长 法法律工作 法法法 法 经月 4 月	
モリ	侧矫间盆间间间网络运丝俱输出具量	
18 4	MM/M/M/M/M/M/M/M/M/M/M/M/M/M/M////////	

Table 2 Export of nitrogen and phosphorus pollution in the

Tongyang River catchment						
项目 Item	2018年	2019年	2020年			
降雨量/mm	1 169.9	699.1	1 424.7			
总氮降雨因子	1.23	0.65	2.58			
总磷降雨因子	1.41	0.50	3.96			
总氮输出/(t•a ⁻¹)	215.49	114.97	453.53			
总磷输出/(t•a⁻¹)	7.90	3.00	22.20			

入河量与面源污染输出量之比即为入河系数^[31]。 2018—2020年流域面源总氮和总磷的入河系数分别 为0.08~0.15和0.19~0.26,与国内外相关研究中的入 河系数取值基本处于同一水平^[32-34],这也进一步验证 了本研究采用的改进输出系数方法及系数取值在巢 湖典型农村流域的适用性。

2.2 面源氮磷输出空间变化

本研究考虑了生活污水、畜禽养殖和土地利用为 流域面源污染源,各污染源的氮磷输出在空间上的差 异明显。如图 3a 和图 3b 所示,镇区-2号子流域和炀 河源头-24号子流域具有生活污水总氮和总磷的高 污染输出。镇区-2号子流域内统计常住人口为4500 余人,居子流域之首,炀河源头-24号子流域位居其 次。但由于炀河源头-24号子流域地处上游,坡度较 高(坡度因子为1.21),镇区-2号子流域处于流域中 下游,地势平缓(坡度因子为0.67),地形因子的引入 使得炀河源头-24号子流域的生活污水总氮和总磷 年均输出最高,分别达到677.87 kg·a⁻¹和113.73 kg· a⁻¹。烔河左支-6号子流域内虽自然村常住人口仅 400余人,但该片区内包含烔炀中学和烔炀敬老院两 处高密度人口聚集点,据统计烔炀中学现有师生1500 余人,敬老院常住人口110余人,这使得烔河左支-6 号子流域的生活污水氮磷输出仅次于镇区-2号子流 域和炀河源头-24号子流域。

烔炀河流域内畜禽养殖带来的面源总氮和总磷 年均输出为7.73 t·a⁻¹和1.87 t·a⁻¹,其中超过64.31% 的总氮和超过55.25% 的总磷输出来自于烔河源头-11号子流域(图3c和图3d)。烔炀河流域现有13家 畜禽养殖场,总体数量上以家禽为主,烔河源头-11 号子流域内有一家拥有600头羊的养殖厂。由于羊 的粪尿排泄系数远高于家禽,使得该分区内的畜禽养 殖氮磷污染非常突出。在炀河左干-17号子流域中 有3家畜禽养殖场,其氮磷污染输出仅次于烔河源 头-11号子流域。

烔炀河子流域在2018—2020年的土地利用氮磷 污染输出受到地形因子、土地利用面积及其输出系数 的综合影响。如图3e和图3f所示,炀河源头-24号子 流域的土地利用氮磷污染输出年均值最高(总氮 32.08 t·a⁻¹、总磷1.17 t·a⁻¹)。该分区总面积为10.83 km²,为所有子流域之首,且其中农田面积高达4.91 km²,农田的氮磷输出系数受化肥施用影响而相对较 高。此外,该分区地处上游低山丘陵区,地形因子也 高达1.21。综合以上因素,炀河源头-24号子流域的 2022年11月



图 3 烔炀河子流域不同污染源的氮磷输出空间分布

Figure 3 Spatial distribution of the nitrogen and phosphorus export from different sources in the Tongyang River catchment

www.aer.org.cn

土地利用氮磷污染输出最高。此外,烔河源头-11号 子流域和烔河左支-10号子流域由于同样原因也造 成氮磷污染输出较高。地形坡度对氮磷污染输出的 影响可通过烔河左支-6号子流域的模拟结果体现, 该分区面积第二,农田面积最大,但由于子流域平均 坡度小,地形因子仅为0.78,使得土地利用氮磷污染 输出低于10号和11号子流域。

综合生活污水、畜禽养殖和土地利用的模拟结果

农业环境科学学报 第41卷第11期

(图4),面源总氮污染年均输出最大的子流域为炀河 源头-24号子流域[(32.76±21.80) t·a⁻¹],总磷污染年 均输出最大的子流域为烔河源头-11号子流域 [(1.81±1.64) t·a⁻¹],二者分别是炀河和烔河的源头子 流域。以单位面积污染强度来看,炀河源头-24号子 流域的输出强度略有下降,而烔河源头-11号子流域 具有最高的总氮年均污染强度(4.48 t·km⁻²·a⁻¹)和总 磷年均污染强度(0.29 t·km⁻²·a⁻¹)。对总氮而言,炀



图4 烔炀河子流域面源氮磷污染输出量与强度的空间分布

Figure 4 Spatial distribution of nitrogen and phosphorus export and export intensity in the Tongyang River catchment

河左支-20号子流域和炀河左支-22号子流域虽面积 较小,但污染强度仅次于烔河源头-11号子流域,主 要是由于其包含农田、水域以及羊粪尿等高输出系数 的污染来源。对总磷而言,炀河左干-17号子流域的 排放强度高达0.22 t·km⁻²·a⁻¹,仅次于烔河源头-11号 子流域。

2.3 面源氮磷输出来源分析

2018—2020年烔炀河流域面源总氮和总磷的年 均输出量分别为261.33 t·a⁻¹和11.03 t·a⁻¹,其组成结 构(图5)中农田占据了绝大部分比例,特别是总氮, 农田的输出量占比高达81%。烔炀河流域现阶段土 地开发强度较低,农田依然超过总面积50%,且存在 尿素、复合肥等化肥的过量施用以及利用率低等问 题。据当地农户问卷调查统计,烔炀河流域的化肥折 纯量施用强度为307 kg·hm⁻²,高于发达国家为防止 化肥施用造成环境危害设定的上限值(225 kg· hm⁻²)^[35]。这种过量施肥的现象在巢湖农村流域普遍 存在。前人研究表明,巢湖流域的种植业施肥强度居 全国前列,是长江中下游化肥流失的重污染区域[36]。 在这样的背景之下,合肥市政府明确了"巢湖流域一 级保护区水稻生产化肥 2021 年底实现零增长、2022 年底实现零使用"的目标任务。这一举措势必将从源 头上控制营养盐向土壤中的直接输入,从而减少面源 氮磷污染输出。水域是烔炀河流域氮磷输出贡献的 第二来源,坑塘为该流域水域的主要组成部分。坑塘 是环巢湖地带的特色水适应性景观单元,在烔炀河流 域中分布广而密^[37],据统计坑塘约占该流域总面积的 9%,目其中大部分被开发利用为养殖池塘。在现阶 段高投入、高产出的养殖模式下,饵料和饲料通常被 过量投放,从而极易造成氮磷的流失。在长江流域重

点水域十年禁渔的政策背景下,以内陆养殖为导向的 坑塘开发利用模式所带来的氮磷污染新形势需要被 重点关注。畜禽养殖对面源总磷输出的贡献达到了 17%,是仅次于农田的第二大污染源。据调研,烔炀 河流域现存养殖场虽规模较小,但粪污仍以直接还田 这种"自循环"处理方式为主,应加强好氧堆肥和厌氧 治沼等资源化和无害化处理,从而减少畜禽养殖氮磷 污染输出。

子流域中污染源的组成结构(图6)呈现空间异 质性。从面源总氮污染输出来看,超过90%的子流 域中土地利用的贡献高于75%。畜禽养殖的总氮污 染贡献比例在烔河源头-11号子流域和炀河左干-17 号子流域中较为突出,分别达到了17.84%和 13.96%。生活污水总氮污染输出贡献仅在镇区-2号 子流域中高于8%。各子流域中面源总磷污染输出的 组成比例与总氮具有一定差异,总磷污染强度最高的 烔河源头-11号子流域中畜禽养殖的贡献达到了 56.96%,在炀河左干-17号子流域中的贡献超过了 50%,在炀河左干-17号子流域中的贡献超过了 50%,在炀河左天-16号子流域也达到了40.13%。生 活污水总磷污染贡献同样表现为镇区-2号子流域最 大,高达28.14%,因此应切实推进该区域人口聚集区 的污水管网改造,加强生活污水的收集纳管,整治雨 污混接、错接问题。

3 结论

(1)采用改进的输出系数模型模拟了烔炀河流域 2018—2020年面源污染氮磷输出,降雨因子和地形 因子的引入细化了模拟结果,结果表明近3a烔炀河 流域面源总氮和总磷污染输出年均值分别为 (261.33±173.87) t·a⁻¹和(11.03±9.98) t·a⁻¹,2019年和





Figure 5 Composition of nonpoint source nitrogen and phosphorus export in the Tongyang River catchment

www.ger.org.cn

1GR 2436







Figure 6 Composition of nonpoint source nitrogen and phosphorus export in each sub-catchment of the Tongyang River catchment

2020年水雨情条件的大幅变化造成污染输出的年际 差异显著。农田是研究区面源污染的首要来源,其对 总氮和总磷的污染输出贡献分别高达81%和52%。

(2)子流域层面下面源氮磷污染输出总量、强度 和组成结构呈现空间异质性。源头子流域的面源氮 磷污染输出总量居首,其中烔河源头子流域具有最高 的畜禽养殖氮磷污染输出,炀河源头子流域具有最高 的生活污水及土地利用氮磷污染输出。

(3)烔炀河流域土地利用中农田占比高,农田化 肥过量施用以及利用率低的问题,是巢湖其他农村流 域普遍存在的现象。切实推广"化肥使用零增长、零 使用"等政策将从源头上减少污染输出。农业面源污 染防治更应把握重点分区,基于污染来源因地制宜地 配置管控措施,针对烔河源头-11号和炀河左干-17 号子流域应加强畜禽粪污的无害化和资源化处理,针 对镇区和烔炀中学等人口密集区应加强生活污水收 集治理。

参考文献:

- HUANG J, ZHANG Y, ARHONDITSIS G B, et al. The magnitude and drivers of harmful algal blooms in China's lakes and reservoirs: A national-scale characterization[J]. Water Research, 2020, 181:115902.
- [2] FU B, MERRITT W S, CROKE B F W, et al. A review of catchmentscale water quality and erosion models and a synthesis of future prospects[J]. *Environmental Modelling & Software*, 2019, 114:75–97.

- [3] 王凯,陈磊,杨念,等.从田块到水体:基于源-流-汇理念的非点源 污染全过程核算方法[J].环境科学学报,2022,42(1):269-279.
 WANG K, CHEN L, YANG N, et al. From field to water body: The whole process accounting method of non-point source pollution based on the source-flow-sink concept[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2022,42(1):269-279.
- [4] 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 Hydrolo*gy, 1996, 183(3):323-349.
- [5] WANG W Z, CHEN L, SHEN Z Y. Dynamic export coefficient model for evaluating the effects of environmental changes on non-point source pollution[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 747: 141164.
- [6] 丁晓雯, 沈珍瑶, 刘瑞民, 等. 基于降雨和地形特征的输出系数模型 改进及精度分析[J]. 长江流域资源与环境, 2008, 17(2): 306-309. DING X W, SHEN Z Y, LIU R M, et al. Improved export coefficient model considering precipitation as well as terrain and its accuracy analysis[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2008, 17(2): 306-309.
- [7] VAREKAR V, YADAV V, KARMAKAR S. Rationalization of water quality monitoring locations under spatiotemporal heterogeneity of diffuse pollution using seasonal export coefficient[J]. *Journal of Environmental Management*, 2021, 277:111342.
- [8] 李明龙, 贾梦丹, 孙天成, 等. 三峡库区非点源污染氮磷负荷时空变 化及其来源解析[J]. 环境科学, 2021, 42(4):1839-1846. LI M L, JIA M D, SUN T C, et al. Spatiotemporal change and source apportionment of non-point source nitrogen and phosphorus pollution loads in

the Three Gorges Reservoir area[J]. Environmental Science, 2021, 42 (4):1839–1846.

- [9] MIN M, DUAN X, YAN W, et al. Quantitative simulation of the relationships between cultivated land-use patterns and non-point source pollutant loads at a township scale in Chaohu Lake basin, China[J]. *Catena*, 2022, 208:105776.
- [10] LIN C, XIONG J, MA R, et al. Identifying the critical watershed regions creating lake nutrient enrichment(SLRs) based on a watershedlake integrated perspective: A case study of Chaohu Lake basin, China [J]. *Ecological Indicators*, 2021, 121:107037.
- [11] DONG J W, XIE H, FENG R R, et al. Transport and fate of antibiotics in a typical aqua-agricultural catchment explained by rainfall events: Implications for catchment management[J]. Journal of Environmental Management, 2021, 293:112953.
- [12] CHENG X, CHEN L D, SUN R H, et al. An improved export coefficient model to estimate non-point source phosphorus pollution risks under complex precipitation and terrain conditions[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2018, 25(21):20946–20955.
- [13] DING X W, SHEN Z Y, HONG Q, et al. Development and test of the export coefficient model in the upper reach of the Yangtze River[J]. *Journal of Hydrology*, 2010, 383(3):233-244.
- [14] 吴浩玮,孙小淇,梁博文,等.我国畜禽粪便污染现状及处理与资源化利用分析[J].农业环境科学学报,2020,39(6):1168-1176.
 WUHW,SUNXQ,LIANGBW, et al. Analysis of livestock and poultry manure pollution in China and its treatment and resource utilization[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2020, 39(6):1168-1176.
- [15] 彭军. 巢湖流域规模化畜禽养殖场对水环境污染评价及其控制对 策研究[D]. 合肥:安徽农业大学, 2010. PENG J. The assessment and control measures of water environmental pollution of large-scale livestock and poultry breeding in Chaohu Lake basin[D]. Hefei: Anhui Agricultural University, 2010.
- [16] 武淑霞. 我国农村畜禽养殖业氮磷排放变化特征及其对农业面源 污染的影响[D]. 北京:中国农业科学院, 2005. WUSX. The spatial and temporal change of nitrogen and phosphorus produced by livestock and poultry & their effects on agricultural non-point pollution in China[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2005.
- [17] 谭平,马太玲,赵立欣,等.巢湖农村生活污水产排污系数测算及 处理模式分析[J].中国给水排水,2012,28(13):88-91. TAN P, MA T L, ZHAO L X, et al. Estimate of production and discharge coefficients of rural domestic sewage and case analysis of treatment modes in Chaohu area[J]. China Water & Wastewater, 2012, 28(13):88-91.
- [18] 田甲鸣, 王延华, 叶春, 等. 太湖流域土地利用方式演变及其对水体氮磷负荷的影响[J]. 南京师大学报(自然科学版), 2020, 43(2): 63-69. TIAN J M, WANG Y H, YE C, et al. The evolution of land use types and its effects on the nitrogen and phosphorus loads in the Taihu Lake basin[J]. Journal of Nanjing Normal University (Natural Science Edition), 2020, 43(2):63-69.
- [19] 刘瑞民,杨志峰,丁晓雯,等.土地利用/覆盖变化对长江上游非点 源污染影响研究[J].环境科学,2006,27(12):2407-2414. LIU R

M, YANG Z F, DING X W, et al. Effect of land use/cover change on pollution load of non-point source in upper reach of Yangtze River basin[J]. *Environmental Science*, 2006, 27(12):2407–2414.

- [20] 宋佳宝.汉江汉中断面以上流域面源污染特征研究[D].西安:西 安科技大学, 2020. SONG J B. Study on the characteristics of nonpoint source pollution in the watershed above the Hanzhong section of the Han River[D]. Xi'an: Xi' an University of Science and Technology, 2020.
- [21] 蔡明, 李怀恩, 庄咏涛, 等. 改进的输出系数法在流域非点源污染 负荷估算中的应用[J]. 水利学报, 2004(7): 40-45. CAI M, LI H E, ZHUANG Y T, et al. Application of modified export coefficient method in polluting load estimation of non-point source pollution[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2004(7): 40-45.
- [22] 刘建峰. 基于空间属性的流域非点源污染风险评估与过程模拟 [D]. 武汉:武汉大学, 2018. LIU J F. Risk assessment and process simulation of watershed non-point source pollution based on spatial attributes[D]. Wuhan: Wuhan University, 2018.
- [23] 金潇.基于土地利用变化的巢湖流域(合肥市)非点源磷污染负荷研究[D]. 合肥:合肥工业大学, 2012. JIN X. Study on non-point source phosphorus pollution based on land use change in Chaohu watershed(Hefei)[D]. Hefei:Hefei University of Technology, 2012.
- [24] 万能胜,齐鹏云. 巢湖流域 2020 年特大洪涝灾害应对实践与思考
 [J]. 中国防汛抗旱, 2021, 31(4): 37-41. WAN N S, QI P Y. Practice and reflection on coping with extreme flood disasters in Chaohu Lake basin in 2020[J]. China Flood & Drought Management, 2021, 31 (4): 37-41.
- [25] 王宏, 徐娅玲, 张奇, 等. 沱江流域典型农业小流域氮和磷排放特征[J]. 环境科学, 2020, 41(10):4547-4554. WANG H, XU Y L, ZHANG Q, et al. Emission characteristics of nitrogen and phosphorus in typical agricultural small watershed on Tuojiang River basin[J]. Environmental Science, 2020, 41(10):4547-4554.
- [26] 张林, 黄志霖, 肖文发, 等. 三峡库区兰陵溪小流域径流氮磷输出及其降雨径流过程特征[J]. 环境科学, 2018, 39(2):792-799. ZHANG L, HUANG Z L, XIAO W F, et al. Characteristics of nitrogen and phosphorus output in runoff and it's rainfall runoff process of Lanlingxi watershed in the Three Gorges Reservoir area[J]. Environmental Science, 2018, 39(2):792-799.
- [27] 迟宇博, 吴磊, 李蕊, 等. 不同措施黄绵土坡地暴雨侵蚀及磷素流 失特点[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(12):2833-2843. CHI Y B, WU L, LI R, et al. Characteristics of soil erosion and phosphorus loss from loessial sloping land under different measures during heavy rainstorms[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2020, 39(12): 2833-2843.
- [28] XIE H, DONG J W, SHEN Z Y, et al. Intra- and inter-event characteristics and controlling factors of agricultural nonpoint source pollution under different types of rainfall-runoff events[J]. *Catena*, 2019, 182:104105.
- [29] 李晓虹, 雷秋良, 周脚根, 等. 降雨强度对洱海流域凤羽河氮磷排放的影响[J]. 环境科学, 2019, 40(12):5375-5383. LI X H, LEI Q L, ZHOU J G, et al. Effect of rainfall intensity on the content of nitrogen and phosphorus components in plateau areas: A case study of the

农业环境科学学报 第41卷第11期

Fengyu River watershed[J]. *Environmental Science*, 2019, 40 (12) : 5375–5383.

- [30] 王赵飞,林晨,许金朵,等.巢湖流域非点源颗粒态磷负荷的空间 差异及关键影响因子研究[J].农业环境科学学报,2019,38(3):
 659-670. WANG Z F, LIN C, XU J D, et al. Spatial differences in non-point source particle phosphorus loads and critical influence factors in the Chaohu basin[J]. Journal of Agro - Environment Science, 2019, 38(3):659-670.
- [31] 耿润哲, 殷培红, 周丽丽,等.关于农业面源污染物入河系数测算 技术路线与关键方法的探讨[J]. 环境与可持续发展, 2019, 44(2): 26-30. GENG R Z, YIN P H, ZHOU L L, et al. Review: Assessment and calculation for the pass through rate of agricultural diffuse sources pollution in national scale[J]. Environment and Sustainable Development, 2019, 44(2):26-30.
- [32] HOU L, ZHOU Z, WANG R, et al. Research on the non-point source pollution characteristics of important drinking water sources[J]. Water, 2022, 14(2):211.
- [33] 凡翔, 吴凤平, 孟岑, 等. 基于人为氮净输入及入河系数的流域河流氮输出负荷估算[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(1):185-193.
 FAN X, WU F P, MENG C, et al. Estimation of nitrogen output load of a river watershed based on net anthropogenic nitrogen input and river

inflow coefficient[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2021, 40 (1):185-193.

- [34] 谭铭欣,李天宏,赵志杰.山西省御河流域水环境污染负荷估算及 来源[J].南水北调与水利科技,2019,17(5):90-99. TAN M X, LI T H, ZHAO Z J. Pollution load estimation and source analysis in the Yu River basin, Shanxi Province[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2019, 17(5):90-99.
- [35] ZHENG W, LUO B, HU X, et al. The determinants of farmers' fertilizers and pesticides use behavior in China: An explanation based on label effect[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 272:123054.
- [36] 张鹏. 基于农业面源污染控制下的巢湖流域农业种植结构优化研究[D]. 合肥:安徽农业大学, 2015. ZHANG P. Agricultural structure optimization study of Chaohu Lake basin based on agricultural non-point source pollution control[D]. Hefei: Anhui Agricultural University, 2015.
- [37] 李莹莹, 尤罗利, 陈永生, 等. 环巢湖地区多水塘景观时空格局演 变特征及其驱动因素[J]. 生态学报, 2018, 38(17):6280-6291. LI Y Y, YOU L L, CHEN Y S, et al. Spatial-temporal characteristics of multi-pond landscape change and their driving factors in the Chaohu basin, China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(17):6280-6291.

(责任编辑:李丹)