

李丽芬, 徐云强, 苏保林, 等. 池塘养殖污染负荷核算方法研究及比较分析[J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(9): 2174–2183.

LI Li-fen, XU Yun-qiang, SU Bao-lin, et al. Accounting methods and comparative analysis of pollution load from an aquaculture pond[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, 38(9): 2174–2183.

池塘养殖污染负荷核算方法研究及比较分析

李丽芬^{1,2}, 徐云强^{1,2}, 苏保林^{1,2*}, 乔飞^{3*}, 雷坤³, 何璟嫻^{1,2}

(1. 北京师范大学水科学研究院, 北京 100875; 2. 城市水循环与海绵城市技术北京市重点实验室, 北京 100875; 3. 中国环境科学研究院, 北京 100012)

摘要:为科学、准确和定量地分析池塘养殖水管理过程及污染负荷,实现水产养殖的控污减排,对现有污染负荷核算方法进行调研,对其进行了适应性评价和实例计算,并在此基础上对化学分析法进行了优化改进。结果表明:不同方法下污染负荷核算结果为污染负荷率法>竹内俊朗法>物料平衡法>排污系数法>化学分析法;基于物质守恒的3种方法计算结果远高于化学分析法和排污系数法,表明池塘底泥对养殖期间所产生的污染负荷贡献较大;改进化学分析法计算结果显示饵料是池塘养殖中产生污染的主要来源,在试验池塘养殖生产中底泥在TN排污中占比约60%,TP占比高达85%左右。研究表明,池塘水管理及底泥对污染负荷核算结果影响较大,且改进化学分析法可定量反映池塘养殖总产污量及水体和底泥排放分别对外界环境产生的影响。

关键词:池塘养殖;污染负荷核算;适应性评价;改进的化学分析法

中图分类号:X714 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2019)09-2174-10 doi:10.11654/jaes.2019-0393

Accounting methods and comparative analysis of pollution load from an aquaculture pond

LI Li-fen^{1,2}, XU Yun-qiang^{1,2}, SU Bao-lin^{1,2*}, QIAO Fei^{3*}, LEI Kun³, HE Jing-yi^{1,2}

(1. College of Water Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 2. Beijing Key Labor of Urban Hydrological Cycle and Sponge City Technology, Beijing 100875, China; 3. Chinese Research Academy of Environmental Science, Beijing 100012, China)

Abstract: A scientific, accurate, and quantitative analysis of water management and pollution load is very important for pollution control and load reduction of pond aquaculture. In this study, existing pollution load accounting methods were investigated, adaptability evaluation and pollution load calculations were conducted, and the chemical analysis methods was improved. The results showed the following increasing order of pollution loads calculated by different methods: pollution load rate method>Takeuchi method>Mass balance method>pollutant discharge coefficient method>chemical analysis method. The pollution loads calculated by the three methods based on the mass conservation theory were much higher than that by the chemical analysis method and discharge coefficient method. This indicates that fish feed residual sediment contributes more pollutant load to the external environment of the pond. The calculation of loads by the improved chemical analysis method showed that fish feed was the main source of the pollution load in the pond, and the proportions of TN and TP in the sediment were about 60% and 85% of the total pollution load, respectively. Our results indicated that pond water and sediment management have a large impact on pollution load accounting results, and that improved chemical analysis can quantitatively reflect the impact of total aquaculture production, water, and sediment discharge on the external environment.

Keywords: pond culture; pollution load accounting; adaptability evaluation; improved chemical analysis method

收稿日期:2019-04-10 录用日期:2019-07-29

作者简介:李丽芬(1992—),女,山西吕梁人,硕士研究生,研究方向为水质模型与模拟及非点源污染研究。E-mail:201721470017@mail.bnu.edu.cn

*通信作者:苏保林 E-mail:subl@bnu.edu.cn;乔飞 E-mail:qiaofei@craes.org.cn

基金项目:国家水体污染控制与治理科技重大专项(2017ZX07301-003)

Project supported: The National Water Pollution Control and Governance of Science and Technology Major Special(2017ZX07301-003)

池塘养殖是我国淡水养殖的重要组成部分,约71.2%的水产品均来自池塘养殖。据统计,全国淡水养殖总面积为 $5.36 \times 10^6 \text{ hm}^2$,其中池塘养殖面积约占47.12%,为 $2.53 \times 10^6 \text{ hm}^2$ ^[1-2]。近年来,为提高养殖产量,追求经济利益,池塘养殖普遍采用高放养密度、高投饵量的集约化精养模式。集约化养殖模式的迅速推进和发展,导致大量外源物质输入水生生态系统造成水质恶化,从而引发了一系列生态环境问题,同时也提高了养殖风险,水产品质量下降直接制约了池塘养殖的可持续发展^[3-6]。因此,对池塘养殖水管理及污染负荷进行科学、准确、定量的分析显得尤为重要。

我国鱼类产品主要来自以饵料投入的养殖模式,淡水池塘养殖会排放大量未消化的饲料和排泄物^[7-9],而传统的养殖方式在养殖捕捞收获后会采用直排方式将养殖废水和底泥排放到环境中,造成外部环境的污染。基于池塘养殖的诸多不良影响,本文对现有池塘养殖污染负荷核算方法进行调研。目前,水产养殖污染负荷的估算方法主要有化学分析法、排污系数法、物料平衡法、竹内俊朗法和污染负荷率法等^[10],主要分为两大类:第一,计算结果显示的是养殖期间对外界环境造成的影响,主要是通过化学分析法和排污系数法进行估算,但是这两种方法均未考虑底泥的影响,计算结果偏低^[8-9,11];第二,计算结果显示的是养殖期间对养殖池塘本身造成的影响,即留在养殖池塘中的污染物的量,主要计算方法有物料平衡法、竹内俊朗法和污染负荷率法,但是这类方法未对水质和底泥作区分,此外,该类方法参数较多,且参数中涉及生物体的消化率,但该参数不确定性大,对估算结果的影响较大^[12-19]。由此可见,目前池塘养殖污染负荷核算存在如下问题:(1)养殖期间是否考虑污染排入外界环境,污染负荷为多少;(2)水产养殖末期养殖废水与底泥的去向,分别对环境造成了多大影响。

本研究在对现有池塘养殖污染负荷核算方法进行适应性评价的基础上,对化学分析法进行了改进,并对研究区池塘养殖废水及底泥中污染负荷进行核算,期望定量反映池塘养殖总产污量及水体和底泥

排放分别对外界环境产生的影响,为后续池塘养殖底泥排放处理、再利用及饵料投喂结构优化等提供参考。

1 研究区域

宜兴市地处江苏省西南端、沪宁杭三角中心,位于北纬 $31^{\circ}07' \sim 31^{\circ}37'$,东经 $119^{\circ}31' \sim 120^{\circ}03'$,水域面积达 532.6 km^2 (不含太湖)。该地区河流湖荡密布,水资源丰富,降水充沛,是典型的江南水乡,水产养殖面积 1.33 万 hm^2 ,其中以池塘养殖为主(占比高达89%)^[20-21]。以水产养殖业为依托的宜兴市在加速发展渔业的同时也面临着养殖所造成的环境污染问题,因此,如何进行污染负荷核算和控源减排仍是一个难题。

研究池塘位于宜兴殷村港地区,整体呈不规则梯形,养殖面积约为 2.53 hm^2 ,在养殖期间,池塘平均水位约为 2.21 m 。研究区养殖水体主要来源于附近河道,池塘养殖需要不定时进行人工补水或人工排水,年末会进行养殖废水排放和淤泥清理,其中,养殖废水排向附近河道,底泥排向附近废弃田块。研究池塘配有增氧机(KD325-9)和投饵机,池塘曝气一般不固定,晴好天气一般不会增加曝气,阴雨天则视天气情况延长开机时间,饵料的投喂主要以颗粒型饲料为主,投喂时主要遵循“四定”原则,即定时、定位、定质和定量,日投喂3次,投饵量在养殖初期为水产品总量的3%~5%,养殖中后期为5%~7%,饵料具体信息详见表1。

本研究的监测期为2017年6月—2019年2月,期间池塘的主要养殖品种为鳊鱼、鲫鱼、草鱼、青鱼和鳙鱼,投入幼鱼均 <1 年龄,采用一年制进行养殖,年末进行成鱼收获,总放养密度约为 $3.2 \text{ 万尾} \cdot \text{hm}^{-2}$,具体数据详见表2。鱼类根据其生活习性有上、中、下层之分,不同种类鱼占据不同“生态位”,其中,鳙鱼多生活在上层,草鱼、鳊鱼多生活在中层,鲫鱼、青鱼多生活在下层,采用不同生态位的混养模式有助于水体垂直对流,加速水中污染物的沉淀和分解,从而达到净化水质的作用,同时也可增加水产品的产量及经济效益。

表1 淡水鱼配合饲料详细信息(%)

Table 1 The detailed information table of freshwater fish formula feed(%)

产品代号 Code name	粗蛋白 Crude protein	粗纤维 Crude fibers	粗灰分 Crude ash	钙 Calcium	总磷 Total phosphorus	氯化钠 Sodium chloride	赖氨酸 Lysine	粗脂肪 Crude fat
8802	≥ 30	≤ 8	≤ 15	0.6~1.5	0.8~1.8	0.3~1.5	≥ 1.3	≥ 3

表2 研究区养殖品种及投入产出汇总(kg)

Table 2 The summary of aquaculture varieties and input-output in research area(kg)

品种 Varieties	2017年		2018年	
	投放量 Delivery	产量 Output	投放量 Delivery	产量 Output
鳊鱼	5000	50 000	6428	62 500
鲫鱼	500	3000	1000	6500
草鱼	0	0	50	500
青鱼	6.75	200	200	750
鳙鱼	1500	6800	1750	5500

2 研究方法

2.1 样品采集和分析方法

为全面了解池塘养殖污染负荷情况,对研究期内水样和底泥进行了采集,水样的初次取样时间为2017年6月26日,以后每周取样一次,若有特殊情况(养殖期间补排水和年末养殖废水排放)则适当增加采样频次。采样点位于池塘排水口处,采样中应确保采集到所有排向外界环境和进入池塘的养殖水体,样品带回实验室后4℃保存,24 h内测定。水样的测定指标包括总氮(TN)、总磷(TP)、氨氮(NH₄⁺-N)、硝酸盐氮(NO₃⁻-N)、COD。其中,TN采用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法,TP采用钼酸铵分光光度法,NH₄⁺-N采用纳氏试剂比色法,COD采用重铬酸盐法,NO₃⁻-N采用酚二磺酸比色法^[22-26]。

池塘底泥样品的采集是在年末养殖废水排放后,共3个采样点,分别位于投饲机的正下方及两侧,采样点离岸约2 m,采样深度为10~20 cm,样品采集后4℃保存。底泥测定指标包括TN、TP和有机质。TN采用土壤氮的测定方法,TP采用土壤磷的测定方法,有机质采用森林土壤有机质的测定及碳氮比的计算方法进行测定^[27-29]。

2.2 池塘水量监测及计算

为全面了解池塘在研究期间的水量变化,补给量、消耗量等均通过池塘水位变化进行计算。因此,对研究池塘的水位和降雨信息进行了全过程采集(整个研究期:2017年6月—2019年2月)。水位信息通过压力式水位自动记录仪(U20)获取,设置仪器记录时间为15 min;降雨信息通过雨量计获取,设置仪器记录时间为10 min。装置安装完毕后需要定期检查以防止探头阻塞而影响记录或数据的准确性。

研究鱼塘为不规则梯形体,为方便对鱼塘水管理进行研究,在水产养殖期间,利用水位、降雨信息结合

池塘构造(边坡及面积等)对研究区蓄水量进行了计算,具体计算公式如下:

$$\Delta V = \left\{ \begin{array}{l} (103\,078.69 + 4\,030.75h + 81.11h^2) \times \frac{h}{6} \\ 34\,563.78 + [10\,261.67 + 1\,594.47(h_1 - 1.87) + \\ 5.21(h_1 - 1.87)^2] \times \frac{h_1 - 1.87}{6} \end{array} \right.$$

式中: ΔV 为池塘蓄水的变化量; h 、 h_1 均表示水位, h 的范围为0~1.87 m, h_1 的范围为1.87~3.22 m。

2.3 污染负荷核算方法

基于池塘养殖对水环境的诸多不良影响,关于池塘养殖污染负荷的研究也日益增多。目前,池塘水产养殖污染负荷的估算方法主要有化学分析法、竹内俊朗法、物料平衡法、排污系数法和污染负荷率法等方法^[10,30]。

2.3.1 化学分析法

化学分析法^[7-9]是估算污染负荷的基础方法,一般作为辅助方法。该方法的主要原理是基于池塘养殖总排水量对进排水水质的分析,进行氮和磷污染负荷估算,其计算公式如下:

$$P = Q(C_{out} - C_{in}) \quad (1)$$

式中: P 为污染物排放负荷量; Q 为排出池塘水量; C_{out} 、 C_{in} 分别为出水和进水中污染物浓度。

化学分析法最初是基于比较封闭的池塘养殖提出的,一般只采集水样,因此所测结果只包含了氮磷污染物的可溶态和悬浮态两者之和,底泥中营养含量没有考虑在内,所以该方法计算的污染负荷量通常比实际偏小。

2.3.2 排污系数法

污染物产生系数(产污系数)是指在正常养殖生产条件下,养殖生产单位质量水产品在水体中所产生的污染物质,污染物排放系数(排污系数)是指在正常生产条件下,养殖生产单位质量水产品所产生的污染物质中,经不同排放渠道直接排放到外部水体环境中的污染物质^[11]。因此,排污系数计算出的产排污量只包含养殖水体,未考虑底泥影响,因此计算结果偏低。但是,该方法计算简便,涵盖了我国目前主要的养殖品种及养殖类型,对计算养殖业产排污量具有很好的借鉴意义。

$$\text{污染物产生量} = \text{产污系数} \times (\text{养殖产量} - \text{养殖投放量})$$

$$\text{污染物排放量} = \text{排污系数} \times (\text{养殖产量} - \text{养殖投放量}) \quad (2)$$

2.3.3 物料平衡法

物料平衡法^[13-14,31-33]是根据食物用量、生物量和营养物在生物体内TN含量进行污染负荷计算,该方法认为食物是养殖系统内直接产生污染物的唯一来源,因而可通过投喂食物的总量与被生物体所利用部分的差值来计算总污染物质,并且可以通过一系列物质平衡关系式计算污染物排放量。物料平衡法被认为是一种与实际较符合的方法,使用范围较广,具体计算公式如下:

$$L = L_{in} - L_{fish} \quad (3)$$

式中: L 为池塘养殖中总污染负荷量; L_{in} 为输入池塘的TN或TP量; L_{fish} 为鱼体内氮或磷含量。

2.3.4 竹内俊朗法

竹内俊朗法^[12,15-16,34]是物料平衡法的简化方法,是依据水产养殖过程中物质的输入输出平衡方程来间接推算,其原理主要是“从所投喂的饵料营养成分中,扣除蓄积在养殖生物体内的量,剩余即是环境负荷量”。该方法主要用于氮和磷的估算,简便实用,其计算公式如下:

$$\begin{aligned} TN &= C \times N_f - N_b \\ TP &= C \times P_f - P_b \end{aligned} \quad (4)$$

式中: TN 、 TP 分别为氮负荷和磷负荷; C 为饵料用量; N_f 、 P_f 分别为饵料中氮、磷的含量,%; N_b 、 P_b 分别为生物体内氮和磷的含量。

竹内俊朗法适用于饵料投喂比较单一的养殖模式,在利用此方法估算污染负荷时要求饲料及生物体中所含营养物质含量信息充足。此外,饵料系数、种群差异是最易导致误差的参数之一,同时,对养殖水体水质的影响除了饲料以外,还有底泥的释放以及动力的输送等,所以,该方法可能与实际的结果有较大出入。

2.3.5 污染负荷率法

污染负荷率法^[16-17,35]最初是根据网箱养殖所提出的,是指生产单位质量水产品所产生的污染负荷量。

其理论计算值为饵料中含有的某元素的量减去鱼体中该元素含量,因此,总污染负荷量等于污染负荷率乘以水库网箱养鱼净产量。具体计算公式如下:

$$\begin{aligned} W_T &= f Y \\ f &= C_f P_{food} - P_{fish} \end{aligned} \quad (5)$$

式中: W_T 为总污染物负荷量; f 为污染负荷率; Y 为水库网箱养鱼净产量,包括固态态和溶解态; C_f 为饵料系数; P_{food} 为饵料的磷质量比; P_{fish} 为净产鱼的磷质量比。

此方法考虑因子齐全,应用较广泛。在使用该方法时水产养殖净产量包括固态态和溶解态,同时还考虑了底泥的污染贡献,这是目前大多数方法所欠缺的,而且其公式比较简单,计算起来很方便。然而,该方法所涉及的参数较多,其中有些单个参数的律定也比较难把握,如饵料系数、饵料中氮磷质量比等参数值通常很难与实际相一致,这也会使得此方法的估算结果有所偏差。

3 结果与讨论

3.1 研究区池塘养殖污染负荷核算

本研究利用不同污染负荷核算方法对研究区2017—2018年池塘养殖污染负荷进行了核算、对比和分析,结果详见表3。

从研究区污染负荷的计算结果来看,竹内俊朗法、物料平衡法、污染负荷率法的计算结果均高于化学分析法和排污系数法,这是由于化学分析法和排污系数法的计算结果体现的是由于养殖污水未经处理直接排放到外部水环境中的污染物质(排污量),而前3种方法的计算结果体现的是对池塘本身的影响[输入(养殖水+水产品/饵料)-输出(水产品)],即产污量,主要包括水体和底泥两部分。从表3数据可看出,排污系数法计算结果整体大于化学分析法,主要原因是排污系数法结果体现的是池塘养殖废水未经处理直接排放到外界环境中所造成的污染,而化学分

表3 研究区池塘污染负荷核算结果对比表(kg)

Table 3 The results of pollution load in ponds by different methods(kg)

项目 Items	2017年污染负荷 Pollution load in 2017			2018年污染负荷 Pollution load in 2018			
	TN	TP	COD	TN	TP	COD	
排污量(水体)	化学分析法	5.4	5.3	376.2	35.7	5.7	1 775.6
	排污系数法	113.7	12.2	534.8	124.0	15.6	624.4
产污量(水体+底泥)	物料平衡法	3 176.1	1 037.0	—	3 082.6	1 178.8	—
	竹内俊朗法	3 456.7	1 063.4	—	3 445.8	1 207.6	—
	污染负荷率法	3 462.6	1 064.1	—	3 487.1	1 208.4	—

析法计算结果体现的是池塘排水与池塘进水中污染量之差。此外,竹内俊朗法、物料平衡法和污染负荷率法的计算结果很接近,但是这3种计算方法结果间存在一定误差,产生误差的主要原因是参数考虑方面的差异。物料平衡法认为食物是池塘系统内直接产生废物的唯一来源;竹内俊朗法认为输入池塘污染量扣除生物体质量剩余的即是环境负荷量,本研究在计算时输入池塘污染量包括饵料和投入的水产品两部分;污染负荷率法和竹内俊朗法相似,均考虑了水产品投放带入池塘系统内的污染量,但是在计算时污染负荷率是通过净产量进行计算,未考虑成鱼和幼鱼间的差异。从研究指标来看,化学分析法测定指标较全面,可根据研究内容灵活测定所需指标,而其他方法均是基于对池塘氮磷污染负荷的计算,排污系数法还可对COD和部分重金属污染负荷进行计算,在指标选择方面具有局限性。

3.2 池塘养殖污染负荷核算方法可行性分析

基于上述水产养殖污染负荷方法的研究调查及实例计算,本文从数据的可得性与方法的适用性两方面进行了讨论分析,并以此得到池塘养殖污染负荷方法可行性分析,具体见表4。

池塘养殖不同污染负荷核算方法有所不同,从数据获取途径来看,化学分析法在应用时需要到研究区进行现场水样采集、监测;竹内俊朗法、物料平衡法、污染负荷率法和排污系数法只需要进行数据调研,但是计算原理及考虑参数方面有所差别。其中,竹内俊朗法、物料平衡法、污染负荷率法是基于物质守恒规律进行计算的方法,在数据需求中均涉及饵料及生物体内含氮或含磷率,这部分数据较难获取且由于饵料/生物品种多样,摄食率、消化率等的不一致而导致计算误差较大;排污系数法方法简便,可根据研究区所处区域位置直接查询对应的产排污系数,但是仅局

限于第一次污染源普查区域。

从数据可得性方面来看,化学分析法和排污系数法的数据最易获得,获得方法主要是通过野外试验采样监测和产排污系数手册;竹内俊朗法、物料平衡法和污染负荷率法所需数据量较多,对于数据的可得性较难,主要原因在于养殖品种不唯一、水产品摄食率及消化率、收获时间等都会对生物体内氮磷含量产生影响。

从方法适应性来看,由表4可知,水产养殖污染负荷核算方法都有其各自的适用范围及优缺点。其中,化学分析法、排污系数法是基于对养殖水体的分析,计算结果仅包含由于养殖水体排放所造成的环境污染,此类方法有两大共性:其一,没有考虑底泥对环境的危害,导致污染负荷核算结果偏低;其二,计算结果只包含了年末养殖废水排放对环境造成的污染,关于水产养殖期间是否对环境造成污染未作具体分析和计算。竹内俊朗法、物料平衡法和污染负荷率法的原理均是基于物质守恒来进行计算,所需参数中均包含生物体和饵料中氮磷含量,参数率定较复杂,对结果的准确性影响较大,这3种方法不同之处在于物料平衡法认为食物是唯一污染源,污染负荷率法是对单位质量水产品所产生的污染负荷进行了定义,但是其计算原理基本相同。

3.3 池塘养殖污染负荷核算方法改进

基于上述池塘养殖污染负荷核算的不同方法适用性评价及实例计算,可发现池塘养殖污染负荷核算目前存在两大问题:在计算池塘养殖对外界环境造成的影响时未考虑底泥因素,且只计算了养殖末期所产生的污染,养殖期间是否有污染排出未作分析;基于物质守恒原理方法的计算结果可认为是整个养殖期间对外界环境所产生的总污染,但是未对水体和底泥进行分别考虑。基于此,本研究对化学分析法中的池

表4 池塘水产养殖污染负荷方法可行性分析

Table 4 Feasibility analysis of pollution load method in pond aquaculture

估算方法 Estimation method	变量 Variable	获取途径 Access	适用条件 Applicable conditions	缺点 Shortcoming
化学分析法	排水量、进出水浓度	野外试验观测	比较封闭、较小的池塘	未考虑底泥影响
排污系数法	产排污系数、生物体净产量	排污手册、实验监测	可测定多种污染指标、可根据年鉴统计数据对全国各地数据进行计算	测定的污染物种类有限
竹内俊朗法	饵料系数、生物体/饵料氮磷含量、饵料用量	实地调查、食物成分表、文献、水利科学研究所	饵料单一且生物体内营养含量已知的水体	参数率定较复杂、不同生物体的消化率较难确定、不同饵料营养成分不同、测定的污染物种类有限
物料平衡法	输入池塘氮磷含量、鱼体氮磷含量	实地调查、食物成分表、文献、水利科学研究所	养殖模式基本一致且水体相对静止	
污染负荷率法	饵料系数、生物体/饵料氮磷含量、饵料用量、生物体净产量	实地调查、食物成分表、文献、水利科学研究所	考虑因子齐全、适用条件较广	

塘排水量 Q 进行细化分析,并基于物质守恒原理对池塘养殖污染负荷核算方法进行改进。

本研究采用改进后的方法对池塘养殖全过程的污染负荷进行核算,计算过程中所需数据主要有池塘养殖面积、养殖水位、降雨等。养殖面积通过对养殖水域进行实际测量长宽高及边坡等计算得到,养殖水位和降雨量通过压力式水位自动记录仪(HOBO-U20)和翻斗式雨量计进行野外监测获取。在核算过程中通过对池塘水位数据分析判断在养殖期间是否向外界环境排污;此外,本研究在核算过程中考虑了底泥贡献,通过核算可获得在养殖期间池塘对外界环境产生的影响。

3.3.1 方法构建

化学分析法一般只采集水样,不需考虑底泥影响,适用于比较封闭的池塘,在计算时认为进、出池塘水量相等。但是,在实际水产养殖过程中,池塘进、出水量不尽相同,且水产养殖过程中并非完全不与外界环境进行水体交换,养殖废水主要来自季节性补水和养殖结束后的排水。此外,池塘底质环境通常是养殖期间污染物的聚集地,是养殖系统内污染的源和汇,在养殖末期养殖废水的排放对外界环境影响较大。因此在本研究中对 Q 进行了细化分解,且将底泥影响

考虑在内,改进后的计算公式如下:

$$P = \sum_{i=1}^n Q_{out,i} \times C_{out,i} + S_c Q_c = P_{food} + P_{fish,1} + \sum_{i=1}^m Q_{in,i} \times C_{in,i} - P_{fish,2} \quad (6)$$

式中: C_{out} 为池塘排水污染物浓度; C_{in} 为池塘进水污染物浓度,通常为本底值; i 表示鱼塘进排水的次数; m 、 n 分别为池塘总进水/排水频次; S_c 为底泥中污染物浓度; Q_c 为底泥排放量; P_{food} 为饵料中污染物质量; $P_{fish,1}$ 为幼鱼中污染物质量; $P_{fish,2}$ 为成鱼中污染物质量。

3.3.2 污染负荷核算

为准确判断池塘养殖期间向外界水环境的排污频次及排污量,本研究对研究区池塘养殖进行了全过程水位和降雨监测。在养殖过程中,引起池塘水量变化的主要有降水、人工补水、人工排水、蒸发和下渗4项。池塘水量平衡是指在任意时间段内,池塘排入水量(降水、人工补水)与排出水量(人工排水、蒸发和下渗)的差额等于该时段池塘蓄水的变化量。

由图1可知,在无降雨影响时,池塘水位若出现明显的拐点,则是由于人工补水或人工排水导致的水位突然上升或下降;降雨时,若降雨量超过蒸发和渗漏损失量,水位会呈现上升趋势(图1a),反之,水位

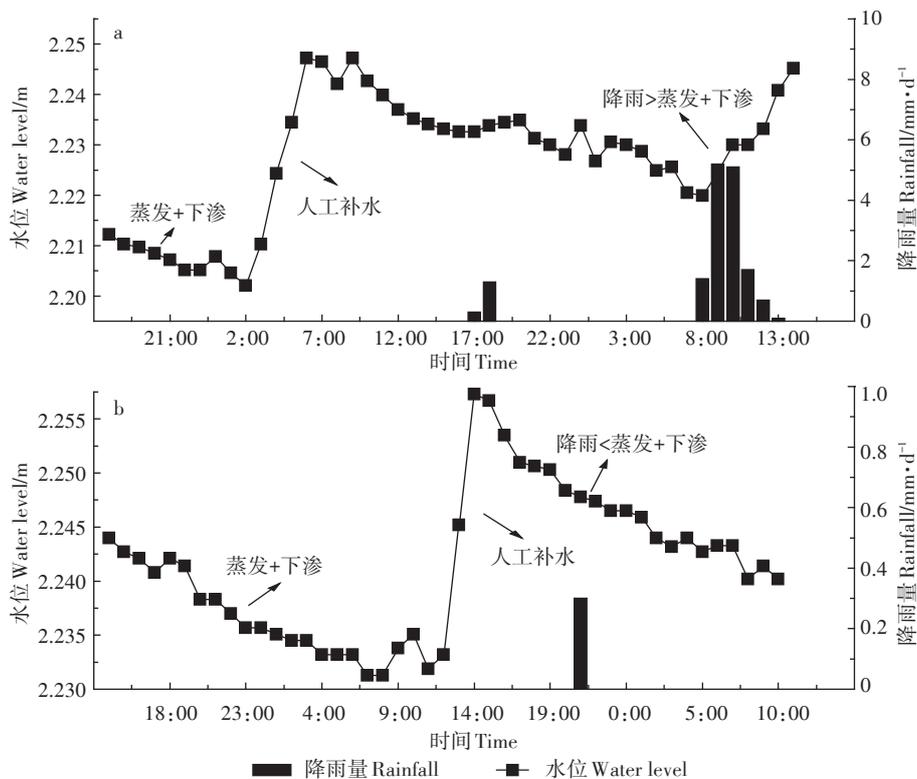


图1 降雨或人工补水条件下的水位变化

Figure 1 Change of water level under the rainfall or artificial recharge conditions

仍会呈现下降趋势(图1b);在无降雨或人工补排水措施的影响时,池塘水位由于蒸发和下渗的影响会呈现下降趋势。因此,可根据池塘水位变化情况对池塘养殖期间的补排水频次及量进行分析。

池塘养殖水管理是核算池塘养殖污染负荷的基础,根据公式6可知,池塘补排水会造成池塘污染物的引入或排出,因此在计算研究池塘养殖污染负荷时需明晰养殖期间补排水频次和补排水量。由数据分析可得,池塘补水主要在集中在4—8月份。由图2可知,池塘水位快速下降的拐点有3个,可判断为研究期间向外界水环境共排水3次,其中9月份是在养殖期间排水,剩余两次为年末养殖废水的排放,因此,这部分对外界环境的影响主要体现在水环境方面。根据实际调研,2017年和2018年都进行了淤泥的清理,因此底泥也对外界环境造成了一定影响。通过对研究区养殖期间水位状况的分析为池塘养殖期间污染负荷核算提供数据基础。

利用改进后核算方法结合研究区池塘养殖水管理对池塘养殖期间所产生的污染负荷进行核算,计算结果主要包括水体和底泥两部分(表5)。

改进方法中研究区池塘养殖水管理是通过野外监测获得,污染浓度数据是基于野外实验测得,因此以改进方法核算的污染负荷为准确值,对现有池塘养殖污染负荷核算方法的结果进行了误差分析,结果见表6。

从表5、表6可看出,改进后污染负荷核算结果(产污量)与物料平衡法、竹内俊朗法与污染负荷率法计算结果相近,相对误差较小,说明在池塘养殖中饵料是产生污染的主要来源,水产品的影响相对较小;水体中污染负荷数据与化学分析法和排污系数法计算结果相对误差较大,主要原因是化学分析法、排污

表5 改进方法对研究区池塘养殖污染负荷计算结果(kg)
Table 5 The pollution load in pond calculated by improved method(kg)

项目 Items	TN	TP	COD	NH ₃ -N	NO ₃ -N
2017年 排放水体	42.0	7.7	1 106.6	17.8	20.9
底泥	3 542.6	1 067.8	2 033.0	—	—
总计	3 584.6	1 075.5	3 139.6	—	—
2018年 排放水体	102.1	10.1	3 103.3	18.1	20.7
底泥	3 386.4	1 197.7	970.3	—	—
总计	3 488.5	1 207.8	4 073.6	—	—

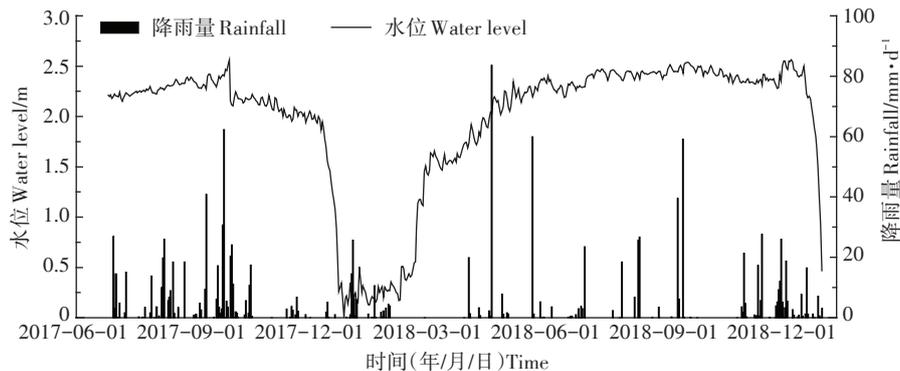


图2 池塘养殖期间水位与降雨变化

Figure 2 Water level and rainfall variation during pond culturing period

表6 研究区池塘污染负荷核算结果相对误差(%)

Table 6 Comparisons of relative errors of pond pollution load accounting results in research areas (%)

项目 Items		2017年相对误差 Relative error of 2017			2018年相对误差 Relative error of 2018		
		TN	TP	COD	TN	TP	COD
排污量(水体)	化学分析法	87.12	31.43	66.01	65.03	43.76	42.78
	排污系数法	-170.70	-58.44	51.67	-21.45	-54.46	79.88
产污量(水体+底泥)	物料平衡法	11.40	3.58	—	11.64	2.40	—
	竹内俊朗法	3.57	1.12	—	1.22	0.02	—
	污染负荷率法	3.40	1.06	—	0.04	-0.05	—

注:相对误差=(准确值-计算值)/准确值,其中,准确值为改进方法污染负荷核算结果。

Note: Relative error = (accurate value - calculated value) / accurate value, in which the accurate value is the result of pollution load accounting by improved method.

系数法核算结果直接反映的是由于养殖水体排放所造成的污染,因此池塘养殖水管理数据的准确性对这两种方法的污染负荷核算结果有直接影响。改进方法水量计算结果考虑了养殖末期及养殖期间由于未处理水直接排放对外界水环境所造成的污染,而化学分析法计算时还需扣除池塘来水量,且未考虑养殖期间排水量,排污系数法是直接基于数据调研,未进行实际监测,因此误差均较大。另外,改进方法计算结果与排污系数法的相对误差还会受当前养殖条件与第一次全国污染源普查期间养殖条件差异的影响,这种差异主要体现在养殖面积、养殖密度、饵料类型及投放量等方面,这些养殖条件的不同都会对养殖过程中污染物的产生和排放产生影响。

利用改进后核算方法结合研究区池塘养殖水管理,可计算得到池塘补、排水以及底泥中污染物含量,此外,利用物料平衡法可明晰生物体内污染物含量,由此可得到研究区池塘养殖中每一部分源汇中污染物含量,具体信息如表7所示。由此说明,饵料是池塘养殖中主要的污染源,这与前述结论一致;另外可看出,改进后污染负荷核算方法的突出优点在于将池塘养殖过程中水体与底泥中污染负荷进行了区分,科学、准确、定量地分析了池塘养殖总产污量及水体和底泥排放分别对外界环境产生的影响,为今后池塘养殖污染负荷的准确核算提供参考。当只关注池塘养殖废水排污量时,必须保证养殖水管理数据的准确性,即全面考虑养殖期间与养殖末期排水量;当关注池塘养殖产污量(水体+底泥)时,饵料是最重要的污染源,该数据直接影响结果的准确性,因此必须保证饵料数据的准确性,其他源汇项对结果影响较小,但考虑越全面结果准确度越高,可根据实际需求完善污染负荷源汇项;在保证养殖废水排污量、养殖产污量结果核算的准确性时,底泥排污无需实验监测,可直

接做差获得。此外,根据表中数据可明晰养殖废水排放、淤泥清理及成鱼收获时带出池塘的营养物占比情况(底泥/成鱼/排水占比=底泥/成鱼/排水÷总营养物含量),通过数据分析可知,在小型池塘养殖生产中底泥中TN约占总排污的60%,TP占比高达85%,成鱼收获时带出的TN约占40%,TP约占15%,为后续池塘养殖的合理化及养殖模式等提供数据基础,尤其为后续池塘养殖底泥排放处理及回收再利用,及池塘养殖饵料投喂结构优化等提供参考。

4 结论

(1)不同池塘养殖污染负荷核算方法数据需求、适用性、优缺点等有所差异,在核算时可根据种群差异、自然水体中氮磷含量信息、结果需求等进行方法选择。

(2)池塘水管理过程及底泥考虑与否对污染负荷核算结果的准确性有直接影响,其中,水管理过程对排污系数法和化学分析法影响较大,底泥对竹内俊朗法、物料平衡法、污染负荷率法影响较大。

(3)改进化学分析法的突出优点:可以对养殖水体和底泥中污染负荷分别进行核算,准确反映池塘养殖总产污量及水体和底泥排放分别对外界环境产生的影响,为后续池塘养殖底泥排放处理、再利用及饵料投喂结构优化等提供参考。

参考文献:

- [1] 农业部渔业局. 中国渔业统计年鉴[M]. 北京:中国农业出版社, 2018:2-3.
Ministry of Agriculture Fisheries Agency. China fishery statistical yearbook[M]. Beijing:China Agriculture Press, 2018:2-3.
- [2] 欧阳佚亭,宋国宝,陈景文,等. 中国淡水池塘养殖鱼类排污的灰水足迹及污染负荷研究[J]. 环境污染与防治, 2018, 40(3):317-322, 328.
OUYANG Yi-ting, SONG Guo-bao, CHEN Jing-wen, et al. Grey water footprint and pollution loading of fresh water pond: Cultured fish in China[J]. *Environmental Pollution & Control*, 2018, 40(3):317-322, 328.
- [3] 李静,闵庆文,李子君,等. 太湖流域农业污染压力分析[J]. 中国生态农业学报, 2012, 20(3):348-355.
LI Jing, MIN Qing-wen, LI Zi-jun, et al. Agricultural pollution pressure in the Taihu Lake basin[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2012, 20(3):348-355.
- [4] 彭自然,陈立婧,王武. 长江中下游浅水湖泊水产养殖污染现状与对策[J]. 安徽农业科学, 2010, 38(12):6467-6468, 6621.
PENG Zi-ran, CHEN Li-jing, WANG Wu. Pollution actuality and counter measures of aquaculture in shallow lakes in the middle and lower reaches of Yangtze River Area[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sci-*

表7 研究区池塘养殖源汇中污染物含量(kg)

Table 7 Information of pollutant content in sources and sinks of pond culture in research area(kg)

项目 Items	2017年		2018年		
	TN	TP	TN	TP	
源	池塘补水	128.0	12.1	138.9	13.1
	饵料	5 245.9	1 212.2	6 104.3	1 410.6
	鱼苗	238.9	19.8	404.6	28.8
汇	养殖废水的排放	42.0	7.7	102.1	10.1
	底泥	3 542.6	1 067.8	3 386.4	1 197.7
	成鱼	2 028.1	168.5	3 021.8	231.8

- ences, 2010, 38(12):6467-6468, 6621.
- [5] 陈家长, 胡庚东, 瞿建宏, 等. 太湖流域池塘河蟹养殖向太湖排放氮磷的研究[J]. 农村生态环境, 2005, 21(1):21-23.
CHEN Jia-zhang, HU Geng-dong, QU Jian-hong, et al. TN and TP from pond crab farming in Taihu Valley[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2005, 21(1):21-23.
- [6] 范立民, 徐跑, 吴伟, 等. 淡水养殖池塘微生态环境调控研究综述[J]. 生态学杂志, 2013, 32(11):3094-3100.
FAN Li-min, XU Pao, WU Wei, et al. Regulation of micro-ecological environment in freshwater aquaculture pond: A review[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2013, 32(11):3094-3100.
- [7] Handy R D, Poxton M G. Nitrogen pollution in mariculture: Toxicity and excretion of nitrogenous compounds by marine fish[J]. *Reviews in Fish Biology & Fisheries*, 1993, 3(3):205-241.
- [8] 张韦, 缴建华. 天津地区水产养殖氮磷污染负荷估算初探[J]. 科学养鱼, 2018(6):54-56.
ZHANG Wei, JIAO Jian-hua. Estimation of nitrogen and phosphorus pollution load in aquaculture in Tianjin[J]. *Scientific Fish Farming*, 2018(6):54-56.
- [9] 张玉珍, 洪华生, 陈能汪, 等. 水产养殖氮磷污染负荷估算初探[J]. 厦门大学学报(自然科学版), 2003(2):223-227.
ZHANG Yu-zhen, HONG Hua-sheng, CHEN Neng-wang, et al. Discussion on estimating nitrogen and phosphorus pollution loads in aquaculture[J]. *Journal of Xiamen University (Natural Science)*, 2003(2):223-227.
- [10] 边蔚. 白洋淀水产养殖污染负荷与控制研究[D]. 北京: 中国地质大学, 2013.
BIAO Wei. Study on pollution load and control of aquaculture in Baiyangdian Lake[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2013.
- [11] 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产排污系数手册. 2010.
National pollution source survey, water and aquaculture pollution source production and emission coefficient measurement project group. China Pollution Source CensiK- Manual of water and aquaculture pollution source production and emission coefficient. 2010.
- [12] Islam M S, Tanaka M. Optimization of dietary protein requirement for pond-reared mahseer *Tor putitora* Hamilton (Cypriniformes: Cyprinidae)[J]. *Aquaculture Research*, 2015, 35(13):1270-1276.
- [13] 罗永霞, 高波, 颜晓元, 等. 太湖地区农业源对水体氮污染的贡献: 以宜溧河流域为例[J]. 农业环境科学学报, 2015, 34(12):2318-2326.
LUO Yong-xia, GAO Bo, YAN Xiao-yuan, et al. Estimating contribution of agricultural sources to aquatic nitrogen load in Taihu Lake region: A case study of Yili River catchment[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2015, 34(12):2318-2326.
- [14] 辛玉婷. 阳澄湖围网养殖污染负荷计算及其污染效应研究[D]. 南京: 河海大学, 2007:38-40.
XIN Yu-ting. Study on the pollution load calculation and polluting effect of barrier net aquaculture in Yangcheng Lake[D]. Nanjing: Hohai University, 2007:38-40.
- [15] 黄小平, 温伟英. 上川岛公湾海域环境对其网箱养殖容量限制的研究[J]. 热带海洋学报, 1998, 17(4):57-64.
HUANG Xiao-ping, WEN Wei-ying. A study of restriction of marine environment on capacity of Caga-culture in Gongwan bay[J]. *Tropic Oceanology*, 1998, 17(4):57-64.
- [16] 曹碧波, 戴乙, 朱龙基, 等. 网箱养鱼对河流型水库水质影响的研究[J]. 水资源与水工程学报, 2016, 27(1):75-81.
CAO Bi-bo, DAI Yi, ZHU Long-ji, et al. Study on simulation of influence of fish cage culture on water quality in riverine reservoir[J]. *Journal of Water Resources & Water Engineering*, 2016, 27(1):75-81.
- [17] 王安亭, 方玮, 白云山. 洛阳陆浑水库网箱养鱼污染负荷预测计算[J]. 渔业现代化, 2011, 38(1):38-40.
WANG An-ting, FANG Wei, BAI Yun-shan. Forecast on cage fish culture pollution carrying capacity in Luhun Reservoir of Luoyang[J]. *Fishery Modernization*, 2011, 38(1):38-40.
- [18] 高月香, 张毅敏, 王伟民, 等. 太湖流域江苏地区代表性水产养殖排污系数测算研究[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(7):1330-1336.
GAO Yue-xiang, ZHANG Yi-min, WANG Wei-min, et al. Study on calculation of representative aquaculture pollution discharging coefficients in the Taihu Lake basin within Jiangsu Province[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36(7):1330-1336.
- [19] 梁秀, 张翔, 刘建峰, 等. 长湖纳污能力及水产养殖污染负荷估算[J]. 水资源保护, 2015, 31(3):78-84.
LIANG Xiu, ZHANG Xiang, LIU Jian-feng, et al. Estimation of permissible pollution bearing capacity and aquaculture pollution load of Changhu Lake[J]. *Water Resources Protection*, 2015, 31(3):78-84.
- [20] 中国水产养殖网, 宜兴日报. 2018-01-10 http://www.shuichan.cc/news_view-349170.html.
China Aquaculture Network, Yixing Daily. 2018-01-10 http://www.shuichan.cc/news_view-349170.html.
- [21] 蔡惠文, 卓丽飞, 吴常文. 海水养殖污染负荷评估研究[J]. 浙江海洋学院学报(自然科学版), 2014, 33(6):558-567.
CAI Hui-wen, ZHUO Li-fei, WU Chang-wen. Review of waste loadings generation from marine aquaculture[J]. *Journal of Zhejiang Ocean University(Natural Science)*, 2014, 33(6):558-567.
- [22] 国家环境保护局规划标准处. 水质, 总氮的测定, 碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法 HJ 636—2012[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2012.
Planning Standards Division of the National Environmental Protection Agency. Water quality—Determination of total nitrogen—Alkaline potassium persulfate digestion—UV spectrophotometry method HJ 636—2012 [S]. Beijing: China Environmental Science Press, 2012.
- [23] 国家环境保护局. 水质, 总磷的测定, 钼酸铵分光光度法 GB 11893—1989[S]. 北京: 中国标准出版社, 1989.
National Environmental Protection Agency. Water quality—Determination of total phosphorus—Ammonium molybdate spectrophotometry method GB 11893—1989[S]. Beijing: China Standards Press, 1989.
- [24] 国家环境保护局. 水质, 铵的测定, 纳氏试剂比色法 GB 7479—1987[S]. 北京: 中国标准出版社, 1987.
National Environmental Protection Agency. Water quality—Determination of ammonium—Nessler's reagent colorimetric method GB 7479—

- 1987[S]. Beijing: China Standards Press, 1987.
- [25] 国家环境保护局. 水质, 化学需氧量的测定, 重铬酸盐法 GB 11914—1989[S]. 北京: 中国标准出版社, 1991.
- National Environmental Protection Agency. Water quality—Determination of COD, Dichromate method GB 11914—1989[S]. Beijing: China Standards Press, 1991.
- [26] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. 四版. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- State Environmental Protection Administration. Water and wastewater monitoring and analysis methods[M]. Fourth Edition. Beijing: China Environmental Science Press, 2002.
- [27] 国家林业局. 森林土壤有机质的测定及碳氮比的计算 LY/T 1237—1999[S]. 北京: 中国标准出版社, 1999.
- State Forestry Administration. Determination of organic matter in forest soil and calculation carbon-nitrogen ratio LY/T 1237—1999[S]. Beijing: China Standards Press, 1999.
- [28] 国家林业局. 森林土壤氮的测定 LY/T 1228—2015[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
- State Forestry Administration. Nitrogen determination methods of forest soils LY/T 1228—2015[S]. Beijing: China Standards Press, 2016.
- [29] 国家林业局. 森林土壤磷的测定 LY/T 1232—2015[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
- State Forestry Administration. Phosphorus determination methods of forest soils LY/T 1232—2015[S]. Beijing: China Standards Press, 2016.
- [30] 中华人民共和国环境保护部, 中华人民共和国国家统计局, 中华人民共和国农业部. 第一次全国污染源普查公报[N]. 人民日报, 2010-02-10(016).
- Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China. National Bureau of Statistics of the People's Republic of China. Ministry of Agriculture of the People's Republic of China. First national pollution source census bulletin[N]. People's daily, 2010-02-10(016).
- [31] 李志斐, 谢 骏, 王广军, 等. 珠江三角洲养殖池塘底栖动物群落结构及水质生物学评价[J]. 湖泊科学, 2017, 29(4): 896-906.
- LI Zhi-fei, XIE Jun, WANG Guang-jun, et al. Community characteristics of the macrozoobenthos and bioassessment of water quality in aquaculture ponds of the Pearl River Delta[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2017, 29(4): 896-906.
- [32] 李晓洁, 唐 敏, 李 云, 等. 鲢鳙在长寿湖水生态系统氮磷循环中的作用[J]. 淡水渔业, 2018(3): 40-46.
- LI Xiao-jie, TANG Min, LI Yun, et al. Role of silver carp and big-head on nitrogen and phosphorus cycle of aquatic ecosystem in Changshou Lake[J]. *Freshwater Fisheries*, 2018(3): 40-46.
- [33] 舒廷飞, 温琰茂, 陆雍森. 网箱养殖 N、P 物质平衡研究: 以广东省哑铃湾网箱养殖研究为例[J]. 环境科学学报, 2004, 24(6): 1046-1052.
- SHU Ting-fei, WEN Yan-mao, LU Yong-sen. Research on material balance of N and P in cage culture: Take example for cage culture in Yaling Bay, Guangdong[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2004, 24(6): 1046-1052.
- [34] 竹内俊郎, 星光政, 佐藤秀一, 等. 饲料中可消化能量及有效磷含量对鲤鱼氮排泄量的影响[J]. 黑龙江水产, 1994(3): 46-51.
- Takeochi, et al. Effects of digestible energy and available phosphorus content in feed on nitrogen excretion of carp[J]. *Heilongjiang Fisheries*, 1994(3): 46-51.
- [35] Hakanson H. Portable continuous blood glucose analyzer[J]. *Methods in Enzymology*, 1988, 137(1): 319.