

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.

太湖流域江苏地区代表性水产养殖排污系数测算研究

高月香, 张毅敏*, 王伟民, 张永春

(环境保护部南京环境科学研究所, 南京 210042)

摘要:为合理评价水产养殖对环境的影响,选取太湖流域典型地区 12 个养殖池塘和养殖围网,包括淡水池塘养殖中华绒螯蟹、草鱼和翘嘴红鲌,网围养殖中华绒螯蟹、鲢鳙等 5 种养殖模式和养殖品种,采用现场监测及物料平衡相结合的方法对水产养殖中总氮、总磷、铜和锌等污染物的排污系数进行系统定量研究。结果表明,物料平衡法计算下的排污系数因养殖品种和养殖模式的不同存在较大差异,即使同一养殖模式下的同一主要养殖品种,因配养情况的不同得出的排污系数也相差很大。围网养殖中华绒螯蟹,套养其他鱼类的比例在 30%~60%时,总氮、总磷、铜、锌的排污系数均值分别为 16.80、2.80、0.002 0、0.026 1 kg·t⁻¹;如不套养或少量套养(套养比例<10%),总氮、总磷、铜、锌的排污系数均值分别为 90.03、41.39、0.036 5、0.219 8 kg·t⁻¹;网围养殖鲢鳙的排污系数为负值。对池塘养殖模式,采用现场实测和物料衡算两种方法同时进行测算,物料衡算法计算下的排污系数远大于现场实测法。研究结果结合渔业统计数据,可核算区域水产养殖污染负荷。在水产养殖过程中,要充分利用鱼、螺、草、藻的物质循环关系,建立一种良好的生态养殖模式,达到经济效益和环境保护双赢的目的。

关键词:太湖流域;水产养殖;排污系数;测算

中图分类号:X171.5 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2017)07-1330-07 doi:10.11654/jaes.2017-0129

Study on calculation of representative aquaculture pollution discharging coefficients in the Taihu Lake basin within Jiangsu Province

GAO Yue-xiang, ZHANG Yi-min*, WANG Wei-min, ZHANG Yong-chun

(Nanjing Institute of Environmental Science, Ministry of Environmental Protection, Nanjing 210042, China)

Abstract: In order to reasonably evaluate the influence of aquaculture on the environment, six aquaculture ponds and six purse seines in typical areas of Taihu Lake were selected, with four aquaculture species and two aquaculture patterns (*Eriocheir sinensis*, grass carp, and *Erythroculter ilishaeformis* in aquaculture ponds; *Eriocheir sinensis*, silver carp, and bighead carp in purse seines). The aquaculture pollution discharging coefficients for total nitrogen (TN), total phosphorus (TP), copper (Cu), and zinc (Zn) were quantitatively analyzed by the method of field monitoring and mass balance. The results showed that there were great differences in pollution discharge coefficients among the various species and patterns using the mass balance method. Owing to different complementary fishes, the pollution discharge coefficients also varied widely for the same species under the same aquaculture patterns. In seine breeding *Eriocheir sinensis*, the range of the other fish intercropping proportion was 30% to 60%, and the averages of pollution discharging coefficients of TN, TP, Cu, and Zn were 16.80, 2.80, 0.002 0, and 0.026 1 kg·t⁻¹, respectively. Under the circumstance of no or little fish intercropping (the proportion of fish intercropping was less than 10%), the averages of pollution discharging coefficients of TN, TP, Cu, and Zn were 90.03, 41.39, 0.036 5, and 0.219 8 kg·t⁻¹, respectively. The pollution discharging coefficients for the silver carp and bighead carp in seine breeding had negative values. Furthermore, the pollution discharging coefficients using mass balance measurement were much higher than those using field monitoring in

收稿日期:2017-02-03

作者简介:高月香(1981—),女,江苏太仓人,副研究员,主要从事水污染防治方面的研究。E-mail:gyx@nies.org

*通信作者:张毅敏 E-mail:zym@nies.org

基金项目:国家水体污染控制与治理科技重大专项(2012ZX07101-007)

Project supported: The National Science and Technology Major Project for Water Pollution Control and Treatment of China(2012ZX07101-007)

aquaculture ponds. The results could be used to calculate the regional aquaculture pollution load in combination with fishery statistics. Overall, it is necessary to take full advantage of the material circulation relationships between fish, snail, grass, and algae to establish a good ecological breeding mode for the process of aquaculture, which could lead to a win-win for economic and environmental protection purposes.

Keywords: Taihu Lake basin; aquaculture; discharge coefficient of pollutant; estimation

“十一五”国家水专项课题对太湖流域污染负荷来源的分析表明,总氮和总磷污染负荷中农村面源污染所占的比重约为58%和40%,而以往的研究主要集中在农田种植的农药化肥、畜禽粪便、农村生活污水和生活垃圾等几个方面^[1-6],作为面源污染中一个重要部分的水产养殖污染,相应的研究较少。近年来,太湖流域是我国重点淡水渔业基地,养殖过程中大量的外源输入,使得残饵和排泄物中的N、P等富营养物质大量排入水体,水产养殖的污染问题日益凸显^[7-9]。水产养殖排污系数测算的科学性和准确性将直接影响水产养殖污染负荷的结果和结论,从而影响养殖产业规划和发展政策的制订,对渔业产业的可持续发展和水域环境保护将产生重大影响。

一个流域内并存着不同的养殖模式和养殖品种,利用现有的研究成果^[10-20],即针对某一养殖水体、养殖模式、养殖品种、利用某一种单一的测算方法得出来的排污系数不能精确得出一个流域内各种养殖生物向水体排放污染物量。

本文针对目前太湖流域水产养殖的特点,综合考虑养殖水体类别、养殖模式、养殖品种、投饵量、投草量、收获量等多项因素,选取太湖流域典型地区12个具有代表性的养殖池塘和养殖围网,包括淡水池塘养殖中华绒螯蟹、草鱼和翘嘴红鲌,网围养殖中华绒螯蟹和鲢鳙,采用现场实测法和物料衡算法相结合的方法,研究太湖代表性水产养殖排污系数,合理评价水产养殖对水环境的影响,为核算太湖流域水产养殖业的污染贡献提供基础数据。

1 研究方法

1.1 研究对象

(1) 养殖模式和品种的确定

在养殖模式方面,池塘养殖和湖泊内的网围养殖是太湖流域主要的养殖模式,养殖面积占总的内陆养殖面积的85%以上。在养殖品种方面,淡水的传统养殖品种“青、草、鲢、鳙、鲤、鲫、鳊”7种鱼类和甲壳类的中华绒螯蟹是养殖的主要品种,占淡水鱼类养殖产量的85%以上。因此确定淡水池塘养殖、淡水网围养殖为本次研究的重要养殖模式,草、鲢和鳙等3种鱼

类、中华绒螯蟹以及太湖地区特有的翘嘴红鲌为重要养殖品种。

(2) 监测点位

本次研究在太湖流域选择了12个养殖池塘和网围,包括淡水池塘养殖中华绒螯蟹、草鱼和翘嘴红鲌,网围养殖中华绒螯蟹和鲢鳙等5种养殖模式和养殖品种。根据地方水产部门的推荐,选择了养殖规模中等、放养模式、饵料投入情况等都能代表当地实际情况的养殖场(户),确保了监测点的典型性和代表性。监测点位的基本情况见表1。

1.2 研究方法

1.2.1 产排污计算方法

(1) 现场实测法

养殖池塘相对于网围养殖,是一个相对封闭的人工生态系统,通过进口的定期补水和出口的定期排水与外界发生水流交换,污染物向外部水环境的排放量取决于整个养殖周期系统的污染物通量,其计算公式为:

$$M_i = \left[\sum_{j=1}^n (Q_{排j} \times C_{排j,i} - Q_{补j} \times C_{补j,i}) \right] \times 10^{-3} / \Delta W$$

式中: M_i 为某种污染物的环境排放量, $\text{kg} \cdot \text{t}^{-1}$; $Q_{排j}$ 为养殖过程中的第 j 次排水所排放的废水量, m^3 ; $C_{排j,i}$ 为第 j 次排放到水体中某种污染物的浓度, $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$; $Q_{补j}$ 为养殖过程中第 j 次补水的水量, m^3 ; $C_{补j,i}$ 为第 j 次补水水体中某种污染物的浓度, $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$; ΔW 为养殖生物净产量或质量增量, t 。

(2) 物料平衡法

对于开放式养殖模式(如网围养殖、网箱养殖等),养殖水体时刻与外界发生着水流交换,无法准确获得换水量及进、排水中污染物浓度差值,故采用物料平衡分析法进行测算。物料平衡分析法认为食物是养殖系统内直接产生废物的唯一来源,因而通过投喂食物中物质含量减去养殖生物增长量中利用的物质含量,就是进入环境中的各类污染物数量。其计算公式为:

$$K_{总i} = \left(\sum_{j=1}^n W_{饲j} \times C_{饲j,i} + \sum_{j=1}^n W_{苗j} \times C_{苗j,i} - \sum_{j=1}^n W_{成j} \times C_{成j,i} \right) \times 10^{-6} / \Delta W$$

表1 水产养殖监测点位基本情况
Table 1 Basic information of monitoring sites

养殖类型	编号	地理位置	主要养殖品种	套养品种	养殖面积/hm ²	饵料品种	主要养殖品种产量/kg·hm ⁻²	排水量/m ³ ·年 ⁻¹	补水量/m ³ ·年 ⁻¹
淡水网围养殖	1#	常州溇湖	中华绒螯蟹	鳊鱼、鲢鱼	2.67	玉米籽、螺蛳、小鱼、水草	525~600	—	—
	2#				2.33		525~600	—	—
	3#		鳊鱼、鲢鱼	鲫鱼、青鱼、草鱼	2.86	青糠	25 500~28 500	—	—
	4#				2		16 500~18 000	—	—
	5#	苏州东太湖	中华绒螯蟹	鲢鱼	10.47	玉米籽、螺蛳、小鱼、水草	900	—	—
	6#				11.87		900	—	—
淡水池塘养殖	7#	常州溇湖	中华绒螯蟹	青虾、鲫鱼	6.67	自制颗粒饲料、玉米籽、螺蛳、小鱼	1200~1350	226 667	170 000
	8#				6.67		1200~1275	213 344	160 008
	9#	无锡马山镇	翘嘴红鲌	花骨鱼	0.87	饲料(通威、青鱼饲料 131、普通饲料 820)	10 800	24 847	10 980
	10#				0.53		11 700	28 352	17 152
	11#		草鱼	鳊鱼、鲢鱼、鲫鱼、青鱼	0.8	普通饲料 820、膨化饲料	2850~3600	26 472	14 472
	12#				0.93		3750~5850	18 680	4680

$$K_{\text{溶}i} = M_{\text{总}i} \times X_i$$

式中: $K_{\text{总}i}$ 为某种污染物总的排放系数, $\text{kg} \cdot \text{t}^{-1}$; $W_{\text{饲}j}$ 为养殖过程中某种饵料的投放量, kg ; $C_{\text{饲}j,i}$ 为某种饵料中某种成分的含量, $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; $W_{\text{苗}j}$ 为养殖过程中某种苗种的投放量, kg ; $C_{\text{苗}j,i}$ 为某种苗种中某种成分的含量, $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; $W_{\text{成}j}$ 为养殖过程中某种成鱼(蟹)的捕捞量, kg ; $C_{\text{成}j,i}$ 为某种成鱼(蟹)中某种成分的含量, $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; ΔW 为养殖生物净产量或质量增量, t ; $K_{\text{溶}i}$ 为某种污染物溶解态的排放系数, $\text{kg} \cdot \text{t}^{-1}$; X_i 为某种污染物的溶解态系数。

对于池塘养殖,同时采用现场监测法和物料平衡法来进行监测分析和比较。

1.2.2 监测指标

水产养殖对水环境的负面影响主要包括饵料损失和养殖对象排泄造成的水体富营养化(主要是有机的氮和磷),以及添加重金属等微量元素的饲料和渔药的残留造成的重金属污染,目前以铜、锌的污染为主^[21-26]。因此,在本研究中选取总氮、总磷、铜、锌等4个因素作为监测分析的指标。

1.2.3 监测方法

对于池塘养殖的现场监测主要监测对象为补水水源和养殖排水。在每次补水和排水时记录相应的补/排水时间和水量,并在补水口根据水源深度分层采样,在排水口根据排水时间(排水初期、中期和末期)进行分段采水,水样进行混合后监测水体中的总氮、总磷、铜、锌等指标。研究周期为2014年12月—2016年1月,即为苗种投放前(前年冬季)至成鱼(蟹)捕捞后(来年冬季)的整个养殖周期内。

对于物料平衡法,监测对象主要为养殖对象和投入品。调查不同养殖对象的投放量和收获量,并在苗种投放时和成鱼(蟹)捕捞时,采集相应的苗种和成鱼(蟹);在饵料投喂期,调查所用饵料的种类和投喂量,并采集投喂的各种饵料。对养殖对象和投入品进行蛋白质(氮)、总磷及铜、锌等的监测。收集了两个养殖周期内(2013年12月—2016年1月)的生物投放量、捕获量以及饲料投放量等数据,在2014年12月—2016年1月的整个养殖周期内采集生物、饲料样本进行物质含量测定。

1.2.4 测试方法

水体中和生物体中的总磷采用钼酸铵分光光度法测定,总氮采用碱性过硫酸钾消解-紫外分光光度法测定;饵料中的总磷采用有机肥料(全磷测定方法)测定,总氮采用有机肥料(全氮测定方法)测定;铜和锌均采用原子吸收分光光度法测定。

2 结果与讨论

2.1 结果分析

根据排污系数计算公式,一年内12个调查养殖点位5个不同养殖模式总氮、总磷、铜和锌的排污系数的平均监测计算结果见表2。

2.1.1 现场实测法得到的产排污系数

(1)池塘养殖中华绒螯蟹

淡水池塘养殖河蟹,投喂加工配制的颗粒饲料、玉米籽、螺蛳和小鱼。总氮、总磷、铜、锌的排污系数均值分别为2.49、0.701、0.006 3、0.057 0 $\text{kg} \cdot \text{t}^{-1}$ 。

(2)池塘养殖翘嘴红鲌

表 2 不同养殖模式和不同计算方法下的排污系数均值和标准差($\text{kg}\cdot\text{t}^{-1}$)Table 2 Result of pollutant discharge coefficient of aquaculture in Taihu Lake basin($\text{kg}\cdot\text{t}^{-1}$)

计算方法	养殖模式	养殖品种	总氮	总磷	铜	锌
现场实测法	池塘	中华绒螯蟹	2.49±0.01	0.701±0.069	0.006 3±0.008 8	0.057 0±0.074 9
		翘嘴红鲌	3.60±0.11	1.114±0.472	0.009 3±0.001 2	-0.037 2±0.109 3
		草鱼	5.12±1.65	1.346±0.287	-0.004 6±0.002 5	-0.068 0±0.048 2
物料平衡法	池塘	中华绒螯蟹	26.09±2.72	4.110±0.732	0.001 9±0.000 4	0.050 6±0.002 5
		翘嘴红鲌	34.18±1.13	6.400±0.198	0.003 1±0.000 2	0.069 2±0.001 6
		草鱼	52.02±5.64	8.260±0.733	0.006 2±0.000 7	0.081 6±0.017 7
	围网	中华绒螯蟹(溇湖)	16.80±3.10	2.800±0.099	0.002 0±0.000 2	0.026 1±0.010 8
		中华绒螯蟹(东太湖)	90.03±13.94	41.395±5.763	0.036 5±0.010 0	0.219 8±0.057 1
		鲢鳙	-13.51±1.27	-2.870±0.410	-0.000 8±0.000 1	-0.005 8±0.000 7

淡水池塘养殖鲌鱼,投喂大量的饲料,养殖水体封闭,基本不与外界水环境相通,根据水质和水量情况定期补水和换水,在清塘捕获时会排水。总氮、总磷、铜、锌的排污系数均值分别为 3.60、1.114、0.009 3、-0.037 2 $\text{kg}\cdot\text{t}^{-1}$ 。

(3)池塘养殖草鱼

淡水池塘养殖草鱼,投喂大量的饲料,养殖水体封闭,基本不与外界水环境相通,根据水质和水量情况定期补水和换水,在清塘捕获时会排水。总氮、总磷、铜、锌的排污系数均值分别为 5.12、1.346、-0.004 6、-0.068 0 $\text{kg}\cdot\text{t}^{-1}$ 。

2.1.2 物料平衡法得到的产排污系数

(1)池塘养殖中华绒螯蟹

淡水池塘养殖河蟹,总氮、总磷、铜、锌的排污系数均值分别为 26.09、4.11、0.001 9、0.050 6 $\text{kg}\cdot\text{t}^{-1}$ 。

(2)池塘养殖翘嘴红鲌

淡水池塘养殖鲌鱼,总氮、总磷、铜、锌的排污系数均值分别为 34.18、6.40、0.003 1、0.069 2 $\text{kg}\cdot\text{t}^{-1}$ 。

(3)池塘养殖草鱼

淡水池塘养殖草鱼,总氮、总磷、铜、锌的排污系数均值分别为 52.02、8.26、0.006 2、0.081 6 $\text{kg}\cdot\text{t}^{-1}$ 。

(4)网围养殖河蟹

同是太湖流域,同是湖泊网围养殖,养殖的主要品种也都为中华绒螯蟹,但是因为配养的情况不同,得出的产排污系数相差很大。太湖流域淡水网围养殖河蟹,同时套养花白鲢,套养的比例在 30%~60%之间,那么总氮、总磷、铜、锌的排污系数均值分别为 16.80、2.80、0.002 0、0.026 1 $\text{kg}\cdot\text{t}^{-1}$ 。套养花白鲢的比例越高,产排污系数越小。太湖流域淡水网围养殖河蟹,不套养其他品种,或少量套养(套养的比例<10%),那么总氮、总磷、铜、锌的排污系数均值分别为 90.03、

41.395、0.036 5、0.219 8。同样套养的比例越高,产排污系数越小。

(5)网围养殖鲢鳙

溇湖南部水域,水体污染轻,水质相对较好,水面开阔,水质肥沃,浮游生物饵料资源和有机碎屑丰富,非常适合不投饵情况下鲢鳙鱼的生长。常州溇湖网围养殖鲢鳙的 2# 和 3# 监测点就是充分利用这种有利的自然条件,在基本不投饵的情况下养殖鲢鳙,让水中的 N、P 通过营养级的转化,最终以鱼产量的形式得到固定,并移出水体(捕捞),从而使得这两个点的排污系数为负值。其中总氮、总磷、铜、锌的排污系数均值分别为-13.51、-2.87、-0.000 8、-0.005 8 $\text{kg}\cdot\text{t}^{-1}$ 。所选的两家鲢鳙鱼的围网养殖场,仅考虑养殖经济效益和鱼苗获取途径,所以鲢鳙鱼的放养比例基本是 1:1。但从对水质和水生态改善效果来看,每个湖泊都有最适控渔量,采取适时、适度放养滤食性鱼类至关重要,而关于放养比例、放养量还有待进一步研究^[27]。有研究表明:鲢鱼与鳙鱼的比例较小时除氮效果较好,而较大时适宜除磷^[28]。所以政府利用鲢鳙鱼开展增殖放流以及水产养殖户开展水产养殖过程中,可根据水质条件和对水质改善的要求,选择合适的鲢鳙鱼投放比例。

2.2 讨论

2.2.1 不同测算方法下的池塘养殖排污系数比较

对池塘养殖模式,采用现场实测法和物料平衡法两种方法同时进行测算,从所得结果(图 1)可以看出,除了个别点位的铜、锌排污系数外,物料平衡法远远大于现场实测法。

物料平衡法遵循投入鱼塘饵料中的各物质量为生物体内各物质含量与生物体未吸收的各物质量之和的物质平衡理论,从理论上讲,用这种方法计算的污染

负荷量是比较符合实际情况的。但是这种方法忽略了水体的自净能力、底泥的吸附分解作用以及水体中其他生物的吸收利用等情况,所得的值偏大;而化学分析法因只采集补水和排水水样,测算的污染物浓度实际上只包含了水体中的可溶态和悬浮态两者浓度之和,对鱼塘底泥中的污染物含量却没有考虑在内,并且该方法还受到采样时间、采样方法和监测分析等的影响,波动性较大,计算的负荷量偏小的可能性大,也造成了部分养殖点的铜、锌排污系数出现了负值,且误差较大,这与其他研究学者得出的结论相似^[10]。

如从环境安全角度考虑,核算可能造成的最大污染负荷更具有实际意义,因此认为物料平衡法的估算结果是可信的。对化学分析法,在不考虑底泥氮磷污染负荷对水环境产生的影响时,可以考虑采用化学分析法,但底泥释放的二次污染对水环境的影响不容忽视,建议采用化学分析法时,同时测出底泥中的污染物浓度,计算出底泥中污染物的排污系数,两者相加即为总的排污系数。

2.2.2 物料平衡法测算围网养殖模式不同养殖品种的排污系数比较

对于围网养殖模式,采用物料平衡法进行测算,4个围网养殖点位两种不同养殖模式总氮、总磷、铜和

锌的排污系数的平均监测计算结果见图2。从图2可以看出,同一养殖模式,不同养殖品种下总氮、总磷、铜和锌的排污系数差距也较大。这是因为养殖水域水体环境和养殖生物的生理特性不同,造成投饵种类和投饵数量的不同,其未被摄食的残饵、排泄物和分泌物的种类和总量差别也很大。

鲢鳙鱼主要以浮游生物为食,若在浮游生物饵料资源和有机碎屑丰富的水域,自然水体的饵料资源能够满足鱼类生长的需求,在养殖过程中不需要额外投加饵料,这种情况的养殖模式让水中的氮、磷通过营养级的转化,最终以鱼产量的形式得到固定,并移出水体(捕捞),对水质起到了促进作用,排污系数为负值。中华绒螯蟹以水生植物、底栖动物、有机碎屑及动物尸体为食,在自然饵料不充分的时候投喂玉米籽、螺蛳、小鱼,并种植水草,如果在投喂过程中采用一些人工手段,如将玉米煮熟、把小鱼切碎等可提高饵料的利用率。

2.2.3 物料平衡法测算围网养殖模式同一养殖品种的排污系数比较

同是太湖流域,同是湖泊网围养殖,养殖的主要品种也都为中华绒螯蟹,但是因为配养的情况不同,得出的产排污系数相差很大。太湖流域淡水网围养殖

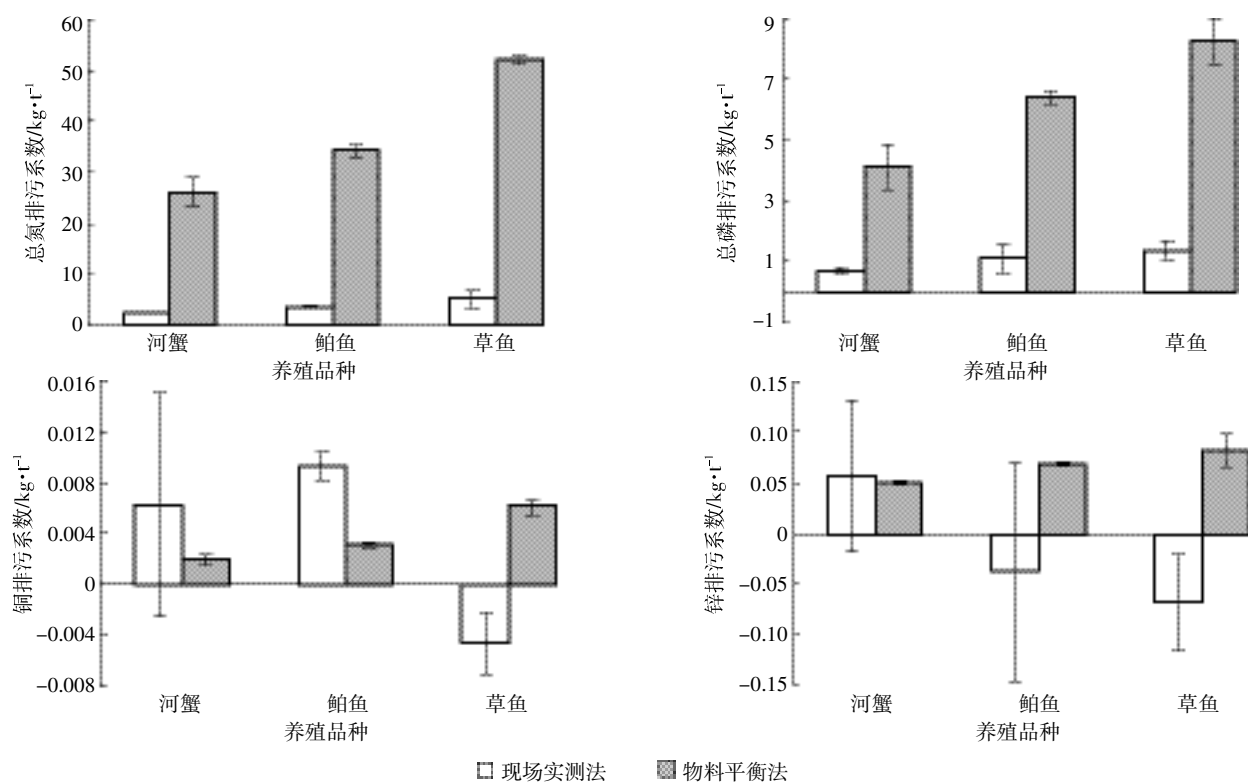


图1 不同测算方法下的池塘养殖排污系数比较

Figure 1 The comparison of discharge coefficient for pond culture by different estimation method

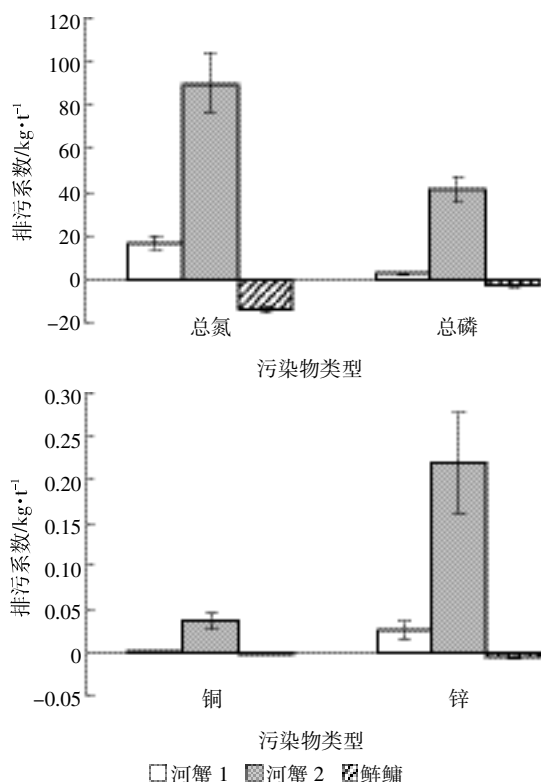


图2 物料平衡法测算网围养殖模式的排污系数比较

Figure 2 The comparison of discharge coefficient for the model of purse seine by material balance method

中华绒螯蟹,同时套养鲢鳙鱼,套养的比例在30%~60%之间(中华绒螯蟹-常州溇湖),那么总氮、总磷、铜、锌的排污系数均值分别为16.80、2.80、0.002 0、0.026 1 $\text{kg}\cdot\text{t}^{-1}$;如不套养其他品种,或少量套养(套养的比例<10%,中华绒螯蟹-苏州东太湖),那么总氮、总磷、铜、锌的排污系数均值分别为90.03、41.39、0.036 5、0.219 8 $\text{kg}\cdot\text{t}^{-1}$,远高于鲢鳙鱼套养比例高的情况。

产排污系数的差异不仅与套养品种的比例有关,而且与套养品种的不同有着密切的关系。在养殖中华绒螯蟹的同时,套养花白鲢,主要是利用了花白鲢属于中上层滤食性鱼类,以浮游生物和其他鱼类的粪便为食的生活习性,在不影响主养鱼类生长,获得更高经济效益的同时,起到改善水质的作用。如套养其他的生物,则可能需要投入更多的饵料而造成排污系数更大。

3 结论

(1)通过一年时间的调查研究,得出太湖流域12个调查养殖点位5个不同养殖模式总氮、总磷、铜和锌的排污系数,即生产单位水产品的水产养殖污染输出通量。

(2)本次研究侧重于太湖流域水产养殖排污系数测算方法研究,若要确定整个太湖流域水产养殖排污系数,尚需设置更多样本,从而获得不同养殖模式不同养殖品种的排污系数,并根据渔业统计数据,统计不同养殖模式不同养殖品种的养殖产量,即可核算太湖流域水产养殖业的污染负荷。

(3)水产养殖业是一种人类干预下的特殊种群优势所造成的“生物污染”,对养殖水体造成的污染已得到越来越多的关注。本研究得到网围养殖鲢鳙的排污系数为负值的结论,说明并非所有的水产养殖都会对环境造成污染,有时反而可以降低水中的污染物浓度,这就为水产养殖提供了一种新的出路。

参考文献:

- [1] 闫丽珍,石敏俊,王磊.太湖流域农业面源污染及控制研究进展[J].中国人口资源与环境,2010,20(1):99-107.
YAN Li-zhen, SHI Min-jun, WANG Lei. Review of agricultural non-point pollution in Taihu Lake and Taihu Basin[J]. *China Population Resources and Environment*, 2010, 20(1): 99-107.
- [2] 段亮,常江,段增强.地表管理与施肥方式对太湖流域旱地磷素流失的影响[J].农业环境科学学报,2007,26(1):24-28.
DUAN Liang, CHANG Jiang, DUAN Zeng-qiang. Effect of surface management and fertilization mode on nitrogen runoff from upland in Taihu Lake Region[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, 26(1): 24-28.
- [3] 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.
- [4] 张绪美,董元华,王辉,等.江苏省农田畜禽粪便负荷时空变化[J].地理科学,2007,27(4):597-601.
ZHANG Xu-mei, DONG Yuan-hua, WANG Hui, et al. Spatial and temporal variation in farmland load of livestock feces in Jiangsu Province[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2007, 27(4): 597-601.
- [5] 王文林,唐晓燕,胡孟春.太湖流域农村生活污水产排污系数测算[J].生态与农村环境学报,2010,26(6):616-621.
WANG Wen-lin, TANG Xiao-yan, HU Meng-chun. Estimation of sewage production and discharge coefficients of rural areas in Taihu Lake basin[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2010, 26(6): 616-621.
- [6] 万寅婧,王文林,唐晓燕,等.太湖流域农村生活垃圾产排污系数测算研究[J].农业环境科学学报,2012,31(10):2046-2052.
WAN Yin-jing, WANG Wen-lin, TANG Xiao-yan, et al. Estimating producing and discharge coefficient of rural household waste in Tai Lake Basin, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2012, 31(10): 2046-2052.
- [7] 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.
- [8] 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 countermeasures of aquaculture in shallow lakes in the middle and lower reaches of Yangtze River Area[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2010, 38(12): 6467–6468, 6621.
- [9] 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 the Taihu Valley[J]. *Rural Eco-Environment*, 2005, 21(1): 21–23.
- [10] 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, 42(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, 42(2): 223–227.
- [11] 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.
- [12] 赵安芳, 刘瑞芳, 温琰茂. 不同类型水产养殖对水环境影响的差异及清洁生产探讨[J]. 环境污染与防治, 2003, 25(6): 362–364.
- ZHAO An-fang, LIU Rui-fang, WEN Yan-mao. Effects on water environment in different aquacultures and discussion on cleaner production[J]. *Environmental Pollution and Control*, 2003, 25(6): 362–364.
- [13] 李慧, 焦隽, 冯其谱, 等. 新沂市水产养殖非点源污染负荷评价[J]. 江西农业学报, 2008, 20(2): 100–103.
- LI Hui, JIAO Jun, FENG Qi-pu, et al. Loads evaluation of agricultural non-point source pollution in aquaculture in Xinyi City[J]. *Acta Agriculturae Jiangxi*, 2008, 20(2): 100–103.
- [14] 温志良, 张爱军, 温琰茂. 集约化淡水养殖对水环境的影响[J]. 水利渔业, 2000, 20(4): 19–20.
- WEN Zhi-liang, ZHANG Ai-jun, WEN Yan-mao. Effects of intensive freshwater aquaculture on the water environment[J]. *Reservoir Fisheries*, 2000, 20(4): 19–20.
- [15] Kaspar H F, Giliespie P A, Boyer I C, et al. Effects of mussel aquaculture on the nitrogen cycle and benthic communities in Kenepu Sounds[J]. *Marine Biology*, 1985, 85(2): 127–136.
- [16] 计新丽, 林小涛, 许忠能, 等. 海水养殖自身污染机制及其对环境的影响[J]. 海洋环境科学, 2000, 19(4): 66–71.
- JI Xin-li, LIN Xiao-tao, XU Zhong-neng, et al. Mechanism of mariculture self-pollution and its effects on environment[J]. *Marine Environment Science*, 2000, 19(4): 66–71.
- [17] 舒廷飞, 温琰茂, 周劲凤, 等. 哑铃湾网箱养殖环境容量研究 I, 网箱养殖污染负荷分析计算[J]. 海洋环境科学, 2005, 24(1): 21–23.
- SHU Ting-fei, WEN Yan-mao, ZHOU Jin-feng, et al. Research on environmental capacity of cage culture in Yaling Gulf I. Calculation of pollution load of cage culture[J]. *Marine Environment Science*, 2005, 24(1): 21–23.
- [18] Islam M S. Nitrogen and phosphorus budget in coastal and marine cage aquaculture and impacts of effluent loading on ecosystem: Review and analysis towards model development[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2005, 50(1): 48–61.
- [19] Teichert-Coddington D R, Martinea D, Ramirez E. Partial nutrient budgets for semi-intensive shrimp farms in Honduras[J]. *Aquaculture*, 2000, 19(1): 139–154.
- [20] Lefebvre S, Bacher C, Meuret A, et al. Modeling approach of nitrogen and phosphorus exchanges at the sediment water interface of an intensive fishpond system[J]. *Aquaculture*, 2001, 195(3/4): 279–297.
- [21] Sutherland T F, Petersen S A, Levings C D, et al. Distinguishing between natural and aquaculture-derived sediment concentrations of heavy metals in the Broughton Archipelago, British Columbia[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2007, 54(9): 1451–1460.
- [22] Mendiguchia C, Moreno C, Manuel-Vez M P, et al. Preliminary investigation on the enrichment of heavy metals in marine sediments originated from intensive aquaculture effluents[J]. *Aquaculture*, 2006, 254(1/2/3/4): 317–325.
- [23] 潘振声, 施国跃, 丁由中. 人工养殖与野生扬子鳄卵中重金属含量分析[J]. 上海环境科学, 2000, 19(10): 489–491.
- PAN Zhen-sheng, SHI Guo-yue, DING You-zhong. Analysis of heavy metal content in the eggs of artificial cultural and wild *Alligator sinensis* [J]. *Shanghai Environmental Science*, 2000, 19(10): 489–491.
- [24] 宗超. 北京地区典型鱼塘与水产品中几种常见污染物含量调查及相关性分析[D]. 北京: 中国农业科学院, 2014: 51–52.
- ZONG Chao. Research of the representative content of common contaminants and correlation of aquaculture ponds and aquatic products in Beijing area[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2014: 51–52.
- [25] 张丽. 福建省后海围垦养殖区海水及沉积物重金属含量分析[J]. 环境, 2006(7): 94–96.
- ZHANG Li. The content of heavy metals in sediments and seawater were analyzed in Houhai reclamation area of Fujian Province[J]. *Environment*, 2006(7): 94–96.
- [26] 徐铁肖, 江天久, 冷科明. 深圳海域养殖牡蛎卫生质量状况[J]. 海洋环境科学, 2005, 24(1): 24–27.
- XU Yi-xiao, JIANG Tian-jiu, LENG Ke-ming. Sanitary quality of farmed oyster from Shenzhen seaboard[J]. *Marine Environmental Science*, 2005, 24(1): 24–27.
- [27] 陈立婧, 梅榛, 孔优佳, 等. 漏湖控藻网围中鲢鳙对枝角类群落结构的影响[J]. 水产学报, 2013, 37(4): 545–555.
- CHEN Li-jing, MEI Zhen, KONG You-jia, et al. The influences of silver carp and bighead carp in bio-manipulation pen on the community structure of cladocera in Lake Gehu[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2013, 37(4): 545–555.
- [28] 陈桐, 张毅敏, 高月香, 等. 鱼类、底栖动物和水生植物的不同组合对水质净化效果的原位围隔实验[J]. 环境工程学报, 2016, 10(10): 5511–5520.
- CHEN Tong, ZHANG Yi-min, GAO Yue-xiang, et al. Different combination of fishes, benthic animals and aquatic plants control of eutrophication water bodies by mesocosm experiment[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2016, 10(10): 5511–5520.