

扑草净对鲫鱼 (*Carassius auratus*) 生长的影响 及其导致的水体营养盐变化

杨振江, 黄岁樑, 孔文文, 于辉, 李沅原

(南开大学 环境污染过程与基准教育部重点试验室, 天津市城市生态修复与污染防治重点试验室,
环境科学与工程学院水环境数值模拟研究室, 天津 300350)

摘要: 为评价扑草净在水环境中造成的生态风险, 以扑草净作为目标污染物, 以鲫鱼作为受试生物, 于实验室内水族箱中进行试验。持续监测鲫鱼体质量体长及水体营养盐浓度, 考察扑草净对鲫鱼生长的影响, 及其导致的水体营养盐浓度变化特征。结果表明: 鲫鱼体质量增长率、体长增长率及营养盐浓度随时间的变化可利用 Logistic 方程描述 ($R^2 = 0.959 \sim 0.997$); 有扑草净组鲫鱼体质量增长率等比无扑草净组低 8.7% ~ 50.3%。无鱼时扑草净对水体中氮磷营养盐浓度、营养盐比例及总氮/总磷比例无显著影响; 有鱼时, 有扑草净组的总颗粒氮和总颗粒磷浓度分别比无扑草净组低 41.4% 及 33.8%, 有扑草净组各形态磷营养盐浓度与总磷的比例以及总氮/总磷浓度比例差异显著。研究表明扑草净对鲫鱼的毒性效应可间接影响水体营养盐浓度。

关键词: 扑草净; 鲫鱼; 生长; 营养盐变化

中图分类号: X524

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2020)05-0042-09

Laboratory experiments on the effect of prometryn on the growth process of crucian carp (*Carassius auratus*) and the variation of nutrient concentrations

YANG Zhenjiang, HUANG Suiliang, KONG Wenwen, YU Hui, LI Fengyuan

(Key Laboratory of Pollution Processes and Environmental Criteria of Ministry of Education, Tianjin Key Laboratory of Environmental Remediation and Pollution Control, Numerical Simulation Group for Water Environment, College of Environmental Science and Engineering, Nankai University, Tianjin 300350, China)

Abstract: In order to evaluate the ecological risk of prometryn in the water environment, prometryn and crucian carp (*Carassius auratus*) were chosen respectively as the target pollutant and target organism to investigate the effect of prometryn on the growth of crucian carp and the variations of nutrient concentrations in the water. To this end, the weight and length of crucian carp raised in the aquariums in the laboratory and the concentrations of nutrients in the water were continuously monitored. The results showed that variations of fish weight gain rates, length gain rates, and nutrient concentrations with time could be described well with Logistic equation ($R^2 = 0.959 - 0.997$), and the weight gain rate and protein efficiency ratio of fish in groups with prometryn was 8.7% - 50.3% ($P < 0.05$) lower than those in groups without prometryn. In fishless groups, no significant effect of prometryn on nutrient concentrations and ratios of TN/TP concentration was observed; whereas when there was fish in the aquariums, TPN and TPP concentrations with prometryn were 41.4% and 33.8% ($P < 0.05$) lower than those without prometryn respectively. In addition, prometryn also had a significant effect on the proportion of various nutrients and total TN concentration/total TP concentration ($P < 0.05$). It was shown that the toxic effect of prometryn on crucian carp could indirectly affect the concentrations of nutrients in the water.

收稿日期: 2019-12-19; 修回日期: 2020-02-28

基金项目: 国家自然科学基金项目 (11672139, 51861135314, 41911530081); 天津市重点研发计划科技支撑重点项目 (18YFZCSF00510); 中波科技合作委员会例会交流项目 (37-14)

作者简介: 杨振江 (1987-), 男, 河南濮阳人, 博士研究生, 研究方向为水环境数值模拟。

通讯作者: 黄岁樑 (1964-), 男, 湖南大通湖人, 教授, 博士 (后), 博士生导师, 主要从事水体环境学与水环境数值模拟研究。

Key words: prometryn; crucian carp (*Carassius auratus*); growth; nutrient variation

1 研究背景

中国的水产养殖业发展迅速,自1990年以来,中国水产养殖的产量世界领先^[1],养殖的鱼类水产品总量占世界生产总量的70%^[2]。鲤科鱼类为中国最重要的水产养殖品种,中国渔业统计年鉴^[3]显示,鲫鱼(*Carassius auratus*)、鳊鱼(*Aristichthys nobilis*)、鲢鱼(*Hypophthalmichthys molitrix*)、鲤鱼(*Cyprinus carpio*)和草鱼(*Ctenopharyngodon idellus*)在中国水产养殖业中占主导地位。

渔业养殖活动可增加水体氮磷负荷,进而导致水体富营养化^[4-5],藻类爆发性繁殖,破坏水域生态平衡。为控制水体富营养化引起的藻类过度繁殖所带来的影响,扑草净(CAS-No. 7287-19-6)等农药在渔业中被用来清理渔业水体中的青苔及有害藻类等^[6]。同时,扑草净广泛用于控制各种作物如棉花和芹菜等出苗前、后的一年生草和阔叶杂草^[7],残留的扑草净可通过降雨等进入水体。

扑草净的化学名称为2-甲硫基-4,6-双异丙氨基均三氮苯,纯品为白色结晶,在水中的溶解度为33 mg/L(25℃),易溶于有机溶剂,熔点为118~120℃^[6],是一种持久性甲基硫代三嗪除草剂^[8]。扑草净具有与苯环类似的结构,因此化学性质比较稳定,不易在水中降解^[9],会在动物体内残留^[10],对鱼类等动物产生影响^[8],也会对鱼类代谢、组织器官及其体内抗氧化活性酶等产生影响^[11-12],进而阻碍鱼类生长^[12]。因此,目前许多国家和地区禁止使用扑草净,但在实际生产中许多地方仍在使用^[13]。因此,扑草净在环境中广泛残留^[10]。Stara等^[12]研究发现,捷克的河流中扑草净浓度达到0.51 μg/L;徐雄等^[14]在我国太湖、长江、黑龙江、松花江以及南水北调中东部和中部运河等重点流域地表水中均检测到了扑草净。

鲫鱼(*Carassius auratus*)是中国重要经济鱼类^[15],因其体型适中,便于在实验室内养殖。扑草净的检测方法、在水体中的吸附解吸^[16]及其对植物的毒性效应^[17]已有报道,而其对鲫鱼生长的影响以及其对水体营养盐变化的间接影响尚未见报道。基于上述背景,本研究以扑草净作为目标污染物,以鲫鱼作为受试生物,于实验室内水族箱中进行试验,研究扑草净对鲫鱼生长的影响及其间接对水体中营养盐浓度产生的影响。

2 材料与方法

2.1 试验材料

使用规格为46.0 cm×38.5 cm×50.0 cm(长×宽×高)的玻璃水族箱。每个水族箱中饲养3尾体长 9.34 ± 0.3 cm、体质量 23.75 ± 2 g的健康鲫鱼。所选鲫鱼购自天津市津南区农贸市场,试验开始前鲫鱼均已在试验条件下驯养15 d。水族箱内注入50 L曝气2 d的自来水。

选用德国Dr. Ehrenstorfer公司生产的纯度为99.0%的扑草净纯粉,在锥形瓶内与水混合并使用磁力搅拌器以1 000 r/min连续搅拌24 h后经0.45 μm滤膜过滤,获得浓度为36.20 mg/L的扑草净水溶液,取552.49 mL比溶液注入水族箱并加水定容至50 L,水族箱内扑草净浓度为400 μg/L。该扑草净浓度为谢剑等^[18]推荐的虾池使用浓度(0.02~0.89 mg/L)。

鱼饵购自淮安通威饲料有限公司,其粗蛋白和总磷含量分别为29.6%和1.4%。

2.2 试验方法

本试验设有无鱼组和有鱼组。无鱼组包括只投加鱼饵的处理组(F组)和投加饵料并暴露扑草净的处理组(FP组);有鱼组包括投喂鱼饵饲养鲫鱼的处理组(FF组),以及扑草净暴露条件下饲养鲫鱼的处理组(FFP组)。每组试验设有两个平行。每天上午9点由专人手动投饵一次,投饵量为鲫鱼初始体质量的1.0%。据观察,有鱼时所投饵料全部被鲫鱼摄食。试验周期为92 d,期间不换水,每2天补充蒸发损失的水以保持水量基本不变。另外,试验期间使用电磁式空气压缩机持续充氧,光暗比为12 h:12 h。

试验在南开大学环境科学与工程学院实验室内进行。试验使用电子天平和刻度尺每10 d测量鲫鱼体质量及体长,每3 d测定水体中总氮(TN)、氨氮($\text{NH}_4^+ - \text{N}$)、总溶解氮(TDN)、总颗粒氮(TPN = TN - TDN)、总磷(TP)、正磷酸盐($\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$)、总溶解磷(TDP)及总颗粒磷(TPP = TP - TDP)。 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度测定采用纳氏试剂分光光度法^[19],TN、TDN使用过硫酸钾消解法测定^[20],TP、 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 以及TDP采用过硫酸钾消解及钼酸铵分光光度法测定^[19]。水温用普通水银温度计,测定pH值用精密pH试纸测定。图1为水温、pH及累

积投饵量随时间的变化。由图 1 可见,试验期间,水温与 pH 基本呈下降趋势,水温变化范围为 27.8 ~ 19.2 °C, pH 变化范围为 7.2 ~ 6.1。

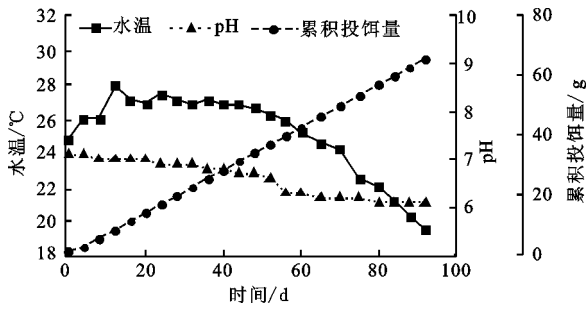


图 1 水温、pH 及累积投饵量随时间变化曲线

2.3 理论基础

选择体长生长率 (LGR), 体质量生长率 (WGR), 特定生长率 (SGR), 饵料系数 (FCR), 饵料转化率 (FCE) 及蛋白质效率 (PER)^[21-23] 评价鲫鱼生长, 计算公式如下:

$$LGR = \frac{L_t - L_0}{L_0} \times 100\% \quad (1)$$

$$WGR = \frac{W_t - W_0}{W_0} \times 100\% \quad (2)$$

$$SGR = \frac{\ln W_T - \ln W_0}{T} \times 100\% \quad (3)$$

$$FCR = \frac{F}{W_T - W_0} \quad (4)$$

$$FCE = \frac{W_T - W_0}{F} \times 100\% \quad (5)$$

$$PER = \frac{W_T - W_0}{F \times CPC} \times 100\% \quad (6)$$

式中: W_0 为鲫鱼初始体质量, g; L_0 为鲫鱼初始体长, cm; W_t (W_T) 为时间 t (时间 T) 时的鲫鱼体质量, g; L_t (L_T) 为时间 t (时间 T) 时的鲫鱼体长, cm; F 为总投饵量, g; CPC 为粗蛋白含量, %; t 为试验时长, d; T 为试验周期, d, 本试验 $T = 92$ d。

前人的研究中, Logistic 模型^[24]以及 von Bertalanffy 模型^[25]等被广泛应用于描述鱼类生长过程。经验证, 本研究中鲫鱼的体质量生长率 (WGR) 和体长生长率 (LGR) 随时间变化过程符合 Logistic 方程, 方程如下:

$$WGR = \frac{WGR_{\max}}{1 + e^{a_{WGR} - r_{WGR}t}} \quad (7)$$

$$LGR = \frac{LGR_{\max}}{1 + e^{a_{LGR} - r_{LGR}t}} \quad (8)$$

式中: $WGR_{\max}$ 和 $LGR_{\max}$ 分别为鲫鱼最大体质量生长

率和最大体长生长率, %; r_{WGR} 和 r_{LGR} 分别为鲫鱼体质量和体长生长率变化速率系数, d^{-1} ; a_{WGR} 和 a_{LGR} 均为常数。

此外, 本研究中无扑草净组和有扑草净组鲫鱼的 WGR 和 LGR 差值 (ΔWGR 和 ΔLGR) 随时间变化过程也符合 Logistic 方程, 即方程 (9) 和 (10):

$$\Delta WGR = \frac{\Delta WGR_{\max}}{1 + e^{a_{\Delta WGR} - r_{\Delta WGR}t}} \quad (9)$$

$$\Delta LGR = \frac{\Delta LGR_{\max}}{1 + e^{a_{\Delta LGR} - r_{\Delta LGR}t}} \quad (10)$$

式中: $\Delta WGR_{\max}$ 和 $\Delta LGR_{\max}$ 分别为鲫鱼最大体质量生长率和最大体长生长率差值, %; $r_{\Delta WGR}$ 和 $r_{\Delta LGR}$ 分别为鲫鱼体质量和体长生长率差值变化速率系数, d^{-1} ; $a_{\Delta WGR}$ 和 $a_{\Delta LGR}$ 均为常数。

同时采用 Logistic 方程拟合营养盐浓度随时间变化, 即方程 (11):

$$C = \frac{C_{\max}}{1 + e^{a_C - r_C t}} \quad (11)$$

式中: C 为时间 t 时的营养盐浓度, mg/L; $C_{\max}$ 为最高营养盐浓度, mg/L; r_C 为营养盐浓度变化速率系数, d^{-1} ; a_C 为常数。

3 结果与分析

3.1 扑草净对鲫鱼生长的影响

图 2 为鲫鱼的体质量生长率 (WGR) 和体长生长率 (LGR) 及 FF 组与 FFP 组体质量生长率和体长生长率差值随时间的变化。由图 2 可以看出, 试验开始阶段, 无扑草净组 (FF 组) 和有扑草净组 (FFP 组) 鲫鱼的体质量生长率和体长生长率均随时间推移 (累积投饵量增加) 迅速增高, 然后增速降低并很快趋于稳定, 如图 2 所示。体质量生长率和体长生长率与累积投饵量显著正相关, 相关系数 (r) 为 0.513 ~ 0.957 ($P = 0.001 \sim 0.046$)。此外, 如图 2 所示, 方程 (7) 和 (8) 可用于描述本研究中鲫鱼的体质量生长率和体长生长率随时间的变化过程 ($R^2 = 0.959 \sim 0.997$)。

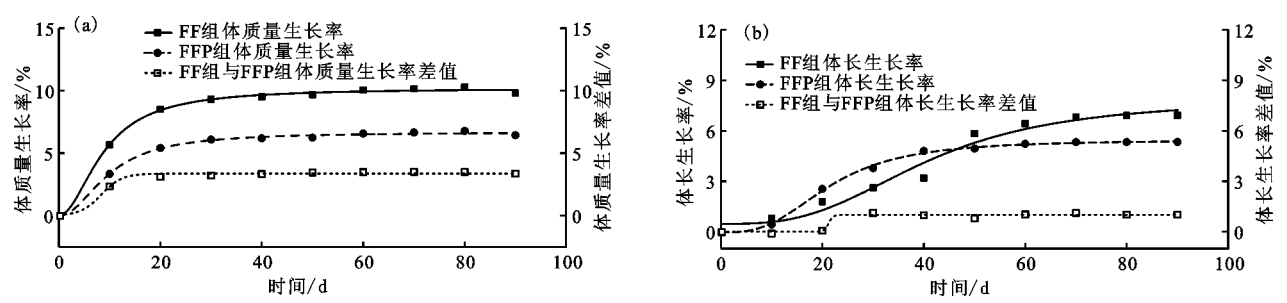
表 1 为采用 Logistic 方程拟合鲫鱼生长变化的参数。由表 1 可知, 有扑草净组鲫鱼的最大体质量生长率为 6.40%, 低于无扑草净组 (9.73%)。有扑草净组鲫鱼的最大体长生长率为 5.23%, 低于无扑草净组 (7.18%)。此外, 有扑草净组体质量生长率拟合曲线的变化速率系数 (r_{WGR}) (0.24) 低于无扑草净组 (0.30)。

表 2 为鲫鱼生长性能的参数。可见, 有扑草净

组鲫鱼的饵料系数比无扑草净组高 100.4%,相应地,有扑草净组鲫鱼的特定生长率、饵料转化率、体质量生长率、体长生长率和蛋白质效率比无扑草净组低 8.7%~50.3%,经方差分析,扑草净对鲫鱼的饵料系数、饵料转化率、体质量生长率、体长生长率和蛋白质效率均有显著影响($P < 0.05$)。这与 Cattaneo 等^[11]和 Stara 等^[12]研究结果类似。

本试验期间鲫鱼死亡率为 0,但观察到有扑草净组鲫鱼旋转游动,游动迟缓等异常行为,丧失正常游动能力,扑草净对鲫鱼具有明显的毒性效应。赵倩等^[6]在研究扑草净对斑马鱼毒性效应的实验中观察到相似现象。Stara 等^[12]发现扑草净的毒性效应导致鲫鱼的抗氧化系统参数发生变化。此外,Shanmugavel 等^[26]研究发现扑草净可对鱼类消化过程产生不利影响。这些均表明,扑草净可对鱼类的新陈代谢等产生影响,从而影响鱼类生长。

无扑草净组与有扑草净组鲫鱼体质量生长率和体长生长率的差值可以衡量扑草净对鲫鱼生长的影响水平。试验开始后,无扑草净组与有扑草净组鲫鱼的体质量生长率差值(ΔWGR)和体长生长率差值(ΔLGR)逐渐增高(见图 2),表明扑草净对鲫鱼体质量生长率和体长生长率的影响逐渐增强。随着试验进行,无扑草净组与有扑草净组鲫鱼的体质量生长率和体长生长率差值逐渐趋于稳定。方程(9)和(10)可较好地描述 ΔWGR 和 ΔLGR 随时间变化($R^2 = 0.952 \sim 0.982$)。 ΔWGR 和 ΔLGR 的最大值 $\Delta WGR_{\max}$ 和 $\Delta LGR_{\max}$ 分别为 3.37% 和 1.00%,如表 1。此外,拟合曲线变化速率系数 $r_{\Delta WGR}$ 和 $r_{\Delta LGR}$ 分别为 0.49 d^{-1} 和 2.27 d^{-1} ,表明体长生长率差值的变化速率高于体质量生长率差值的变化速率,可能是由于扑草净对鲫鱼体长生长的影响水平高于扑草净对鲫鱼体质量的影响水平,该现象有待进一步验证。



注:FF 组为无扑草净组,FFP 组为有扑草净组,以下同。
图 2 鲫鱼体质量生长率、体长生长率及 FF 组与 FFP 组体质量生长率和体长生长率差值随时间的变化

表 1 鲫鱼生长曲线拟合相关参数

组别	鲫鱼体质量生长率拟合				鲫鱼体长生长率拟合			
	a_{WGR}	r_{WGR}/d^{-1}	$WGR_{\max}/\%$	R^2	a_{LGR}	r_{LGR}/d^{-1}	$LGR_{\max}/\%$	R^2
FF	2.75	0.30	9.73	0.973	3.11	0.08	7.18	0.976
FFP	2.45	0.24	6.40	0.973	3.28	0.15	5.23	0.987

组别	体质量生长率差值拟合值				体长生长率差值拟合值			
	$a_{\Delta WGR}$	$r_{\Delta WGR}/\text{d}^{-1}$	$\Delta WGR_{\max}/\%$	R^2	$a_{\Delta LGR}$	$r_{\Delta LGR}/\text{d}^{-1}$	$\Delta LGR_{\max}/\%$	R^2
FF - FFP	4.13	0.49	3.37	0.982	48.20	2.27	1.00	0.952

注: a_{WGR} 、 a_{LGR} 和 $a_{\Delta WGR}$ 、 $a_{\Delta LGR}$ 为常数; r_{WGR} 、 r_{LGR} 和 $r_{\Delta WGR}$ 、 $r_{\Delta LGR}$ 为变化速率系数, d^{-1} ; $WGR_{\max}$ 为鲫鱼的最大体质量生长率,%; $LGR_{\max}$ 为鲫鱼的最大体长生长率,%; $\Delta WGR_{\max}$ 为 FF 组与 FFP 组最大体质量生长率差值,%; $\Delta LGR_{\max}$ 为 FF 组与 FFP 组最大体长生长率差值,%; R^2 为决定系数。

表 2 扑草净对鲫鱼生长性能的影响

组别	饵料系数	特定生长率/(% · d ⁻¹)	饵料转化率/%	体质量生长率/%	体长生长率/%	蛋白质效率/%
无扑草净组	27.76 ± 3.21 ^b	0.10 ± 0.01 ^a	3.64 ± 0.45 ^a	9.22 ± 0.52 ^a	11.86 ± 1.45 ^a	4.59 ± 0.09 ^a
有扑草净组	43.70 ± 10.45 ^a	0.08 ± 0.02 ^a	2.39 ± 0.64 ^b	5.97 ± 0.94 ^b	7.79 ± 2.08 ^b	4.19 ± 0.11 ^b

注:体质量生长率和体长生长率分别表示试验结束时的结果。数据用平均值 ± 标准差的形式表示($n = 24$)。上标不同表示差异显著($P < 0.05$),下同。

3.2 扑草净存在时水体营养盐变化特征

3.2.1 营养盐浓度变化 图3为无鱼时各营养盐浓度随时间的变化。由图3可见,无鱼时,扑草净对鱼饵释放营养盐基本无影响,差别在试验精度范围内,这是可预料的。实际上,统计分析也表明,无鱼时,有、无扑草净组氮磷营养盐浓度无显著差异($P > 0.05$)。表3为 Logistic 方程拟合营养盐浓度随时间变化过程参数。如表3所示,有、无扑草净组营养盐浓度变化趋势的拟合参数 a_C 、 r_C 、 $C_{\max}$ 及 R^2 基本无差异。这与黄岁樑等^[27]的研究结果相似,他们发现阿特拉津的存在对鱼食营养盐的释放特征无影响。尽管本研究中扑草净分子式中含氮,但因为添加的扑草净浓度很低,所以由扑草净添加引起的氮浓度增加可以忽略。试验开始阶段, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度迅速升高,并于第8天增至最高浓度 1.67 mg/L,然后降至 0.19 mg/L 并趋于稳定。相关性分析表明, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度与累积投饵量呈负相关($r = -0.595, P = 0.013$)。这是因为 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度上升与下降与氮的生物化学转化过程有关,如硝化作用、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的挥发和吸附等^[28-29]。吕元蛟等^[30]在关于池塘残饵对底泥氮、磷释放影响的模拟研究中发现氨氮浓度先上升后下降,并认为这是由于 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 向硝态氮转化。本研究中硝化作用可能是 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度最终趋于稳定的主要原因。

与 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度变化趋势不同,TN、TDN、TP、 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 和 TDP 浓度均随累积投饵量的持续增加不断增高,与累积投饵量呈极显著正相关,相关系数 $r = 0.910 \sim 0.998 (P < 0.001)$ 。如图3和表3所示,方程(11)可较好地描述 TN、TDN、TP、 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 和 TDP 浓度随时间变化趋势($R^2 = 0.973 \sim 0.990$)。作为 TN 和 TDN 的差值^[31],TPN 浓度随时间变化波动明显,与累积投饵量的相关系数为 0.739 ($P < 0.001$)。作为 TP 和 TDP 的差值,TPP 浓度在前 50 d 波动增高后,出现降低趋势,与累积投饵量的相关系数为 0.739 ($P < 0.001$)。

图4为有鱼时水体中各营养盐浓度及有、无扑草净组营养盐浓度差值随时间的变化。如图4所示,有鱼时,试验开始阶段,无扑草净组与有扑草净组 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度迅速增高,并分别于第8天和第4天增至最高浓度 2.37 及 1.93 mg/L,然后分别迅速降至 0.32 及 0.54 mg/L,此后保持相对稳定。 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度与累积投饵量呈负相关($r = -0.355 \sim -0.201$)。不管是否有扑草净,有鱼时 TN、TDN、

TP、 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 和 TDP 浓度不断增高,TN、TDN、TP、 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 和 TDP 浓度与累积投饵量呈极显著正相关,相关系数为 0.898 ~ 0.996, $P < 0.001$ 。如图4和表3所示,TN、TDN、TP、 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 和 TDP 浓度随时间变化过程均可用方程(11)较好地描述($R^2 = 0.898 \sim 0.995$)。TPN 及 TPP 浓度随时间变化均呈现较大幅度波动,整体上 TPP 浓度呈先增高后降低趋势(见图4)。TPN 与 TPP 和累积投饵量的相关系数 r 分别为 0.231 ~ 0.271 ($P = 0.200 \sim 0.277$) 和 0.633 ~ 0.898 ($P = 0.000 \sim 0.001$)。

有、无扑草净组的水体营养盐浓度差值(以质量浓度差计,下同)可以衡量扑草净对营养盐浓度产生影响的水平。如前所述,无鱼时有、无扑草净组营养盐浓度十分接近。图4显示了有鱼时有、无扑草净组营养盐浓度差值随时间的变化。可见, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 差值(以 $\Delta\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 表示,下同)在试验期间波动明显。有鱼时,鱼体排泄^[32]、有机氮的氨化过程及硝化作用^[29]等因素皆可影响水体中 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度的增高与降低,现有数据无法确定导致 $\Delta\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 在试验期间波动的具体原因。试验期间, $\Delta\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 平均值为 0.00 mg/L。 ΔTN 、 ΔTDN 及 ΔTP 比较稳定,其平均值分别为 -0.55、-0.49 及 -0.06 mg/L。试验开始阶段, $\Delta\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 和 ΔTDP 较为稳定,随着试验进行, $\Delta\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 和 ΔTDP 呈增高趋势,试验期间 $\Delta\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 和 ΔTDP 平均值分别为 0.43 和 0.35 mg/L。 ΔTPN 和 ΔTPP 随时间变化波动幅度较大,试验期间其平均值分别为 -0.65 及 -0.46 mg/L。

根据 Shanmugavel 等^[26]的研究,扑草净导致鲫鱼对蛋白质的消化率降低,从而影响水体中氮营养盐浓度,如本研究中发现,有扑草净组的 TDN 平均浓度比无扑草净组低 1.4%,且有扑草净组的最高 TDN 浓度 $C_{\max}$ 比无扑草净组低 1.2% (见表3)。有扑草净组的 TN、TPN、TP 和 TPP 平均浓度比无扑草净组低 1.0% ~ 41.4%,且有扑草净组 TN 和 TP 的最高浓度 $C_{\max}$ 分别比无扑草净组低 1.0% 和 4.2% (见表3)。

统计分析表明,有、无扑草净组的 TPN 和 TPP 浓度差异显著($P < 0.05$)。刘峰等^[33]研究发现鱼类对底泥的扰动作用影响水体中营养盐的浓度。本研究中,可能是扑草净对鲫鱼的毒性效应导致鲫鱼对底部沉积物的扰动作用减弱,使水中 TN、TPN、TP 和 TPP 浓度低于无扑草净组。而有扑草净组的

TDP 和 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 平均浓度比无扑草净组高 8.6% ~ 10.6%。此外,有扑草净组 TDP 和 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 的最高浓度 $C_{\max}$ 分别比无扑草净组高 1.6% 及 13.5%

(见表 3)。这可能是由于扑草净影响了鲫鱼对磷的吸收同化作用,间接对水体中 TDP 和 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 浓度产生影响。

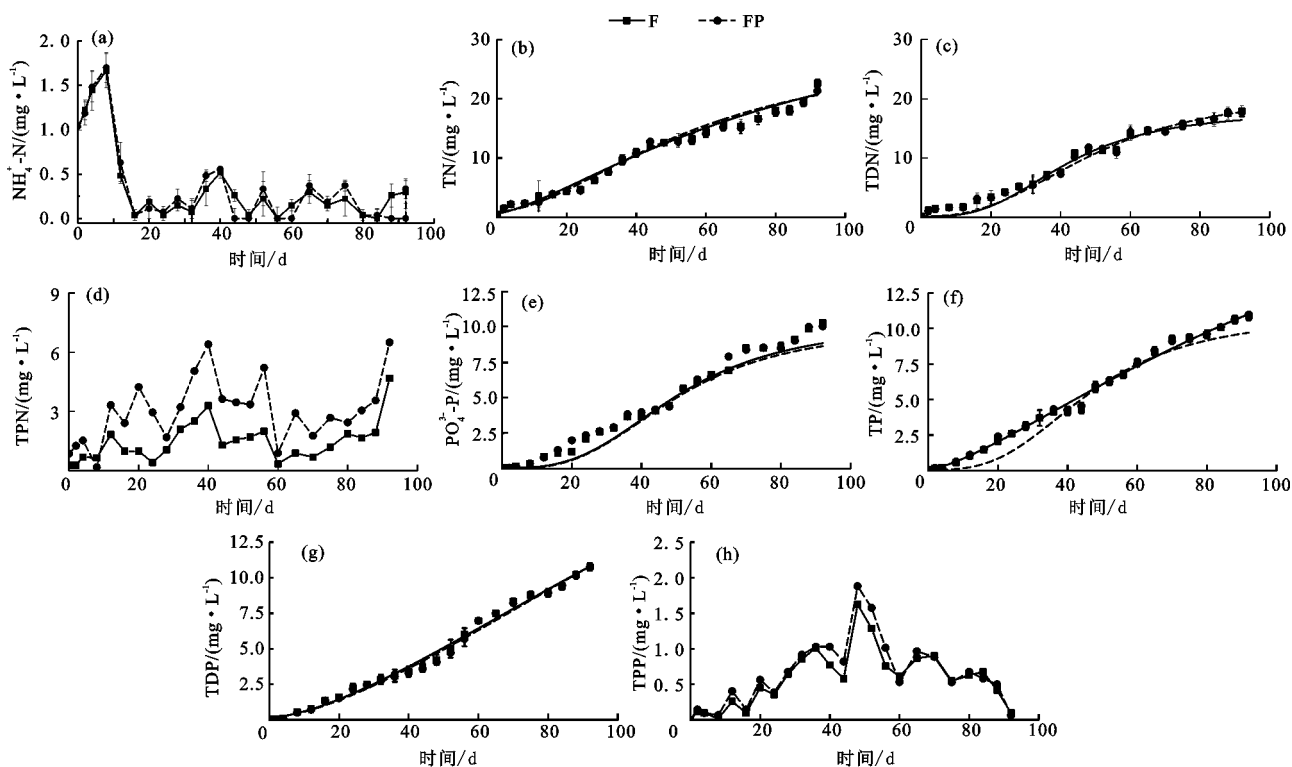


图3 无鱼时 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、TN、TDN、TPN、 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 、TP、TDP 及 TPP 浓度随时间的变化

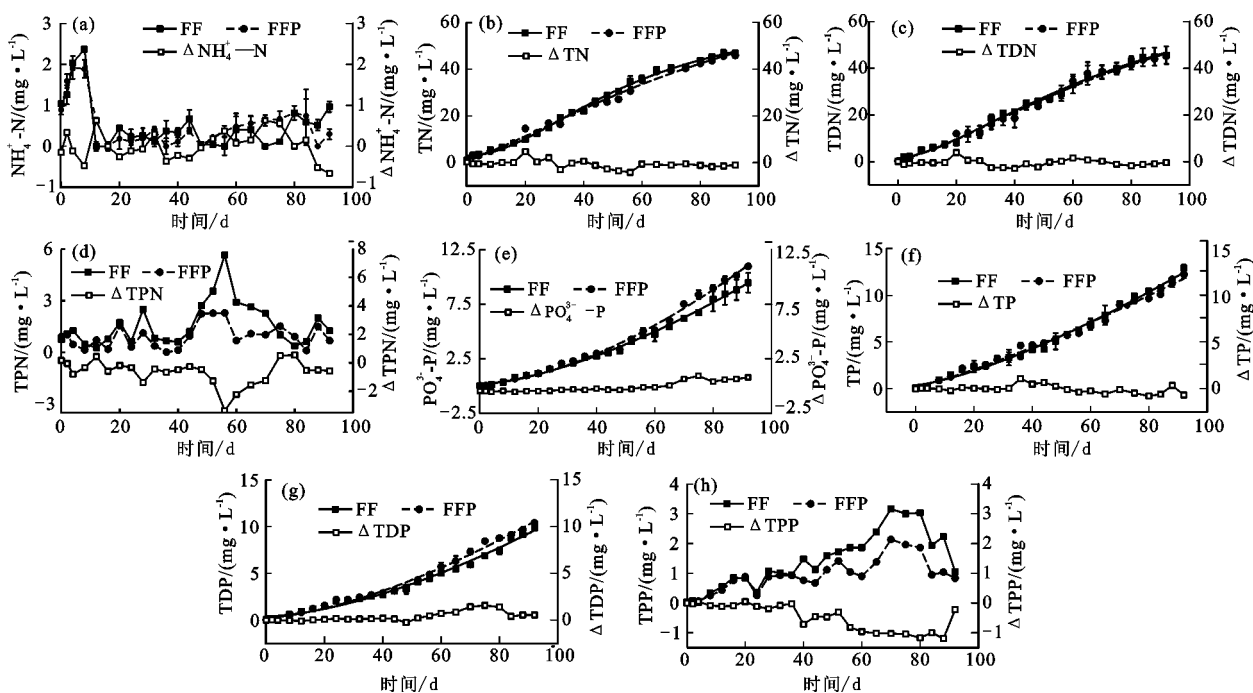


图4 有鱼时 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、TN、TDN、TPN、 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 、TP、TDP 及 TPP 浓度及有无扑草净组营养盐浓度差值随时间的变化

3.2.2 扑草净和养殖鲫鱼对水中营养盐比例的影响 表4 为试验期间各形态营养盐(平均)比例,包

括 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度与 TN 浓度平均比例(记为 $\text{NH}_4^+ - \text{N} : \text{TN}$, 下同)、TDN 浓度与 TN 浓度平均比

例、TPN 浓度与 TN 浓度平均比例、 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 浓度与 TP 浓度平均比例、TDP 浓度与 TP 浓度平均比例、TPP 浓度与 TP 浓度平均比例以及 TN 浓度与 TP 浓度平均比例。可见,如前所述,无鱼时,有、无扑草净组间相同营养盐形态比例相近。

有鱼时,统计分析显示有、无扑草净组各形态氮营养盐浓度与 TN 浓度比例无显著差异 ($P > 0.05$),例如,无扑草净组 TDN 浓度为 TN 浓度的 93.59%,有扑草净组 TDN 浓度为 TN 浓度的 94.25%。然而,统计分析显示有、无扑草净组各形态磷营养盐与 TP 比例差异显著 ($P < 0.05$)。例如,无扑草净组 TDP 浓度为 TP 浓度的 72.15%,有扑草净组 TDP 浓度为 TP 浓度的 79.53%。此外,无

扑草净组和有扑草净组 TN/TP 分别为 6.96% 和 6.60%,具有显著差异 ($P < 0.05$)。

对比表 4 中是否养殖鲫鱼的结果,可见鲫鱼对水体中的营养盐比例产生了显著影响。无鱼时 F 和 FP 组与有鱼时 FF 组和 FFP 组对比,水体中 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$: TN、 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$: TP、TDP: TP 以及 TPP: TP 差异显著 ($P < 0.05$)。此外,鲫鱼对水体中的 TN/TP 有显著影响。这是由于经鱼类消化吸收后,饵料中氮素部分被吸收利用,其余部分以粪便等形式排出鱼体,经鱼体排出后,氮素更容易被微生物利用^[34],而微生物的作用可加速氮素释放^[35]。此外,据 Rahman 等^[36]研究报道,鱼类对沉积物的扰动作用可影响水环境中营养盐的释放。

表 3 Logistic 方程拟合营养盐浓度随时间变化过程参数

状态	组别	参数	TN	TDN	TP	TDP	PO ₄ ³⁻ - P
无鱼时	无扑草净组	a_c	2.34	2.78	2.86	3.10	3.04
		$r_c / (\text{d}^{-1})$	0.05	0.07	0.06	0.06	0.06
		(F) $C_{\text{max}} / (\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	20.90	17.88	11.41	11.78	10.73
		R^2	0.973	0.989	0.990	0.990	0.990
	有扑草净组	a_c	2.36	2.79	2.83	3.16	3.03
		$r_c / (\text{d}^{-1})$	0.05	0.06	0.06	0.06	0.06
		(FP) $C_{\text{max}} / (\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	20.64	17.83	11.38	11.92	10.73
		R^2	0.971	0.988	0.990	0.990	0.990
有鱼时	无扑草净组	a_c	2.56	2.59	2.88	3.17	3.19
		$r_c / (\text{d}^{-1})$	0.06	0.06	0.04	0.04	0.05
		(FF) $C_{\text{max}} / (\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	48.16	48.18	15.90	16.05	12.85
		R^2	0.995	0.989	0.989	0.989	0.991
	有扑草净组	a_c	2.39	2.65	2.70	3.21	3.42
		$r_c / (\text{d}^{-1})$	0.06	0.06	0.04	0.05	0.05
		(FFP) $C_{\text{max}} / (\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	48.12	47.60	15.24	16.30	14.59
		R^2	0.987	0.989	0.977	0.990	0.993

表 4 各形态营养盐比例

状态	组别	$\text{NH}_4^+ - \text{N}$: TN	TDN: TN	TPN: TN	$\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$: TP	TDP: TP	TPP: TP	TN: TP
无鱼时	无扑草净组	3.68 ^a	85.96 ^a	14.04 ^a	87.80 ^a	88.98 ^a	11.22 ^b	3.04 ^c
	有扑草净组	4.03 ^a	86.15 ^a	13.85 ^a	87.03 ^a	87.23 ^a	12.77 ^b	3.05 ^c
有鱼时	无扑草净组	2.20 ^b	93.59 ^a	6.41 ^a	70.41 ^b	72.15 ^b	27.85 ^a	6.96 ^a
	有扑草净组	2.27 ^b	94.25 ^a	5.75 ^a	79.34 ^{ab}	79.53 ^a	20.27 ^b	6.60 ^b

4 结 论

本试验研究扑草净对鲫鱼生长的影响,并对比

有无扑草净情况下水体中营养盐浓度变化特征,主要结论如下:

(1) 扑草净 400 $\mu\text{g/L}$ 试验条件下,显著抑制鲫

鱼生长,有扑草净组鲫鱼的特定生长率、饵料转化率、体质量生长率、体长生长率和蛋白质效率比无扑草净组鲫鱼低 8.7% ~ 50.3% ($P < 0.05$)。

(2)有鱼时,有扑草净组的总氮、总颗粒氮、总磷和总颗粒磷浓度比无扑草净组低 1.9% ~ 41.4%,其中总颗粒氮和总颗粒磷浓度差异显著 ($P < 0.05$),可能是由于扑草净对鲫鱼的毒性效应影响鲫鱼对沉积物的扰动作用以及鲫鱼对鱼食的新陈代谢作用,从而影响水体营养盐浓度。

(3)试验条件下鲫鱼生长过程 ($R^2 = 0.959 \sim 0.997$) 和营养盐浓度随时间变化过程 ($R^2 = 0.973 \sim 0.996$) 符合 Logistic 方程。

综上所述,扑草净可显著抑制鲫鱼生长,其对鲫鱼的毒性效应间接对水体营养盐浓度变化产生影响。因此,扑草净对生态系统产生的深远影响值得进一步研究。

参考文献:

- [1] 靖凯霖,徐永平,李媛,等. 卵黄抗体在水产养殖病害防治及水产品保鲜中的应用研究进展[J]. 水产科学, 2016,35(2):185-190.
- [2] 麦康森. 我国水产动物营养与饲料的研究和发展方向[J]. 饲料工业, 2010, 31(A01):1-9.
- [3] 农业部渔业渔政管理局. 中国渔业统计年鉴[M]. 北京: 中国农业出版社, 2014.
- [4] AKHAN S, GEDIK K. The nutrient releases from sea bass (*Dicentrarchus labrax* Linnaeus, 1758) faeces and feed in estuarine Black Sea condition[J]. Journal of Feed Agriculture & Environment, 2011, 9(1): 738-740.
- [5] HUANG Suiliang, WU Min, ZANG Changjuan, et al. Dynamics of algae growth and nutrients in experimental enclosures culturing bighead carp and common carp: Phosphorus dynamics[J]. International Journal of Sediment Research, 2016, 31(2): 173-180.
- [6] 赵倩,王灿灿,袁旭娇,等. 腐植酸影响扑草净对斑马鱼的急性毒性研究[J]. 农业环境科学学报, 2015, 34(4): 653-659.
- [7] SHI Yajuan, BURNS M, RITCHIE R J, et al. Probabilistic risk assessment of diuron and prometryn in the Gwydir River Catchment, Australia, with the input of a novel bioassay based on algal growth[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2014, 106: 213-219.
- [8] STARR A V, BARGU S, MAITI K, et al. The effect of Atrazine on Louisiana Gulf coast estuarine phytoplankton[J]. Archives of Environmental Contamination & Toxicology, 2017, 72(2): 178-188.
- [9] 张骞月,吴伟. 扑草净在养殖水体中的生态毒理效应及其微生物降解的研究进展[J]. 生物灾害科学, 2014, 37(1):64-69.
- [10] VRYZAS Z, ALEXOUDIS C, VASSILIOU G, et al. Determination and aquatic risk assessment of pesticide residues in riparian drainage canals in northeastern Greece[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2011, 74(2): 174-181.
- [11] CATTANEO R, MORAES B S, LORO V L, et al. Tissue biochemical alterations of *Cyprinus carpio* exposed to commercial herbicide containing clomazone under rice-field conditions[J]. Archives of Environmental Contamination and Toxicology, 2012, 62(1): 97-106.
- [12] STARA A, KRISTAN J, ZUSKOVA E, et al. Effect of chronic exposure to simazine on oxidative stress and antioxidant response in common carp (*Cyprinus carpio*, L.)[J]. Pesticide Biochemistry & Physiology, 2013, 33(2): 18-23.
- [13] ZHOU Jihai, HU Feng, JIAO Jiaguo, et al. Effects of bacterial-feeding nematodes and prometryne-degrading bacteria on the dissipation of prometryne in contaminated soil[J]. Journal of Soils and Sediments, 2012, 12(4): 576-585.
- [14] 徐雄,李春梅,孙静,等. 我国重点流域地表水中 29 种农药污染及其生态风险评价[J]. 生态毒理学报, 2016,11(2):347-354.
- [15] YANG Wei, XIANG Fuhui, SUN Hongjie, et al. Changes in the selected hematological parameters and gill Na^+/K^+ ATPase activity of juvenile crucian carp *Carassius auratus* during elevated ammonia exposure and the post-exposure recovery[J]. Biochemical Systematics and Ecology, 2010, 38(4): 557-562.
- [16] 任艳真,黄岁樑. 麦秆对水中扑草净的吸附性能研究[J]. 环境污染与防治, 2015,37(7):27-34.
- [17] 廖金花. 扑草净对水绵的毒性效应研究[J]. 河北农业科学, 2010, 14(10): 50-52.
- [18] 谢剑,戴习林,臧维玲,等. 扑草净对两种虾和两种水草的毒性研究[J]. 湖南农业科学, 2010,23(12):147-150.
- [19] WETZEL R G, LIKENS G E. Composition and biomass of phytoplankton[M]. Springer New York, USA: Limnological Analyses, 2000.
- [20] HUANG Suiliang, KONG Wenwen, YANG Zhenjiang, et al. Combination of Logistic and modified Monod functions to study *Microcystis aeruginosa* growth stimulated by fish feed[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2019, 167: 146-160.
- [21] HU Liang, YUN Biao, XUE Min, et al. Effects of fish meal quality and fish meal substitution by animal protein

- blend on growth performance, flesh quality and liver histology of Japanese seabass (*Lateolabrax japonicus*) [J]. Aquaculture, 2013, 372–375: 52–61.
- [22] YOUNIS E S M, AL – QUFFAIL A S, AL – ASGAH N A, et al. Effect of dietary fish meal replacement by red algae, *Gracilaria arcuata*, on growth performance and body composition of Nile tilapia *Oreochromis niloticus* [J]. Saudi Journal of Biological Sciences, 2018, 25(2):198–203.
- [23] 徐建志, 史艳红. 诱食剂 NUTRI – TRACK 对鲫鱼的诱食效果[J]. 河北渔业, 2015(2):13–15.
- [24] MINTE-VERA C V, MAUNDER M N, CASSELMAN J M, et al. Growth functions that incorporate the cost of reproduction[J]. Fisheries Research, 2016, 180:31–44.
- [25] YUAN Qi, SONG Guobao, FULLANA-I-PALMER P, et al. Water footprint of feed required by farmed fish in China based on a Monte Carlo-supported von Bertalanffy growth model: A policy implication[J]. Journal of Cleaner Production, 2017, 153: 41–50.
- [26] SHANMUGAVEL S, SAMPATH K, SIVAKUMAR V, et al. Sublethal effects of phosphamidon and methyl parathion on food intake, growth and conversion efficiency of the fish *Oreochromis mossambicus* [J]. Environment and Ecology, 1988, 6(2): 257–261.
- [27] 黄岁樑, 孔文文. 阿特拉津作用下鱼食对铜绿微囊藻生长的影响及其导致的水体营养盐变化特征[J]. 生态环境学报, 2017, 26(11): 1950–1960.
- [28] 吴敏, 黄岁樑, 杜胜蓝, 等. 鱼饵对铜绿微囊藻生长的影响[J]. 环境科学研究, 2011, 24(1): 50–57.
- [29] 吴敏, 黄岁樑, 杜胜蓝, 等. 投饵养鱼对潘家口水库水质影响围隔试验 I: 氮素[J]. 水利学报, 2013, 44(9): 1030–1036.
- [30] 吕元蛟, 李瑞娇, 张念, 等. 池塘残饵对底泥氮、磷释放影响的模拟研究[J]. 环境科学, 2014, 35(6): 2178–2184.
- [31] KONG Wenwen, HUANG Suiliang, YANG Zhenjiang, et al. Fish feed quality is a key factor in impacting aquaculture water environment: Evidence from incubator experiments[J]. Scientific Reports, 2020, 10(1): 187.
- [32] 刘峰, 李秀启, 王芳, 等. 养殖系统 N、P 收支及环境 N、P 负荷量的研究进展[J]. 海洋环境科学, 2011, 30(4): 603–608.
- [33] HORPPILA J, KAIRESAALO T. A fading recovery: The role of roach (*Rutilus rutilus*, L.) in maintaining high phytoplankton productivity and biomass in Lake Vesijärvi, southern Finland [J]. Hydrobiologia, 1990, 200(1): 153–165.
- [34] BURFORD M A, WILLIAMS K C. The fate of nitrogenous waste from shrimp feeding[J]. Aquaculture, 2001, 198(1–2): 79–93.
- [35] RAHMAN M M, VERDEGEM M C J, NAGELKERKE L A J, et al. Effects of common carp *Cyprinus carpio* (L.) and feed addition in rohu *Labeo rohita* (Hamilton) ponds on nutrient partitioning among fish, plankton and benthos [J]. Aquaculture Research, 2008, 39(1): 85–95.