

影响池养鳊健康的关键水生态因子

赖子尼¹, 余煜棉², 吴淑勤¹, 杨婉玲¹, 石存斌¹, 庞世勋¹

(1. 中国水产科学研究院珠江水产研究所,农业部珠江流域渔业生态环境监测中心,广东 广州 510380;

2. 广东工业大学实验研究中心,广东 广州 510090)

摘要: 池塘生态系统是一个动态、多因素、非典型的复杂系统,用单因素统计法难以研究池塘养殖中的生态问题。在16口鳊养殖塘进行试验(总面积为4.7 hm²),每两周采样一次,获取鳊健康指标和pH、铵氮、硝酸盐氮、二氧化碳、总碱度、镁和细菌总数等17项水生态因子的87组监测数据,并对数据进行数理统计,研究探讨用权重因子、偏回归平方和、F检验值和相关系数等统计量优化进入鳊健康模型的因子。在满足一定准确度条件下,优选出用pH、铵氮、硝酸盐氮、二氧化碳、总碱度、镁浓度和细菌总数等7项因子为自变量,利用回归技术,求出它们与鳊健康指标(y)的关系模型为 $y = a_0 + \sum_{i=1}^7 a_i x_i + \sum_{j=1}^7 a_j x_j^2 + \sum_{k=1}^7 a_k x_k^3$ 的非线性模型,模型的预报准确率为92.4%。借助所得模型进一步推导出对鳊健康指标影响由大到小的因子是细菌总数、二氧化碳、pH、铵氮,他们的最佳取值范围依次为 $(13 \sim 27) \times 10^4 \text{ cfu} \cdot \text{L}^{-1}$ 、小于 $3 \text{ mL} \cdot \text{L}^{-1}$ 、7.5~8.0、0.5 $\text{mL} \cdot \text{L}^{-1}$ 。

关键词: 鳊;水生态因子;健康;养殖;模型优化

中图分类号: S965

文献标识码: A

水环境是水产动物生活的介质,水环境的好坏直接影响水产动物的健康和水产品的安全性^[1]。水质变化对水生生物影响的预测和养殖池塘水质污染修复已成为人们关注的水环境问题^[2-3]。徐宁等^[4]建立了池塘溶解氧预报的方法,刘振乾等^[5]基于水生态因子研究沼泽安全阈值,也有文献报道用人工神经网络等评价水环境质量^[6-7],唐桂刚等^[8]应用遗传神经网络方法分析我国降水化学数据,Maccina^[9]用一个简单回归模型评估环境对鱼产量的影响。虽然许多学者用各种方法研究水环境变化及对水生生物影响预测问题,但目前仍没有形成一种标准化的研究方法。池塘生态系统是一个动态、多因素、非典型的复杂系统,用传统的单因素统计法讨论、研究池塘健康养殖问题往往难以凑效。作者曾用计算机线性、

非线性拟合技术、模式识别法研究水体生态因子间的关系^[10-12],研究用水温、pH、溶氧量、铵氮、磷酸盐磷和亚硝酸盐氮预报鳊健康^[13]。但当时只是选择常用的几个指标进行预报,缺乏对指标的科学优化筛选。本文则以预报准确度尽可能高,用于预报的自变量尽可能少为原则,通过对高密度鳊养殖中17项水生态因子中的有关数据进行统计分析,借助权重因子(W_i)、F检验度(F_i)、偏回归平方和(V_i)与相关系数(r_{ij})等四种统计量,从众多的水生态因子中优选出pH、铵氮、硝酸盐氮、二氧化碳、总碱度、镁含量和细菌总数等7项影响鳊健康的关键因子为自变量(x_i),利用回归技术,求出各个自变量与鳊健康综合指标y(后简称健康指标)间 $y = a_0 + \sum_{i=1}^7 a_i x_i + \sum_{j=1}^7 a_j x_j^2 +$

收稿日期:2007-09-08

资助项目:国家“十五”科技攻关计划(2001BA505B03);广东省海洋与渔业局项目

作者简介:赖子尼(1964-),女,广东兴宁人,研究员,硕士生导师,主要从事渔业生态环境学科研究。Tel:020-81616887, E-mail:laini@tom.com

$\sum_{k=1}^7 a_k x_k^3$ 的非线性模型。该模型对 87 次试验的预报准确率为 92.1%，可以用 7 项水生态因子较理想地监控鳊的健康。文中还借助模型导出健康养殖 7 项关键水生态因子的优化值，对生态养殖水质调控，水质污染修复，提高水产品质量安全有积极意义。

1 材料与方法

1.1 试验池塘的基本情况

试验时间：2001 年 7 月 1 日至 10 月 30 日，鳊苗种至成鱼整个养殖周期；试验地点：广东省南海、新会荷塘两地，鳊养殖塘 16 口；总面积 4.7 hm²，水深 1.0~2.0 m；养殖模式：增氧机随机增氧，半封闭式（通常情况下不换水）；放养密度约 2000 尾·667m⁻²，饵料鱼为露斯塔野鲮；采样方式：用有机玻璃采水器采样，每两周一次，时间为上午 8:00-9:00。

1.2 17 项水生态因子的检测

水温(x_1)、pH(x_2)、溶解氧(x_3)、高锰酸盐指数(x_4)、铵氮(x_5)、磷酸盐磷(x_6)、亚硝酸盐氮(x_7)、硝酸盐氮(x_8)、非离子氨(x_9)、二氧化碳(x_{10})、浊度(x_{11})、总碱度(x_{12})、总硬度(x_{13})、钙(x_{14})、镁(x_{15})、叶绿素 a(x_{16})和细菌总数(x_{17})的检测依 GB11607-89 及 GB3838-88 要求进行。

1.3 鳊健康综合指标的评定

鱼体健康常规检查与水样采集同时进行(试验期间发病及时检查)。借助显微镜检查和 PCR 技术确认鳊健康等级，以健康鳊 100 分为基准，对患有细菌性出血、烂鳃、肠炎、车轮虫、病毒病等疾病的鳊依病情从轻到重分为五级，分别扣除 3、6、9、12、15 分，最终得分定为鳊健康指标值。

2 结果与分析

为了能充分利用 87 组原始数据所提供的信息，本文将用数理统计技术求出 17 项因子的权重因子 W_i 、 F_i 检验值、偏回归平方和(V_i)和相关系数(r_{ij})等四种统计量，为从 17 项水生态因子中筛选出少量的对建模作用大的因子进入模型提供依据。

2.1 平均值和标准偏差

表 1 列出 87 组数据 18 项因子的统计结果，其中，温度和 pH 的相对标准偏差均 <7%，87 次测量值差异不太大；而总硬度、总碱度、溶氧量、高

锰酸盐指数、浊度、Ca 含量和 CO₂ 含量等 7 项生态因子值的相对标准偏差在 20%~50%，各次测量值有一定的差异；而余下的铵氮、磷酸盐磷、亚硝酸盐、硝酸盐氮、非离子氨、镁、叶绿素 a 和细菌总数等八项指标的相对偏差均 50% 以上，87 次测量值变化较大。而目标值 y 的测量结果为 (90.6 ± 11.8)，(其 RSD 是 13%)，这表明所观测的塘中鳊处在较良好的生长养殖状态中。

表 1 水生态因子的均值、偏差和变异系数
Tab. 1 Mean deviation and coefficient of variation of each aquatic ecofactors

因子 factors	平均值 mean	偏差 deviation	变异系数 CFVAR RSD(%)
x_1 (°C)	28.9	1.95	6.7
x_2	7.68	0.202	2.6
x_3 (mg·L ⁻¹)	4.36	1.65	38
x_4 (mg·L ⁻¹)	7.80	1.77	23.0
x_5 (mg·L ⁻¹)	1.46	1.459	9.3
x_6 (mg·L ⁻¹)	0.049	0.043	87.8
x_7 (mg·L ⁻¹)	0.296	0.281	95
x_8 (mg·L ⁻¹)	2.13	2.651	25
x_9 (mg·L ⁻¹)	0.053	0.064	102
x_{10} (mg·L ⁻¹)	7.36	3.68	50.0
x_{11} (degree)	89.2	37.1	41.8
x_{12} [mg(CaCO ₃)·L ⁻¹]	74.1	24.03	2.3
x_{13} [mg(CaCO ₃)·L ⁻¹]	100.2	21.0	21.0
x_{14} [mg(CaCO ₃)·L ⁻¹]	56.4	26.8	47.5
x_{15} [mg(CaCO ₃)·L ⁻¹]	23.7	20.4	86.1
x_{16} (μg·L ⁻¹)	60.4	34.2	56.7
x_{17} (10 ⁴ cfu·L ⁻¹)	43.0	371.8	863
Y	90.6	11.8	13.0

2.2 17 项生态因子的权重因子 W_i

在多因素统计聚类分析中，为了描述某一因素对样本类别的识别能力高低，可应用因素的权重因子 W_i 。权重因子定义为第 i 因素的类间偏差平方和与类内偏差平方和之比，当 W_i 值越大，表示第 i 因素识别样本性质的能力越强，对建模提供的信息越多。将 87 组样本，按健康指标 y 值的高低分为三类： $y > 99$ 分为第一类， y 值在 99~85 分为第二类， $y < 85$ 分为第三类。文中计算出 17 项水生态因子的权重因子 W_i (表 2)。可以看出 x_2 (pH)、 x_8 (硝酸盐氮)、 x_{10} (二氧化碳)、 x_{15}

(镁)和 x_{17} (细菌总数)等 5 项因子的权重因子值均大于 2.0。可以认为这些水生态因子有利于识

别 y 值的高低,为建模提供较多信息,故应优先考虑这五因子为建模自变量。

表 2 水生态因子的权重值 W
Tab. 2 Weight factor of aquatic ecofactors

x_i	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8	x_9	x_{10}	x_{11}	x_{12}	x_{13}	x_{14}	x_{15}	x_{16}	x_{17}
W	1.98	2.15	1.68	1.73	1.45	1.71	1.53	2.11	1.32	2.12	1.94	1.81	1.57	1.57	2.19	1.87	2.81

2.3 17 项因子的 F 检验度

为了讨论 17 项因子中哪些指标与模型的相关程度较高,比较在建立回归方程时各因子的 F_i ($i=1,2,\dots,17$)值的大小。在进行 17 项因素的非线性拟合时,各指标均采用三次幂的形式,即回归方程为: $y = a_0 + \sum_{i=1}^7 a_i x_i + \sum_{j=1}^7 a_j x_j^2 + \sum_{k=1}^7 a_k x_k^3$ 的建模形式。总共可以求出 $17 \times 3 = 51$ 个 F_i

值。为节省篇幅和便于说明问题,只将 x_i^1, x_i^2, x_i^3 对应的最大 F_i^{\max} 值和三个 F_i 的平均值 F_i^{mean} 列出在表 3 中。如果 F_i^{\max} 和 F_i^{mean} 越大,第 i 因素对 y 的相关程度越高,对准确建模的贡献越大。比较表 3 发现, x_1 (温度), x_5 (铵氮), x_9 (非离子铵), x_{12} (总碱度)和 x_{17} (细菌总数)的 F_i^{\max} 和 F_i^{mean} 均较大,在建模中,可以考虑引入这些指标。

表 3 水生态因子的 F_i 检验值
Tab. 3 F_i inspection value of aquatic ecofactors

x_i	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8	x_9	x_{10}	x_{11}	x_{12}	x_{13}	x_{14}	x_{15}	x_{16}	x_{17}
F_i^{\max}	1.8	0.54	0.23	0.49	3.1	0.12	0.80	0.77	2.6	0.34	0.08	1.8	0.98	0.16	0.95	0.16	2.8
F_i^{mean}	1.8	0.51	0.10	0.46	2.8	0.07	0.61	0.28	2.0	0.14	0.07	1.7	0.89	0.08	0.53	0.13	1.3

2.4 各生态因子的偏回归平方和 V_i

在评价建模效果时,可引入偏回归平方和 V_i ($i=1,2,\dots,17$)来讨论第 i 因素对回归方程 y 的贡献率。在一定条件下,如果 V_i 较大,表示第 i 个因素 x_i 对目标函数值 y 的影响较大,因此可考虑将含有信息量较多的 x_i 引入模型中。与 2.3 中叙述的一样,采用 x_i 的三次幂的非线性模型,

在推求回归方程中,17 个因子均有对应 x_i^1, x_i^2 和 x_i^3 的三个 V_i 值,共 51 个。同样为了简便和更好说明问题,表 4 仅列出 x_i 三个偏回归平方和中的 V_i^{\max} 和 V_i^{mean} 。从表中可以看出,在 17 个指标中, x_1 (温度), x_5 (铵氮), x_9 (非离子氨), x_{12} (总碱度)和 x_{17} (细菌总数)的 V_i^{\max} 和 V_i^{mean} 较大,故可以考虑将上述因素引进模型中。

表 4 水生态因子的偏回归平方和 V_i
Tab. 4 Partial regression square-sum of aquatic ecofactors

x_i	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8	x_9	x_{10}	x_{11}	x_{12}	x_{13}	x_{14}	x_{15}	x_{16}	x_{17}
V_i^{\max}	145	43	19	39	247	9.9	64	61	208	28	6.6	142	78	13	76	13	225
V_i^{mean}	140	40	8.0	37	223	6.0	49	22	180	11	6.0	130	70	6.0	43	10	104

2.5 17 项水生态指标间的相关系数矩阵 r_{ij}

第 i 个指标和第 j 个指标间的线性相关程度可以由相关系数 r_{ij} 表示之。假如 $|r_{ij}|$ 越接近 1,表明指标间的共线程度越高,它们间的相关性越密切。从我们采集到的(87 行 \times 17 列)原始数据

矩阵中,用计算机很容易求出指标间的相关系数矩阵表 5,由于该矩阵是对称矩阵,故只列出下三角矩阵的元素。表 5 可以看出,当置信度为 95% 时的临界值 $r_{(85,0.05)} = 0.21$,在全部 136 个相关系数 r_{ij} 中($i, j = 1, 2, \dots, 17, i \neq j$)有 61 个相关系数

值 ≥ 0.21 。即因子间有显著相关的约占45%。表6统计出某一因子 x_i 与其它16项因子 x_j 显著相关的个数。由该表可知,与其它因子共线较小的水生

态因子为 $x_2, x_6, x_7, x_8, x_{10}, x_{11}$ 和 x_{17} 。在建模中如果舍弃这些共线较小因素,可能容易丢失信息,所以在建模允许条件下,应保留这些指标。

表5 水生态因子间的线性相关系数矩阵 r_{ij}
Tab.5 Correlation coefficient matrix of aquatic ecofactors

	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8	x_9	x_{10}	x_{11}	x_{12}	x_{13}	x_{14}	x_{15}	x_{16}	x_{17}
x_1	1.00																
x_2	-0.64	1.00															
x_3	-0.04	0.16	1.00														
x_4	-0.15	0.02	-0.10	1.00													
x_5	-0.04	0.02	0.14	-0.23	1.00												
x_6	0.18	-0.16	0.09	0.01	0.39	1.00											
x_7	0.35	-0.40	0.39	-0.08	0.12	0.18	1.00										
x_8	0.23	-0.13	0.36	-0.05	-0.04	0.09	0.35	1.00									
x_9	-0.23	0.30	0.23	-0.21	0.90	0.34	0.01	-0.06	1.00								
x_{10}	0.38	-0.32	-0.37	-0.01	-0.08	0.24	0.02	-0.01	-0.19	1.00							
x_{11}	-0.08	0.02	-0.04	0.38	-0.14	-0.14	-0.08	0.15	-0.11	-0.10	1.00						
x_{12}	-0.63	0.31	-0.26	0.31	-0.13	0.06	-0.30	-0.35	-0.03	-0.05	0.10	1.00					
x_{13}	-0.27	0.04	-0.14	0.46	-0.33	0.02	-0.13	0.12	-0.30	-0.01	0.25	0.64	1.00				
x_{14}	-0.24	-0.02	-0.37	0.33	-0.40	-0.15	-0.27	-0.10	-0.39	0.15	0.36	0.60	0.70	1.00			
x_{15}	-0.16	-0.09	-0.36	0.22	-0.35	-0.09	-0.29	-0.19	-0.33	0.22	0.35	0.42	0.51	0.67	1.00		
x_{16}	-0.20	0.14	-0.02	0.43	-0.34	-0.16	-0.11	-0.01	-0.26	0.01	0.21	0.28	0.32	0.38	0.29	1.00	
x_{17}	0.12	-0.24	-0.10	-0.14	0.02	-0.05	-0.05	-0.05	-0.06	0.22	-0.07	-0.08	-0.10	0.22	0.10	-0.08	1.00

$$r_{(85,0.05)} = 0.21$$

表6 与水生态因子(x_i)显著相关的生态因子个数(x_j)

Tab.6 The number of aquatic ecofactors (x_j) of marked correlation with aquatic ecofactors(x_i)

x_i	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8	x_9	x_{10}	x_{11}	x_{12}	x_{13}	x_{14}	x_{15}	x_{16}	x_{17}
x_j	8	6	7	8	7	3	6	4	9	6	5	10	9	11	11	8	2

3 结果与讨论

3.1 建模因子的确定

综合以上有关权重因子 W_i 、 F_i 检验值、偏回归平方和 V_i 和相关系数 r_{ij} 讨论中建议建模引入的因子。列表于表7中,一般而言,引入模型的因素数较多,能提供的信息量也较大,但如果因素间存在明显的共线,引进这些共线的变量可能不会增加信息,有时反而会扩大干扰,增加误差,而且加大采集数据的工作量,耗费不必要的人力、物力和时间。因此在建模中,只要能保证一定的准确度,应尽量减少模型中自变量的个数。在优化模型引入因子的研究中,尽可能引入表7中在 W_i 、 F_i 和 V_i 项中所推荐的因子。即模型中要引进 x_1

(温度)、 x_2 (pH)、 x_5 (铵氮)、 x_8 (硝酸盐氮)、 x_9 (非离子氨)、 x_{10} (二氧化碳)、 x_{12} (总碱度)、 x_{15} (Mg 含量)和 x_{17} (细菌总数)共9种水生态因子。但从表5、6可知, x_1 (温度)与8个因子共线,特别是与 x_2 、 x_{12} 高度相关,现在拟引进的9种因子中已经包含 x_2 和 x_{12} ,故 x_1 (温度)可以舍弃;另外, x_9 (非离子氨)与9个因子共线,尤其是与 x_5 高度相关,其相关系数 $r_{(5,9)} = 0.90$,远大于其临界值 $r_{(85,0.05)} = 0.21$,而 x_5 拟在模型中存在,故因子 x_9 可以舍弃;从相关系数考虑,可以引进模型的 x_6 、 x_7 和 x_{11} 三种因子因与其它因子共线,个数分别为3、6和5,而在 W_i 、 F_i 、 V_i 栏中没有被建议引入,因此也可以舍弃。最后确定从17种因子中选取 x_2 、 x_5 、 x_8 、 x_{10} 、 x_{12} 、 x_{15} 和 x_{17} 等7种因子为建模因子。

表 7 各种统计方法推荐的建模因子
Tab. 7 Model factors recommended by each statistic method

方法 method	建模因子 model factor					
权重因子法(W_i) weight factor method	x_2		x_8	x_{10}	x_{15}	x_{17}
F_i 检验法 F inspection value method	x_1	x_5		x_9	x_{12}	x_{17}
偏回归平方和法(V_i) partial regression square-sum method	x_1	x_5		x_9	x_{12}	x_{17}
相关系数法(r) correlation coefficient method	x_2		x_6 x_7 x_8	x_{10} x_{11}		x_{17}
最终确定因子 determined factors	x_2	x_5	x_8	x_{10}	x_{12}	x_{15} x_{17}

3.2 最佳模型的确定

最佳模型的推求 依据多元线性、非线性拟和理论和技术,使用本课题研制的软件系统,求出以 x_2 (pH)、 x_5 (铵氮)、 x_8 (硝酸盐氮)、 x_{10} (二氧化碳)、 x_{12} (总碱度)、 x_{15} (镁)和 x_{17} (细菌总数)为监控因子与鳃健康指标(y)的多种关系模型及有关统计参数(表 8)。其中 3 种模型为:

表 8 5 种模型及其相关参数

Tab. 8 Five models and their parameters

模型序号名 model number	$F_{计}$	$F_{临界值}$	预报准确率(%) prediction precision	残差平方和 Q residual sum of square
模型 1 model 1	2.05	2.13	81.5	8690
模型 2 model 2	3.24	1.82	91.6	7295
模型 3 model 3	2.93	1.73	92.4	6105
模型 4 model 4	2.83		93.3	5025
模型 5 model 5	2.37		93.7	4529

$$(1) y = 72.6 + 12.5x_2 + 0.433x_5 - 0.581x_8 - 1.12x_{10} + 21.5x_{12} - 26.0x_{15} + 0.148x_{17}$$

$$(2) y = -2201 + 6079x_2 - 3973x_5^2 + 0.253x_5 + 0.121x_5^2 - 2.04x_8 + 0.145x_8^2 - 44.2x_{10} + 24.4x_{10}^2 - 42.1x_{12} + 38.3x_{12}^2 - 30.4x_{15} + 9.93x_{15}^2 + 1.99x_{17} - 0.054x_{17}^2$$

$$(3) y = 64131 - 254857x_2 + 338344x_2^2 - 149590x_2^3 - 8.04x_5 + 4.08x_5^2 - 0.397x_5^3 - 4.98x_8 + 0.876x_8^2 - 0.041x_8^3 - 99.5x_{10} + 80.4x_{10}^2 - 17.6x_{10}^3 - 280x_{12} + 337x_{12}^2 - 120x_{12}^3 + 14.5x_{15} - 150x_{15}^2 +$$

$$153x_{15}^3 + 2.33x_{17} + 0.146x_{17}^2 - 0.006x_{17}^3$$

从表 8 有关统计参数分析可知,随着自变量 x_i 幂指数增加,从模型 1 到模型 5,模型的预报残差平方和 Q 从 8419 降到 4529,87 组数据预报准确性从 81.5% 提高到 93.7%。因而理论上最佳模型为五次幂的模型 5,但实际上使用太高次幂的模型时,假如 x_i 的检测误差增大,容易对 y 造成较大影响,所以应稍微降低对理论模型准确率的要求,建议使用七因子的二次幂或三次幂模型,本文选用三次幂的模型 3 为监控模型,其准确率为 92.4%。

模型准确率讨论 为了解所建模型 3 的预报能力,本文将 87 个样本按 y 值的高低分成 5 个健康段来讨论,表 9 是其统计结果。 y 值高于 70 分的 79 个样本(约占总样本数的 91%),平均预

表 9 模型 3 的分段判别准确率

Tab. 9 Precision of piecewise discrimination for model 3

y 值范围 range of y	≤ 60	$60 < y \leq 70$	$70 < y \leq 80$	$80 < y \leq 90$	> 90
该段样本个数 number of samples in the piece	3	5	14	16	49
占总样本的比例(%) proportion in total samples	3.5	5.8	16	18.4	56.3
平均准确率(%) average precision	57.4	84.7	93.1	94.7	94.5

报准确率均高于 93%, y 值低于 60 分的 3 个样本(占总样本的 3.5%),预报准确率仅 57.4%,应该是模型的不足之处。但实际上,对于 y 值低于 60

分,鳃已处在一个极端的非正常情况,已不属健康养殖考虑的情况。可见模型 3 是一个较理想的池塘养殖判断鳃健康程度的模型。

7 项水生态因子的理想养殖范围 利用模型 3 从单因素角度分别绘制出 x_2 、 x_5 、 x_8 、 x_{10} 、 x_{12} 、 x_{15} 和 x_{17} 等 7 种水生态因子对 y 影响的七条关系曲线图。从曲线中很容易求出他们对健康指标的影响幅度和最佳养殖范围(另外也可以利用对模型实行 $\frac{\partial y}{\partial x_i} = 0$,再解高次方程求出最佳 x_i 值)。为省篇幅,本文只列出表 10 的统计结果。可以看出 pH、铵氮、二氧化碳和细菌总数对鳃健康指标影响较明显。

表 10 7 项水生态因子最佳浓度范围和对 y 影响幅度
Tab. 10 Optimal concentration range and influence extent for y of seven ecosystem factors

x_i	x_2	x_5	x_8	x_{10}	x_{12}	x_{15}	x_{17}
对 y 影响幅度 influence extent to y	30	25	8	35	15	10	50
浓度范围 concentration range	7.5~8	0.5	<1	<3	100~140	<30	13~27

4 结语

文中通过权重因子、偏回归平方和、 F 检验值和相关系数等统计量优化 17 项水生态因子,从中优选出 7 项影响池养鳃健康的指标用于建模,所得模型平均预报准确率高于 93%。7 项生态因子对鳃健康的影响顺序:细菌总数(x_{17})>二氧化碳(x_{10})>pH(x_2)>铵氮(x_5)>总碱度(x_{12})>镁(x_{15})>硝酸盐氮(x_8),其中细菌总数、二氧化碳、pH、铵氮是最关键的因子,推荐浓度范围如表 10。模型的预报准确率与先前作者用水温、pH、溶氧量、铵氮、磷酸盐磷和亚硝酸盐氮 6 项因子预报鳃健康^[11]相比提高了 3.4%。两个模型选用因子虽然不尽相同,但表 5 生态因子间的线性相关系数显示两个模型中多个生态因子存在相关性,二氧化碳、碱度、镁、硝酸盐氮与溶氧相关, $r_{(10,3)}$ 、 $r_{(12,3)}$ 、 $r_{(15,3)}$ 、 $r_{(8,3)}$ 分别为: -0.37、-0.26、-0.36、0.36;总碱度与温度相关, $r_{(12,1)} = -0.63$;二氧化碳与磷酸盐相关, $r_{(10,6)} = 0.24$;碱度、镁、硝酸盐分别与亚硝酸盐相关, $r_{(12,7)}$ 、

$r_{(15,7)}$ 、 $r_{(8,7)}$ 分别为: -0.30、0.29 和 0.35。文中导出的优化养殖条件在实际养殖过程中,由于各生态因子的相关性会导致优化值发生变化,应灵活掌握和运用。

参考文献:

- [1] 淡水无公害水产品养殖池塘水质的控制措施[J]. 中国水产, 2005, 8:70-71.
- [2] 金栋梁,刘予伟. 水环境评价概述[J]. 水资源研究, 2006,27(4):33-36.
- [3] 徐永健,陆开宏,韦玮. 大型海藻江蕨对养殖池塘水质污染修复的研究[J]. 中国生态学学报, 2007, 15(5):156-159.
- [4] 徐宁,李德尚. 养殖池塘溶氧平衡与日最低值预报的研究概况[J]. 中国水产科学, 1998, 5(1): 84-87.
- [5] 刘振乾,王建武,骆世明,等. 基于水生态因子的沼泽安全阈值研究——以三江平原沼泽为例[J]. 应用生态学报,2002,13(12):1610-1614.
- [6] Préon P, Mullon C, Pichon G. Experimental interactive software for choosing and fitting surplus production models including environmental variables [J]. Rome: FAO Computerized Information Series Fisheries,1993, 5:1-76
- [7] Maier H R, Dandy G C. Neural networks for the prediction and forecasting of water resources variables: a review of modelling issues and applications [J]. Environmental Modelling and Software,1999,15(1):101-123.
- [8] 唐桂刚,白乃彬. 应用遗传神经网络方法分析我国降水化学数据[J]. 环境科学学报,2000,20(5): 542-547.
- [9] Maceina M J. A simple regression model to assess environmental effects on fish growth[J]. Journal of Fish Biology,1992, 41,557-565.
- [10] 赖子尼,余煜棉,庞世勋,等. 鳃养殖池塘水体叶绿素 a 与 16 项水生态因子关系的[J]. 中国水产科学,2004,11(5): 425~430.
- [11] 赖子尼,余煜棉,庞世勋,等. 水生态因子与鳃的健康关系[J]. 水产学报,2004,28(3):273-278.
- [12] 赖子尼,吴淑勤,石存斌,等. 鳃塘水体生态因子的计算机模式识别法应用[J]. 水产学报,2000,24(2): 146-150.
- [13] 赖子尼,石存斌,吴淑勤,等. 鳃塘水体理化因子昼夜变化及相关性研究[J]. 大连水产学院学报,2001, 16(1):61-66

Study on key aquatic ecosystem factors for culturing *Siniperca chuatsi* by regulating model optimization

LAI Zi-ni¹, YU Yu-mian², WU Shu-qin¹,

YANG Wan-ling¹, SHI Cun-bin¹, PANG Shi-xun¹

(1. Pearl River Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery, Guangzhou 510380, China;

2. Experiment Center, Guangdong Industry University, Guangzhou 510090, China)

Abstract: Pond ecosystem is a complicated system with the characteristics of dynamic state, multiple factor and unrepresentative. It was difficult to give out results for cultivation problem via single factor statistics traditionally. The paper studied the model optimization of relationship between *Siniperca chuatsi* health index and seventeen aquatic ecological factors of *Siniperca chuatsi* culturing pond. The ecological factors involved pH value, ammonia nitrogen content, nitrate content, CO₂ content, Mg²⁺ content, total alkalinity and general bacterial population, etc. Sampled water with plexiglass water sampler every two weeks between 8:00 a. m. and 9:00 a. m. *Siniperca chuatsi* health examination was done at the same time as water sampling. Employing the statistics as weight factor, F inspection value, partial regression square-sum and correlation coefficient etc., the superiority model factors were obtained by mathematical statistics to 87 groups of experiment data. A non-linear model between the superiority seven factors (pH, NH₄⁺-N, NO₃⁻-N, CO₂, total alkalinity, Mg²⁺, bacteria counts) and *Siniperca chuatsi* health comprehensive indicators were regressed and expressed as $y = a_0 + \sum_{i=1}^7 a_i x_i + \sum_{j=1}^7 a_j x_j^2 + \sum_{k=1}^7 a_k x_k^3$. Its precision was 92.1%. By means of the model optimization, cultivation conditions were analyzed, in order to do favor to ecological culture. The most effect factors on y coming from the model were bacteria counts, CO₂, pH and NH₄⁺-N, and their best ranges are $(13 - 27) \times 10^4 \text{ cfu} \cdot \text{L}^{-1}$, less than $3 \text{ mL} \cdot \text{L}^{-1}$, 7.5 - 8.0 and $0.5 \text{ mL} \cdot \text{L}^{-1}$, respectively.

Key words: *Siniperca chuatsi*; aquatic ecofactors; health; culturing; model optimization