

生化处理模式下生猪养殖污水特征分析与水质评价

周 昊^{1,2}, 周素茵^{1,2}, 邬心迪³

(1. 浙江农林大学 数学与计算机科学学院, 浙江 杭州 311300; 2. 浙江农林大学 浙江省林业智能监测与信息技术研究重点实验室, 浙江 杭州 311300; 3. 浙江经贸职业技术学院, 浙江 杭州 310018)

摘要: 【目的】研究生化处理模式下的生猪养殖污水特征, 找到一种合理、快速的水质评价方法, 为猪场及相关监管部门了解污水处理情况提供理论依据。【方法】以浙北一家规模猪场为采样点, 于2018年秋至2020年秋对处理后的养殖污水进行随机采样。先采用SPSS软件对样本进行统计特征分析, 然后利用逐步多元回归分析方法确定影响污水水质的关键指标, 再结合水质指标之间的相关性建立生猪污水最小水质指数评价模型。【结果】①水质呈现季节性变化特征, 春、夏季节水质优于秋、冬季节, 尤其是夏季水质最好; ②基于电导率和化学需氧量2个关键指标建立的最小水质指数评价模型的决定系数为0.994, 该模型的验证结果表明: 通过其评价的水质结果与基于氨氮、化学需氧量、总氮、总磷和酸碱度共5个指标的评价结果一致程度可达90%以上。【结论】基于关键指标构建的最小水质指数模型具有准确性和合理性, 可用于生化处理模式下生猪养殖污水水质的快速评价。图4表3参28

关键词: 生猪; 污水; 水质评价; 水质指数

中图分类号: S818.9 文献标志码: A 文章编号: 2095-0756(2022)01-0146-07

Characteristics analysis and water quality assessment of swine breeding wastewater under biochemical treatment mode

ZHOU Hao^{1,2}, ZHOU Suyin^{1,2}, WU Xindi³

(1. College of Mathematics and Computer Science, Zhejiang A&F University, Hangzhou 311300, Zhejiang, China; 2. Key Laboratory of Forestry Intelligent Monitoring and Information Technology of Zhejiang Province, Zhejiang A&F University, Hangzhou 311300, Zhejiang, China; 3. Zhejiang Institute of Economics and Trade, Hangzhou 310018, Zhejiang, China)

Abstract: [Objective] This objective is to analyze the characteristics of swine breeding wastewater under biochemical treatment mode, and put forward a reasonable and rapid water quality assessment method, so as to provide a theoretical basis for swine farms and related regulatory authorities to understand the wastewater treatment situation. [Method] A large-scale swine farm in northern Zhejiang was taken as the sampling location, and the treated breeding wastewater was randomly sampled from fall 2018 to fall 2020. Firstly, SPSS software was used to analyze the statistical characteristics of the samples, and then the stepwise multiple regression analysis method was used to determine the key indexes affecting the wastewater quality. Thirdly, combined with the correlation among the water quality indexes, the assessment model of the minimum water quality index for swine wastewater was established. [Result] (1) The water quality will change in different seasons, it was better in spring and summer than that in fall and winter, and the water quality in summer was the best. (2) Based on the electrical conductivity and chemical oxygen demand, the assessment model of the

收稿日期: 2021-02-08; 修回日期: 2021-06-09

基金项目: 浙江省公益技术应用研究计划项目 (LGN19F010001)

作者简介: 周昊 (ORCID: 0000-0002-7597-7516), 从事污水监测等农业物联网方向的研究。E-mail: 1220470928@qq.com。通信作者: 周素茵 (ORCID: 0000-0001-8501-3879), 讲师, 从事畜禽污水监测及装备研发。E-mail: zsy197733@163.com

minimum water quality index was established, its determination coefficient was 0.994. The verification results showed that the consistency of evaluation grades of water quality based on the minimum model and five indexes include ammonia nitrogen, chemical oxygen demand, total nitrogen, total phosphorus and pH can be more than 90%. [Conclusion] The minimum water quality index model based on key indexes can be used for rapid evaluation of swine breeding wastewater quality under biochemical treatment mode, meanwhile its accuracy and rationality can be ensured. [Ch, 4 fig. 3 tab. 28 ref.]

Key words: swine; wastewater; water quality assessment; water quality index

近年来,随着生猪养殖业的飞速发展,规模猪场普遍采用生化处理模式^[1-2]对养殖污水处理后进行排放,但由于受处理工艺稳定性及其他因素的影响,大量排放的污水达标与否成为突出问题^[3-4]。因此,提出合理、快速的水质评价方法用于污水实时监管十分必要。现有的水质评价研究主要是针对地下水及河流湖泊等地表水^[5-7]。在单因子评价法的研究中,超标最严重的指标往往被简单地视作整体水质的决定性因素,而其他指标所产生的综合影响则被忽视,导致评价结果不准确。模糊综合评价法常用于地下水的评价,方运海等^[8]引入相对隶属度概念建立起模糊综合优化模型评价地下水水质,并证明了模型的可靠性,但该方法仍存在隶属函数判定区间不精确、水质评价结果表达方式单一等问题。BP 神经网络法在自学习以及自适应功能方面优势显著,有利于将各水质指标与水质整体等级更好地拟合,被广泛应用于水质评价^[9-10],孔刚等^[11]通过 BP 神经网络法对浅层地下水水质进行综合评级,在减小了人为影响因素的同时,得到更加贴近客观实际的水质评价结果,但因其对样本依赖性过强而具有局限性。与以上方法相比,水质指数(water quality index, WQI)方法能够结合多个环境参数并将其有效地转换为反映水质状况的单个值,被广泛用于地下水和地表水的水质评价^[12-13],在水资源管理中起着越来越重要的作用。KAMRAN 等^[14]对河水采用主成分分析法提取主要指标后,再结合 WQI 方法对河流水质进行准确评价。目前,规模猪场针对生化处理后的养殖污水水质评价仅以 GB 18596—2001《畜禽养殖业污染物排放标准》中的各指标限值作为依据,评价结果具有一定的单一性和片面性。本研究以一家采用 SFAO⁴(step-feed four-stage micro aeration units)微氧曝气工艺的规模猪场处理后的养殖污水为研究对象,在分析其水质特征的基础上,构建了基于关键水质指标和 WQI 的生猪养殖污水水质评价模型,期为生化处理后的生猪养殖污水提供准确和快速的评价方法。

1 材料与方法

1.1 样本采集

本研究自 2018 年秋至 2020 年秋对浙北一家规模猪场处理后的养殖污水进行随机采样,累计样本 81 组,其中春、夏、秋、冬分别采样 20、19、24 和 18 组。

1.2 水质评价指标选取

以 GB 18596—2001《畜禽养殖业污染物排放标准》中规定的指标和现有规模猪场中常规监测的水质指标为依据,本研究选取了氨氮(NH₃-N)、总磷(TP)、总氮(TN)、化学需氧量(COD)、酸碱度(pH)和电导率(EC)共 6 个指标对生猪养殖污水水质进行评价。

1.3 水质指数计算

为避免水质评价的片面性和单一性,初始水质指数(WQI)的计算选取了评价生猪养殖污水水质常用的 NH₃-N、COD、TN、TP、pH 共 5 个指标,计算方法如式(1)所示。根据每个指标对水质的影响程度及相对重要性,为其分配权重^[15-17],同时对其进行标准化以消除变量的不同量纲和不同数量级对评价结果的影响(表 1)。

$$I_{WQI} = \frac{\sum_{i=1}^n (C_i P_i)}{\sum_{i=1}^n P_i} \quad (1)$$

式(1)中： n 为指标总数， C_i 和 P_i 分别为指标 i 的标准化值与权重。 I_{WQ} 为水质指数，取值范围为[0, 100]，根据水质指数把水质等级划分为：很好(90, 100]、好(70, 90]、一般(50, 70]、差(30, 50]、很差[0, 30]。在保证水质评价合理的同时，为了缩减评价指标以提高评价速度，本研究采用逐步回归分析法筛选影响生猪养殖污水水质的关键指标，并引入了加权和非加权最小水质指数模型^[18]，分别表示为 $WQI_{\min-w}$ 和 $WQI_{\min-nw}$ 。

2 结果与分析

2.1 水质指标特征

从表2可以看出：部分样本的TN质量浓度偏高，最大质量浓度为 $183.00\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ； $\text{NH}_3\text{-N}$ 、COD和TP的平均质量浓度分别为6.36、40.79和 $2.40\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ，均远低于限值，且标准差相对较小；pH均在正常范围内。

表1 各指标权重和标准化值

标准化值	pH	TN/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	$\text{NH}_3\text{-N}/$ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	TP/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	COD/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)
100	6~9	<50	<4	<0.5	<20
90		50~70	4~6	0.5~1.0	20~40
80		70~90	6~8	1.0~2.0	40~60
70		90~110	8~20	2.0~3.0	60~100
60		110~130	20~40	3.0~6.0	100~200
50		130~150	40~80	6.0~9.0	200~400
40		150~170	80~120	9.0~12.0	400~600
30		170~190	120~160	12.0~15.0	600~800
20		190~210	160~200	15.0~18.0	800~1 000
10		210~230	200~240	18.0~21.0	1 000~1 200
0	<6、>9	>230	>240	>21.0	>1 200
权重	1	3	3	1	4

表2 水质指标的统计特征

项目	pH	EC/ $(\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1})$	TN/ $(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	$\text{NH}_3\text{-N}/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	TP/ $(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	COD/ $(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$
限值	6.00~9.00		≤ 140.00	≤ 80.00	≤ 8.00	≤ 400.00
最大值	7.85	400.00	183.00	10.70	3.24	62.76
最小值	6.16	51.80	26.10	0.88	0.81	20.78
平均值±标准差	7.21 ± 0.39	200.31 ± 85.90	102.32 ± 35.83	6.36 ± 2.77	2.40 ± 0.50	40.79 ± 10.09

对不同季节的水质指标进行统计分析(图1)可以看出：秋、冬季TN和 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的质量浓度及EC相比春、夏季较高；TP的质量浓度春季较小；COD四季变化规律不明显；pH在春季相对较高。

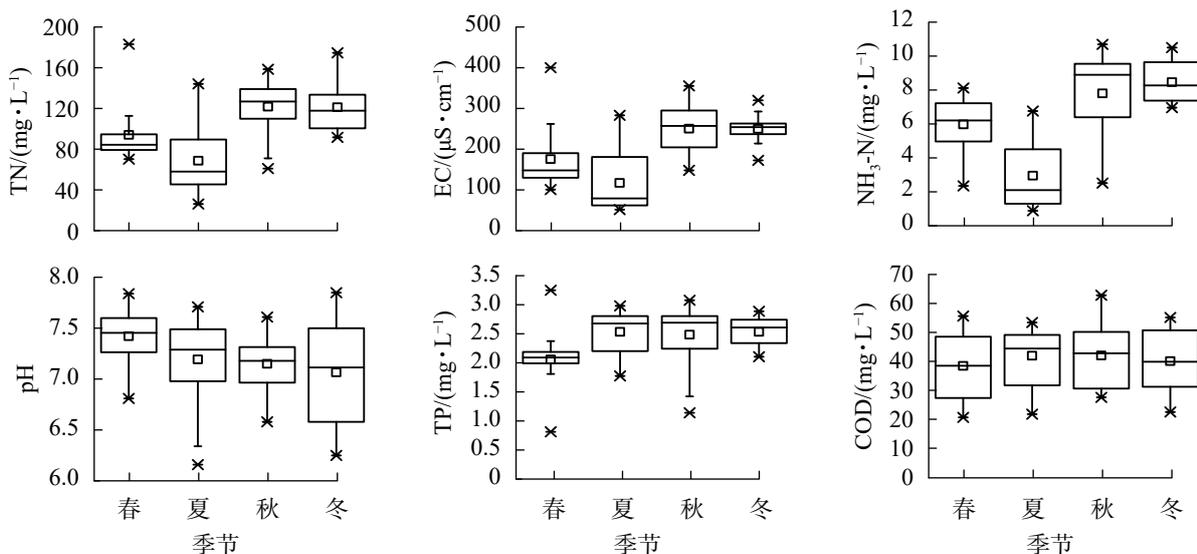


图1 水质指标季节变化规律

Figure 1 Regulation of concentration or value of water quality indexes in different seasons

2.2 水质指数分析

将采样数据代入水质指数公式的计算结果表明：81组样本中有64组等级为好，占比为79.0%，等

级为一般和很好的样本分别占 8.6% 和 12.4%。从图 2 可以看出：不同季节中水质指数差异较大，秋、冬季的污水水质指数相对较低，平均为 60~80，而春、夏季的水质指数显著增大，平均为 75~95，尤其在夏季较为突出，这表明总体上春、夏季的水质较好。

2.3 最小水质指数模型的构建与验证

2.3.1 模型构建 从 81 组样本中根据不同季节共随机抽取 45 组用于建模，其余 36 组用于模型检验。如表 3 所示：在构建最小水质指数模型 (WQI_{\min}) 之前，利用逐步多元线性回归法确定了对水质指数影响最大的指标为 TN(模型 1, $R^2=0.859$, $P<0.001$)，依次增加 NH_3-N 、COD 后，模型的决定系数 (R^2) 逐渐增加(模型 2、模型 3)。从 R^2 变化可以看出： NH_3-N 、COD 对模型精度有较为明显的提升；但加入 TP 后， R^2 仅提升了 0.005(模型 4)。因此，TN、 NH_3-N 和 COD 对水质指数的影响较大。

周昊等^[19]发现生猪污水中 NH_3-N 、TN 和 EC 具有强相关性，其中 NH_3-N 、TN 的标准化值可分别通过替代模型由 EC 推导的 NH_3-N_d 、TN(记做 TN_d) 标准化值代替。本研究将 NH_3-N 、TN 分别与 EC 和 WQI 进行相关性分析表明：① NH_3-N 、TN 与 EC 的强相关性依然存在，相关系数分别为 0.738 和 0.914。② NH_3-N 、TN 与 WQI 的相关系数分别为 0.898 和 0.938； NH_3-N_d 、 TN_d 与 WQI 的相关系数分别为 0.768 和 0.812。因此 NH_3-N 和 TN 的推导值与实测值均与 WQI 显著相关。

基于这一结论，本研究利用 NH_3-N_d 和 TN_d 计算 WQI (记做 WQI_d)，并将其与初始 WQI 值进行对比，结果表明：① WQI_d 与初始 WQI 之间存在较强的相关性，其 R^2 为 0.721, $P<0.001$ ；② WQI_d 与 WQI 的差值平均值仅为 1.13，标准差为 3.8，差值小于等于 5 的组数占总组数的 88.73%。因此， WQI_d 与 WQI 差距较小，采用 NH_3-N_d 和 TN_d 替代 NH_3-N 和 TN 实测值计算 WQI 值是可行的。综上，在利用逐步多元线性回归方法剔除 TP 并确定 NH_3-N 、TN 和 COD 等 3 个关键指标后，利用 NH_3-N_d 和 TN_d 可再次精简计算 WQI 所需指标，仅需要使用 EC 和 COD 计算 WQI 即可。在 45 组建模样本中，将原 NH_3-N 和 TN 分别用 NH_3-N_d 和 TN_d 替换，得出模型 5~7 共 3 个 WQI 模型(表 3)，这 3 个模型的 R^2 逐步递增，分别为 0.842、0.925 和 0.994。因此，本研究选择精度最高的模型 7 作为 WQI_{\min} 模型。

表 3 基于实测值和计算值的水质指数逐步多元回归结果

Table 3 Water quality indexes stepwise multiple regression results based on measured values

模型编号	模型表达式	数据来源	R^2	P
1	$y=12.745+48.381 \lg(x_1+1)$	实测值	0.859	<0.001
2	$y=-87.461+37.294 \lg(x_1+1)+39.662 \lg(x_2+1)$	实测值	0.927	<0.001
3	$y=-232.459+31.739 \lg(x_1+1)+45.921 \lg(x_2+1)+55.114 \lg(x_3+1)$	实测值	0.981	<0.001
4	$y=-237.045+35.884 \lg(x_1+1)+59.762 \lg(x_2+1)+70.416 \lg(x_3+1)+21.264 \lg(x_4+1)$	实测值	0.986	<0.001
5	$y=-22.539+51.28 \lg(x_1+1)$	计算值	0.842	<0.001
6	$y=-135.074+37.179 \lg(x_1+1)+57.368 \lg(x_2+1)$	计算值	0.925	<0.001
7	$y=-213.361+35.154 \lg(x_1+1)+78.005 \lg(x_2+1)+67.733 \lg(x_3+1)$	计算值	0.994	<0.001

说明： y 表示WQI； x_1 、 x_2 、 x_3 和 x_4 分别表示TN、 NH_3-N 、COD和TP的标准化值

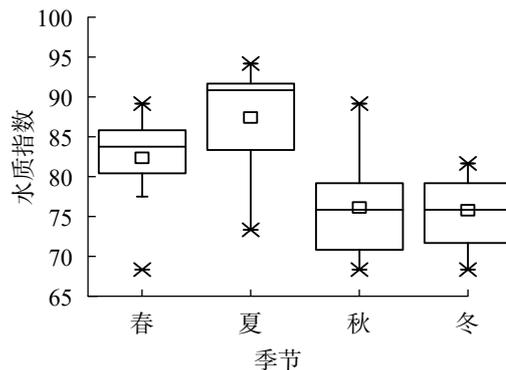


图 2 生猪养殖污水初始水质指数

Figure 2 Initial water quality indexes value of swine breeding wastewater

2.3.2 模型验证 以模型 7 为验证对象，将加权最小水质指数模型 $WQI_{\min-w}$ 和非加权最小水质指数模型 $WQI_{\min-nw}$ 进行对比验证。首先基于决定系数 (R^2)、残差平方和 (RSS) 以及显著性 (P) 来判断模型本身的拟合优度和精度，再将基于 $WQI_{\min-w}$ 、 $WQI_{\min-nw}$ 计算得到的 WQI 值，与通过初始 5 个指标计算得到的 WQI 值的线性拟合效果判断模型的适用性。以 EC 和 COD 作为关键指标，将 36 组检验数据分别代入 2 个模型，进行精度检验。模型 $WQI_{\min-w}$ 和 $WQI_{\min-nw}$ 的 $P<0.001$ ，其中模型 $WQI_{\min-w}$ 的决定系数

(0.994) 略高于模型 $WQI_{\min-nw}$ (0.971), 且模型 $WQI_{\min-w}$ 的残差平方和 (RSS) 为 1.327, 小于模型 $WQI_{\min-nw}$ (6.580)。因此, 模型 $WQI_{\min-w}$ 的拟合优度和精度略高于模型 $WQI_{\min-nw}$ 。为进一步判断模型的适用性, 将检验样本数据分别代入 2 个模型, 得到 WQI 值, 与初始 WQI 值进行线性拟合分析。从图 3 可知: 由模型 $WQI_{\min-w}$ 得到的 WQI 值与初始 WQI 值具有更密切的相关性, 其拟合直线决定系数为 0.855, 略高于模型 $WQI_{\min-nw}$ (0.854); 模型 $WQI_{\min-nw}$ 对应的样点与 1:1 参考线的距离普遍较大, 且偏离程度大于 $WQI_{\min-w}$ 中拟合直线与 1:1 参考直线的偏离程度。图 4 为分别通过 2 个模型以及初始 WQI 公式计算得到的 36 组水质指数, 可以直观地看出: 模型 $WQI_{\min-w}$ 的 WQI 值与初始 WQI 值较为接近, 而模型 $WQI_{\min-nw}$ 的误差相对较大。可见, 模型 $WQI_{\min-w}$ 的水质评价结果与初始 WQI 水质评价结果一致程度更高 (91.7%), 而模型 $WQI_{\min-nw}$ 的水质评价结果误差相对较大, 一致程度仅为 83.3%。综合以上对比结果, 模型 $WQI_{\min-w}$ 更适用于生猪养殖污水水质的评价。

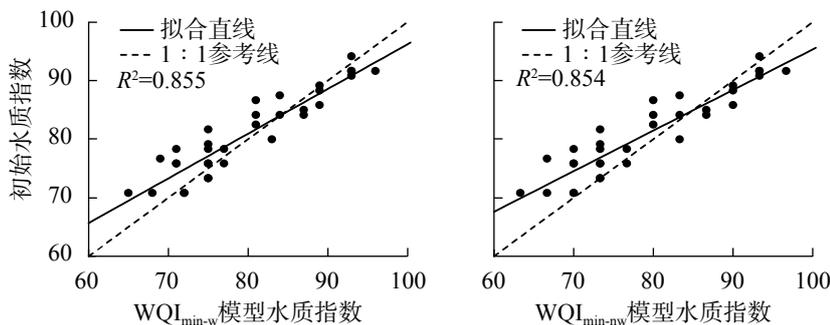


图 3 WQI_{\min} 模型验证
Figure 3 Validation of WQI_{\min} model

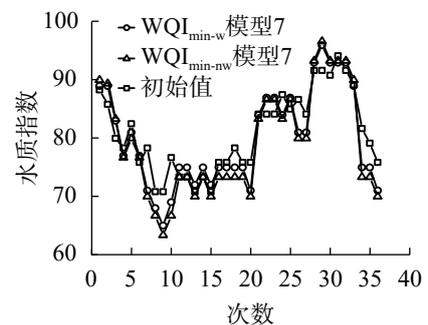


图 4 模型 7 计算的 WQI 值与初始 WQI 值对比
Figure 4 Comparison of WQI value calculated by model 7 with initial WQI value

3 讨论

3.1 生猪养殖污水水质影响因素分析

本研究结果表明: 相对于 TP、pH 和 COD 这 3 个污水水质主要指标, TN 和 NH_3-N 这 2 个关键指标的大小受季节变化影响较为明显, 这可能与不同季节的气温有关。仇天雷^[20] 研究发现: 在适当的温度范围内, 温度的升高有利于养殖废水中 NH_3-N 的消除。何佳敏等^[21] 研究了温度对升流式微氧活性污泥反应器 (UMSR) 处理高 NH_3-N 、低碳氮比养猪废水效能的影响, 结果表明当温度下降时, TN 和 NH_3-N 的去除率均有大幅度下降, 而其他指标的去除率变化不明显。诸多关于城市生活污水处理工艺或水质影响因素的研究中也有同一发现^[22-24], 即不同处理工艺的污水处理效果均与温度密切相关。因春夏季平均气温高于秋冬季, 故本研究处理后的污水水质为春夏季优于秋冬季, 且以夏季最优。此外, 污水曝气情况、静置时间、阳光照射等因素也可能对各指标的值产生影响^[25]。曝气是否充分是影响污水指标质量浓度的重要因素, 如曝气不足将导致溶解氧供应不充分, 直接影响微生物的代谢, 从而降低 COD、 NH_3-N 和 TP 的去除率^[26]; 曝气过量也同样会影响污水处理效率, 可能导致 COD 等指标质量浓度超标^[27]。

3.2 模型精度影响因素分析

污水样本检测的精度、水质指标的标准化方法、权重分配是影响水质评价模型精度的主要因素。本研究以地表水水质指标的标准化方法为参考, 结合生猪养殖污水的特点, 基于 GB 18596—2001《畜禽养殖业污染物排放标准》对污水中相应指标进行了标准化, 标准化值共分为 11 个等级, 而等级数和等级划分的细致程度会对水质指数的大小产生直接影响。在权重分配环节, 是以地下水及河流湖泊等地表水水质研究中的权重分配方式为参考, 对生猪养殖污水中的 TN、 NH_3-N 、COD、TP 和 pH 进行权重分配。在地下水及河流湖泊等地表水水质研究中, TN 的权重取 2。而针对生猪养殖污水的有关研究表明^[28]: TN 是畜禽养殖污水中重要的指标, 也是极易超标的指标之一, 因此本研究适当地对 TN 的权重进行了调整, COD、TN 和 NH_3-N 的权重分别为 4、3、3, 其他指标为 1。

除上述分析外, 污水处理工艺的稳定性也是需要考虑的因素, 不稳定的工艺必然导致出水水质异

常, 若将异常数据作为水质评价模型构建的基础, 即使数量很少, 也会对模型精度产生不容忽视的影响。

4 结论

生化处理模式下, 规模猪场处理后的养殖污水水质呈现季节性变化特征, 具体表现为春、夏季水质总体优于秋、冬季, 尤其是夏季水质最好。基于 EC 和 COD 构建的最小水质指数评价模型决定系数为 0.994, 通过该模型得到的水质等级与基于 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、COD、TN、TP 和 pH 共 5 个指标评价的等级一致程度可达 90% 以上。因此, 利用该模型能够较为准确、合理地评价处理后的生猪养殖污水水质。

5 参考文献

- [1] 武新梅, 周素茵, 徐爱俊. 生态治理模式下生猪养殖业污水智慧监管[J]. *浙江农林大学学报*, 2018, **35**(3): 543 – 551.
WU Xinmei, ZHOU Suyin, XU Aijun. Smart monitoring of hog sewage under ecological treatment mode [J]. *J Zhejiang A&F Univ*, 2018, **35**(3): 543 – 551.
- [2] 武新梅, 徐爱俊, 周素茵. 生猪养殖业污水排放智慧监管系统的设计与实现[J]. *农业工程学报*, 2018, **34**(2): 226 – 234.
WU Xinmei, XU Aijun, ZHOU Suyin. Design and implementation of smart supervisory system for sewage emission in swine breeding industry [J]. *Transac Chin Soc Agric Eng*, 2018, **34**(2): 226 – 234.
- [3] 钱晓雍, 王振旗, 沈根祥, 等. 华东地区典型畜禽养殖场重金属产污系数研究[J]. *农业环境科学学报*, 2020, **39**(1): 201 – 206.
QIAN Xiaoyong, WANG Zhenqi, SHEN Genxiang, et al. Pollutant generation coefficient of heavy metals from typical livestock and poultry farms in East China [J]. *J Agro-Environ Sci*, 2020, **39**(1): 201 – 206.
- [4] 石奥, 张建森, 王重庆, 等. 北京市规模化畜禽养殖场粪便和污水监测及承载力估算[J]. *家畜生态学报*, 2018, **39**(4): 63 – 67, 96.
SHI Ao, ZHANG Jianmiao, WANG Chongqing, et al. Monitoring and carrying capacity estimation of animal manure and wastewater in Beijing livestock farm [J]. *J Domest Anim Ecol*, 2018, **39**(4): 63 – 67, 96.
- [5] FANG Yunhai, ZHENG Tianyuan, ZHENG Xilai, et al. Assessment of the hydrodynamics role for groundwater quality using an integration of GIS, water quality index and multivariate statistical techniques[J/OL]. *J Environ Manage*, 2020, **273**: 111185 [2021-01-18]. doi: 10.1016/j.jenvman.2020.111185.
- [6] QU Xiao, CHEN Yushun, LIU Han, et al. A holistic assessment of water quality condition and spatiotemporal patterns in impounded lakes along the eastern route of China's South-to-North water diversion project[J/OL]. *Water Res*, 2020, **185**: 116275 [2021-01-18]. doi: 10.1016/j.watres.2020.116275.
- [7] NOROUZI H, MOGHADDAM A A. Groundwater quality assessment using random forest method based on groundwater quality indices (case study: Miandoab plain aquifer, NW of Iran) [J]. *Arabian J Geosci*, 2020, **13**(18): 81 – 103.
- [8] 方运海, 郑西来, 彭辉, 等. 基于模糊综合优化模型的地下水质量评价[J]. *地学前缘*, 2019, **26**(4): 301 – 306.
FANG Yunhai, ZHENG Xilai, PENG Hui, et al. Groundwater quality assessment based on optimization of fuzzy synthetic evaluation [J]. *Earth Sci Front*, 2019, **26**(4): 301 – 306.
- [9] 符东, 吴雪菲, 易珍言, 等. 沱江水质模糊综合评价及主要污染物的预测研究[J]. *农业环境科学学报*, 2020, **39**(12): 2844 – 2855.
FU Dong, WU Xuefei, YI Zhenyan, et al. Fuzzy comprehensive assessment of water quality and prediction of main pollutants in the Tuo River [J]. *J Agro-Environ Sci*, 2020, **39**(12): 2844 – 2855.
- [10] 赵军, 张祯宇, 谢哲宇, 等. 基于 BP 人工神经网络的闽江口水厂水质模拟[J]. *环境科学与技术*, 2020, **43**(增刊 1): 198 – 203.
ZHAO Jun, ZHANG Zhenyu, XIE Zheyu, et al. Water quality modeling for water works in the Minjiang River estuary based on BP neural network model [J]. *Environ Sci Technol*, 2020, **43**(suppl 1): 198 – 203.
- [11] 孔刚, 王全九, 黄强. 基于 BP 神经网络的北京昌平山前平原地下水水质评价[J]. *农业工程学报*, 2017, **33**(增刊 1): 150 – 156, 389.
KONG Gang, WANG Quanjiu, HUANG Qiang. Evaluation of groundwater quality in Changping piedmont plain of Beijing based on BP neural network [J]. *Transac Chin Soc Agric Eng*, 2017, **33**(suppl 1): 150 – 156, 389.
- [12] PATIL V B, PINTO S M, GOVINDARAJU T, et al. Multivariate statistics and water quality index (WQI) approach for

- geochemical assessment of groundwater quality: a case study of Kanavi Halla Sub-Basin, Belagavi, India [J]. *Environ Geochem Health*, 2020, **42**(9): 2667 – 2684.
- [13] NIHALANI S, MEERUTY A. Water quality index evaluation for major rivers in Gujarat[J/OL]. *Environ Sci Pollut Res Int*, 2020[2021-01-18]. doi: [10.1007/s11356-020-10509-5](https://doi.org/10.1007/s11356-020-10509-5).
- [14] KAMRAN Z, ELNAZ R. Determining spatial and temporal changes of surface water quality using principal component analysis [J]. *J Hydrol Reg Stud*, 2017, **13**: 1 – 10.
- [15] JESÚS C F. Comments to the use of water quality indices to verify the impact of Córdoba City (Argentina) on Suquia river [J]. *Water Res*, 2002, **36**(18): 4664 – 4666.
- [16] ŞENER Ş, ŞENER E, DAVRAZ A. Evaluation of water quality using water quality index (WQI) method and GIS in Aksu River (SW-Turkey) [J]. *Sci Total Environ*, 2017, **584/585**: 131 – 144.
- [17] KOÇER M A T, SEVGILI H. Parameters selection for water quality index in the assessment of the environmental impacts of land-based trout farms [J]. *Ecol Indic*, 2014, **36**: 672 – 681.
- [18] NONG Xizhi, SHAO Dongguo, ZHONG Hua, et al. Evaluation of water quality in the south-to-north water diversion project of China using the water quality index (WQI) method [J]. *Water Res*, 2020, **178**: 115781[2021-01-18]. doi: [10.1016/j.watres.2020.115781](https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.115781).
- [19] 周昊, 徐爱俊, 周素茵. 生猪养殖污水水质指标相关性分析与建模[J]. *农业工程学报*, 2020, **36**(1): 200 – 207.
ZHOU Hao, XU Aijun, ZHOU Suyin. Correlation analysis and modeling of water quality indexes for swine breeding wastewater [J]. *Transac Chin Soc Agric Eng*, 2020, **36**(1): 200 – 207.
- [20] 仇天雷. 循环水养殖废水生物脱氮技术及其影响因素研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2016.
QIU Tianlei. *Performance of the Biological Nitrifying and Denitrifying Technology and Its Influencing Factors in the Recirculating Aquaculture System*[D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2016.
- [21] 何佳敏, 孟佳, 张永, 等. 温度降低对 UMSR 处理高氨氮低碳氮比养猪废水效能的影响[J]. *化工学报*, 2017, **68**(5): 2074 – 2080.
HE Jiamin, MENG Jia, ZHANG Yong, et al. Effect of lower temperature on performance of upflow microaerobic sludge reactor treating manure-free piggery wastewater with high $\text{NH}_4\text{-N}$ and low COD/TN ratio [J]. *CIESC J*, 2017, **68**(5): 2074 – 2080.
- [22] 李海青, 刘德启, 潘攀, 等. 温度、基质对 SBR 去除氨氮与总氮的影响[J]. *环境工程学报*, 2010, **4**(9): 1 – 4.
LI Haiqing, LIU Deqi, PAN Pan, et al. Effect of temperature, organic substrate on ammonia and total nitrogen simultaneous removal in sequencing batch reactor [J]. *Chin J Environ Eng*, 2010, **4**(9): 1 – 4.
- [23] 姚俊芹, 刘志辉, 周少奇. 温度变化对厌氧氨氧化反应的影响[J]. *环境工程学报*, 2013, **7**(10): 3993 – 3996.
YAO Junqin, LIU Zhihui, ZHOU Shaoqi. Influence of temperature change on anaerobic ammonia oxidation reaction [J]. *Chin J Environ Eng*, 2013, **7**(10): 3993 – 3996.
- [24] 陆祎韵. 姑苏区污水厂出水水质变化及影响因素研究[D]. 苏州: 苏州科技大学, 2016.
LU Yiyun. *The Characteristics and Influence Factors on Effluent Quality of Wastewater Treatment Plants in Gusu Area*[D]. Suzhou: Suzhou University of Science and Technology, 2016.
- [25] WANG Zhenwei, ZUO Wei, ZHANG Jun, et al. Effect of illumination time on water treatment efficiency of symbiotic bacteria and algae [J]. *Sci Discovery*, 2017, **5**(4): 301 – 306.
- [26] 张玉君, 李冬, 李帅, 等. 间歇梯度曝气的生活污水好氧颗粒污泥脱氮除磷[J]. *环境科学*, 2020, **41**(8): 3707 – 3714.
ZHANG Yujun, LI Dong, LI Shuai, et al. Nitrogen and phosphorus removal from domestic sewage aerobic granular sludge under intermittent gradient aeration [J]. *Environ Sci*, 2020, **41**(8): 3707 – 3714.
- [27] 王晓莲, 王淑莹, 马勇, 等. A^2O 工艺中反硝化除磷及过量曝气对生物除磷的影响[J]. *化工学报*, 2005, **56**(8): 1565 – 1570.
WANG Xiaolian, WANG Shuying, MA Yong, et al. Anoxic biological phosphorus removal and effect of excessive aeration on biological phosphorus removal in A^2O process [J]. *J Chem Ind Eng*, 2005, **56**(8): 1565 – 1570.
- [28] 陈玉东, 周慧平, 庄犁, 等. 苕河流域生猪养殖产污特征[J]. *生态与农村环境学报*, 2017, **33**(10): 943 – 949.
CHEN Yudong, ZHOU Huiping, ZHUANG Li, et al. Pollution production coefficient of pig farms typical of Tiaoxi Basin [J]. *J Ecol Rural Environ*, 2017, **33**(10): 943 – 949.