环境工程学报
CHINESE JOURNAL OF ENVIROMENTAL ENGINEERING
第 18 卷 第 5 期 2024 年 5 月
Vol. 18, No.5 May 2024
http://www.cjee.ac.cn E-mail: cjee@rcees.ac.cn (010) 62941074
DOI 10.12030/j.cjee.202308095 中图分类号 X824 文献标识码 A

农村黑臭水体综合评估方法

彭佳华[1,2], 鹿晓菲[1], 史斌[2], 蔡文倩[3], 胡明[4], 王军强[3,✉]

1. 沈阳建筑大学市政与环境工程学院，沈阳 110168；2. 中国科学院生态环境研究中心，北京 100085；3. 生态环境部土壤与农业农村生态环境监管技术中心，北京 100012；4. 中国地质调查局自然资源综合调查指挥中心，北京 100055

摘　要　农村黑臭水体的排查是美丽乡村建设的重要环节。以河南省周口市 3 个县的 141 个农村黑臭水体为评估对象，运用相关性分析、多元回归分析以及识别结果敏感性分析等方法，探索并建立了一种新的农村黑臭水体评估方法。结果表明，相较于传统的指南法，新方法在黑臭水体的判别上更为精确。指南法在一般水体的评估上适用，但在评价黑臭程度的水体时，各评价指标的分歧较大，真阳性率较低。新方法考虑了农村黑臭水体的形成原因，将指南法中的溶解氧 (DO) 替换为总磷 (TP)，并提出了一种“感官+NH_3-N+TP”融合的综合评价方法，更符合农村黑臭水体的实际情况。新方法的黑臭水体评估准确率 (AUC) 为 0.86，显著高于指南法的 0.71。新方法快速、简洁且贴近实际，为我国广大农村地区黑臭水体的识别和下一步的治理提供了可靠的依据。

关键词　农村黑臭水体；综合评价；多元回归分析；灵敏度；受试者工作特征曲线

党的二十大报告明确提出：要全面推进乡村振兴，坚持农业农村优先发展。改善农村人居环境是党中央从战略和全局高度做出的重大决策部署，是乡村振兴战略实施的重要任务[1]。随着乡村振兴战略的实施和美丽乡村建设进程加速推进，对于农村污染治理的要求也在不断提高。农村在我国社会经济结构中占有重要的地位，但在环境治理方面，农村远落后于城镇，其中以水体黑臭现象尤为突出。2018 年中国农村生活污水产生量估计为 141×10^8 m^3，但只有约 25.1% 得到了适当处理，远低于城市污水近 90% 的处理率[2-3]。

水体黑臭是水体有机污染的一种极端现象，是对水体极端污染状态的一种描述，泛指呈黑色或泛黑色，散发出令人感觉不愉快臭味甚至作呕的水体[4]。水体黑臭产生的 H_2S 等刺鼻挥发性有机硫化物对人体也有很大伤害[5]，长期受其影响可损害人呼吸系统和神经系统[6]。农村黑臭水体主要来源于种植业、畜禽养殖业、水产养殖业和生活污水排放，其污染来源复杂、分布广泛和水体底数大[7-8]，这也决定了农村黑臭水体的评估指标体系不能照搬城市黑臭水体基准，需要开展农村黑臭水体认定的精确评估基准研究。

目前，我国黑臭水体评价体系分为 3 大类，有物理评价法、化学评价法和生物评价法。物理评价法主要是感官评价，但由于人的视觉和嗅觉受主观影响较大，此种表观划分方法并没有形成统一基准。化学评价法主要包括单因子评价法[9-10]、综合指数评价法[11-12]、模型法[13]、指南法等[14]，由于应用的黑臭水体判别式各异，选择的关键指标也不尽相同，从而限制了此类方法的推广。生物评价方法是基于微生物驱动的生物化学过程，将水生生物指数作为黑臭水体评价指标[15]。但是由于生物指标测试和评估的技术难度较大，也一定程度上限制了其推广应用。近年来，已有学者开展了普适性强、精确度高的综合评估新方法的探索。李佳音等[16] 选择选择 BOD_5、COD_{Mn}、TP、NH_3-N、DO 为评价水体黑臭的关键指标，提出了一套以单因子水质标识为基础，结合有机污染指标和富营养化指标的综合评价指数法。但是，有研究指出正常水体在黑臭过程中会出现黑臭程度先变轻后快速黑臭化的过程，此过程中 DO 的浓度呈现持续下降的趋势[17]。而水体中 TP 浓度由于好氧条件下积磷细菌和硝化细菌的合成代谢，以及厌氧条件下的沉积物的磷释放等过程，表现出比 DO 浓度与黑臭水体有更强的相关性[2]。王莉等[18] 提出了一种“感官+NH_3-N”的评估方法，一定程度上规避了

收稿日期：2023-08-25；**录用日期**：2023-12-20

基金项目：国家自然科学基金资助项目 (42107514)；辽宁省自然科学基金资助项目 (2021-BS-171)

第一作者：彭佳华 (1999—)，男，硕士研究生，1647735163@qq.com；✉**通信作者**：王军强 (1993—)，男，硕士，工程师，jqwang17@163.com

单一物理评价方法主观性强、多数化学评估方法地域性强且计算过程复杂的问题。虽然上述综合指数评价方法在实际应用中较单一指标相比能够描述现状，但是往往出现全部指标都符合临界值要求，仍无法准确给出研究水体是否黑臭，可靠性有待进一步提升。根据《第二次全国污染源普查公报》显示，农村地区的水污染排放源主要来源于种植业 (排放 TP 约 7.62×10^4 t) 、畜禽养殖 (排放 TP 约 11.97×10^4 t) 、水产养殖 (排放 TP 约 1.61×10^4 t) 、农村生活污水 (排放 TP 约 3.69×10^4 t) ，远远高于城镇生活源污染物排放量 (排放 TP 约 5.85×10^4 t) ，说明在农村地区水污染评估过程中 TP 对水体的贡献不能被忽视[18]。同时，另一方面水体中营养物质浓度 (TP) 持续较高会进一步导致藻类大量生长引起水体富营养化，测定水体中 TP 含量的变化不仅可以评估黑臭水体，而且也是预测评估水体富营养化的主要依据[19]。

基于现阶段的评价方法以及农村黑臭水体实际情况，作者提出了一种融合“感官+NH_3-N+TP”的综合评价方法，该方法能避免单一物理评价法主观性强，现有综合评价法地域性较强、难以贴合农村实际情况等问题，更具有普适性。该方法可便捷地评价农村黑臭水体的黑臭程度，从而根据不同地区的实际情况，判断出治理的难易程度，决定治理的先后顺序，找到适用的技术手段，可为我国农村黑臭水体的识别和后续治理提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区域及样品采集

周口市位于豫东平原，河南省东南部，豫、皖交界处，属于中原经济区与合肥都市圈、南京都市圈的重要交通要道，总面积 11 959 km^2。选取了淮阳县、郸城县和沈丘县 3 个县开展农村黑臭水体评估工作。针对水体中底泥有机污染负荷较高、严重影响水体生态景观和生态环境、水体流动性较差和水动力学条件不足等问题，采集了 141 个政府积极性较高、村民反映较为强烈的封闭性水体进行评估，其中沈丘取样点 22 个、郸城取样点 74 个、淮阳取样点 45 个 (图 1)。水体样品的采集按照《水质采样技术指导》(HJ494-2009) 中方法进行。采水样之前，用水样冲洗采样瓶 2、3 次后，在距岸边 1~2 m 处将采水瓶浸入水面下 20~50 cm 处采样。

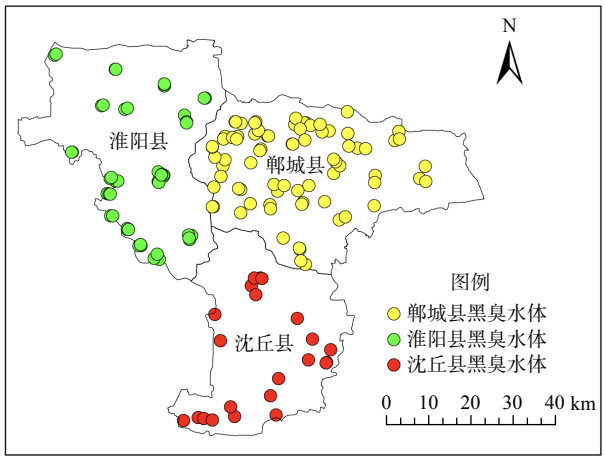


图 1 黑臭水体采样点位置分布示意图

Fig. 1 Schematic map of sampling point locations in black and odorous water bodies

1.2 监测与分析方法

DO、透明度、pH 等指标采用哈希 SL1000 多参数便携式水质分析仪进行现场测定。NH_3-N、TN、COD、TP 等指标在实验室内测定，其中 TP 采用快速消解测定仪检测，COD 采用重铬酸盐法 (HJ 828-2017) 测定，NH_3-N 采用水杨酸分光光度法 (HJ 536-2009) 检测，TN 采用碱性过硫酸钾紫外分光光度法 (HJ 636-2012) 。

1.3 评价方法

1) 采用 Pearson 系数定量描述水质指标中线性关系的密切程度和相关方向，其计算公式如式 (1) 所示[20]。

$$r=\frac{\sum_{i=1}^{n}(X_i-\bar{X})(Y_i-\bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(X_i-\bar{X})^2}\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(Y_i-\bar{Y})^2}} \tag{1}$$

式中：X_i 和 Y_i 分别为第 i 个样本元素 X 和 Y 的检测值，$\bar{X}$和$\bar{Y}$分别为所有样本元素 X 和 Y 的平均检测值，n 为统计样本数。

检验时，若检验的 P>0.01，不拒绝原假设，即认为两种元素含量之间无相关性。若检验的 $P\leqslant0.01$，拒绝零假设，接受备择假设，即认为 2 种元素含量间的相关性差异有统计学意义，相关系数与相关程度一般划

分为 0.8~1.0 极强相关；0.6~0.8 强相关；0.4~0.6 中等程度相关；0.2~0.4 弱相关；0.0~0.2 极弱相关或无相关[21-22]。

多元回归分析 (Multiple Regression Analysis) 是指在相关变量中将一个变量视为因变量，其他一个或多个变量视为自变量，建立多个变量之间线性或非线性数学模型数量关系式并利用样本数据进行分析的统计分析方法，其中一般多元回归分析模型如式 (2) 所示。

$$y=\beta_0+\beta_1 x_1+\beta_2 x_2+\ldots+\beta_m x_m+\varepsilon \tag{2}$$

式中：x_m 和 β_m 为自变量，y 为因变量，ε 为随机误差项，是随机变量。

2) 采用受试者工作特征曲线 (receiver operating characteristic curve，简称 ROC 曲线) 来评估不同评估方法预测的准确率，ROC 曲线是横坐标为假阳性率，越接近于坐标圆点准确率越高；纵坐标为真阳性率，Y 轴越大代表准确率越好。其横纵坐标计算公式如式 (3)~式 (4) 所示。

$$FPR=\frac{FP}{TN+FP} \tag{3}$$

$$TPR=\frac{TP}{TP+FN} \tag{4}$$

式中：TP 为真正例，即预测值与真实值相同，而且都是正例；FP 为假正例，即预测值与真实值相反，预测值为 P；FN 为假负例，即预测值与真实值相反，预测值为 N；TN 为真负例，即预测值与真实值相同，而且都是反例。

ROC 曲线下面积 (AUC) 的大小可作为诊断试验准确度的衡量指标，面积在 0.5~0.7 之间时诊断价值较低，在 0.7~0.9 之间时诊断价值中等，在 0.9 以上时诊断价值较高[23]。

2　结果与讨论

2.1　不同黑臭程度下各指标的监测结果

通过对研究区域 141 个水体进行检测分析发现，DO 分布在 0.13~9 mg·L^{-1} 之间；透明度分布在 5~100 cm 之间；NH_3-N 浓度分布在 0.2~89.2 mg·L^{-1} 之间。将样本中按照指南中分级基准进行分级，分级结果如表 1。

表 1　不同水质指标为基准的水体数量及其他指标的真阳性率

Table 1　The number of water bodies based on different water quality parameters and the true positive rates of other parameters

项目	重度黑臭	轻度黑臭	一般水体
透明度/个	6	47	88
DO真阳性率	0	14.29%	94.32%
NH_3-N真阳性率	22.22%	8.57%	88.64%
DO/个	1	19	121
透明度真阳性率	0	21.05%	66.12%
NH_3-N真阳性率	100.00%	10.53%	93.39%
NH_3-N/个	19	6	116
DO真阳性率	5.26%	33.33%	96.55%
透明度真阳性率	21.05%	50.00%	72.41%

按照评估指南基准，选择不同的评估指标得到的评估等级差距较大。当以透明度为分类依据时，DO 在轻度黑臭水体中的真阳性率为 14.29%，在一般水体在中的真阳性率为 94.32%；NH_3-N 在轻度黑臭水体中的真阳性率为 8.57%，在一般水体在中的真阳性率为 88.64%。黑臭水体中 DO 和 NH_3-N 的真阳性率均远远小于一般水体中的真阳性率。同样条件下，当分别以 NH_3-N 和 DO 为黑臭水体的评价基准时也可以得到另外两类指标的真阳性率均表现为黑臭水体中的真阳性率显著低于一般水体 (当以 DO 为基准时，NH_3-N 在轻度黑臭水体中的真阳性率为 10.53%，在一般水体在中的真阳性率为 94.32%；透明度在轻度黑臭水体中的真阳性率为 21.05%，在一般水体在中的真阳性率为 66.12%；当以 NH_3-N 为基准时，DO 在重度黑臭水体中的真阳性率为 5.26%，DO 在一般水体在中的真阳性率为 96.55%；透明度在重度黑臭水体中的真阳性率为 21.05%，在一般水体在中的真阳性率为 72.41%) 。说明采用指南法评估水体污染状况时，在污染物浓度较低的一般水体中各个指标之间的相关程度更高，基于不同指标进行分类的结果相对一致，但随着污染物浓度的升高，在黑臭水体中各个指标并没有呈现相同的变化趋势，各个指标的分类结果存在较大的分歧。因此，需要深入挖掘不同评估指标之间的相关性，减少评估结果的分歧，构建新的评估指标体系，更合理的评估黑臭水体。

2.2 黑臭水体评估新方法的构建

河南作为农业大省，农村的封闭性的水体不可避免的会有大量农村生活、畜禽养殖、农业种植的污水排入，如水产养殖中投入水体中的饵料只有 50% 会保留在养殖动物体内，其余会进入养殖水体，当水体开始处于缺氧条件时，水体中大量厌氧微生物开始活跃，利用水体中有机物，加快水体中金属硫化物、硫化氢(H_2S) 等物质的产生，导致水体黑臭[24]。在分析过程中以 DO 作为依据对水体进行分类，发现轻度黑臭水体共有 19 个。然而，在检测到的 19 个轻度黑臭水体中，超过 60% 的水体中的 NH_3-N 浓度已达到重度黑臭水体的标准。其中，NH_3-N 浓度最高达 87.9 mg·L^{-1}，远超过《黑臭水体判别指南》中以 NH_3-N 作为评判标准时的重度黑臭水体限值。同样地，NH_3-N 为分类依据对水体进行分类后，我们发现重度黑臭水体有 19 个，但其中只有不足 10% 的水体中的 DO 浓度达到了重度黑臭水体的标准，而在大多数黑臭水体中，DO 浓度尚未达到重度黑臭水体的标准。因此，我们可以推断，DO 浓度超标可能并非导致水体黑臭的主要原因[25]。

在进行水质分析的过程中，针对不同黑臭程度的样本，我们发现主要水质指标中 NH_3-N 与 TP 的浓度变化最为显著 (见图 2) 。通过对不同黑臭程度下 NH_3-N 与 TP 的相关性分析，发现在不同黑臭程度下 NH_3-N 和 TP 总是呈显著正相关，并且随着黑臭程度的增加，在 p<0.01 水平上，其相关性系数也在逐渐增大 (一般水体中 r=0.692**，轻度黑臭中 r=0.725**，重度黑臭中 r=0.855**) 。通过局部灵敏度分析结合 ROC 曲线的方法 (见图 3)，对于指南法中给出的评价指标及常见的水质指标是否是造成水体的黑臭关键因素进行分析发现，化学水质指标中，NH_3-N 和 TP 对于水体是否发生黑臭的解释率均超过 0.7 (TP 的曲线下面积为 0.798、NH_3-N 的曲线下面积为 0.738)。而且水体中的 NH_3-N 与 TP 的含量的随着黑臭情况变化的增加幅度远远超过其他指标，所以将 NH_3-N 和 TP 作为评价周口市农村黑臭水体的重要指标，并且采用“感官+NH_3-N+TP”的组合作为农村黑臭水体的新评价指标基准。

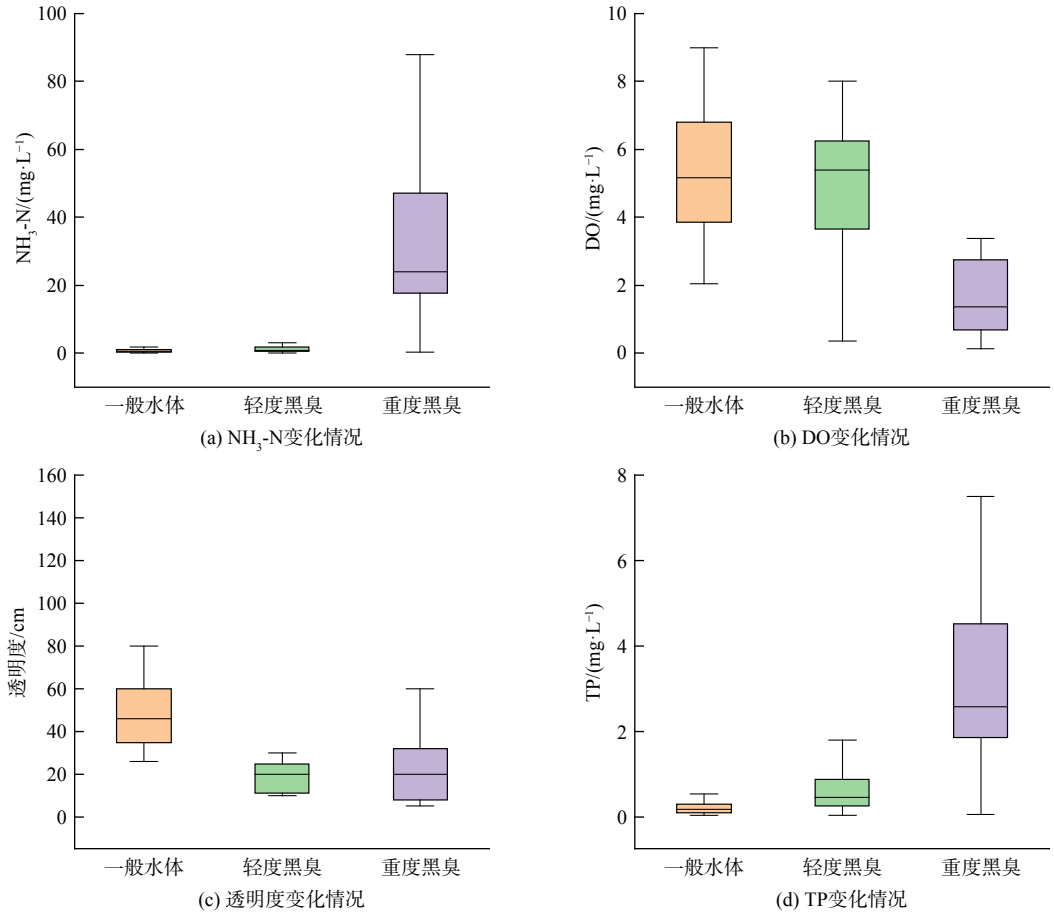


图 2 不同黑臭程度下样品主要水质指标变化情况

Fig. 2 Changes of main water quality parameters of samples under different degrees of blackness and odor

考虑到农村自身条件的限制，应尽可能减少监测因子的数量，同时保证分级结果的准确性，所以新的评价方法以 NH_3-N 和 TP 作为水质评价指标，通过分析 NH_3-N 与 TP、DO 与 TP 的变化关系得到其分布散点图 (图 4)，从图中可以看出 TP 浓度与 DO 呈负相关关系 (ln 函数)，而与 NH_3-N 浓度呈正相关关系 (线性函数)，采用多元非线性回归技术对其浓度拟合，取误差最小时即拟合度最高时的参数得到拟合方程如式 (5) 所示。

$$C(TP) = 0.122 + 0.039 \cdot C(\mathrm{NH_3} - \mathrm{N}) - 0.32 \cdot \ln C(DO) \tag{5}$$

式中：$C(TP)$为计算得到的 TP 浓度，mg·L^{-1}；$C(NH_3 - N)$为指南法中不同分级基准的 NH_3-N 浓度，mg·L^{-1}；$C(DO)$为指南法中不同分级基准的 DO 浓度，mg·L^{-1}。

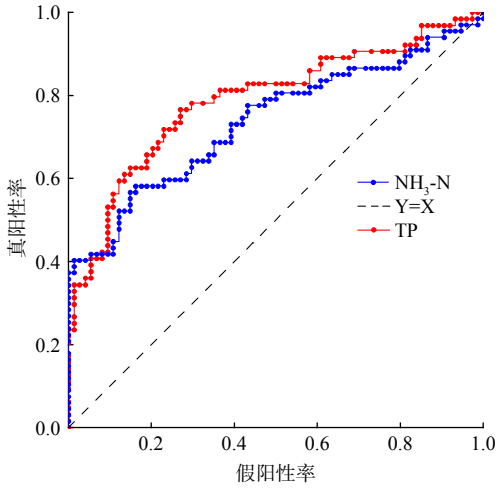
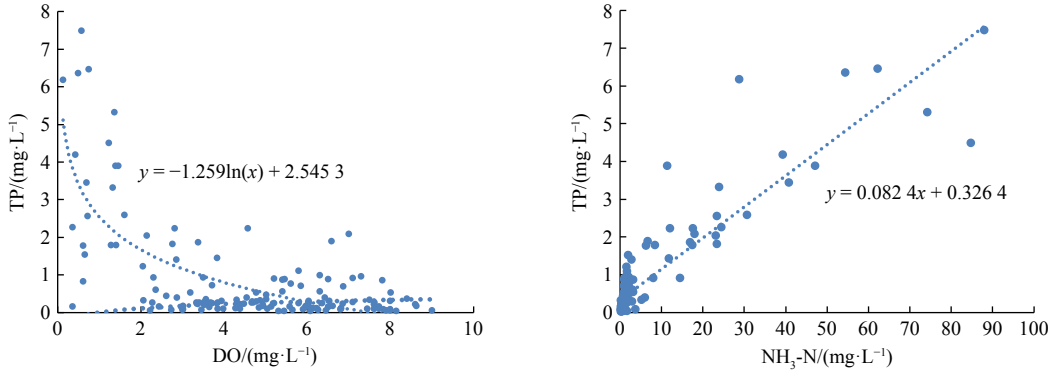


图 3　不同水质指标对黑臭水体判定结果敏感性影响 ROC 曲线

Fig. 3　ROC curves of the sensitivity of different water quality parameters for the condition judgment of the black and odorous water body



(a) DO与TP分布散点图　　(b) NH_3-N与TP分布散点图

图 4　DO 与 TP、NH_3-N 与 TP 分布散点图

Fig. 4　Scatter plots of DO-TP and NH_3-N-TP distributions

2.3　多种评估方法评估效果评价

采用新的评价方法对 141 个水体重新进行黑臭程度的评价，其结果如下：一般水体个数 40 处、轻度黑臭 76 处、重度黑臭 25 处。对比实际情况来看，虽然分类的准确率不能达到 100%，但是其分类的准确程度已经大大提高。结合河南省农村实际情况，同时也为保证分级的准确性，对比以下 3 种评价方法：“指南法”、“透明度+NH_3-N”、“感官+NH_3-N+TP”，并结合 ROC 曲线对其准确率进行了比较，其比较结果见表 2。

通过表 2 可以发现“感官+NH_3-N+TP”的评价方法准确率远远高于其他 2 种评价方法，说明以“感官+NH_3-N+TP”的评价方法较为适合农村黑臭水体评估。农村地区化肥和农业废弃物以及含磷洗涤剂的使用造成黑臭水体中磷元素普遍超标，过量的磷是引发水体黑臭的主要原因[26]。所以本研究在提出农村黑臭水体综合评估方法时，引入 TP 为指标之一，不仅减少了其余水质指标的检测，缓解了

表 2　不同评估方法评估效果比较

Table 2　Comparison of evaluation effects under different evaluation methods

评价方法	一般水体/个	轻度黑臭/个	重度黑臭/个	准确率/AUC
指南法	74	45	22	0.71
透明度+NH_3-N	84	38	19	0.74
感官+NH_3-N+TP	40	76	25	0.86

对于农村水体监测的经济压力节约了农村水体检测的经济、人工、时间等成本。

以 TP 作为黑臭水体的评价依据，不仅能够更好的解释水体发生黑臭的原因也为下一步黑臭水体的治理指明了方向。有研究发现当水体中的 TP 浓度减少后不仅改善了黑臭水体的水质也降低了再次发生黑臭的风险[26]。虽然 TP 在测定方面的难度略高于 DO，但是随着分析技术的进步 (如 HACH 公司开发的钼蓝法、国内部分省市采用的连续流动-钼酸铵分光光度法、快速室温云点萃取 (RT-CPE) 等) 能够实现在 10 分钟内进行精确的测定，能够实现对水体中 TP 的连续自动监测[27-28]。在对农村水体评价的标准提出了更高的要求的同时，也推动了农村黑臭水体评价方法的进步。

3 结论

1) 采用评估指南标准，选择不同的评估指标得到评估等级，发现以不同指标为基准时，另外两类指标的黑臭水体真阳性率显著低于一般水体，说明指南法更适用于一般水体，而对黑臭水体评价各个指标的分歧更大，真阳性率较低。

2) 通过分析 NH_3-N、DO 与 TP 的变化关系，结合多元非线性回归技术得到 TP 的取值范围并得到新的评价标准即对于一般水体：NH_3-N 浓度小于 8 mg·L^{-1}，TP 浓度小于 0.2 mg·L^{-1} 时为一般水体；感官轻度且 NH_3-N 浓度为 8~15 mg·L^{-1} 或 NH_3-N 浓度小于 8 mg·L^{-1}，且 TP 浓度为 0.2~1 mg·L^{-1} 为轻度黑臭，感官重度且 NH_3-N 浓度大于 15 mg·L^{-1} 或 NH_3-N 浓度小于 8 mg·L^{-1}，且 TP 浓度大于 1 mg·L^{-1} 为重度黑臭。

3) 通过三种方法 (“指南法”、“透明度+NH_3-N”、“感官+NH_3-N+TP”) 的准确度进行对比发现，“感官+NH_3-N+TP”的评价方法准确率远远高于其他两种评价方法，说明以“感官+NH_3-N+TP”的评价方法较为适合周口市农村黑臭水体，且此方法与其他方法相比减少了其余水质指标的检测的同时，也缓解了对于农村水体监测的经济压力。

参 考 文 献

[1] 中共中央办公厅，国务院办公厅印发《农村人居环境整治提升五年行动方案 (2021—2025 年)》[EB/OL]. [2021-12-20].https://www.gov.cn/gongbao/content/2021/content_5661975.htm.

[2] LIU M, LI T, WANG Z, et al. Effect of aeration on water quality and sediment humus in rural black-odorous water[J]. Journal of Environmental Management, 2022, 320: 115867.

[3] HUANG Y, LI P, LI H, et al. To centralize or to decentralize? A systematic framework for optimizing rural wastewater treatment planning[J]. Journal of Environmental Management, 2021, 300: 113673.

[4] 吕保玉, 白海强. 黑臭水体评价指标及评价方法[J]. 化学工程师, 2021, 35(10): 56-59.

[5] 徐敏, 姚瑞华, 宋玲玲, 等. 我国城市水体黑臭治理的基本思路研究[J]. 中国环境管理, 2015, 7(2): 74-78.

[6] 卢娟丽. VOCs 废气来源、危害及处理技术研究[J]. 环境与发展, 2018, 30(3): 97-116.

[7] 刘晓玲, 徐瑶瑶, 宋晨, 等. 城市黑臭水体治理技术及措施分析[J]. 环境工程学报, 2019, 13(3): 519-529.

[8] 生态环境部土壤生态环境司负责同志就《关于推进农村黑臭水体治理工作的指导意见》有关问题进行解读[J]. 城市道桥与防洪, 2019(12): 219-221.

[9] 俞欣, 陈天安. 河道黑臭污染简易评价方法研究[J]. 环境科学与管理, 2015, 40(3): 176-179.

[10] 戴树桂, 庄源益, 金朝晖, 等. 模拟污染指标水体统计分析[J]. 环境科学学报, 1994(2): 144-151.

[11] 王旭, 王永刚, 孙长虹, 等. 城市黑臭水体形成机理与评价方法研究进展[J]. 应用生态学报, 2016, 27(4): 1331-1340.

[12] 胡培, 赵吉国. 江门市黑臭水体水质现状及污染特征分析[J]. 广东水利水电, 2017(5): 20-24.

[13] 郝晓明, 胡湛波, 刘成, 等. 南宁市竹排冲河道水体黑臭评价模型建立研究[J]. 华东师范大学学报 (自然科学版), 2011(1): 163-171.

[14] 生态环境部. 生态环境部办公厅关于印发《农村黑臭水体治理工作指南 (试行)》的通知[EB/OL]. [2019-11-27].https://www.h2o-china.com.

[15] 任宏伟, 田彦芳, 路金霞, 等. 农村黑臭水体沉积物细菌群落结构特征[J]. 环境科学, 2023, 44(11): 6205-6214.

[16] 李佳音, 李伟芳, 孟洁, 等. 天津市中心城区黑臭河流评价及判定标准[J]. 中国给水排水, 2017, 33(19): 90-95.

[17] FENG Z, FAN C, HUANG W, et al. Microorganisms and typical organic matter responsible for lacustrine "black bloom"[J]. Science of the Total Environment, 2014, 470-471: 1-8.

[18] 王莉, 刘萌硕, 李亭亭, 等. 农村黑臭水体评价方法研究[J]. 中国给水排水, 2023, 39(3): 94-99.

[19] ZHANG D, YANG H, LAN S, et al. Evolution of urban black and odorous water: The characteristics of microbial community and driving-factors[J]. Journal of Environmental Sciences, 2022, 112: 94-105.

[20] 王珊, 苏亮, 刘远立, 等. 皮尔森和偏相关系数模型在稻谷重金属污染程度研究中应用[J]. 中国食品卫生杂志, 2020, 32(6): 631-635.

[21] 许正厚. 城市商住混合街区格局对微气候影响机理研究——以首都功能核心区为例[D]. 北京: 北方工业大学, 2022.

[22] SOCKLOFF A L. Statistical power analysis for the behavioral sciences: (revised edition)[J]. Evaluation and Program Planning, 1978, 1(3): 249-250.

[23] 刘月, 王宁涛, 周超, 等. 基于 ROC 曲线与确定性系数法集成模型的三峡库区奉节县滑坡易发性评价[J]. 安全与环境工程, 2020, 27(4): 61-70.

[24] BIN S, PENG W, JIPING J, et al. Applying high-frequency surrogate measurements and a wavelet-ANN model to provide early warnings of rapid surface

water quality anomalies[J]. Science of the Total Environment, 2018, 610-611.
[25] 柳超, 钱彬杰, 王莉元, 等. 城市河流黑臭水体综合评价体系的建立及应用[J]. 中国给水排水, 2018, 34(11): 73-77.
[26] 郝晓地, 申展, 李季, 等. 国际上主要污水磷回收技术的应用进展及与之相关的政策措施[J]. 环境工程学报, 2022, 16(11): 3507-3516.
[27] AFKHAMI A, NOROOZ-ASL R. Cloud point extraction for the spectrophotometric determination of phosphorus(V) in water samples[J]. Journal of Hazardous Materials, 2009, 167(1): 752-755.
[28] SNIGUR D, CHEBOTAREV A, BULAT K, et al. Fast room temperature cloud point extraction procedure for spectrophotometric determination of phosphate in water samples[J]. Analytical Biochemistry, 2020, 597: 113671.

(责任编辑: 金曙光)

Research on the comprehensive assessment method for rural black and odorous water bodies

PENG Jiahua[1,2], LU Xiaofei[1], SHI Bin[2], CAI Wenqian[3], HU Ming[4], WANG Junqiang[3,*]

1. School of Municipal and Environmental Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang 110168, China; 2. Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China; 3. Technical Centre for Soil, Agricultural and Rural Ecology and Environment, Ministry of Ecology and Environment, Beijing 100012, China; 4. Command Center of Natural Resources Comprehensive Survey, China Geological Survey, Beijing 100055, China
*Corresponding author, E-mail: jqwang17@163.com

Abstract The investigation of black and odorous water bodies in rural areas is a crucial aspect of beautiful rural construction. Evaluating 141 black and odorous water bodies in three counties of Zhoukou City, Henan Province, a new assessment method for rural black and odorous water bodies was established using correlation analysis, multiple regression analysis, and sensitivity analysis methods. Compared to the traditional guideline-based method, this new method showed more precise performance in the judgment of black and odorous water bodies. Although the guideline-based method was more suitable for general water bodies, there was a larger divergence among the evaluation indicators in evaluating the water bodies with varying degrees of foul smell, resulting in a lower true positive rate. The new method took into account the causes of black and odorous water bodies in rural areas, replaced dissolved oxygen (DO) with total phosphorus (TP) compared to the guideline-based method, and proposed a comprehensive evaluation method considering sensory, NH_3-N and TP, which was more in line with the actual situation of rural black and odorous water bodies. The accuracy rate (AUC) value by the new method for evaluating black and odorous water bodies was 0.86, which was significantly higher than the AUC values of 0.71 by the guideline-based method. The new method was fast, concise, and practical, which can provide a reliable basis for the identification and subsequent treatment of black and odorous water bodies in rural areas of China.

Keywords rural black and odorous water bodies; comprehensive evaluation; multiple regression analysis; sensitivity; receiver operating characteristic curve