

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2023.03.014

农村黑臭水体评价方法研究

王莉¹, 刘萌硕¹, 李亭亭¹, 彭赵旭², 李洁³, 刘驰³

(1. 郑州大学 生态与环境学院, 河南 郑州 450001; 2. 郑州大学 水利科学与工程学院, 河南 郑州 450001; 3. 河南省环境保护科学研究院, 河南 郑州 450001)

摘要: 针对农村黑臭水体监测评价这一热点展开研究,通过对河南省农村地区黑臭水体进行采样分析,建立了适合农村的黑臭水体评价方法。结果表明,感官+监测因子的评价结果与城市黑臭水体分级标准评价结果的吻合度为:感官+NH₃-N(88.8%)>感官+ORP(83.8%)>感官+DO(70.0%)>仅凭感官(65.0%),NH₃-N作为最佳评价因子,与黑臭水体的形成关系密切。感官+NH₃-N评价法具有经济、快速、高效的特点,适用于农村黑臭水体,对我国广大农村地区黑臭水体的识别及治理具有重要意义。

关键词: 农村黑臭水体; 评价方法; 感官评价; 氨氮; 溶解氧

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2023)03-0094-06

Evaluation Methods of Black and Odorous Water in Rural Area

WANG Li¹, LIU Meng-shuo¹, LI Ting-ting¹, PENG Zhao-xu², LI Jie³, LIU Chi³

(1. School of Ecology and Environment, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China;

2. School of Water Science and Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China;

3. Henan Academy of Environmental Protection Sciences, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: The hot spot of monitoring and evaluation of black and odorous water in rural area was investigated. A method suitable for black and odorous water evaluation in rural area was established by sampling and analyzing the black and odorous water in rural area of Henan Province. The goodness of fit between the sensory and monitoring factors evaluation result and the result evaluated by urban black and odorous water classification standard in descending order was as follows: sensory index and NH₃-N (88.8%)> sensory index and ORP (83.8%)> sensory index and DO (70.0%)> sensory index alone (65.0%), and NH₃-N (the best evaluation factor) was closely related to the formation of black and odorous water. The sensory index and NH₃-N evaluation method is economical, rapid and efficient, which is suitable for rural black and odorous water evaluation, and has great significance for the identification and treatment of black and odorous water in rural area of China.

Key words: black and odorous water in rural area; evaluation method; sensory evaluation; ammonia nitrogen; dissolved oxygen

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2015ZX07204-002-05); 国家自然科学基金资助联合项目(U1704125)

通信作者: 王莉 E-mail: xiawangli@zzu.edu.cn

水环境污染极其严重时会发生水体黑臭现象,“致黑”主要是因为Fe、Mn在缺氧或厌氧条件下被还原成FeS、MnS等黑色物质,“致臭”主要是因为随着有机物的分解,产生的H₂S和挥发性有机硫化物逸出水面进入大气^[1]。水污染很大程度上制约了农村的生态化可持续发展,是农村地区主要的环境问题^[2-3]。农村黑臭水体作为环境保护与农村建设发展不平衡的产物,也是我国当下生态环境保护工作的重点之一,其主要污染源有生活污水、农业种植、工业废水、畜禽养殖和水产养殖。

水体黑臭成因比较复杂,形成过程中受多个因素影响,因此有效评价水体的黑臭程度尤为重要。常用评价方法有物理评价法、化学评价法和生物评价法。物理评价法主要是感官评价,化学评价法主要包括黑臭指数法、综合评价法、模型法、指南法等,但是上述方法大多普适性较差^[4]。目前,对于黑臭水体的研究主要集中在城市黑臭水体形成机制^[5-6]、黑臭水体综合治理技术^[7-8]等方面,缺乏对于农村黑臭水体的相关研究,特别是尚没有人关注农村地区黑臭水体评价时监测因子的选择问题;而且黑臭水体水质监测以实地采样为主,监测因子较多,超出了农村地区的经济负荷,亟需经济高效的评价方法。

不同于现有的评价方法,作者提出了一种指南法与感官评价法相结合的黑臭水体评价法,又通过分析河南省五地市共103个农村黑臭水体样本,找到了一种与按城市黑臭水体分级标准所得结果吻合度较高的评价方法——感官+NH₃-N评价法,其具有经济、快速、高效的特点。与其他评价方法相比,该方法在一定程度上能规避单一物理评价法主观性较强、多数化学评价法地域针对性较强且计算过程复杂等问题,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 材料和方法

1.1 样品采集

选取了5个河南省典型地市进行黑臭水体现状调查分析,分别为焦作市、南阳市、商丘市、周口市、驻马店市。样品采集方法参照《水质 采样技术指

导》(HJ 494—2009)。采样水体主要有沟渠、坑塘和河道,分别占46.4%、38.1%和15.5%。对于长1 km左右的河道类水体,根据实际情况设2~4个采样点,采样点之间的间隔为200~300 m,每个采样点平行取3个水样。采集沉积物时去除泥中的石头、砂砾、水草等杂质,用柱状采样器在0~10 cm深度处采集,然后快速装入聚乙烯袋中,沉积物采样点同水质采样点。

1.2 分析方法

TP、COD、BOD₅是常规水质指标,其中TP采用快速消解测定仪检测,COD、BOD₅均按照国标法检测;DO、氧化还原电位(ORP)、NH₃-N是城市黑臭水体分级评价涉及的3项指标,其中DO和ORP采用HI 8424型快速测定仪检测,NH₃-N采用国标法检测;叶绿素a(Chl-a)、腐殖质(HS)是根据黑臭水体形成机理选出的指标,Chl-a和HS分别采用分光光度法和焦磷酸钠浸提-重铬酸钾氧化法检测。

1.3 评价方法

采用水色和气味两个表观要素^[9]对水体感官污染进行评价。气味以距离河岸1 m处的异味程度来判定。进行评价时,需要评测人员达到一定数量,避免个人主观性过强。黑臭水体感官评价的分级标准如下:轻度黑臭为站在水体旁(1 m内)有臭味,水体颜色为黄绿色/深绿色;重度黑臭为距离水体1 m外有臭味,水体为灰褐色/灰黑色/黑色。

根据水体黑臭程度的不同,《城市黑臭水体整治工作指南》(以下简称《指南》)将黑臭程度分为“轻度黑臭”(DO: 0.2~2.0 mg/L; ORP: -200~50 mV; NH₃-N: 8.0~15.0 mg/L)和“重度黑臭”(DO<0.2 mg/L; ORP<-200 mV; NH₃-N>15.0 mg/L),水质优于“轻度黑臭”则为“不黑不臭”(DO>2.0 mg/L; ORP>50 mV; NH₃-N<8.0 mg/L)。《农村黑臭水体治理工作指南(试行)》只设定了监测阈值(DO<2 mg/L; NH₃-N>15.0 mg/L),暂未设定不同黑臭程度的具体范围。

依据城市黑臭水体分级标准对水样进行分级,发现有23个水样属于不黑不臭水体,劣于《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)中V类水体。此类水体可能沉积物污染严重,但由于上覆水受污染程度低,沉积物中污染物向上覆水中的释放有限,所以整体水质比轻度黑臭好。本研究采用感官评价与特征指标相结合的方法对五地市农村黑臭水

体进行分级,并与城市黑臭水体分级标准的分级结果进行比较。

2 结果与讨论

2.1 不同黑臭程度下各指标的监测结果

对采集到的103个水体样品和99个沉积物样品进行分析后,按城市黑臭水体分级标准进行分级。结果显示,不黑不臭、轻度黑臭和重度黑臭的水体占比分别为22.3%、43.7%和34.0%。不同黑臭程度下各指标的监测结果见图1(不同黑臭程度下水体的温度和pH变化不大,不属于区分黑臭程度的特征指标,所以不予分析)。不同黑臭程度下TP含量差异较大,轻度黑臭水体TP含量均值为0.9 mg/L,重度黑臭水体TP含量均值为8.4 mg/L;水体COD和BOD₅含量整体随黑臭程度的增加而增大;

黑臭程度越严重,DO含量越低;ORP变化明显,重度黑臭水体整体呈强还原态,ORP均值为-191 mV,轻度黑臭水体整体呈氧化态,均值为65 mV,不黑不臭水体均值为176 mV;NH₃-N含量随黑臭程度的增加而明显增大,轻度黑臭水体NH₃-N含量均值为7.8 mg/L,而重度黑臭水体NH₃-N含量均值是其5.84倍,NH₃-N含量差异较大可能是因为某些点位富营养化程度严重,造成NH₃-N含量过高;水体中Chl-a含量随黑臭程度的增加而增大,不黑不臭水体Chl-a含量为29.6 mg/m³,轻度黑臭水体Chl-a含量是其1.9倍,重度黑臭水体Chl-a含量是其4.3倍;沉积物中HS含量随黑臭程度的增加而略有增加,重度黑臭水体沉积物中HS含量为17.3 g/kg,轻度黑臭水体沉积物中HS含量为15.5 g/kg。

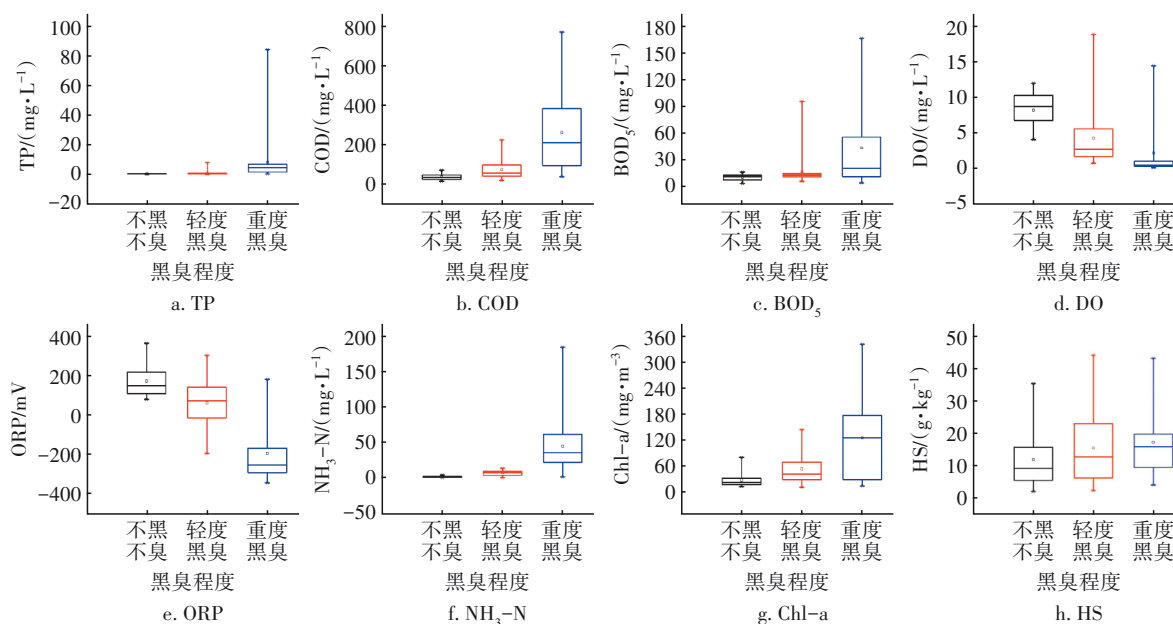


图1 不同黑臭程度下各指标的监测结果

Fig.1 Measurement results of each monitoring index under different black and odorous degree

DO的情况不符合目前大多数的研究结果,即DO<2.0 mg/L时水体会出现黑臭现象^[10-11],但与柳超等^[12]获得的结果相同,这表明DO<2.0 mg/L可能并不是水体发生黑臭的关键条件。由ORP的变化情况可知,重度黑臭水体呈强还原性,可能是由于水体中还原性污染物含量较高,且污染物会积累^[13]。黑臭水体中较高的COD含量可确保硫酸盐还原菌及其他厌氧菌具有足够的碳源,使其在厌氧状态下大量分解含硫有机物,产生挥发性有机硫化物。黑臭水体的NH₃-N和TP含量比非黑臭水体高,主要是在受纳外界排入的氮、磷等营养物

质后水中藻类旺盛增长,且藻类等生物残体腐烂过程中又会将氮、磷等营养物质释放到水中,重新供新生藻类利用。黑臭水体Chl-a含量较高,可能是因为绝大部分样品的采样时间处于夏季,该季节水体中浮游藻类较多,会导致Chl-a含量增加^[14]。较高的NH₃-N、TP和Chl-a含量表明,重度黑臭水体富营养化程度明显比不黑不臭水体严重。

整体分析发现,沉积物的HS含量随黑臭程度的增加而略有增加,而水体的NH₃-N、TP、COD、BOD₅、Chl-a含量均随黑臭程度的增加而明显增加,水体的ORP值则随黑臭程度的增加而明显减小。

NH₃-N、TP、COD、BOD₅、Chl-a、ORP 是区分农村不黑不臭水体、轻度黑臭水体和重度黑臭水体的特征指标。

2.2 不同评价方法分析

五地市黑臭水体的分布情况不同,周口市和驻马店市主要为非黑臭水体和轻度黑臭水体,而南阳市和商丘市的重度黑臭水体数量相对较多。对 80 个黑臭水体的水样进行分析,并将其按城市黑臭水体分级标准分级后发现,轻度黑臭和重度黑臭水体分别占 56.3% 和 43.7%。依据感官判断黑臭程度,结果为 71.3% 属于轻度黑臭,28.7% 属于重度黑臭。经调研,五地市黑臭水体的主要污染源有 5 种,其中 62.5% 源于农村生活污水污染,13.8% 源于畜禽养殖污染,11.2% 源于工业废水污染,10.0% 源于农业种植污染,2.5% 源于水产养殖污染。

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。结合上述 8 项监测指标的结果和《指南》中给出的监测指标,选取 DO、ORP 和 NH₃-N 作为黑臭水体的主要监测指标。将 DO、ORP 和 NH₃-N 三个监测指标分别与感官评价相结合,对比 4 种方法(A:仅凭感官;B:感官+DO;C:感官+ORP;D:感官+NH₃-N)与按城市黑臭水体分级标准评价结果的吻合度,得出与其相符的黑臭水体数量,结果见表 1。

表 1 与分级标准评价结果相符的黑臭水体数量

Tab.1 Number of black and odorous water consistent with grading criteria

项 目	A		B		C		D	
	轻度	重度	轻度	重度	轻度	重度	轻度	重度
生活污水	22	8	25	8	25	17	24	18
畜禽养殖	4	5	4	5	4	5	6	5
工业废水	4	1	4	2	5	2	4	4
农业种植	5	1	5	1	5	2	5	3
水产养殖	2	0	2	0	2	0	2	0
吻合样本总计	37	15	40	16	41	26	41	30

依据感官+DO 进行黑臭程度评价的标准为:轻度黑臭,感官轻度+DO 为 0.2~2.0 mg/L;重度黑臭,感官重度+DO<0.2 mg/L,若两者冲突,则以 DO 浓度为准;不黑不臭,DO>2.0 mg/L。依据感官+ORP 进行黑臭程度评价的标准为:轻度黑臭,感官轻度+ORP 为 -200~50 mV;重度黑臭,感官重度+ORP<-200 mV,若两者冲突,则以 ORP 为准;不黑不臭,

ORP>50 mV。依据感官+NH₃-N 进行黑臭程度评价的标准为:轻度黑臭,感官轻度+NH₃-N 为 8.0~15.0 mg/L;重度黑臭,感官重度+NH₃-N>15.0 mg/L,若两者冲突,则以 NH₃-N 浓度为准;不黑不臭,NH₃-N<8.0 mg/L。

图 2 为不同污染来源下黑臭水体判定结果的吻合度。可知,依据感官+NH₃-N 测定,5 种污染来源下黑臭水体的分级结果吻合度均能达到 80% 以上。其中,源于畜禽养殖污染、农业种植污染和水产养殖污染的黑臭水体吻合度能达到 100%,源于农村生活污水污染和工业废水污染的黑臭水体分级结果吻合度分别为 84.0% 和 88.9%。不论是依据水体的黑臭程度,还是污染来源,4 种方法的评价结果与按城市黑臭水体分级标准评价结果相符的水体数量都呈增加的趋势。依据感官+NH₃-N 测定进行分级时,88.8% 的黑臭水体与按城市分级标准评价结果相同(轻度黑臭水体吻合度为 91.1%,重度黑臭水体吻合度为 85.7%)。当采用感官+ORP 进行分级时,83.8% 的黑臭水体与按城市分级标准分级结果相同(轻度黑臭水体吻合度为 91.1%,重度黑臭水体吻合度为 74.3%)。与按照城市黑臭水体分级标准评价结果相比,4 种方法与其吻合度的排序如下:感官+NH₃-N(88.8%)>感官+ORP(83.8%)>感官+DO(70.0%)>仅凭感官(65.0%)。由此可知,感官+NH₃-N 为最佳评价方法。

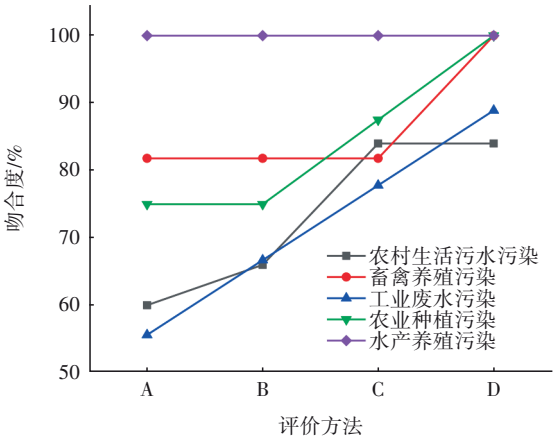


图 2 不同污染来源下黑臭水体判定结果的吻合度

Fig.2 Consistency of evaluation results of black and odorous water under different pollution sources

由上述分析可以看出,NH₃-N 为最佳评价因子,主要来源有 5 种,如图 3 所示(a 为生活污水污染、b 为畜禽养殖污染、c 为水产养殖污染、d 为农业

种植污染和e为工业废水污染)。首先,在农村地区,约90%的生活污水未经处理直接排入附近地表水,造成水体污染,而且与化肥相比,农村生活污染物更容易造成营养物质流失;其次,畜禽养殖产生的有机物、氮、磷等水体污染物会导致水生生物大量死亡,继而引发恶臭;水产养殖过程中投放的饲料残余和鱼、虾、蟹类排泄物形成的污染物会对水体、池塘底泥等造成污染,使养殖水体日趋富营养化;同时,河南作为国家粮食主产区,在农业种植施用化肥过程中有大量营养物质流失,经农田地表径流等途径进入受纳水体造成污染;此外,近年来越来越多的工业企业由城市向农村转移,富含高浓度 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的废水排放量也随之增加。

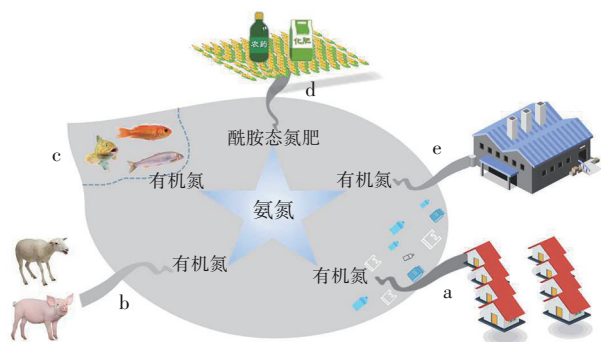


图3 黑臭水体氨氮的来源

Fig.3 Sources of ammonia nitrogen in black and odorous water

$\text{NH}_3\text{-N}$ 作为《指南》采用的评价指标之一,是导致水体富营养化和环境污染的重要物质, $\text{NH}_3\text{-N}$ 超标也成为现代黑臭水体治理过程中亟需解决的问题之一。感官+ $\text{NH}_3\text{-N}$ 评价法具有经济、快速、高效的特点,评价结果具有较高的准确度和可信度,更适用于农村地区。与其他评价方法相比,操作更为简单,无需进行繁琐的模型建立及数据计算,只需测定水体 $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度,经济成本较低。

3 结论

① 区分农村不黑不臭水体、轻度黑臭水体和重度黑臭水体的特征指标有ORP、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TP、COD、 BOD_5 和Chl-a,其中 $\text{NH}_3\text{-N}$ 是最佳评价因子。重度黑臭水体中 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TP和Chl-a含量较高,富营养化程度严重。

② 结合河南省五地市黑臭水体的采样结果发现,与按城市黑臭水体分级标准评价结果相比,4种方法与其吻合度的排序为:感官+ $\text{NH}_3\text{-N}$

(88.8%)>感官+ORP(83.8%)>感官+DO(70.0%)>仅凭感官(65.0%)。

③ 感官+ $\text{NH}_3\text{-N}$ 评价法的标准是:轻度黑臭,感官轻度+ $\text{NH}_3\text{-N}$ 为8.0~15.0 mg/L;重度黑臭,感官重度+ $\text{NH}_3\text{-N}$ >15.0 mg/L,若两者冲突,以 $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度为准;不黑不臭, $\text{NH}_3\text{-N}$ <8.0 mg/L。该方法具有经济、快速、高效的特点,十分适用于农村黑臭水体分级评价。

参考文献:

- [1] LU X, FAN C X, HE W, *et al.* Sulfur-containing amino acid methionine as the precursor of volatile organic sulfur compounds in algae-induced black bloom [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2013, 25 (1): 33-43.
- [2] KHATRI N, TYAGI S, RAWTANI D. Rural environment study for water from different sources in cluster of villages in Mehsana district of Gujarat [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2017, 190 (1): 10.
- [3] SONG P, HUANG G H, AN C J, *et al.* Performance analysis and life cycle greenhouse gas emission assessment of an integrated gravitational-flow wastewater treatment system for rural areas [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2019, 26(25): 25883-25897.
- [4] 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.
LI Jiayin, LI Weifang, MENG Jie, *et al.* Evaluation and categorization of black and odorous rivers in central urban area of Tianjin [J]. *China Water & Wastewater*, 2017, 33(19):90-95(in Chinese).
- [5] PAN M, ZHAO J, ZHEN S C, *et al.* Effects of the combination of aeration and biofilm technology on transformation of nitrogen in black-odor river [J]. *Water Science and Technology*, 2016, 74(3):655-662.
- [6] CHEN J, XIE P, MA Z M, *et al.* A systematic study on spatial and seasonal patterns of eight taste and odor compounds with relation to various biotic and abiotic parameters in Gonghu Bay of Lake Taihu, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2010, 409 (2): 314-325.
- [7] 刘娟,谢雪东,张洋,等. 不同基质厌氧折流-垂直流人工湿地(ABR-VFW)对农村生活污水的处理效果

- [J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(8): 1758-1766.
- LIU Juan, XIE Xuedong, ZHANG Yang, *et al.* Experimental study on treatment of rural domestic sewage by four substrates anaerobic baffled reactor-vertical flow wetlands (ABR-VFW) [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, 37(8): 1758-1766 (in Chinese).
- [8] 刘丽香, 韩永伟, 刘辉, 等. 曝气技术对黑臭水体治理效果影响的研究进展[J]. *环境科学研究*, 2020, 33(4): 932-939.
- LIU Lixiang, HAN Yongwei, LIU Hui, *et al.* Research progress on the effect of aeration on urban black-odor water ecosystem [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2020, 33(4): 932-939 (in Chinese).
- [9] 卢信, 冯紫艳, 商景阁, 等. 不同有机基质诱发的水体黑臭及主要致臭物(VOSCs)产生机制研究[J]. *环境科学*, 2012, 33(9): 3152-3159.
- LU Xin, FENG Ziyang, SHANG Jingge, *et al.* Black water bloom induced by different types of organic matters and forming mechanisms of major odorous compounds [J]. *Environmental Science*, 2012, 33(9): 3152-3159 (in Chinese).
- [10] 余茂蕾, 洪国喜, 许海, 等. 湖泊蓝藻水华对连通河道水质的影响[J]. *环境科学*, 2019, 40(2): 603-613.
- YU Maolei, HONG Guoxi, XU Hai, *et al.* Effects of cyanobacterial blooms in eutrophic lakes on water quality of connected rivers [J]. *Environmental Science*, 2019, 40(2): 603-613 (in Chinese).
- [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.
- WANG Xu, WANG Yonggang, SUN Changhong, *et al.* Formation mechanism and assessment method for urban black and odorous water body: a review [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2016, 27(4): 1331-1340 (in Chinese).
- [12] 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, 83.
- LIU Chao, QIAN Binjie, WANG Liyuan, *et al.* Establishment and application of comprehensive evaluation system of urban black and odorous rivers [J]. *China Water & Wastewater*, 2018, 34(11): 73-77, 83 (in Chinese).
- [13] 崔健, 李雨平, 缪恒锋, 等. 黑臭水体中主要致臭组分特征分析[J]. *环境科学与技术*, 2019, 42(10): 128-133.
- CUI Jian, LI Yuping, MIAO Hengfeng, *et al.* Characteristic analysis of odor-causing components in the black-odorous water [J]. *Environmental Science & Technology*, 2019, 42(10): 128-133 (in Chinese).
- [14] 丁潇蕾, 李云梅, 吕恒, 等. 城市黑臭水体的吸收特性分析[J]. *环境科学*, 2018, 39(10): 4519-4529.
- DING Xiaolei, LI Yunmei, LÜ Heng, *et al.* Analysis of absorption characteristics of urban black-odor water [J]. *Environmental Science*, 2018, 39(10): 4519-4529 (in Chinese).

作者简介: 王莉(1973-), 女, 河南长垣人, 博士, 教授级高级工程师, 主要从事水环境治理与水生生态修复研究。

E-mail: xiawangli@zzu.edu.cn

收稿日期: 2020-07-13

修回日期: 2020-10-18

(编辑: 任莹莹)

深入实施乡村振兴战略, 促进人水和谐