

# 城市黑臭水体形成机理与评价方法研究进展

王 旭 王永刚\* 孙长虹 潘 涛

(北京市环境保护科学研究院/国家城市环境污染控制工程技术研究中心, 北京 100037)

**摘 要** 黑臭水体是水体污染的一种极端现象.造成黑臭水体的主要污染源包括有机污染物、底泥再悬浮以及水体热污染,城市水循环条件不足是引起黑臭水体的水动力学因素.从黑臭形成化学机理看,致黑物质主要包括悬浮物、Fe、S元素及其化合物FeS;致臭物质主要包括H<sub>2</sub>S、NH<sub>3</sub>等小分子气体以及硫醚类(VOSCs)、乔司脒和2-二甲基异茨醇等化合物.本文重点从黑臭评价指标、黑臭指数法、多元线性回归模型以及综合评价法4个方面对黑臭水体评价方法进行对比与总结,并对未来城市黑臭水体研究进行展望,旨在进一步明确城市黑臭水体判别技术,为城市水环境治理和水生态维护提供依据.

**关键词** 黑臭水体;挥发性有机硫化物;乔司脒;形成机理;评价方法

**Formation mechanism and assessment method for urban black and odorous water body: A review.** WANG Xu, WANG Yong-gang\*, SUN Chang-hong, PAN Tao (*Beijing Municipal Research Academy of Environmental Protection/National Engineering Research Center for Urban Environmental Pollution Control, Beijing 100037, China*).

**Abstract:** Black and odorous (B&O) water body reflects very typical serious water pollution related to organic pollution, sediment re-suspension and thermal pollution. Also, the insufficiency of water cycle is one of the most important hydrodynamic factors for formatting B&O water body. The blackening substances mainly include suspended particles, Fe- and S-containing substances; the odour causing substances include the small molecule gases such as H<sub>2</sub>S, NH<sub>3</sub> and some compounds such as VOSCs, Geosmin and 2-MBI. Evaluation methods of B&O water were summarized from the evaluation index, B&O index, multiple linear regression model and comprehensive evaluation method in this paper. Correspondingly, the relative research direction in the future was discussed. All these works not only defined the identifying technology for urban B&O water body, but also would further support the water environment improvement and ecological recovery in urban region.

**Key words:** black and odorous water body; VOSCs; Geosmin; formation mechanism; assessment methodology.

城市水体是指位于城市范围内、与城市功能保持密切相关的水体,包括流经城市的河段、河流沟渠、湖泊和其他景观水体,是城市生态系统的重要组成部分<sup>[1]</sup>.城市水体黑臭问题主要由水体中藻类和细菌的新陈代谢以及人类向水体中过度排放污染物引起的<sup>[2]</sup>.近年来,随着我国城市经济的快速发展,

城市规模的日益膨胀,城市环境基础设施日渐不足,城市污水排放量不断增加,大量污染物入河,水体中化学需氧量(COD)、氮(N)、磷(P)等污染物浓度超标,河流水体污染严重,水体出现季节性或终年黑臭<sup>[3]</sup>.2015年国务院发布的《水污染防治行动计划》(简称“水十条”)对黑臭水体问题提出明确要求,到2020年,我国地级及以上城市建成区黑臭水体均控制在10%以内;到2030年,城市建成区黑臭水体总体得到消除<sup>[4]</sup>.城市黑臭水体的生态系统结构严重失衡,给群众带来了极差的感官体验,成为目前较为突出的水环境问题,也严重影响着我国城市的良好发展.

本文由水体污染控制与治理科技重大专项(2012ZX07203-001-01)和丰台区重点河段水环境改善技术研究项目资助 This work was supported by the Major Science and Technology Program for Water Pollution Control and Treatment (2012ZX07203-001-01) and Water Environment Improvement Technology of Major Rivers in Fengtai District.

2015-09-12 Received, 2016-01-15 Accepted.

\*通讯作者 Corresponding author. E-mail: edward8848@163.com

目前,国内外对城市黑臭水体的概念、机理、产生的原因已经开展研究,但依然存在较多不足与瓶颈,形成机理还未全面明确、评价体系还未统一建立.本文基于众多学者在黑臭水体方面的研究基础,对城市黑臭水体形成机理、产生的原因进行了概括,重点在如何对黑臭水体进行判别和界定方面进行总结和评述,并对未来城市黑臭水体研究发展方向进行了讨论与展望,以期后续黑臭水体判别标准的制定及治理提供理论基础.

1 黑臭水体内涵与研究回顾

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<sup>[5]</sup>.所谓“黑臭”,可以从外在视觉感官和内在形成机理两个方面解释.在视觉感官上,水体呈黑色或泛黑色,在嗅觉上会有刺激性气味,引起人们不愉快、恶心或厌恶.从形成机理上,水体发黑发臭主要是在缺氧或厌氧状况下,水体内有机污染物发生系列物理、化学、生物作用的结果.住房和城乡建设部发布的《城市黑臭水体整治工作指南》中也提及了城市黑臭水体概念,即城市范围内、呈现令人不悦的颜色和(或)散发令人不适气味的水体的统称<sup>[6]</sup>.

随着水体污染问题的日益严重以及大众对黑臭水体问题的持续关注,科学界对黑臭水体的认识也随之不断深入,城市黑臭水体相关研究得到了发展.其过程大体可分为两个阶段:起始阶段<sup>[5,7-15]</sup>与发展阶段<sup>[16-26]</sup>(图1).初始阶段主要指出了黑臭水体的存在,提出了黑臭水体的内涵,初步分析了黑臭水体形成机理及原因;发展阶段主要针对河流、湖泊、水库等不同类型水体的黑臭产生原因及机理展开深入研究,同时丰富了黑臭水体治理技术、修复方法等技术研究;关于黑臭水体评价方法、指标体系等研究是近两年相关研究人员关注的重点.

目前我国在城市黑臭水体评价研究中存在的主要问题有:1)内涵认识不足.城市黑臭水体概念尚无统一、明确的定义;多数概念强调物理或化学等单一属性,忽略从物理-化学-生物综合指标进行定义.2)评价方法不统一.国内评价方法主要集中在基于单一化学指标评价,与国外流行的非线性回归模型评价方法结合不够.另外,评价指标的科学性与代表性也未能形成统一认识.3)关键支撑技术不完善.对于城市黑臭水体评价与治理的关键支撑技术关注还不够,原型观测与模型等基础研究需进一步开展.

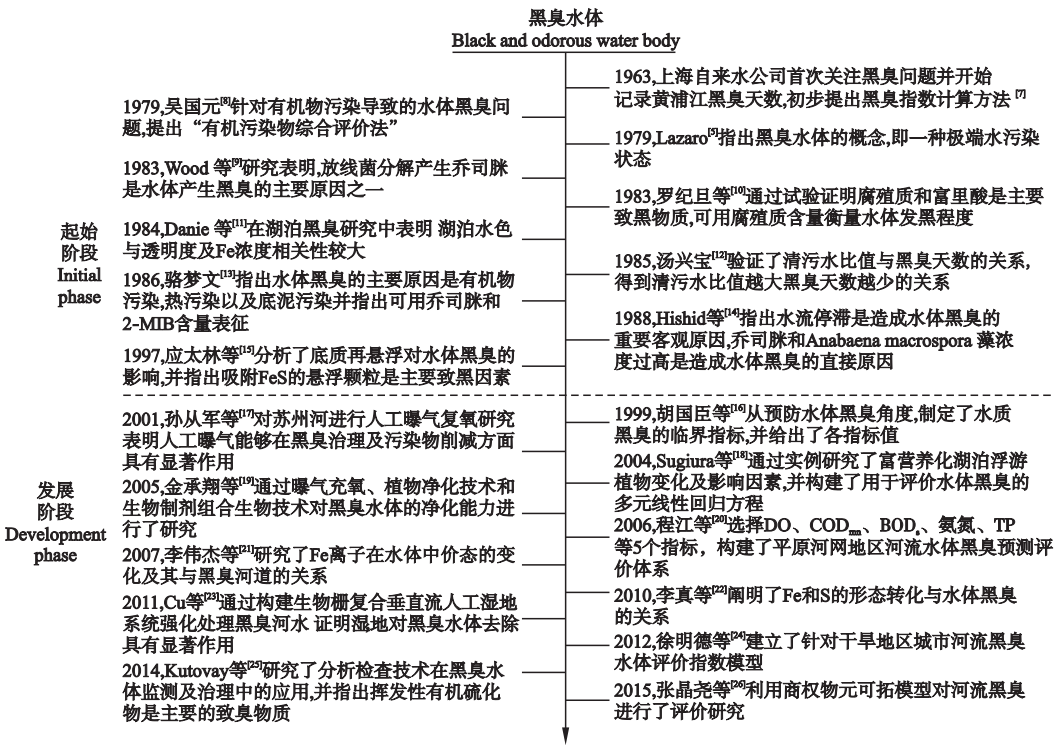


图1 黑臭水体研究回顾  
Fig.1 Progress of urban black and odorous water.

## 2 城市黑臭水体成因及机理

### 2.1 黑臭水体污染源

**2.1.1 有机污染物入河** 有机污染物入河是造成水体黑臭现象的主要原因之一。随着城市规模的不断扩大,城市居住人口激增,人口布局相对集中,造成城市污水处理能力不足,截污治污设施相对落后,加之城市地表径流污染负荷较大,造成大量有机污染物排入水体。有机污染物主要包括有机碳污染源(化学需氧量 COD、生化需氧量 BOD)、有机氮污染物(氨氮)以及含磷化合物,这些污染物主要来自废水、污水中的糖类、蛋白质、氨基酸、油脂等有机物的分解,在分解过程中消耗大量的溶解氧,造成水体缺氧,厌氧微生物大量繁殖并分解有机物产生大量致黑致臭物质,从而引起水体发黑发臭。大多数有机物富集在水体表面形成有机物膜会破坏正常水气界面交换,从而加剧水体发黑发臭<sup>[1,13]</sup>。

**2.1.2 底质污染与底泥再悬浮** 底泥再悬浮是导致水体黑臭的重要因素之一。底泥作为城市水体的重要内源污染物,在水力冲刷、人为扰动以及生物活动影响下,引起沉积底泥再悬浮,进而在一系列物理-化学-生物综合作用下,吸附在底泥颗粒上的污染物与孔隙水发生交换,从而向水体中释放污染物,大量悬浮颗粒漂浮在水中,导致水体发黑、发臭;另外大量底泥为微生物提供良好的生存空间,其中放线菌和蓝藻通过代谢作用使得底泥甲烷化、反硝化,导致底泥上浮及水体黑臭<sup>[27]</sup>。陆桂华等<sup>[28]</sup>针对太湖地区发生的局部黑臭水体现象,通过实地监测与资料分析,表明局部黑臭水体形成区域分布与太湖底部淤泥集中区域位置基本一致,并进一步指出,湖泊中藻类大量繁殖后发生死亡沉降,藻类有机质的大量堆积是底泥的主要成分,也是形成局部黑臭水体的发生基础。

**2.1.3 水体热污染** 城市水体中往往会有大量较高温度的工业冷却水、污水处理厂退水以及居民日常生活污水等排入,导致局部甚至整个水体水温升高。水体中微生物在适宜水温下发生强烈的活动,致使水体中的大量有机物分解,降低溶解氧,释放各种发臭物质。水体一般在夏季出现黑臭现象比在冬季显著增多,主要原因是一方面微生物的活动频率与温度表现出显著正相关性,另一方面水体中的溶解氧含量随着温度的升高而降低<sup>[29-30]</sup>。Wood 等<sup>[9]</sup>指出,水体温度低于 8℃和高于 35℃时,放线菌分解有机物产生致黑致臭物质的活动受到限制,一般不会黑

臭,而在 25℃时放线菌的繁殖量达到最高,水体的黑臭也达到最大。

### 2.2 水动力学条件

水动力学条件不足、水循环不畅也是引起河道水体黑臭的原因之一,诸如河道水量不足、流速低缓以及河道渠道化、硬质化等都有可能河道黑臭。Hishida 等<sup>[14]</sup>在分析 Yodo 河黑臭河道的原因时指出,由于河道水流不畅,导致水体中藻类浓度过高,水体出现霉臭味。张敏等<sup>[31]</sup>在分析浦东新区城市河道水体黑臭原因时指出,河道污泥淤积导致的河床太高、水生植物疯长、闸坝阻拦造成河道流水不畅,甚至形成死水,导致水体环境恶化,同时指出河道的渠道化、硬质化,割裂了土壤与水体的渗透关系,阻断了水体自然循环过程,形成污染物积累,水体自净能力显著减弱,水体恶化敏感性增强,导致水体出现黑臭现象。

水循环与水污染过程紧密相连。城市水循环是水污染形成、迁移、转化等一系列过程的载体,又是影响其动力学过程的因素之一<sup>[32]</sup>。水循环对水污染过程的作用主要从两方面体现:一是人类活动不断改变自然水循环的动力学过程,改变了河流特征,影响到污染物的迁移转化过程,进而影响流域水环境状况。原水调配不合理和人工取水量的增加在一定程度上减少了区域自然水循环通量;人工水循环过程中的耗水量增加又导致取水量的不断增加等导致水体水量不足,黑臭现象易发;另一方面,污染物伴随水循环过程也发生着迁移转换,水污染物在各水循环要素过程中会与环境中的其他物质及其自身相互反应,在水循环条件不具备时,部分生成物又会对环境造成二次污染,进一步降低水资源与水环境质量。

### 2.3 黑臭水体形成的化学机理

**2.3.1 致黑机理** 水体致黑原理主要以下 2 种,一是以固态或吸附于悬浮颗粒上的形式存在于水体中的不溶性物质;另一是溶于水的带色腐殖质类有机化合物<sup>[33]</sup>。罗纪旦等<sup>[10]</sup>通过试验发现,水体发黑与悬浮颗粒有直接联系,悬浮颗粒中的致黑物质主要是腐殖酸和富里酸。应太林等<sup>[15]</sup>对苏州河水体黑臭进行研究,通过沉淀分离、充氧及氧化还原点测定等试验,发现悬浮颗粒对水体致黑起到主导作用,并指出悬浮颗粒中的腐殖酸和富里酸因吸附络合了 Fe、Mn 和 S 的化合物成为主要致黑化学物,并证明了 Fe<sup>2+</sup>在致黑方面的主导作用。丁琦等<sup>[34]</sup>也通过试验证明,水体发黑主要与吸附了 FeS 的带电胶体悬



浮颗粒有关.卢信等<sup>[35]</sup>通过试验研究发现,有机物只要达到一定负荷水平(1.0 g·L<sup>-1</sup>)对水体均有致黑作用,但含硫有机物相比不含硫有机物,能够在更短的时间内导致水体变黑,且水体颜色更深.因此,从致黑物质的元素形态组成方面主要指 Fe、S 及其化合物 FeS.

图 2 为铁元素(Fe)在自然河道水体中的形态转化过程<sup>[36]</sup>.Fe 主要以铁氧化物和氢氧化物形式进入水体,经过好氧带、活性反应带、厌氧带,最终沉入水底.未出现黑臭水体中,好氧带、活性反应带、厌氧带 3 个带分层合理,铁离子转化处于良好循环状态.当大量有机污染物等好氧物质进入水体时引起水体溶解氧降低,“3 带”分层被破坏,活性反应带向水体上层移动且厚度缩小甚至消失,厌氧带厚度增大,整个水体普遍呈厌氧还原状态,此时铁的循环被完全破坏,大量二价铁离子累积,与厌氧状态下产生的硫化氢结合成硫化亚铁.

图 3 为硫元素(S)在河道水体中的转化过程<sup>[22]</sup>.S 主要以硫酸盐和有机硫的形式进入到水体,未受重污染的水体中硫的形态转化途径畅通.与 Fe 类似,当大量有机物等耗氧物质进入水体后,水体溶解氧下降到一定程度后,有机硫分解和硫酸盐还原产生的 H<sub>2</sub>S 继续氧化耗氧使得水体中的溶解氧进一步减少,甚至下降为零,整个水体呈厌氧还原态.这种情况下,只有少数微生物能同化 H<sub>2</sub>S,大多数情况下 H<sub>2</sub>S 等都须先转变为硫酸盐,然后才能固定为有机硫化合物.没有被氧化和同化的 H<sub>2</sub>S 一部分与水体中的 Fe<sup>2+</sup>等形成 FeS.FeS 是黑色沉积物,水体中微小的悬浮物质会吸附一部分 FeS,而部分沉积于水底的 FeS 沉积物还会在厌氧分解产生的气体或气泡托浮作用下重新进入水体,再加上其他因素的协同作用,使水体呈现黑色.在不同的厌氧微生物的参与下发生以下反应:

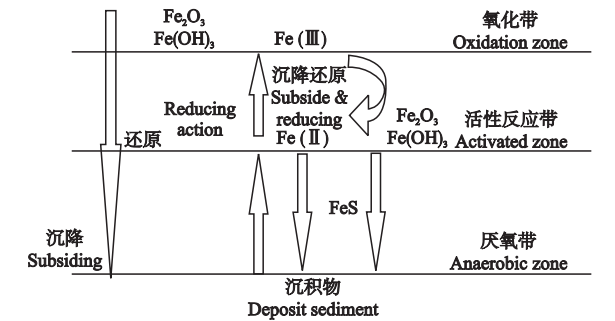


图 2 铁在河道中的形态转化过程  
Fig.2 Transformation progress of iron (Fe) in river.

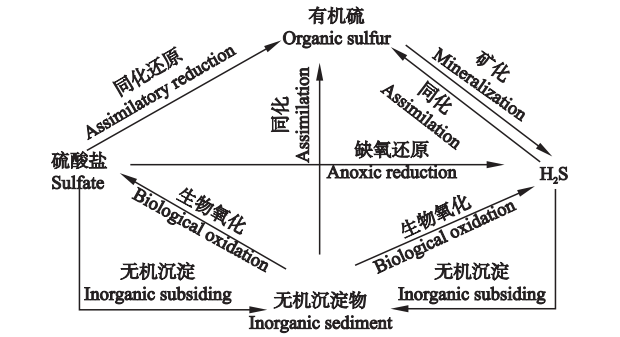
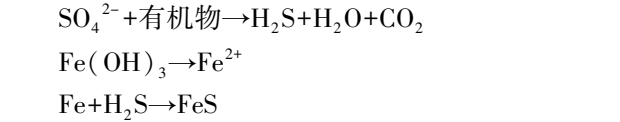
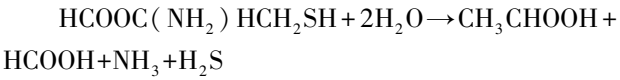


图 3 硫在河道水体中的转化过程  
Fig.3 Transformation progress of sculpture(S) in river.

含硫蛋白质 → 半胱氨酸 + H<sub>2</sub> → H<sub>2</sub>S + NH<sub>3</sub> + CH<sub>3</sub>CH<sub>2</sub>COOH



2.3.2 致臭机理 根据不同产臭途径和致臭物质,致臭机理大致分为以下 3 种:1) H<sub>2</sub>S、NH<sub>3</sub> 等小分子气体.当水体遭受严重有机物质污染时,有机物好氧分解使得水体中耗氧速率>复氧速率,造成水体缺氧.在缺氧水体中,产臭过程会与致黑同步,有机物厌氧分解产生甲烷(CH<sub>4</sub>)、硫化氢(H<sub>2</sub>S)、氨(NH<sub>3</sub>)等具有异味易挥发的小分子化合物溢出水面进入大气,因而散发出臭味.丁琦等<sup>[34]</sup>通过试验研究发现,水体发臭主要为含硫、氮等有机物分解时逸出的 H<sub>2</sub>S 和 NH<sub>3</sub> 等所致.此外,有机物在分解过程中还产生低碳脂肪酸及胺类等.H<sub>2</sub>S、NH<sub>3</sub> 等在水体中发生的反应如下:



2) 硫醚类化合物.通过对腐殖物质的分析,从腐殖酸、富里酸的酸水解产物中得到的近 20 种氨基酸和大量游离氨,这些氨基酸在水体中以脱氨基作用、脱羧酸作用以及某些细菌如变形杆菌分解含硫氨基酸,在产生大量的游离氨臭气的同时,也产生大量具有相当臭味的硫醚类化合物等导致水体发臭<sup>[37]</sup>.

挥发性有机硫化物(volatile organic sulfur compounds, VOSCs)被证实为主要的致臭物质<sup>[38-39]</sup>.试验研究发现,甲硫醇(MeSH)、二甲基硫醚(DMS)、二甲基二硫醚(DMDS)、二甲基三硫醚(DMTS)以及二甲基四硫醚(DMTeS)是黑臭水体的主要致臭物质<sup>[40-41]</sup>.卢信等<sup>[35]</sup>通过试验研究认为,只有含硫有机物才具有致臭作用,并确定蛋氨酸(methonine)

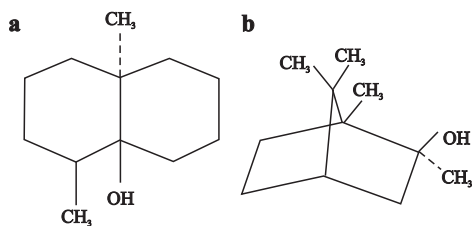


图 4 乔司脞(a) 和 2-二甲基异莰醇(b) 化学结构(根据 Juttner 和 Watson 调整<sup>[53]</sup>)

Fig.4 Molecular structures of Geosmin (a) and 2-MBI (b) (Modified from Juttner & Watson<sup>[53]</sup>).

为 VOSCs 的主要前驱物。

3) 乔司脞和 2-二甲基异莰醇。当水体处于厌氧状态或营养盐相对较高时,水体中存在大量放线菌、藻类和真菌,其新陈代谢过程中会分泌多种醇类异臭物质<sup>[42]</sup>。土臭素,包括乔司脞(Geosmin, C<sub>12</sub>H<sub>22</sub>O)和 2-二甲基异莰醇(2-MBI, C<sub>11</sub>H<sub>20</sub>O),是国内外研究中普遍认为导致水体发臭的主要物质之一(图 4)<sup>[43]</sup>。Gerber<sup>[44-45]</sup>于 20 世纪 40 年代先后从放线菌的发酵液中提取到乔司脞和 2-二甲基异莰醇,因此,放线菌最初被认为是臭味化合物的主要来源。随后,人们的注意力转向藻类,主要是蓝藻,如颤藻(*Oscillatoria*)、旋藻(*Lyngbya*)、席藻(*Phormidium*)和鱼腥藻(*Anabaena*),随后不断有学者证实一些真核藻类,如硅藻也是乔司脞和 2-二甲基异莰醇的重要来源<sup>[46-51]</sup>。乔司脞和 2-MBI 在较低浓度情况下就能导致天然水体发臭,其发臭阈值分别是 4 和 9 ng · L<sup>-1</sup><sup>[52]</sup>。

3 城市黑臭水体评价方法

3.1 黑臭评价指标与确定方法

在城市黑臭水体评价指标研究中,主要包括了物理指标和化学指标两种。在物理指标方面,方宇翹等<sup>[54]</sup>从物理表观角度,基于人的感官体验,提出将水体划分为黄(灰)绿无臭、灰褐微臭、黑臭、深黑恶臭 4 个等级,指出臭味感觉级别以距离划分,微臭为贴近水面有感觉,黑臭为站在河旁有感觉,恶臭为距离河流 1 m 以外有感觉。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标准,如何准确运用人的感觉表述黑臭水体是未来实践工作中亟需开展的工作。

在化学指标方面,单一指标,国内学者普遍以溶解氧(DO)指标作为界定水体是否黑臭的基本标准。认为水体中当 DO<2.0 mg · L<sup>-1</sup>时,表示出现黑臭。另外部分学者通过测定直接表征水体黑臭程度的色

度(CH)、黑度(BI)以及臭阈值等指标,用以表征黑臭水体的程度。戴树桂等<sup>[55]</sup>通过模式试验得出 CH=21.5 可作为水体黑臭与否的临界指标。俞欣等<sup>[56]</sup>等通过论证氧化还原电位(ORP)与部分黑臭因子 DO、S<sup>2-</sup>、pH、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>之间具有较好的相关性,通过现场快速监测 ORP 评价水体黑臭状况,当 ORP>-50 mg · L<sup>-1</sup>时,水体不黑臭,ORP<-100 mg · L<sup>-1</sup>时,水体出现黑臭,ORP<-200 mg · L<sup>-1</sup>,水体处于严重黑臭状态。依靠单一临界指标判断水体黑臭在实际应用中具有简单、快捷等优点,但有时候往往无法准确描述现状,且不同的研究者对同一指标参考的临界值也不尽相同,从整体上看,单一指标法可靠性相对较低。

综合化学指标方面,主要建立了以 DO、BOD<sub>5</sub>、COD<sub>Cr</sub>、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、总磷(TP)等为常规指标的表征方法,设置各项指标浓度阈值,通过各指标对比表征黑臭水体。胡国臣等<sup>[16]</sup>利用自配水样研究提出水体黑臭与不黑臭的临界指标为:CH=21.5、DO=1.8 mg · L<sup>-1</sup>、BOD<sub>5</sub>=14 mg · L<sup>-1</sup>;产生 H<sub>2</sub>S 细菌数 N=2000 个 · L<sup>-1</sup>。程江等<sup>[20]</sup>提出适合中小河道水体预测和评价黑臭的关键指标为:DO≤2 mg · L<sup>-1</sup>、COD<sub>Cr</sub>≥15 mg · L<sup>-1</sup>、BOD<sub>5</sub>≥14 mg · L<sup>-1</sup>、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N≥8 mg · L<sup>-1</sup>、TP≥0.8 mg · L<sup>-1</sup>。吕佳佳等<sup>[57]</sup>通过自制典型黑臭水,从水质参数与环境条件两方面分析黑臭水体形成的阈值条件:总有机碳≥150 mg · L<sup>-1</sup>,总氮≥50 mg · L<sup>-1</sup>,Fe<sup>2+</sup>≥0.2 mg · L<sup>-1</sup>,温度≥25℃,水深≥0.9 m 及厌氧条件时,高污染水体发生黑臭。综合化学临界指标法在实际应用中与单一法类似,均较为快捷,但往往全部指标都符合临界值要求时,仍无法准确得出研究水体是否黑臭,可靠性并不高。

3.2 黑臭指数(I)法

黑臭指数(I)是通过构建综合指标全面评价水体黑臭程度。常用的有 3 种:1)黑臭单因子污染指数(I),最早由上海自来水公司提出,主要用于评价黄浦江水系河道黑臭情况;2)有机污染指数(A 值),该指数综合考虑了 BOD<sub>5</sub>、COD、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 和 DO 等 4 种因素对黑臭的影响;3)黑臭多因子加权指数(W),是通过实地调研、观测试验,研究各种影响因素与水体黑臭的相关性。上述方法的目的皆是建立影响水体黑臭的主要环境因素和黑臭状况关键指标之间的关系方程,目前国内已建立了多项用于黑臭评价的判别关系式,并不断应用于实践中。表 1 总结了城市黑臭水体判别关系。

表 1 黑臭水体判别式  
Table 1 Discriminant of black and odorous water

序号 No.	黑臭水体判别式 Discriminant of black and odorous water	判别标准 Discriminant standard	参考文献 Reference
1	$I = \frac{BOD_5}{COD_{Mn}}$	$I \geq 1.3, BOD_5 \geq 13 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ $I \leq 1.3, BOD_5 \geq 20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$	[ 10 ]
2	$I = NH_4^+-N / ( DO_{\text{饱}} \% + 0.4 )$	$I \geq 5$	[ 7, 13 ]
3	$I = \frac{BOD_5}{BOD_5'} + \frac{COD_{Mn}}{COD_{Mn}'} + \frac{NH_3-N}{NH_3-N'} + \frac{DO}{DO'}$	$I \geq 2$	[ 58 ]
4	$I = 2.157 - 0.827DO + 0.349COD_{Mn} + 0.0726NH_3-N + 0.266T$	$I > 13$	[ 59 ]
5	$I = \frac{0.2COD_{Mn} + 0.1NH_3-N}{DO_{\text{饱}} \% + 0.3} \times 1.084^{(T-10)} DO$	$8 \leq I \leq 15$ (微臭)	[ 54 ]
6	$I = X_1 X_2 = 0.2 ( DO + COD_{Mn} + BOD_5 + NH_3-N + TP )$	$X_1 X_2 > 7$	[ 60 ]
7	$I = 0.05COD_{Cr} + 0.26NH_3-N - 2.3DO + 1.24Fe + 2.77Mn + 14.4$	$I \geq 13$	[ 61 ]
8	$I(1) = \frac{1.684}{DO} + 0.239TP + 0.005NH_3-N - 1.81$ $I(2) = \frac{7.946}{DO} + 1.002TP + 0.004NH_3-N - 8.187$	$I(2) > I(1)$	[ 55 ]
9	$I = 0.624COL + 0.376TO$ $TO = 4.3 + 1.0COD_{Cr} + 0.25BOD_5 + 0.9NH_3-N - 2.31DO + 1.76H_2S$	$I \geq 18$	[ 24 ]

TO: 臭度 Odorosity; COL: 色度 Chroma.

由于不同学者针对的是不同地区的不同河流,应用的黑臭水体判别式各异,选择的关键指标也不尽相同,从而使黑臭指数的判别标准也有较大差异.李鹏章<sup>[62]</sup>通过实际采样,对 1~8 号判别式的可靠性进行了验证,通过判别式计算结果对比,发现不同的判别式对同一水体黑臭情况判定结果不一样,且最高判定正确率只有 20%.

3.3 多元非线性回归模型

有学者认为,用于黑臭水体评价的指标与各水质指标之间的关系是复杂的,不能用简单的线性关系进行指示,因此需要建立评价指标与各项水质指标之间的非线性关系.与多元线性回归模型类似,多元非线性回归模型在建立过程中同样需要检测大量水质指标并分析各水质指标与水体黑臭程度的相关性,随后选取相关性高的水质指标建立模型.Canfield 等<sup>[11]</sup>在对佛罗里达州的 165 个湖泊的水色研究中,通过实时监测多项物理、化学和生物指标,并分析各指标与水体黑臭之间的相关性,最终选取叶

绿素 a(Chla)、TP、总氮(TN)与 CH 建立多元非线性回归方程为:

$$\lg CH = 6.19 \lg TN + 2.5 \lg TP - 6.25 \lg Chla - 13.3,$$
$$R^2 = 0.78$$

其研究表明,湖泊水色与透明度呈负相关关系,与水体中 Fe 的浓度呈正相关,水体颜色与 pH 值、总碱度、营养物质、叶绿素 a 以及其他生物参数相关性并不高.

乔司脒是引起水体黑臭的主要物质之一,通过预测其含量也是评价水体黑臭的重要方法.国外一些学者通过对水体浊度、透明度、电导率的监测及测定水体 COD、DO、TP、Chla、藻类总量和乔司脒等浓度,建立多元非线性回归模型预测研究水体中乔司脒的含量来达到评价水体黑臭的目的.主要评价模型见表 2.

多元非线性回归模型在建立过程中考虑了多个水质指标,在评价模型建立过程中监测了 pH、水温、DO、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、TN、TP、PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P、温度、Chla、蓝细菌总

表 2 基于乔司脒预测的黑臭水体评价模型  
Table 2 Evaluation model on black and odorous water body based on GEOS concentration prediction

序号 No.	多元回归模型 Multiple regression model	R <sup>2</sup>	水体 Water body	参考文献 Reference
1	$\lg GEOS = 1.07 \lg TURB - 0.009SC + 7.23$	0.71	美国堪萨斯切尼水库	[ 63 ]
2	$GEOS = 0.412CHL - 1.08$	0.72	美国堪萨斯切尼水库	[ 64 ]
3	$GEOS = 1.08SD - 0.064SC + 0.24TURB + 31.04$	0.70	美国堪萨斯奥拉西水库	[ 65 ]
4	$\lg GEOS = -0.624 - 1.092TP + 0.153COD + 0.149DO$	0.70	日本西南部霞浦湖	[ 18 ]
5	$GEOS = -9.93 + 3.02DO + 9.33 \lg CHL - 3.58 \lg TOTALG$	0.93	美国堪萨斯地区的 5 个水库	[ 66 ]

CHL: 叶绿素 a Chlorophyll a; COD: 化学需氧量 Chemical oxygen demand; DO: 溶解氧 Dissolved oxygen concentration; GEOS: 乔司脒 Geosmin; SC: 电导率 Electrical conductivity; SD: 透明度 Transparency; TURB: 浊度 Turbidity; TP: 总磷 Total phosphorus; TOTALG: 藻类生物总量 Total algae biomass.



生物量、藻类总生物量和浊度等大量水质参数并进行了筛选,能够较全面、准确地预测水体的黑臭状况。但是由于涉及到的参数太多,监测过程也比较复杂。目前国内使用非线性回归模型多用来评价湖泊、水库,对河道黑臭的研究鲜有报道,却是一种值得借鉴的河道黑臭评价方法。

### 3.4 综合评价法

目前用于黑臭水体评价的综合评价法主要包括模糊数学评价法、灰色系统评价法和人工神经网络评价法。模糊数学评价和灰色系统评价属于矩阵运算分析法,是基于矩阵运算形成的分析方法。张晶尧等<sup>[26]</sup>在研究丹河晋城河段水体黑臭问题时,考虑河流致黑致臭成因的模糊性和不确定性,以及干旱地区河流黑臭成因的复杂性,应用商权赋权法确定各个评价指标的权重,对不同水期,考虑  $BOD_5$ 、 $COD_{Cr}$ 、 $NH_4^+-N$ 、 $Mn$ 、 $DO$ 、 $CH$ 、 $Fe$ 、 $P$  等指标,建立了熵权的物元可拓模型。该方法根据水质监测数据引用信息熵反映数据本身的效用值,合理确定各个指标对河流黑臭污染的贡献率,避免了人为或者主观因素造成的权重赋予失衡,用来准确评价干旱地区河流黑臭情况<sup>[67]</sup>。

误差反向传播神经网络(BP网络)是水质评价中最典型的人工神经网络评价方法。该方法通过反复的正馈和反馈,对BP神经网络进行训练,使之得出与样本预期输出相符合的结果,进而应用BP网络进行水质评价。目前该方法在国内外已经有了一些研究。Sugiura等<sup>[18]</sup>利用人工神经网络技术(artificial neural network, ANN),建立了12项水质指标预测水体臭味,并与多元线性回归法(MLR)进行对比,结果表明,由于水体黑臭与水环境指标之间的非线性关系,ANN比MLR更适合对水体黑臭进行评价与预测。徐明德等<sup>[24]</sup>考虑河流黑臭评价属于多因素非线性评价,具有模糊现象,通过采用BP神经网络-隶属度函数建立河流黑臭评价模型,解决了多致黑因子间的复杂作用关系,以网络输出收敛于两等级间的模糊隶属问题,实现了对河流黑臭的评价。基于矩阵运算评价和人工神经网络评价等的黑臭水体综合评价方法具有较高的科学性,能够模拟人类思维方式,通过直观推理进行水质评价,在对于干旱地区河流黑臭水体评价中具有一定的优势。

## 4 研究展望

本文对城市黑臭水体的内涵、成因及形成机理进行了评述,重点论述了城市黑臭水体的评价方法,

认识到合理的指标与方法全面、准确地进行黑臭水体识别和分级的关键,因此未来需要从进一步深入探索黑臭成因、评价体系角度开展针对性的黑臭水体治理对策研究。

1)明确城市黑臭水体形成机理。本文从污染源、化学机理、水动力学条件等3个方面总结了目前黑臭水体形成的主要成因。但在实际研究中,黑臭水体成因需针对不同地区、不同类型、不同污染源构成以及不同水体功能类别进行区分,明确湖库、大江大河以及城市沟渠等不同类型水体在黑臭形成中的差异,以便有针对性地确定治理对策。另一方面,城市水循环对水体水质的作用日益显著,通过构建城市二元水循环及其伴生过程综合模拟平台,考虑各类污染源产生、入河及其在河道中的迁移转化过程,不断完善城市水循环对水体水环境的影响机理,开展基于水循环改善的黑臭水体综合整治集成技术显得日益重要。

2)丰富黑臭水体评价指标体系。研究证明,与黑臭水体具有较高的相关性的指标主要有: $DO$ 、 $BOD_5$ 、 $COD$ 、氨氮、硝酸盐氮、有机污染物、水温、 $pH$ 值等指标,其中前4项在大多相关研究中被应用到。因不同地区不同水体的黑臭成因不一,所以选择的指标也不尽相同,至今黑臭水体评价指标还未统一或形成规范。同时,在充分考虑化学指标的同时,需结合实际,增加黑臭水体水生生物指标和人类感官指标。

水生生物指数的黑臭水体评价指标。目前,用于城市黑臭水体评价指标多以水质化学指标为主,其在一定程度上反映了水体黑臭情况,但还不尽完善。一些学者从黑臭水体危害角度也分析了黑臭河道水体对水生生物的生物毒性效应。而水生生物种类和分布与河流水质状况有显著的相关性,极端黑臭污染状态更能改变水体水生生物系统,因此,需要增加黑臭水体的生物指标,通过对城市黑臭水体大型底栖动物、鱼类、浮游动植物采集与指标计算,进一步从生物学角度判别黑臭水体状况和级别。

人类感官指标的黑臭水体评价指标。人类感官,如视觉、嗅觉、情绪反应等,相对化学指标更能够直接、清晰地表达与指示水体黑臭状况。因此,在综合评价黑臭水体时,应增加周围群众对水体的满意度调查,通过实地走访、网络调查问卷形式对基于感官的黑臭水体状况进行定量化表述。

3)完善黑臭水体评价方法。随着对河道黑臭水体认识的不断深入,目前在黑臭水体评价研究中也

开展了大量工作,取得了阶段性成果.但由于城市黑臭水体成因较为复杂,影响因素多,且全国各地区水系情况各异,现有研究多集中在南方地区,对于北部或西部干旱和半干旱地区,尤其针对缺乏新鲜水源补充、多以污水处理厂退水作为生态用水的城市水体,需要在进一步明确形成机理的基础上,采用科学合理的评价方法.

4)加强黑臭水体处置对策技术研究.研究黑臭水体形成机理及评价方法的最终目的是制定行之有效的处置对策.应加强黑臭水体处置技术研究,针对水体的主要致黑致臭因子,深入研究水体放线菌高效去除方法、乔司脍和2-MBI检测与去除技术、饮用水源地水体痕量致臭物质去除技术等.在污染源控制的基础上,加强管理、监督,完善法律法规,通过工程性措施与非工程性措施相结合,采用物理、化学和生物-生态法综合工程技术,实现水环境质量改善,解决城市黑臭水体问题.

#### 参考文献

- [1] Xu M (徐敏), Yao R-H (姚瑞华), Song L-L (宋玲玲), *et al.* Primary exploration of general plan of the urban black-odor river treatment in China. *Chinese Journal of Environmental Management* (中国环境管理), 2015, **7**(2): 74-78 (in Chinese)
- [2] Suffet IH, Mallevialle J, Kawczynski E. Advances in taste and odor treatment and control. Report of American Water Works Association Research Foundation, 1995
- [3] Zhao Y (赵越), Yao R-H (姚瑞华), Xu M (徐敏), *et al.* Study on the practice and route of combating urban black and malodorous water body. *Environmental Protection* (环境保护), 2015, **43**(13): 27-29 (in Chinese)
- [4] The State Council (国务院). Action Plan of Water Pollution Prevention, Beijing, 2015 (in Chinese)
- [5] Lazaro TR. Urban Hydrology. Michigan: Ann Arbor Science Publishers, 1979
- [6] Ministry of Housing and Urban-Rural Development of China (住房和城乡建设部). Guideline for Urban Black and Odorous Water Treatment, Beijing, 2015 (in Chinese)
- [7] Gu G-W (顾国维), Cai B-T (蔡不忒). Preliminary prediction of the trends of black-odor in Huangpu River. *Shanghai Environmental Sciences* (上海环境科学), 1983, **2**(4): 24-26 (in Chinese)
- [8] Wu G-Y (吴国元). A research on the assessment of water quality of Huangpujiang. *Journal of Huazhong Normal University* (Natural Science) (华东师范大学学报:自然科学版), 1979(1): 121-126 (in Chinese)
- [9] Wood S, Williams ST, White WR, *et al.* Factors influencing geosmin production by a streptomycete and their relevance to the occurrence of earthy taints in reservoirs. *Water Science and Technology*, 1983, **15**: 191-198
- [10] Luo J-D (罗纪旦), Fang B-R (方柏蓉). Research on black-odor issue of Huangpu River. *Shanghai Environmental Sciences* (上海环境科学), 1983, **2**(5): 6-8 (in Chinese)
- [11] Canfield DE, Linda SB, Hodgson LM, *et al.* Relations between color and some limnological characteristics of Flodia lakes. *Journal of the American Water Resources Association*, 1984, **20**: 323-329
- [12] Tang X-B (汤兴宝). Dynamic analysis of the black-odorous water in Huangpu River in nearly three years. *Environmental Engineer* (环境工程), 1985(2): 12-13 (in Chinese)
- [13] Luo M-W (骆梦文). The origin of the black-odor water in Huangpu River. *Shanghai Environmental Sciences* (上海环境科学), 1986, **5**(5): 37-38 (in Chinese)
- [14] Hishida Y, Ashitani K, Fujiwara K. Occurrence of musty odor in the Yodo River. *Water Science and Technology*, 1988, **8**: 193-196
- [15] Ying T-L (应太林), Zhang G-Y (张国莹), Wu R-R (吴蕊蕊). The mechanism of blackening and stink and effects of resuspended sediments on Suzhou Creek water body. *Shanghai Environmental Sciences* (上海环境科学), 1997, **16**(1): 23-26 (in Chinese)
- [16] Hu G-C (胡国臣), Wang Z (王忠), Chang X-Q (常晓青). Study on water quality index for preventing black and offensive odor in water. *Shanghai Environmental Sciences* (上海环境科学), 1999, **18**(11): 523-525 (in Chinese)
- [17] Sun C-J (孙从军), Zhang M-X (张明旭). Application of aeration technique in river pollution control. *Environmental Protection* (环境保护), 2001, **29**(4): 12-14, 20 (in Chinese)
- [18] Sugiura N, Utsumi M, Wei B, *et al.* Assessment for the complicated occurrence of nuisance odours from phytoplankton and environmental factors in a eutrophic lake. *Lakes & Reservoirs: Research and Management*, 2004, **9**: 195-201
- [19] Jin C-X (金承翔), Sun J-J (孙建军), Huang M-S (黄民生). Study on purification and remediation of black-colored and odorous water body by combined biotechnologies. *Water Purification Technology* (净水技术), 2005, **24**(4): 1-4 (in Chinese)
- [20] Cheng J (程江), Wu A-N (吴阿娜), Che Y (车越), *et al.* Study on key indicators for judging black and odorous water in area of plain river system. *China Water and Wastewater* (中国给水排水), 2006, **22**(9): 19-22 (in Chinese)
- [21] Li W-J (李伟杰), Wang Y-H (汪永辉). The cycle and conversion of iron in the rivers and its relation to water blackening and stink. *Water Purification Technology* (净水技术), 2007, **26**(2): 35-37 (in Chinese)
- [22] Li Z (李真), Huang M-S (黄民生), He Y (何岩), *et al.* The relationship between the form transformation of iron and sulfur and the black-odor water body. *Environmental Science & Technology* (环境科学与技术), 2010, **33**(6E): 1-7 (in Chinese)



- [23] Cui W, Zhang Y, Huang MS. Activities of urease and phosphatase in integrated vertical flow constructed wetland and purification effect of black and malodorous river. *Agricultural Science & Technology*, 2011, **12**: 1186–1190
- [24] Xu M-D (徐明德), Yan Z-K (阎正坤), Zhu Q-L (朱秋丽). Study on black-stink assessment of river based on BP neural network-membership grade. *Mathematics in Practice and Theory* (数学的实践与认识), 2012, **42** (17): 55–61 (in Chinese)
- [25] Kutovaya OA, Watson SB. Development and application of a molecular assay to detect and monitor geosmin-producing cyanobacteria and actinomycetes in the Great Lakes. *Journal of Great Lakes Research*, 2014, **40**: 404–414
- [26] Zhang J-Y (张晶尧), Xu M-D (徐明德), Zhang J-J (张君杰), *et al.* Application of entropy-weighted matter-element model in black-odour prediction for river. *Yellow River* (人民黄河), 2015, **37** (2): 85–88 (in Chinese)
- [27] Chen J, Xie P, Ma ZM, *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. *Science of the Total Environment*, 2010, **409**: 314–325
- [28] Lu G-H (陆桂华), Ma Q (马倩). Analysis on the causes of forming black water cluster in Taihu Lake. *Advance in Water Science* (水科学进展), 2009, **20** (3): 438–442 (in Chinese)
- [29] Gao JH, Jia JJ, Kettner AJ, *et al.* Changes in water and sediment exchange between the Changjiang River and Poyang Lake under natural and anthropogenic conditions, China. *Science of the Total Environment*, 2014, **481**: 542–553
- [30] Xiao L (肖靓), Zhao W-T (赵文涛), Luan J-S (栾敬帅), *et al.* Review on black-odor prediction models and pollution control technology for urban river. *Journal of Anhui Agricultural Sciences* (安徽农业科学), 2014, **42** (26): 9116–9120 (in Chinese)
- [31] Zhang M (张敏), Yang Q-W (杨芹伟). Feasible measure for basically eliminating black and stink of waterways in urban area. *Shanghai Environmental Sciences* (上海环境科学), 2004, **23** (4): 161–163 (in Chinese)
- [32] Wang H (王浩), Yan D-H (严登华), Xiao W-H (肖伟华), *et al.* Total Quantity Control of Water Pollutions Based on Watershed Hydrological Cycle: Theory, Method and Application. Beijing: China Water and Power Press, 2012 (in Chinese)
- [33] Yu Y-B (于玉彬), Huang Y (黄勇). Review of reason and mechanism of black and stink in urban rivers. *Environmental Science and Technology* (环境科技), 2010, **23** (suppl.2): 113–114 (in Chinese)
- [34] Ding Q (丁琦), Tang L-H (汤利华), Xie D (谢丹). Forming mechanism of black-odor of a campus lake. *Industrial Water and Wastewater* (工业用水与废水), 2012, **43** (3): 28–30 (in Chinese)
- [35] Lu X (卢信), Feng Z-Y (冯紫艳), Shang J-G (商景阁), *et al.* Black water bloom induced by different types of organic matters and forming mechanisms of major odorous compounds. *Environmental Science* (环境科学), 2012, **33** (9): 3152–3159 (in Chinese)
- [36] Li W-J (李伟杰), Wang Y-H (汪永辉). The cycle and conversion of iron in the rivers and its relation to water blackening and stink. *Water Purification Technology* (净水技术), 2007, **26** (2): 35–37 (in Chinese)
- [37] Li X-L (李相力), Zhang P-C (张鹏程), Yu H-C (于洪存). Analysis on black color and odor of Weigong River in Shenyang. *Environmental Protection Science* (环境保护科学), 2003, **29** (5): 27–28 (in Chinese)
- [38] Kiene RP, Hines ME. Microbial formation of dimethyl sulfide in anoxic *Sphagnum* peat. *Applied and Environmental Microbiology*, 1995, **61**: 2720–2726
- [39] Kiene RP, Linn LJ. The fate of dissolved dimethylsulfoniopropionate (DMSP) in seawater: Tracer studies using 35S-DMSP. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2000, **64**: 2797–2810
- [40] Bentley R, Chasteen TG. Environmental VOSCs: Formation and degradation of dimethyl sulfide, methanethiol and related materials. *Chemosphere*, 2004, **55**: 291–317
- [41] Lu X, Fan CX, He W, *et al.* Sulfur-containing amino acid methionine as the precursor of volatile organic sulfur compounds in alga-induced black bloom. *Journal of Environmental Sciences*, 2013, **25**: 33–43
- [42] Parinet J, Rodriguez MJ, Serodes J. Influence of water quality on the presence of off-flavour compounds (geosmin and 2-methylisoborneol). *Water Research*, 2010, **44**: 5847–5856
- [43] Dionigi CP, Lawlor TE, McFarland JE, *et al.* Evaluation of geosmin and 2-methylisoborneol on the histidine dependence of TA98 and TA100 salmonella typhimurium tester strains. *Water Research*, 1993, **27**: 1615–1618
- [44] Gerber NN. A volatile metabolite of actinomycetes, 2-methylisoborneol. *Journal of Antibiotics*, 1969, **22**: 508–509
- [45] Gerber NN. Geosmin from microorganisms, istrans-1, 10-dimethyl-Trans-9- decalol. *Tetrahedron Letters*, 1968, **25**: 2971–2974
- [46] Gerber NN, Lechevalier HA. Geosmin, an earthy-smelling substance isolated from actinomycetes. *Applied Microbiology*, 1965, **13**: 935–937
- [47] Gerber NN. Geosmin, an earthy-smelling substance isolated from actinomycetes. *Biotechnology and Bioengineering*, 1967, **9**: 321–327
- [48] Tabachek JL, Yurkowski M. Isolation and identification of blue green algae producing musty odor metabolites, geosmin and 2-methylisoborneol in saline lakes in Manitoba. *Journal of Fisheries Research Board of Canada*, 1976, **33**: 25–35
- [49] Tsuchiya Y, Matsumoto A, Okamoto T. Volatile metabolites produced by actinomycetes, isolated from Lake Tairo at Miyakejima. *Yakugaku Zasshi*, 1978, **98**: 454–550

- [50] Sugiura N, Yagi O, Sudo R. Effect of various environmental factors in musty odor production by actinomycetes (*Streptomyces*). *Japanese Journal of Water Pollution Research*, 1983, **6**: 77–86
- [51] Sugiura N, Yagi O, Sudo R. Musty odor blue green algae, *Phormidium tenue*, in Lake Kasumigaura. *Environmental Science and Technology Letters*, 1986, **7**: 77–86
- [52] Pirbazari M, Ravindran V, Badriyha BN, *et al.* GAC absorber design protocol for the removal of off-flavors. *Water Research*, 1993, **27**: 1153–1166
- [53] Juttner F, Watson SB. Biochemical and ecological control of geosmin and 2-methylisoborneol in source waters. *Applied and Environmental Microbiology*, 2007, **73**: 4395–4406
- [54] Fang Y-Q (方宇翹), Qiu Z-N (裘祖楠), Zhang G-Y (张国莹). Study of the phenomena of water blackening and stink on Suzhou Creek. *China Environmental Science* (中国环境科学), 1993, **13**(4): 256–262 (in Chinese)
- [55] Dai S-G (戴树桂), Zhuang Y-Y (庄源益), Jin Z-H (金朝晖). Statistical analysis of parameters for simulated polluted aquatic ecosystems. *Acta Scientiae Circumstantiae* (环境科学学报), 1994, **14**(2): 144–151 (in Chinese)
- [56] Yu X (俞 欣), Chen T-A (陈天安). Study of a rapid assessment method on black-odor river. *Environmental Science and Management* (环境科学与管理), 2015, **40**(3): 176–179 (in Chinese)
- [57] Lyu J-J (吕佳佳), Yang J-Y (杨娇艳), Liao W-F (廖卫芳), *et al.* Study on the water quality and environmental conditions of the formation of black-odorous water. *Journal of Huazhong Normal University* (Natural Science) (华东师范大学学报:自然科学版), 2014, **48**(5): 711–716 (in Chinese)
- [58] Liu D-S (刘德生). *Environmental Monitoring*. Beijing: Chemical Industry Press, 2001: 51–120 (in Chinese)
- [59] Zhu M (诸 敏), Yao Z-Y (姚祯业), Shen B-K (沈炳康). Research on the stink-smell and purification capacity of drainage brook. *Environment Pollution and Control* (环境污染与防治), 1986, **7**(5): 14–21 (in Chinese)
- [60] Xu Z-X (徐祖信). Comprehensive water quality identification index for environmental quality assessment of surface water. *Journal of Tongji University* (Natural Science) (同济大学学报:自然科学版), 2005, **33**(4): 482–488 (in Chinese)
- [61] Hao X-M (郝晓明), Hu Z-B (胡湛波), Liu C (刘成), *et al.* Development of black-odour prediction model for Nanning Zhupai Creek. *Journal of East China Normal University* (Natural Science) (华东师范大学学报:自然科学版), 2011 (1): 163–171 (in Chinese)
- [62] Li P-Z (李鹏章). A Study on the Characterization Method of Apparent Pollution for Scenic Water. Master Thesis. Suzhou: Suzhou University of Science and Technology, 2011 (in Chinese)
- [63] Christensen VG, Graham JL, Milligan CR, *et al.* Water quality and relation to taste-and-odor compounds in the North Fork Ninescaw River and Cheney Reservoir, South central Kansas. United States Geological Survey Scientific Investigations Report. Center for Integrated Data Analytics, Wisconsin Science Center, 2006
- [64] Smith VH, Jonathan SD, Frank DJ, *et al.* Managing taste and odor problems in a eutrophic drinking water reservoir. *Journal of Lake and Reservoir Management*, 2002, **18**: 319–323
- [65] Mau DP, Ziegler AC, Porter SD, *et al.* Surface water-quality conditions and relation to taste-and-odor occurrences in the Lake Olathe Watershed, Northeast Kansas, 2000–02. United States Geological Survey Scientific Investigations Report, 2004: 95
- [66] Dzialowski AR, Smith VH, Huggins DG, *et al.* Development of predictive models for geosmin-related taste and odor in Kansas, USA, drinking water reservoirs. *Water Research*, 2009, **43**: 2829–2840
- [67] Si Y-B (司有斌), Bao J-J (包军杰), Cao D-J (曹德菊), *et al.* Purification of eutrophicated water body by *Vetiveria zizanioids*. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2003, **14**(2): 277–279 (in Chinese)

---

**作者简介** 王 旭,男,1987年生,研究实习员.主要从事水污染控制和水环境与生态修复技术研究. E-mail: wangxu8568658@163.com

**责任编辑** 肖 红

---