

美国溶解氧基准标准及其对我国的启示

黄炜惠¹, 李文攀², 霍守亮¹, 马春子^{1,3*}, 陈艳卿¹, 何卓识¹, 郑佳琦¹

1. 中国环境科学研究院, 环境基准与风险评估国家重点实验室, 北京 100012

2. 中国环境监测总站, 北京 100012

3. 上海大学环境与化学工程学院, 上海 200444

摘要: 近年来我国水质整体改善, 但全国采用统一的溶解氧标准易导致不同地区水体欠保护或过保护. 美国拥有相对完善的溶解氧标准体系, 在综述了美国溶解氧基准标准制定体系的基础上, 初步分析了我国溶解氧标准现存的不足及美国溶解氧标准制定对我国的启示. 美国国家环境保护局通过分析不同溶解氧暴露情况对水生生物的影响, 针对淡水和海水2种栖息地环境, 对冷水和温水物种及其不同生活史阶段分别制定溶解氧基准值. 美国各州参照溶解氧基准, 考虑社会经济、反降级政策等因素, 在不同时间和地点分别制定了保护指定水体功能的溶解氧基准值. 我国现行的溶解氧标准值, 主要参考国外发达国家标准制定, 缺少对我国溶解氧背景浓度和水生生物溶解氧敏感性的基础研究. 为制定符合我国国情的溶解氧基准标准, 需在综合考虑我国气候、地理条件等自然因素对溶解氧影响基础上, 开展水生生物对溶解氧敏感性、栖息地环境对物种及溶解氧浓度影响的相关研究工作, 并综合考虑反降级政策, 防止水质进一步恶化.

关键词: 溶解氧; 美国; 标准; 基准

中图分类号: X651

文章编号: 1001-6929(2021)06-1338-09

文献标志码: A

DOI: 10.13198/j.issn.1001-6929.2021.04.18

US Dissolved Oxygen Criterion, Standard and Its Revelation for China

HUANG Weihui¹, LI Wenpan², HUO Shouliang¹, MA Chunzi^{1,3*}, CHEN Yanqing¹, HE Zhuoshi¹, ZHENG Jiaqi¹

1. State Key Laboratory of Environmental Criteria and Risk Assessment, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China

2. China National Environmental Monitoring Centre, Beijing 100012, China

3. School of Environmental and Chemical Engineering, Shanghai University, Shanghai 200444, China

Abstract: Water quality in China has improved markedly in recent years, while the adoption of single national dissolved oxygen (DO) standard is vulnerable to result in under-protection or over-protection of water in various regions. The United States (US) has a relatively perfect water quality standard system. The literature was examined to systematically discuss the development system of DO criterion and standard in US and its revelation for China, and preliminary analyze the disadvantages of the national DO standard. According to the analysis of the impacts of different DO exposure conditions on aquatic organisms, the US Environmental Protection Agency (US EPA) has established the DO criteria for cold water and warm water species and their different life history stages in view of the two habitat environments (freshwater and seawater). Taking into account DO criteria, social economy, and antidegradation policy, the States and Tribes of US have established DO standards to protect the designated water function in various times and places. The current DO standard values in China mainly referred to those of developed counties, lacking of basic research on the background DO concentration of and the DO sensitivity of aquatic organisms. In order to establish DO criteria and standards conforming to China's national conditions, it is necessary to synthetically consider the impacts of climate, geographical conditions, and other natural factors on DO, carry out relevant research on the sensitivity of aquatic organisms to DO, the impacts of habitat environment on species and DO concentration. Meanwhile, the anti-degradation policy should be taken into consideration to develop DO standards, and to prevent further deterioration of water quality.

Keywords: dissolved oxygen; United States (US); standard; criterion

收稿日期: 2021-01-29

修订日期: 2021-04-15

作者简介: 黄炜惠(1996-), 女, 河北邢台人, huangweihui2020@163.com.

* 责任作者, 马春子(1986-), 女, 山东泰安人, 高级工程师, 硕士, 主要从事水环境质量基准标准研究, xiaomachunzi@163.com

基金项目: 国家重点研发计划项目(No.2017YFA0605003); 国家自然科学基金项目(No.51922010)

Supported by National Key Research and Development Program of China (No.2017YFA0605003); National Natural Science Foundation of China (No.51922010)

我国溶解氧标准在借鉴国外水质标准的基础上制定. 我国幅员辽阔,地形复杂、气候多样,南北水体饱和溶解氧差异显著,全国采用统一的溶解氧标准易导致不同地理气候区域水体的欠保护或过保护. 近年来我国水环境质量总体呈向好趋势,正迈向生态文明建设的新阶段,为有利推进生态环境高水平保护,现急需通过科学的方法制定符合我国国情的溶解氧标准,实现水环境的精准保护. 美国从 20 世纪 40 年代开始探索建立水质标准,目前已经形成一套较为完善的溶解氧标准体系. 美国环境保护局(US EPA)制定国家层面的溶解氧基准,各州参照溶解氧基准结合具体水体功能制定溶解氧标准,并定期(3 年一次)对溶解氧标准进行审查和修订,US EPA 最终审批并监督实施^[1]. 该文通过系统梳理美国溶解氧基准标准制定体系,对比分析我国溶解氧标准体系现存不足,初步提出美国溶解氧标准制定对我国的启示.

1 美国溶解氧基准

溶解氧基准是指对水生生物产生可接受影响的最低溶解氧浓度^[2],是溶解氧标准制定的理论依据. 美国现行的溶解氧基准包括 1986 年 US EPA 发布的淡水溶解氧基准^[2-3]和 2000 年发布的海水溶解氧基准^[4]. 根据水生生物对溶解氧敏感性的不同,分别探讨了溶解氧对冷水生物和温水生物及其不同生活史阶段生长和生存的影响,制定了淡水和海水溶解氧的慢性基准值和急性基准值.

US EPA 针对冷水鱼和温水鱼的早期生活史阶段和其他生活史阶段,分别制定了溶解氧基准值(见表 1). 冷水鱼被认为是鲑科鱼类或与鲑科鱼类的溶解氧敏感度相似的生物^[3],一般生活在 20 ℃ 以下水体中^[5]. 温水鱼适宜生存的温度较高,所需的溶解氧基准值较低. 不同生活史阶段的鱼类对溶解氧的敏感度不同,鱼类在早期生活史阶段对溶解氧更敏感,需要制定更高的溶解氧基准值. 为了保护冷水鱼栖息地常见的昆虫,溶解氧急性基准值采用 4 mg/L,替代鲑科鱼类的急性基准值 3 mg/L^[3]. 为满足 7 d 平均值的要求,限制溶解氧 1 d 最小值的发生频率为每年 3 次,或将冷水鱼可接受的溶解氧 1 d 最小值增至 4.5 mg/L,温水鱼溶解氧 1 d 最小值增至 3.5 mg/L.

基于弗吉尼亚州(Virginia)夏季入海口和近岸海域脊椎动物和鱼类的毒理数据,US EPA 制定了海水(入海口和近岸海域)溶解氧基准值(见表 2),该值适用于弗吉尼亚州入海口和近岸海域(从低潮线向

表 1 美国淡水溶解氧基准				
Table 1 US freshwater dissolved oxygen criteria				
不同鱼类及生长阶段	溶解氧基准值/(mg/L)			
	30 d 平均	7 d 平均	7 d 平均最小	1 d 最小 ²⁾
冷水鱼基准	早期生活史阶段 ¹⁾	—	9.5(6.5)	— 8.0(5.0)
	其他生活史阶段	6.5	— 5	4
温水鱼基准	早期生活史阶段	—	6	— 5
	其他生活史阶段	5.5	— 4	3

注: 1) 早期生活史阶段包括所有胚胎、仔鱼和孵化后 30 d 的稚鱼阶段,如果早期生命处于底部砾石环境,上覆水的溶解氧基准采用括号外的值;如果早期生命处于上覆水环境中,直接采用括号内的溶解氧基准值; 2) 表示瞬时浓度,要求在任何时间都要达到.

海域延伸 3 m 范围)水生生物的保护^[4]. 根据表 2 中的公式,各州采用自有的生物毒性数据可以推导其相应的溶解氧基准值. 海水基准值分析了在持续低氧暴露(大于 24 h)和间歇低氧暴露(小于 24 h)两种方式下,低氧对水生生物不同生活史阶段的影响. 在持续低氧暴露情况下,采用处于未成熟和成熟阶段水生生物的急性毒性效应数据,利用毒性百分数排序法计算得到溶解氧急性基准值为 2.3 mg/L;采用处于生长阶段水生生物的慢性毒性效应(4~29 d 生长损失)数据,利用毒性百分数排序法计算得到溶解氧慢性基准值(4.8 mg/L);当水中溶解氧浓度介于二者之间时需要采用幼体增长阶段模型,通过设定可接受增长累积损失(5%),推导在该浓度下水生生物允许暴露间隔的持续时间,以评价该栖息地是否适合物种幼体生长.

在间歇低氧暴露情况下,需通过低氧状态的持续时间和强度,根据不同阶段的公式,计算得到溶解氧的允许浓度和最大允许天数,判断溶解氧的实际浓度是否达到水生生物生长和生存要求. 间歇低氧暴露下处于未成熟和成熟阶段水生生物的溶解氧基准值根据溶解氧在不同时间(h)造成的死亡率进行拟合,以 CMC(基准最小浓度值)为终点计算得到;生长阶段的数据与持续低氧暴露下生长阶段中慢性毒性数据来源相同,利用间歇低氧暴露 24 h 的生长损失(为持续低氧暴露 24 h 生长损失的 1.56 倍),计算得到某一时间内总生长损失小于 25%的溶解氧浓度和暴露允许时间;幼体增长阶段利用生长阶段计算得到 TTD 曲线(时间-死亡率曲线),将数据代入 TTD 曲线得到最大日死亡率,再根据死亡率-允许天数曲线,得到该死亡率下的最大允许天数^[4].

表 2 美国弗吉尼亚州 (Virginia) 海水溶解氧基准
Table 2 Saltwater dissolved oxygen criteria in Virginia, US

生活史阶段		持续低氧暴露 (大于 24 h)	间歇低氧暴露 (小于 24 h)
未成熟和 成熟期阶段	DO 浓度为 2.3 mg/L (基准最小浓度值, CMC)		$[DO] = 0.37 \times \ln t + 1.095$ 其中, $[DO]$ 为 DO 允许浓度 (mg/L), t 为暴露持续时间 (h)
生长阶段	DO 浓度为 4.8 mg/L (基准连续浓度值, CCC)		$\sum_i^n \frac{t_i \times 1.56 \times Gred_i}{24} < 25\%$ $Gred_i = -23.1 \times [DO]_i + 138.1$ 其中, n 为暴露时间的划分个数, i 为划分后的第 i 个暴露片段 (个), t_i 为第 i 个暴露片段的持续时间 (h), $Gred_i$ 为第 i 个暴露片段下的生长损失 (%), $[DO]_i$ 为第 i 个暴露片段下允许的溶解氧浓度 (mg/L)
幼体增长阶段	$\sum_i^n \frac{t_i(\text{actual})}{t_i(\text{allowed})} < 1$ $[DO]_i = \frac{13}{[2.8 + 1.84e^{-0.1t_i(\text{allowed})}]}$ 其中, n 为暴露时间的划分个数, i 为划分后的第 i 个暴露片段 (个), $t_i(\text{allowed})$ 为第 i 个暴露片段的允许的持续时间 (h), $t_i(\text{actual})$ 为第 i 个暴露片段的实际持续时间 (h), $[DO]_i$ 为第 i 个暴露片段下允许的溶解氧浓度 (mg/L)		通过 TTD 曲线得到最大日死亡率, 然后根据死亡率-允许天数曲线, 得到最终最大允许天数

2 美国溶解氧标准

溶解氧标准是参照溶解氧基准制定的保护特定水体功能的标准值, 采用溶解氧浓度和溶解氧饱和度来评价, 在 2 个指标都监测的情况下采用更严格的值对溶解氧进行评价. 美国各州对行政区内水体分段, 每段河流具有多种功能, 根据最敏感功能得到对应溶解氧标准值. 美国水质标准制定的目的是保护鱼类和贝类以及野生动物的生存和繁殖, 满足娱乐用水、饮用水供应、农业用水、工业用水及航行等功能, 并保护下游水质^[1,6]. 溶解氧基准只考虑了溶解氧对水生生物生长和生存的效应, 完全基于试验数据, 简化了环境要素的影响. 溶解氧标准的制定需要分析不同时间和栖息地环境中水生生物对溶解氧的敏感性, 并考虑社会经济等因素. 除了保护水生生物外, 溶解氧标准还通过实施反降级政策保护特定水体功能. 根据溶解氧标准保护目标的不同, 从保护水生生物、保护水体功能和反降级政策三方面来介绍美国溶解氧标准.

2.1 保护水生生物

为保护水生生物, 溶解氧标准最低限值为 4 mg/L^[7-15], 溶解氧饱和度不得超过 110%^[7,16] (见表 3). 不同环境生存着不同类型的生物, 生物在不同生活史阶段的生长代谢状况不同, 对低氧敏感性也不同. 基于溶解氧基准, 美国从海水 (入海口及近岸海域) 和淡水、冷水生物和温水生物以及物种不同生活史阶段 3 个层

次分别制定了溶解氧标准值. 海水溶解氧最低标准值为 4 mg/L^[10], 淡水溶解氧标准值较高, 最低标准值为 5 mg/L^[8,11,15,17-18]. 淡水生物又分为温水生物和冷水生物, 温水生物的溶解氧最低标准值为 5 mg/L^[5,14,16-19], 溶解氧饱和度标准为 60%^[18]; 冷水生物敏感的早期生活史阶段溶解氧标准为 7 mg/L^[8,15,18-21], 溶解氧饱和度标准为 75%^[18]; 冷水生物其他较不敏感的生活史阶段溶解氧标准为 6 mg/L^[8,15-16,18], 溶解氧饱和度标准为 70%^[18].

表 3 美国部分州保护水生生物溶解氧标准的最小值

Table 3 The minimum values of DO standards for the protection of aquatic life in some US states

水体类型及生长阶段		溶解氧标准最小值	
		溶解氧浓度/ (mg/L)	溶解氧饱和度/%
各州内所有水体		—	≤110
海水	入海口	4	—
	近岸海域	5	—
温水生物		5	60
淡水	早期生活史阶段	7	75
	其他生活史阶段	6	70

不同地貌、水文、气候因素导致栖息地环境各异, 随着时间变化栖息地环境和物种活动轨迹也会改变, 不同时间和栖息地环境中物种对溶解氧敏感性不同.

现阶段水环境受人类干扰严重,不同地区水质差异显著,需要制定不同的溶解氧标准。如缅因州、纽约州和马萨诸塞州等地区根据栖息地质量划分了水体等级,根据水体等级分别制定溶解氧标准。针对脆弱的栖息地和敏感物种及其生活史阶段,各州制定了符合当地实际情况的溶解氧标准。

2.1.1 海水溶解氧标准

根据水文和水质因素将海水分为入海口和近岸海域2种水体类型。入海口位于河流下游和大海交界处,受潮汐影响盐度变化大,污染较重。路易斯安那州入海口溶解氧标准为4 mg/L,近岸海域的溶解氧标准为5 mg/L^[10]。阿拉斯加州近岸海域1 m深的表层溶解氧浓度要求大于6 mg/L,入海口处受潮汐支配水体的溶解氧浓度大于5 mg/L^[7]。对入海口、近岸海域和淡水溶解氧标准值比较发现,入海口受陆地污染源和盐度双重影响,溶解氧标准值较低,适合耐污型水生生物生存。不同时间入海口处潮汐运动和生物活动存在显著差异,因此同一地点不同时间物种对溶解氧的敏感性不同。如华盛顿特区根据潮汐时间制定了不同的溶解氧标准值,规定2月1日—5月31日溶解氧标准瞬时值为5 mg/L,6月1日—翌年1月31日的溶解氧标准瞬时值为3.2 mg/L。根据不同时间和地点制定溶解氧标准能更有效地保护水生生物,避免过保护或欠保护现象的发生^[14]。

2.1.2 淡水溶解氧标准

淡水溶解氧标准分为冷水生物和温水生物2种溶解氧标准,并针对敏感物种的产卵阶段制定溶解氧标准值。根据水流状态将淡水栖息地分为河流和湖库2类。河流流速大,流量随季节变化显著,在流量过低情况下甚至会出现断流,无法维持水体正常功能。威斯康星州规定河流流量低于10年内最小7 d的平均流量(7Q10)或者全年平均流量的0.274%(相当于每年一次),难以维持生物生存繁殖等功能的情况下,可不制定溶解氧标准^[15]。密歇根州规定不同保护目标水质标准应用的流量要求:为保护野生动物,设计流量大于10年内最小90 d的平均流量(90Q10);为保护人体健康,设计流量大于谐波平均流量;在氨等物质排放的情况下,设计流量大于4个季节中流量最高月95%时间的流量;实际流量超过设计流量时,溶解氧标准值也应相应提高。水力发电、闸坝建设等工程导致河流流量进一步减少,溶解氧标准值降低^[13]。如水力发电设施下鱼类产卵期(7月15日—10月15日),爱达荷州制定溶解氧标准瞬时值为3.5 mg/L,显著低于其他条件下物种产卵

期的溶解氧标准值^[16]。

湖库等栖息地环境水体较深,随着深度的增加,水体中溶解氧的浓度因氧气补充减少而降低。在分层情况下,湖库下层水体植物产氧和大气复氧能力弱,耗氧速率超过氧气补充速率,易造成缺氧,因此溶解氧标准只适用于湖库水体表层或者混合状态良好的河流等水体。密西西比州规定了未分层水体中溶解氧标准的适用范围:如果水体最大深度小于或等于3 m,溶解氧标准适用于湖库上层水体(一半深度以上),否则适用于水面以下1.5 m内水体;对分层的水体,将湖库上层视为未分层水体^[13]。爱达荷州对不同水深的湖库规定了溶解氧标准的适用范围:对最大水深小于35 m的湖库,溶解氧标准值仅适用于水深20%以内的表层水体;超过35 m的湖库,溶解氧标准值适用于7 m以内表层水体;溶解氧标准值不适合分层湖库^[16]。

2.1.3 敏感物种及其生活史阶段

针对冷水鱼等敏感物种及其早期生活史阶段,需要制定更严格的溶解氧标准。在鲑鱼洄游期间,威斯康星州规定溶解氧浓度需保持在自然背景浓度下,阿拉斯加州对溯河产卵的鱼类制定溶解氧标准值为7 mg/L^[15]。华盛顿州规定鲑鱼饲养和迁徙期溶解氧标准值为6.5 mg/L,产卵期为8 mg/L;鳟鱼产卵期的溶解氧标准值也为8 mg/L;而红点鲑鱼产卵期溶解氧标准值高达9.5 mg/L^[14]。佛蒙特州规定鲑鱼卵成熟后期和仔鱼发育期的溶解氧饱和度为95%^[18]。由于鱼类有洄游的习性,尤其是生殖洄游期,在具体时间和地点制定溶解氧标准值是保护敏感物种更有效的措施。罗得岛州对鱼类早期生活史阶段所处的不同地点制定了不同溶解氧标准:早期生命在砾石处溶解氧标准值为8 mg/L;在上覆水中溶解氧标准值为5 mg/L^[19]。爱达荷州规定建有水力发电设施的河段鱼类产卵期的溶解氧标准适用的时间为7月15日—10月15日^[16]。缅因州鱼类产卵期溶解氧标准适应的时间为10月1日—翌年5月14日,溶解氧标准值为8 mg/L^[22]。冷水鱼产卵期需要较低的温度^[22],高温会使得物种敏感性升高,因此高温条件下应制定更严格的溶解氧标准来保护冷水生物^[14]。

2.2 保护水体功能

根据不同的水质等级制定不同水体功能的溶解氧标准。高质量水体能提供多种功能,根据最敏感功能制定高质量水体的溶解氧标准。水产养殖溶解氧标准范围为5~8 mg/L^[7,19];饮用水分为消毒后直接饮用水和给水处理后间接饮用水,其溶解氧标准范围

为4~8 mg/L^[5,7,12,19-20,22-23];农业用水、娱乐用水和工业用水的溶解氧标准范围均为3~8 mg/L^[5,7,12,19-20,22-25]. 针对冷水鱼产卵期制定的溶解氧标准值最高,为8 mg/L^[19,22],只保护水生生物生存而不考虑物种繁殖的溶解氧标准值为3 mg/L^[20]. 由于水流断流等原因,无法保护水生生物等功能,但能维持人体非直接接触的娱乐、景观和保护地下水等功能,且没有异味或腐臭的环境水体,被称为有限资源水体. 有限资源水体溶解氧浓度最小值应大于0,溶解氧日均值应大于1 mg/L^[12]. 佛罗里达州对工业用水制定的溶解氧标准为0.1~0.3 mg/L,允许溶解氧存在正常波动. 根据栖息地水质的特点,不同功能水体的溶解氧饱和度范围为60%~75%^[22],最高质量水体溶解氧标准应达到自然水平^[20,22]. 明尼苏达州为了防止富营养化,规定一昼夜内北部、中部和南部河流溶解氧浓度最大值和最小值之差应分别小于3、3.5和4.5 mg/L^[12].

海水没有饮用水供应等功能,对应溶解氧标准值较低. 海水中贝类的繁殖期和捕捞期、娱乐用水和工业用水的溶解氧标准为3~6 mg/L^[5,7,19-20]. 低质量海水只保护水生生物生存不考虑繁殖和娱乐等功能^[20].

2.3 反降级政策

反降级政策^[26-27]是为了保护水体并防止现有状况良好水体的水质恶化而制定的,是水质标准中的重要组成部分. 上述溶解氧标准值是为满足各种水体功能制定的溶解氧最低值. 对未受人类破坏的自然栖息地,如五大湖(苏必利尔湖、密歇根湖、休伦湖、伊利湖和安大略湖)等高质量水体,根据反降级政策应该保持自然状态,需要制定更高的溶解氧标准值. 如果现行标准低于可达最高标准,应修改至可达最高标准. 如果无法达到现行标准,除非是自然现象(非人类干扰)导致的溶解氧浓度偏低,否则低于溶解氧标准将被认为是对水体功能的损害. 由于受到短暂的人为因素影响而无法达到标准,在水体进行升级改造期间,可制定临时标准^[11]. 可达性分析表明,现有水质持续下降,或由于社会经济等其他因素无法达到现行标准时,可移除或者修改此水体功能并提供分析说明.

3 中美两国溶解氧测定方法比较

溶解氧测定的方法主要有碘量法、电化学法和荧光法^[28-29]. 碘量法操作较复杂,易受氧化、还原性物质干扰,无法在线连续监测;电化学法比碘量法测定快,操作简便,易受环境因素干扰,需一定流速或搅拌^[28];荧光法测定前无需极化和校准,响应时间快,

测量结果稳定,抗干扰能力强,无需更换膜组件及电解液等,探头耐用性高,电极寿命长,维护低. 我国目前发布了《水质 溶解氧的测定 碘量法》(GB 7489—1987)、《水质 溶解氧的测定 电化学探头法》(HJ 506—2009)和《便携式溶解氧测定仪技术要求及检测方法》(HJ 925—2017)3种溶解氧测定方法. 美国已用荧光法取代电化学法进行常规监测,并且建议在实验室用碘量法进行仪器校正^[30];荧光法在我国自动监测站和便携式溶解氧测定仪中广泛采用^[29]. 研究^[29]表明,电化学探头法和荧光法现场测定的溶解氧浓度没有显著差异. 中美两国采用相同的方法计算溶解氧饱和度,即测量的溶解氧浓度除以饱和溶解氧浓度乘以100%. 淡水饱和溶解氧浓度考虑温度和压强的影响,海水饱和溶解氧浓度考虑温度、压强和盐度的影响^[31]. 中美两国采用的溶解氧测定方法相近,溶解氧标准值具有可比性.

4 我国溶解氧标准及其存在的问题

为保护某一水体功能,美国考虑多种因素的影响制定溶解氧标准,与我国溶解氧标准值的范围存在较大的差异(见表4). 如我国溶解氧标准中为保护水生生物早期生活史阶段制定的溶解氧标准值为6 mg/L,其他生活史阶段为5 mg/L,与美国温水生物溶解氧标准值接近,低于美国鲑鱼产卵核心保护区的溶解氧标准值,高于水力发电设施下鱼类产卵所需的溶解氧值. 我国《海水水质标准》(GB 3097—1997)中一类和二类水体为保护水生生物制定的溶解氧标准为5~6 mg/L,与美国近岸海域溶解氧标准接近,但我国未对入海口制定溶解氧标准. 我国现行的《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)中溶解氧的标准值,主要参考国外发达国家标准制定,缺少对我国溶解氧背景浓度和水生生物溶解氧敏感性的基础研究(见表4). 通过对美国各州溶解氧基准标准体系的分析比较,我国溶解氧标准主要存在以下问题.

a) 溶解氧标准值单一,未考虑区域和季节差异性对溶解氧的影响. 我国地域辽阔,地形复杂,鱼类等物种丰富多样^[32-33],不同季节和区域饱和溶解氧浓度存在显著的差异性;同时,溶解氧浓度因海拔高度和温度的不同而差异显著,全国不宜采用统一的溶解氧标准评价水体. 采用溶解氧饱和度可以合理评价水体的溶解氧状况,但冰封期区域不宜采用溶解氧饱和度对溶解氧进行评价. 如东北地区温度较低,饱和溶解氧对温度变化较敏感,饱和溶解氧浓度较高且波动较大,在11~15 mg/L之间;南部地区温度高,饱和溶解氧浓度较低,在7~9 mg/L之间. 东北地区冬

表4 中国和美国溶解氧标准对比
Table 4 Comparison of DO standards between China and US

水体类型	保护目标	溶解氧标准	
		美国	中国
淡水	自然栖息地	保持自然状态	≥7.5 mg/L 或饱和度大于 90%
	淡水生物	7 mg/L(冷水生物早期生活史阶段); 6 mg/L (冷水生物其他生活史阶段); 5 mg/L(温水生物)	≥6 mg/L(早期生活史阶段); ≥5 mg/L(其他生活史阶段)
	水产养殖	5~8 mg/L	≥5 mg/L
	饮用水	4~8 mg/L	≥5 mg/L
	景观娱乐用水	3~8 mg/L	≥2 mg/L
	工业	3~8 mg/L	≥3 mg/L
	农业	3~8 mg/L	≥2 mg/L
	营养化	昼夜差<3~4.5 mg/L	—
海水	自然栖息地	保持自然状态	>6 mg/L
	入海口生物	3.2~6 mg/L	—
	近岸海域生物	4~7 mg/L	>5 mg/L
	贝类	3~6 mg/L	>5 mg/L
	娱乐	3~6 mg/L	>5 mg/L
	工业	3~6 mg/L	>4 mg/L

季溶解氧普遍大于 10 mg/L,而南方夏季溶解氧浓度普遍小于 7.5 mg/L.

b) 未考虑物种敏感性对溶解氧标准值的影响. 我国溶解氧标准针对水生生物栖息地、洄游活动、敏感生活史阶段等不同保护目标分类制定了溶解氧标准值,但没有考虑不同地区、不同时间物种种类等因素对溶解氧的影响. 同一地点物种会因水生生物的活动范围、栖息地的人文状况、温度等季节变化对溶解氧的敏感性产生影响. 如鲑科鱼类普遍比鲤科鱼类需要较高的溶解氧;叶尔羌高原鳅类夏季需氧量比冬季高^[34-35]等.

c) 未考虑入海口、水库等栖息地环境对物种及溶解氧浓度的影响. 栖息地环境比较脆弱的地区,易受人类活动影响导致溶解氧水平偏低,需要重点保护. 入海口是海水和淡水的混合区域,水文状况受潮汐和河流流量支配,水质受盐度和陆源污染影响,水文和水质波动明显,不适合敏感物种生存. 如我国长江口夏季受冲淡水影响导致入海口明显分层,底层氧气无法得到补充而产生严重低氧危害^[36-37]. 我国水利设施分布广泛,高坝泄水时产生的总溶解氧气体过饱和会导致下游鱼类产生气泡病甚至死亡^[38-39]. 较深的湖泊和水库流速缓慢,易形成分层水体,导致下层溶解氧缺氧严重. 夏季水体易出现富营养化现象,进一步加剧底层水体缺氧. 东北地区冰封期阻碍了

大气与水体中气体的交换,导致冰封期水体易出现缺氧现象.

d) 水质评价等级与水体功能划分等级不一致,未体现反降级政策. 根据我国地表水环境功能和保护目标,溶解氧标准值对应多功能水体,而目前我国水体功能划分不够详细,容易造成欠保护或过保护. 我国未实行反降级政策,会出现根据标准值评价等级和功能区水体划分等级不一致,而采取低级水质标准的情况,使得优质水体被合法降级,水质具有恶化风险,这与水质保护和管理原则相背. 由于人为活动导致的水质恶化而降低水质标准等级时,未进行可达性分析或者制定临时标准,缺少严格的反降级政策等监督管理措施. 如我国东北地区大部分水体冬季实际溶解氧浓度显著高于 GB 3838—2002《地表水环境质量标准》Ⅰ类标准限值(7.5 mg/L),但水功能区划为Ⅱ类,加大了水体污染空间,增加了水质恶化的风险.

5 我国溶解氧标准修订建议

我国溶解氧标准缺乏系统的理论研究,尤其缺乏对溶解氧基准的基础研究工作,这是制定标准的理论和科学基础^[40]. 溶解氧基准主要是针对保护水生生物制定,需要从物种对不同溶解氧浓度的敏感性等方面分析溶解氧对生物的影响. 近年来我国已经开展了一系列基准研究,为我国标准修订奠定了良好基础^[41],但目前尚未建立适于我国水生态系统保护的

基于溶解氧基准的溶解氧标准体系。

a) 开展溶解氧基准的分区研究工作。综合考虑气候、地理条件等自然因素对饱和溶解氧的影响,建议在根据饱和溶解氧浓度对全国进行分区的基础上,分区域制定溶解氧基准。

b) 开展水生生物对溶解氧敏感性的相关研究工作。不同于一般污染物,溶解氧受环境影响显著,物种对溶解氧的敏感性主要与生物种类本身和所处生活史阶段及环境因素有关。我国多采用密闭空间“窒息点”研究溶解氧对生物的毒性^[42-44],国际上采用一定时间内某一溶解氧浓度下生物产生的急性或慢性效应制定溶解氧基准,更接近实际水体情况。我国应开展符合国情的溶解氧毒性研究,并在分区基准制定的基础上,分析我国水生生物对溶解氧的敏感性,借鉴美国溶解氧基准值制定的毒性百分数排序法,考虑不同物种及其生活史阶段,分别制定保护水生生物生存和生长的急性基准值和慢性基准值。

c) 开展栖息地环境对物种及溶解氧浓度影响的相关研究工作。以保护水生生物为目标制定溶解氧标准值时,栖息地水文水质及生物活动都会发生季节波动,影响水生生物对溶解氧的敏感性,需要分析不同时间和栖息地条件下物种不同阶段对溶解氧的敏感性。针对我国环境脆弱区域和敏感物种及其生活史阶段,需要制定考虑地点、时间、物种等要素的溶解氧标准,如制定入海口、水库等环境下的溶解氧标准值。

d) 细化水体功能对应的溶解氧标准,并充分体现反降级政策。我国目前根据区域生态系统服务功能高低制定分类的溶解氧标准值,同一个溶解氧标准值对应多个功能。需要根据社会经济、栖息地环境物理化学和生物特征、及人类活动干扰程度,进一步明确和细化水体指定功能,对不同水体指定功能制定切实可行的溶解氧标准。根据我国水体自然状况和污染特征制定反降级政策,有效地保护和改善水体的现有水质,防止水体进一步退化,为水质标准的实施提供重要政策保障。同时,对由于人为原因不能达标的水体,要制定惩罚机制,根据污染源管控和社会经济因素制定可达的最大标准值,在进行水体修复时制定临时标准或提交降级说明,并监督和适时更新溶解氧标准。

总之,需要基于我国不同区域物种对溶解氧的敏感性分区制定溶解氧基准,在综合考虑社会经济、自然要素和反降级政策的基础上制定溶解氧标准。综合各部门力量细化水体功能,针对分段水体特定功能

制定相应的溶解氧标准,协调好跨省行政区水体管理部门,保证下游水体水质。

参考文献 (References) :

- [1] US EPA. Water Quality Standards [EB/OL]. Washington DC: Office of the Federal Register and the Government Publishing Office, 2020-11-24 [2020-12-06]. <https://www.ecfr.gov/cgi-bin/retrieveECFR?gp=&SID=3f8e8d7cb50e6ab955866c20d7b36776&mc=true&r=PART&n=pt40.24.131>.
- [2] US EPA. Ambient water quality criteria for dissolved oxygen [R]. Washington DC: Office of Water, 1986.
- [3] US EPA. Quality criteria for water [R]. Washington DC: Office of Water, 1986.
- [4] US EPA. Ambient aquatic life water quality criteria for dissolved oxygen (saltwater); cape cod to cape hatteras [R]. Washington DC: Office of Water, 2000.
- [5] Massachusetts Department of Environmental Protection. Massachusetts surface water quality standards [S/OL]. Massachusetts: Massachusetts Department of Environmental Protection, 2013-06-12 [2020-11-26]. <https://www.mass.gov/doc/314-cmr-400-surface-water-quality-standards/download>.
- [6] US Congress. Federal water pollution control ACT [R]. Washington DC: US Government Publishing Office, 2002.
- [7] Alaska Department of Environmental Conservation. Water quality standards [S/OL]. Alaska: Alaska Department of Environmental Conservation, 2020-03-05 [2020-11-26]. <https://www.epa.gov/sites/production/files/2020-07/documents/akwqs-chapter70-2020.pdf>.
- [8] Indiana Department of Environmental Management. Water quality standards [S/OL]. Indiana: Indiana Department of Environmental Management, 2015-05-20 [2020-11-26]. <https://www.epa.gov/sites/production/files/2014-12/documents/inwqs.pdf>.
- [9] Kansas Department of Health and Environment. Kansas surface water quality standards [S/OL]. Kansas: Kansas Department of Health and Environment, 2018-04-11 [2020-11-26]. <https://www.epa.gov/sites/production/files/2014-12/documents/kswqs-article16.pdf>.
- [10] Louisiana Department of Environmental quality. Surface water quality standards [S/OL]. Louisiana: Louisiana Department of Environmental quality, 2020-01-13 [2020-11-26]. <https://www.epa.gov/sites/production/files/2014-12/documents/lawqs.pdf>.
- [11] Michigan Department of Environmental Quality. Water quality standards [S/OL]. Michigan: Michigan Department of Environmental Quality, 2006-01-13 [2020-11-26]. <https://www.epa.gov/sites/production/files/2014-12/documents/mi-part4-wqs.pdf>.
- [12] Minnesota Pollution Control Agency. Water quality standards for protection of waters of the state [S/OL]. Minnesota: Minnesota Pollution Control Agency, 2020-02-12 [2020-11-26]. <https://www.epa.gov/sites/production/files/2014-12/documents/mnwqs-chapter-7050.pdf>.
- [13] Mississippi Department of Environmental Quality. Water quality criteria for intrastate, interstate, and coastal waters [S/OL]. Mississippi: Mississippi Department of Environmental Quality,

- 2016-02-25 [2020-11-26]. <https://www.epa.gov/sites/production/files/2014-12/documents/ms-wqs.pdf>.
- [14] Washington State Department of Ecology. Water quality standards for surface waters of the state of Washington [S/OL]. Washington; Washington State Department of Ecology, 2019-12-30 [2020-11-26]. <https://www.epa.gov/sites/production/files/2014-12/documents/wawqs.pdf>.
- [15] Wisconsin Department of Natural Resources. Water quality standards for Wisconsin surface waters [S/OL]. Wisconsin; Wisconsin Department of Natural Resources, 2020-06-18 [2020-11-26]. <https://www.epa.gov/sites/production/files/2014-12/documents/wiwqs-nr102.pdf>.
- [16] Idaho Department of Environmental Quality. Idaho water quality standards [S/OL]. Idaho; Idaho Department of Environmental Quality, 2019-11-12 [2020-11-26]. <https://www.epa.gov/sites/production/files/2014-12/documents/idwqs.pdf>.
- [17] Arizona Department of Environmental Quality. Water quality standards [S/OL]. Arizona; Arizona Department of Environmental Quality, 2016-12-31 [2020-11-26]. <https://www.epa.gov/sites/production/files/2014-12/documents/az-chapter11.pdf>.
- [18] Vermont Department of Environmental Conservation. Vermont water quality standards, environmental protection rule [S/OL]. Vermont; Vermont Department of Environmental Conservation, 2017-01-15 [2020-11-26]. <https://www.epa.gov/sites/production/files/2014-12/documents/vtwqs.pdf>.
- [19] Rhode Island Department of Environmental Management. Water quality regulations [S/OL]. Rhode Island; Rhode Island Department of Environmental Management, 2020-02-26 [2020-11-26]. <https://www.epa.gov/sites/production/files/2014-12/documents/riwqs.pdf>.
- [20] New York State Department of Environmental Conservation. Classifications and standards of quality and purity [S/OL]. New York; New York State Department of Environmental Conservation, 2018-03-07 [2020-11-26]. <https://www.epa.gov/sites/production/files/2014-12/documents/nywqs-section1.pdf>.
- [21] Ohio Department of Health. Ohio water quality standards [S/OL]. Ohio; Ohio Department of Health, 2018-05-09 [2020-11-26]. https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-09/documents/oh_34751_1_to_40.pdf.
- [22] Maine Department of Environmental Protection. Standards for classification of fresh surface waters [S/OL]. Maine; Maine Department of Environmental Protection, 2009-08-19 [2020-11-26]. <https://www.epa.gov/sites/production/files/2014-12/documents/mewqs-mrsa-465.pdf>.
- [23] Florida Department of Environment Protection. Surface water quality standards [S/OL]. Florida; Florida Department of Environment Protection, 2018-04-30 [2020-11-26]. https://www.epa.gov/sites/production/files/2014-12/documents/fl_section62-302.pdf.
- [24] Illinois Environment Agency. Water quality standards [S/OL]. Illinois; Illinois Environment Agency, 2019-07-01 [2020-11-26]. <https://www.epa.gov/sites/production/files/2019-11/documents/ilwqs-title35-part302.pdf>.
- [25] Columbia District Department of the Environment. Water quality standards [S/OL]. Washington DC; Columbia District Department of the Environment, 2020-02-19 [2020-11-26]. <https://www.epa.gov/sites/production/files/2014-12/documents/dcwqs-2014.pdf>.
- [26] 席北斗, 霍守亮, 陈奇, 等. 美国水质标准体系及其对我国水环境保护的启示[J]. 环境科学与技术, 2011, 34(5): 100-103.
- XI Beidou, HUO Shouliang, CHEN Qi, *et al.* US water quality standard system and its revelation for China [J]. Environmental Science & Technology (China), 2011, 34(5): 100-103.
- [27] Administrative Committee of the Federal Register. 40 CFR § 131.12; antidegradation policy and implementation methods [EB/OL]. 2021-03-18 [2021-03-20]. <https://www.ecfr.gov/cgi-bin/text-idx?SID=0647abd51b8a667b0d805614bd7817c2&mc=true&node=sp40.24.131.b&rgn=div6>.
- [28] 刘彬, 张缓缓, 金庆辉, 等. 溶解氧的测定[J]. 化学传感器, 2011, 31(4): 39-43.
- LIU Bin, ZHANG Huanhuan, JIN Qinghui, *et al.* Measurement of dissolved oxygen [J]. Chemical Sensors, 2011, 31(4): 39-43.
- [29] 吴阿娜, 王话翔, 汤琳. 两种溶解氧测定仪和碘量法测定地表水中溶解氧的比较和分析研究[J]. 环境科学与管理, 2021, 46(1): 95-99.
- WU Ana, WANG Huaxiang, TANG Lin. Comparison of two on-site dissolved oxygen monitoring methods with laboratory results [J]. Environmental Science and Management, 2021, 46(1): 95-99.
- [30] US Geological Survey. National field manual for the collection of water-quality data [S]. Virginia; US Geological Survey, 2020.
- [31] 生态环境部. HJ 2.3—2018 环境影响评价技术导则 地表水环境 [S]. 北京; 中国环境出版社, 2018.
- [32] 郑亮, 吕振波, 李凡, 等. 黄河口、长江口和珠江口水域鱼类分类学多样性的对比研究[J]. 大连海洋大学学报, 2014, 29(5): 530-535.
- ZHENG Liang, LÜ Zhenbo, LI Fan, *et al.* Comparison of ontaxonomic diversity of fish community among the Yellow River Estuary, Yangtze River Estuary, Pearl River Estuary and their adjacent waters [J]. Journal of Dalian Ocean University, 2014, 29(5): 530-535.
- [33] 邢迎春, 赵亚辉, 张春光, 等. 中国近、现代内陆水域鱼类系统分类学研究历史回顾[J]. 动物学研究, 2013, 34(4): 251-266.
- XING Yingchun, ZHAO Yahui, ZHANG Chunguang, *et al.* Review on taxonomical studies of Chinese inland-water fish [J]. Zoological Research, 2013, 34(4): 251-266.
- [34] 向伟. 北极茴鱼亲鱼耗氧率和窒息点的研究[J]. 水产养殖, 2014, 35(7): 30-32.
- XIANG Wei. Studies of *Thymallus arcticus grubei* on the oxygen consumption rate and suffocation point [J]. Journal of Aquaculture, 2014, 35(7): 30-32.
- [35] 雷曼红, 陈根元, 程勇, 等. 叶尔羌高原鳅耗氧率和窒息点的初步研究[J]. 水产养殖, 2007, 28(6): 1-3.
- LEI Manhong, CHEN Genyuan, CHENG Yong, *et al.* Studies of *Triplophysa (Hedinichthys) Yarkandensis (Day)* on the oxygen consumption rate and suffocation point [J]. Journal of Aquaculture, 2007, 28(6): 1-3.
- [36] 李博, 王鹏皓, 卢军炯, 等. 长江口海域水文环境要素分布及溶

- 解氧垂向输运[J].海洋与湖沼,2019,50(6):1161-1167.
- LI Bo, WANG Penghao, LU Junjiong, *et al.* Distribution of hydrological environmental elements and vertical transport of dissolved oxygen in Changjiang River Estuary[J].*Oceanologia et Limnologia Sinica*,2019,50(6):1161-1167.
- [37] ZHOU F, CHAI F, HUANG D, *et al.* Investigation of hypoxia off the Changjiang Estuary using a coupled model of ROMS-CoSiNE[J]. *Progress in Oceanography*,2017,159:237-254.
- [38] 冀前锋,王远铭,梁瑞峰,等.总溶解气体渐变饱和度下齐口裂腹鱼的耐受特征[J].工程科学与技术,2019,51(3):130-137.
- Ji Qianfeng, WANG Yuanming, LIANG Ruifeng, *et al.* Tolerance of schizothorax prenanti to gradually varied total dissolved gas supersaturation [J]. *Advanced Engineering Sciences*, 2019, 51 (3): 130-137.
- [39] 王远铭,张陵蕾,曾超,等.总溶解气体过饱和胁迫下齐口裂腹鱼的耐受和回避特征[J].水利学报,2015,46(4):480-488.
- WANG Yuanming, ZHANG Linglei, ZENG Chao, *et al.* Tolerance and avoidance responses of Schizothorax prenanti to total dissolved gas supersaturation[J].*Journal of Hydraulic Engineering*,2015,46(4):480-488.
- [40] 杨帆,林忠胜,张哲,等.浅析我国地表水与海水环境质量标准存在的问题[J].海洋开发与管理,2018,35(7):36-41.
- YANG Fan, LIN Zhongsheng, ZHANG Zhe, *et al.* Problems in environmental quality standards of surface water and marine water in China[J].*Ocean Development and Management*,2018,35(7):36-41.
- [41] 张远,林佳宁,王慧,等.中国地表水环境质量标准研究[J].环境科学研究,2020,33(11):2523-2528.
- ZHANG Yuan, LIN Jianing, WANG Hui, *et al.* Research on environmental quality standard for surface water [J].*Research of Environmental Sciences*,2020,33(11):2523-2528.
- [42] 杨斯琪,郑洪武,孙颖,等.氨氮、温度和体重对大口黑鲈 (*Micropterus salmoides*) 幼鱼耗氧率和窒息点的影响[J].海洋与湖沼,2019,50(6):1328-1333.
- YANG Siqi, ZHENG Hongwu, SUN Ying, *et al.* Effects of ammonia exposure, temperature, and body weight on oxygen consumption rate and asphyxiation point of juvenile largemouth bass *Micropterus salmoides* [J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2019, 50 (6): 1328-1333.
- [43] 杨小东,江兴龙,乐普敏,等.南美洲鳗鲡 (*Anguilla rostrata*) 的耗氧率(ROC)、窒息点(AP)和适温范围(RT)及对非离子氨(NIA)、NO₂⁻的LC50和SC的研究[J].海洋与湖沼,2019,50(2):455-464.
- YANG Xiaodong, JIANG Xinglong, LE Pumin, *et al.* Studies on oxygen consumption rate (ROC), asphyxial point (AP) and optimum water temperature range (RT) of *Anguilla rostrata* and LC50 and SC of non-ionic ammonia (NIA) and nitrite in water [J].*Oceanologia et Limnologia Sinica*,2019,50(2):455-464.
- [44] 包杰,姜宏波,付佩佩,等.中华小长臂虾对盐度的耐受性及盐度对其呼吸代谢的影响[J].生态学杂志,2018,37(11):3351-3356.
- BAO Jie, JIANG Hongbo, FU Peipei, *et al.* Salinity tolerance of *Palaemonetes sinensis* and effects of salinity on its respiratory metabolism[J].*Chinese Journal of Ecology* 2018,37(11):3351-3356.

(责任编辑:张蕊)