

大辽河近入海河段水体溶解氧分布特征及低氧成因的初步分析

杨丽娜¹, 李正炎^{1,2*}, 张学庆¹

(1. 中国海洋大学环境科学与工程学院, 青岛 266100; 2. 中国海洋大学海洋环境与生态教育部重点实验室, 青岛 266100)

摘要:根据2009年春、夏季大辽河近入海河段的大面站和连续站观测,分析了水体溶解氧(dissolved oxygen, DO)的时空分布规律,并对近入海河段上游低氧区的成因进行了初步探讨. 结果表明,水体溶解氧含量在空间分布上呈入海口高、河段上游低,表层高、底层低的趋势;时间分布上呈白天高、夜间低,春季高、夏季低的趋势. 夏季溶解氧含量介于1.36~4.77 mg/L之间,平均为3.44 mg/L,其中河段下游的溶解氧含量平均为3.94 mg/L,上游距入海口约45 km处开始出现较大面积的低氧区,溶解氧含量平均为2.33 mg/L,最低1.36 mg/L. 溶解氧与温度、盐度、叶绿素a、营养盐和高锰酸盐指数的相关性分析显示,溶解氧含量与营养盐和有机污染物的相关性最显著,由此推断低氧区形成的主要原因是径流营养盐的输入和有机污染物的排放,而夏季表层水温升高导致的水体垂直层化作用进一步加剧了底层溶解氧含量的降低.

关键词:溶解氧; 低氧; 大辽河; 河口

中图分类号:X131.2 **文献标识码:**A **文章编号:**0250-3301(2011)01-0051-07

Distribution Characteristics of Dissolved Oxygen and Mechanism of Hypoxia in the Upper Estuarine Zone of the Daliaohe River

YANG Li-na¹, LI Zheng-yan^{1,2}, ZHANG Xue-qing¹

(1. College of Environmental Science and Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, China; 2. Key Laboratory of Marine Environmental Science and Ecology, Ministry of Education, Ocean University of China, Qingdao 266100, China)

Abstract:Based on field surveys in the upper estuarine zone of the Daliaohe River in Spring and Summer of 2009, the spatial and temporal distributions of dissolved oxygen were analyzed and the mechanism of hypoxia were preliminarily discussed. The results indicated that DO concentrations were higher in the river mouth and lower in the upper reaches, higher in surface layers and lower in bottom concerning its spatial distribution. For its temporal distribution, DO concentrations were higher in daytime and lower at night, higher in Spring and lower in Summer. The DO concentrations in the upper estuarine zone of the Daliaohe River in Summer ranged between 1.36-4.77 mg/L with an average of 3.44 mg/L. The concentrations in the lower reaches were higher with an average of 3.94 mg/L. A large hypoxia area was recorded in Summer in the upper reaches of the estuary starting from about 45 km away from the river gate with an average DO concentration of 2.33 mg/L and a minimum of 1.36 mg/L. The correlation analysis showed that DO concentration was significantly correlated with nutrients and permanganate index. Excessive discharge of nutrients and organic pollutants were, therefore, main factors causing hypoxia, and water column stratification due to temperature rise in Summer in surface layers led to further reduction of DO in bottom layers of the water.

Key words:dissolved oxygen; hypoxia; the Daliaohe River; estuary

溶解氧含量是衡量水体环境质量的重要指标之一,它可以直接反映生物的生长状况和水体的污染程度. 水体中的溶解氧主要来源于大气中氧的溶解和浮游植物的光合作用;消耗途径则主要包括水生生物的呼吸作用和有机物质的降解. 一般来说,水体中溶解氧的含量低于5 mg/L时,便会对水生生物的生存产生不良影响,低于2 mg/L时会导致鱼类窒息死亡,大多数藻类也无法存活^[1]. Schuble等^[2]把低氧(Hypoxia)的标准定义为溶解氧含量低于3 mg/L.

河口是海洋与河流相互作用的耦合带,是陆源物质的主要接受体(“汇”),也是海洋物质的输出

“源”. 它具有典型的区域性特征,不仅受到海陆自然力的强烈作用,也是人类活动最频繁、环境变化最剧烈的地区之一. 因此,河口区中水体的溶解氧含量除受营养物质、有机污染和生物活动的影响外,还取决于水体稳定度、垂直层化作用以及海水运动等水动力条件. 营养盐和有机物的大量输入,藻类的过度繁殖,以及水体发生较强的层化作用而妨碍垂直混合,都会大量消耗溶解氧而导致河口低氧区的形成. 近

收稿日期:2010-01-06;修订日期:2010-03-24

基金项目:国家水体污染控制与治理科技重大专项(2008ZX07526-001-02, 2009ZX07528-006-03)

作者简介:杨丽娜(1985~),女,硕士研究生,主要研究方向为河口环境生态学,E-mail:yangln_851002@126.com

* 通讯联系人,E-mail:zhengyan@ouc.edu.cn

年来,河口的缺氧问题已经成为全球性的重大生态问题,引起了国内外学者的广泛关注. 20 世纪 90 年代初到现在,世界许多河口地区,夏季常常出现缺氧现象,最典型的例子是墨西哥湾北部发现的高达 2 万 km² 的低氧区^[3],研究表明,径流带来的营养物质分解是该低溶氧区形成的主要原因. 在美国西部的长岛海峡, Jay 等^[4] 认为夏季层化作用形成的密度跃层是导致底部水体缺氧的主要原因,而 Welsh 等^[5] 的研究发现,氮的过度排放及其导致的藻类大量繁殖是形成低氧区的主要原因. 在中国,长江口、珠江口以及一些沿岸海域也存在季节性的缺氧现象,研究较多的是长江口外的低氧区,强烈的水体层化作用限制了表底层的氧交换,导致出现了面积达 13 700 km²,平均厚度达 20m 的底层低氧区 (DO < 2 mg/L),其溶解氧的最低值甚至达 1 mg/L. 同时,长江径流携带的大量营养盐促进了这一海域的初级生产,从而加剧了长江口及邻近海域氧的亏损^[6].

大辽河是辽宁省内自浑河、太子河汇流后的三岔河至营口入海口的水域,是一条具有航运、养殖、灌溉等多功能的河道,近入海河段长度约 96 km. 由于沿途流经众多工业城镇,携带了大量的工业和生活污水,河水及其所携带的物质进入大辽河之后,会受到河流与海洋共同的物理、化学和生物化学过程的影响. 营养物质的输入、有机污染物的氧化降解、水体的垂直层化作用、浮游植物的过度繁殖等因素的共同作用很容易引起水体溶解氧含量的降低,甚至导致低氧区的形成. 但目前国内对大辽河河口的溶解氧分布特征及低氧区成因的研究报道还不多见,且研究区域主要分布在入海口邻近海域^[7],而对于大辽河近入海河段的研究还未见报道,因此本研究考察了大辽河近入海河段水体溶解氧的时空分布特征,并初步分析了低氧区形成的原因和机制,这对于大辽河河口的水质保护和环境管理工作具有一定的指导意义.

1 材料与方法

于 2009 年春季(5 月 15 ~ 25 日)和夏季(9 月 1 ~ 12 日)对大辽河近入海河段(40°40' ~ 41°01'N, 122°05' ~ 122°26'E)环境进行了调查,共设置 16 个调查站位(图 1),并在辽河公园(S4)和三岔河(S16)2 个站位进行了 24h 连续观测. 观测项目包括温度、盐度、溶解氧、营养盐、高锰酸盐指数、叶绿素 a 等(表 1). 其中,温度、盐度和溶解氧分别由便携式水质参数仪和溶解氧仪现场测定;营养盐样品经

醋酸纤维滤膜过滤,氯仿固定后用 Bran Luebbe 营养盐自动分析仪进行测定. 高锰酸盐指数的测定采用碱性高锰酸钾法. 测定叶绿素 a 的水样经醋酸纤维滤膜过滤后,将膜于 -20℃ 下冷冻保存,采用萃取荧光法测定. 连续站溶解氧的含量采用多参数水质仪进行测定. 数据的统计分析采用 SPSS13. 0.

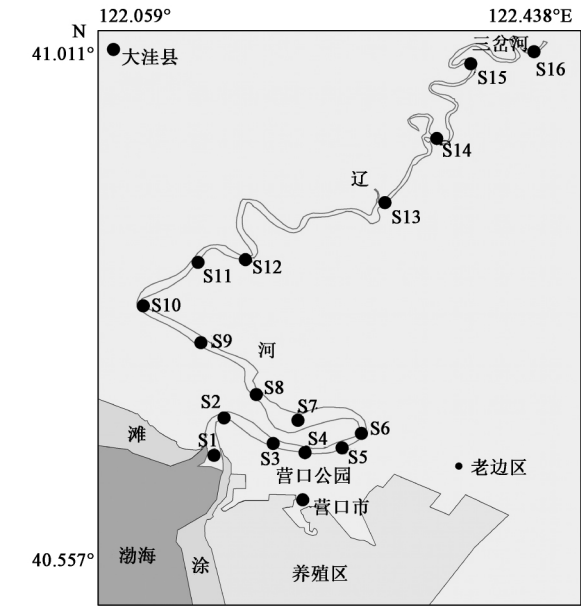


图 1 大辽河近入海河段调查站位
Fig. 1 Sampling stations in the upper estuarine zone of the Daliaohe River

表 1 大辽河近入海河段夏季水深、表层水温
和表层盐度监测结果

Table 1 Water depth, temperature and salinity in surface layers in the upper estuarine zone of the Daliaohe River in Summer

站位	水深/m	表层水温/℃	表层盐度
S1	8	23.3	24.0
S2	17	23.3	22.4
S3	8	23.4	20.4
S4	7.5	22.9	18.2
S5	5	23.2	18.2
S6	8	23.3	17.7
S7	7.5	23.3	17.2
S8	7	23.0	14.9
S9	3.5	24.0	12.0
S10	2	23.8	7.1
S11	7	23.8	3.9
S12	15	23.7	1.7
S13	3	23.7	0.5
S14	2	23.9	0.2
S15	10	23.5	0.1
S16	5	23.9	0.1

2 结果与讨论

2.1 大辽河近入海河段溶解氧空间分布特征

2.1.1 夏季溶解氧平面分布特征

夏季大辽河近入海河段水体的溶解氧含量总体表现为自入海口至河段上游逐渐降低的趋势. 溶解氧含量 1.36 ~ 4.77 mg/L, 平均为 3.44 mg/L. 表层溶解氧含量 2.12 ~ 4.77 mg/L, 平均为 3.62 mg/L. 底层溶解氧含量 1.36 ~ 4.63 mg/L, 平均为 3.28 mg/L, 基本上呈表层高、底层低的分布规律(图2). 在入海口附近, 表底层溶解氧含量差异较小, 但往河段上游方向表底层溶解氧的差异逐渐增大, 且从 S12 站位开始表底层均出现较大范围的低氧区($DO < 3$ mg/L), 底层溶解氧含量最低可达 1.36 mg/L. 较以往报道的大辽河溶解氧含量的最小值更低^[7], 说明溶解氧的含量正在下降, 该流域的缺氧问题也日趋严重.

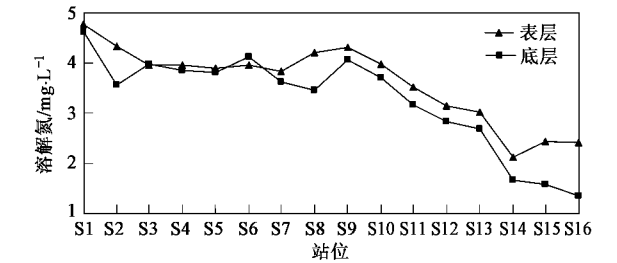


图2 夏季大辽河近入海河段表底层水体溶解氧含量的空间分布特征

Fig.2 Spatial distribution of DO in surface and bottom water layers in the upper estuarine zone of the Daliaohe River in Summer

2.1.2 夏季溶解氧垂直分布特征

以辽河公园(S4)和三岔河(S16)2个站位的溶解氧含量随水深的变化为例来研究夏季大辽河近入海河段上游和下游的溶解氧垂直分布规律. 由图3可知, 辽河公园站和三岔河站的溶解氧含量均呈现由表层至底层递减的规律, 且都存在垂直分层现象. 辽河公园站邻近大辽河入海口, 表层水-气交换条件好, 溶解氧含量较高, 底层由于有海水入侵, 垂直变化很小, 反而在水深2 m左右的次表层出现较弱的溶解氧垂直分层. 三岔河站位于河段上游, 由于夏季水体稳定度高, 垂直混合作用较弱, 阻碍了上、下层的氧气交换, 因此溶解氧含量的垂直变化较大.

2.2 大辽河近入海河段溶解氧时间分布特征

2.2.1 溶解氧含量的昼夜变化特征

分别在辽河公园(S4)和三岔河(S16)设置24 h

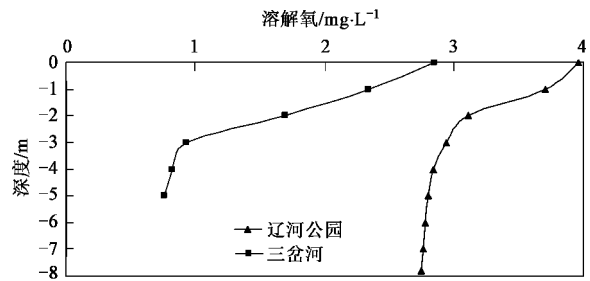


图3 夏季营口公园站和三岔河站的溶解氧垂直分布特征

Fig. 3 Vertical distribution of DO at the stations of Yingkou Park and Sancha River in Summer

(9月3日14:00~9月4日14:00)连续监测站位, 观测表层溶解氧的昼夜变化特征. 结果表明, 三岔河站的表层溶解氧含量为0.78~2.60 mg/L, 平均为1.4 mg/L, 其昼夜变化规律明显, 最高值出现在17:00, 最低值出现在01:00, 溶解氧含量呈现白天高、夜间低、昼夜差别大的特点. 由于三岔河站位于大辽河近入海河段的上游, 水体稳定度高, 表、底层的氧交换受阻, 因而浮游植物的光合作用导致了溶解氧含量的昼夜差别. 相反, 辽河公园的表层溶解氧含量昼夜变化不明显, 最高值为3.96 mg/L, 出现在14:00, 最低值为3.80 mg/L, 出现在06:00, 平均含量为3.87 mg/L(图4). 辽河公园站靠近入海口, 水动力条件较好, 海水的潮汐运动会带来大量的溶解氧, 从而使表层溶解氧得到补充, 而且辽河公园站与三岔河站相比, 浮游植物的光合作用减弱(表2), 因此其表层溶解氧含量的昼夜变化较小.

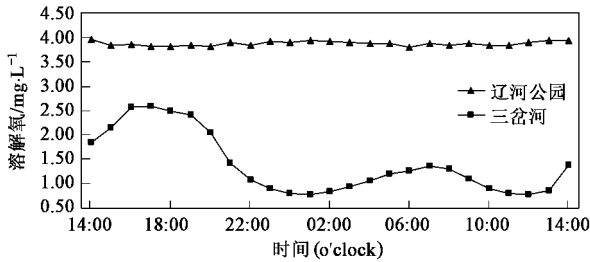


图4 夏季大辽河近入海河段连续站水体溶解氧含量的昼夜变化特征

Fig.4 Diurnal variation of DO at continuous stations in the upper estuarine zone of the Daliaohe River in Summer

2.2.2 溶解氧含量的季节变化特征

大辽河近入海河段春、夏季溶解氧含量的变化如图5所示, 表、底层水体都呈现春季>夏季的规律. 春季表层水体的溶解氧含量4.74~7.05 mg/L,

表 2 大辽河近入海河段夏季表层溶解氧与温、盐、高锰酸盐指数、营养盐和叶绿素 a 的相关关系¹⁾

Table 2 Correlation coefficients between DO, temperature (*t*), salinity (*S*), permanganate index, nutrients and chlorophyll a (Chl-a) in surface water layer in the upper estuarine zone of the Daliaohe River in Summer

	DO	<i>t</i>	<i>S</i>	高锰酸盐指数	NO ₃ ⁻	NH ₄ ⁺	NO ₂ ⁻	PO ₄ ³⁻	Chl-a
DO	1								
<i>t</i>	-0.506 *	1							
<i>S</i>	0.861 **	-0.712 **	1						
高锰酸盐指数	-0.665 **	0.308	-0.640 **	1					
NO ₃ ⁻	-0.781 **	0.207	-0.645 **	0.613 *	1				
NH ₄ ⁺	-0.644 **	0.294	-0.556 *	0.405	0.534 *	1			
NO ₂ ⁻	-0.640 **	0.205	-0.567 *	0.366	0.578 *	0.906 **	1		
PO ₄ ³⁻	-0.049	0.049	0.015	0.127	-0.011	0.051	-0.195	1	
Chl-a	-0.876 **	0.453	-0.794 **	0.459	0.771 **	0.709 **	0.818 **	0.150	1

1) ** 表示 $p < 0.01$, 极显著相关; * 表示 $p < 0.05$, 显著相关, 下同

平均含量为 6.60 mg/L; 底层溶解氧含量 4.65 ~ 7.05 mg/L, 平均含量为 6.57 mg/L. 除入海口处 (S1) 溶解氧含量稍偏低外, 其它站位的溶解氧含量都相对较高, 没有出现溶解氧的垂直分层现象, 也不存在底层的缺氧问题. 夏季溶解氧的含量则普遍较低, 自入海口至河段上游逐渐出现溶解氧含量的垂

直分层, 且从 S12 站开始表底层均出现溶解氧含量低于 3 mg/L 的缺氧现象. 夏季溶解氧含量低于春季的原因可能是: 夏季表层水温较高, 水体的垂直混合作用与春季相比较弱, 层化作用形成的密度跃层导致表底层氧气交换受阻, 因而夏季更容易形成低氧区.

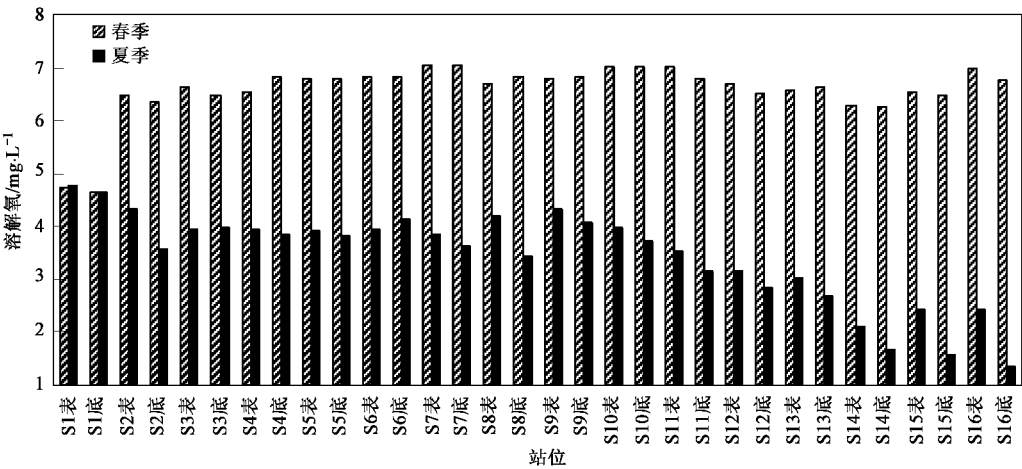


图 5 大辽河近入海河段春季与夏季溶解氧分布特征

Fig. 5 Distribution of DO in the upper estuarine zone of the Daliaohe River in Spring and Summer

2.3 大辽河近入海河段夏季低氧成因的初步分析

水体中溶解氧的含量是物理、生物和生物化学过程综合作用的结果, 受温度、盐度、水交换能力、浮游生物以及耗氧有机物等诸多因素的影响. 然而河口低氧区的形成受人为活动影响更为显著, 沿岸大量有机污染物的排放、径流各种营养元素的输入被普遍认为是导致河口地区低氧的主要原因. 由于大辽河流经海城、盘山、大石桥、大洼、营口等城镇, 穿行于辽河中下游区的近海地带, 沿岸分布有养殖区、造纸厂等污染源, 再加上大辽河属于感潮河段, 潮汐

作用对溶解氧及其各个环境因子的分布具有一定影响, 因此大辽河近入海河段低氧区的成因较为复杂. 本研究通过分析溶解氧与温度、盐度、高锰酸盐指数、营养盐和叶绿素 a 的相关性, 初步探讨了大辽河近入海河段低氧区形成的原因.

2.3.1 夏季溶解氧与温度、盐度的相关性分析

大辽河近入海河段夏季表层的溶解氧含量与温度具有显著负相关关系 (表 2), 底层溶解氧与温度没有显著相关性 (表 3). 其水温的水平分布呈现上游高、下游低的趋势 (表 1), 且水体温度的高值区与

低氧区相对应;垂直分布由浅至深呈逐渐降低趋势,形成了水温的垂直分层.由于溶解氧含量取决于它在水中的溶解度,而溶解度又与水温密切相关.一般情况下,水温低,溶解度就高,反之亦然,这可能是造成夏季大辽河近入海河段溶解氧含量普遍偏低,且上游低于下游的原因之一.其次,夏季的热量输入增强了水体层化作用,产生密度跃层,使得垂直混合作用减弱,因此夏季水温的垂直分层是形成底层低氧区的主要物理因素之一.

从溶解氧与盐度的相关性分析可以看出,表、底层的溶解氧含量与盐度均呈极显著正相关(表 2、3),但溶解氧随盐度的变化并没有表现出一致的分布规律,而是呈现一种分段式的“溶解氧-盐度”关系.在盐度 > 3 的区域(S1 ~ S11 站),溶解氧与盐度

呈极显著的正相关关系, $R^2 = 0.87$;在盐度 < 3 的区域(S12 ~ S16 站),溶解氧与盐度无显著相关关系, $R^2 = 0.26$.而盐度 = 3 在近入海河段可以作为海水与淡水的分界线^[8],由此表明潮汐作用对河段下游的溶解氧含量影响很大,大量海水的涌入,不但对河道水体起到了扩散和稀释作用,同时也带来了大量的溶解氧,因此溶解氧含量随盐度的增大而增大.在盐度 < 3 的 S12 ~ S16 站,恰好也是大辽河近入海河段的低氧区,溶解氧含量几乎都小于 3 mg/L,故在这一水域盐度不是导致低氧的关键因素.相比之下,人为排放的营养物质和耗氧有机污染物分解等生物化学过程可能对河段上游溶解氧含量的影响更为重要,而在中下游及入海口附近水域潮汐作用对溶解氧的分布起着十分重要的作用.

表 3 大辽河近入海河段夏季底层溶解氧与温、盐、高锰酸盐指数、营养盐和叶绿素 a 的相关关系
Table 3 Correlation coefficients between DO, temperature (t), salinity (S), permanganate index, nutrients and chlorophyll a (Chl-a) in the bottom water layer in the upper estuarine zone of the Daliaohe River in Summer

	DO	t	S	高锰酸盐指数	NO_3^-	NH_4^+	NO_2^-	PO_4^{3-}	Chl-a
DO	1								
t	0.026	1							
S	0.844 **	-0.054	1						
高锰酸盐指数	-0.784 **	-0.198	-0.476	1					
NO_3^-	-0.366	-0.182	-0.334	0.433	1				
NH_4^+	-0.690 **	0.087	-0.847 **	0.259	0.573 *	1			
NO_2^-	-0.723 **	0.116	-0.947 **	0.341	0.395	0.910 **	1		
PO_4^{3-}	0.350	0.067	0.548 *	-0.194	0.093	-0.336	-0.417	1	
Chl-a	-0.093	0.68 **	-0.359	-0.305	-0.192	0.439	0.538 *	-0.087	1

2.3.2 夏季溶解氧与叶绿素 a 的相关性分析

生物活动包括浮游生物的呼吸耗氧和浮游植物的光合作用等,也是影响溶解氧含量的一个重要因素.而叶绿素 a 是反映水体初级生产者(浮游植物)生物量的重要指标,因此这里通过分析溶解氧与叶绿素 a 的相关性来讨论生物活动对大辽河近入海河段溶解氧分布的影响.大辽河近入海河段夏季的表层叶绿素 a 总体表现为河段上游高,下游低的趋势,变化幅度大,最高可达 21.3 mg/m³,是最低值的 18 倍.叶绿素 a 含量与表层溶解氧含量呈极显著的负相关关系(表 2),叶绿素 a 浓度高,表明生物(主要是浮游植物)活动旺盛,但浮游植物大量繁殖释放的氧气并没有使河段上游的溶解氧含量增高,反而河段上游存在一定面积的低氧区.导致这一现象的原因可能与表层浮游细菌在生长繁殖过程中降解有机质、消耗溶解氧有关^[9];也可能是由于生物学上的“双峰效应”,径流带来的营养物质促使浮游植物迅速繁殖的同时,浮游动物也随之大量生长,从而消

耗溶解氧^[10].本研究结果也发现表层叶绿素 a 与无机氮含量呈极显著正相关,结果与以上理论相符,因此河段上游表层的低氧区,可能与浮游动物活动较活跃,消耗大量溶解氧有关.但底层叶绿素 a 与溶解氧几乎无相关性(表 3),说明浮游植物的初级生产过程不是导致底层溶解氧变化的主要因素.

2.3.3 夏季溶解氧与营养盐的相关性分析

大辽河近入海河段表层的溶解态无机氮含量基本表现为自河段上游至入海口逐渐降低的变化趋势,与表层溶解氧呈极显著负相关关系(表 2).大量营养盐的输入会导致水体的富营养化,水生生物迅速繁殖,当这些生物死亡腐烂,其耗氧作用大大超过光合作用时,溶解氧含量将急剧下降从而使该水域形成缺氧状态.3 种不同形态的溶解态无机氮中,以硝酸盐的浓度最大,氨氮次之,亚硝酸盐浓度最小,硝酸盐含量在夏季出现最高值,可能是灌溉区或养殖区营养盐的沥滤作用加强引起的结果^[11].底层的溶解态无机氮含量与溶解氧也呈负相关关系,但硝

酸盐与溶解氧的相关性不显著(表3)。由此推断,底层溶解氧的含量受亚硝酸盐和氨氮的影响较大,3种溶解态无机氮之间的相互转化也可能是导致水体中溶解氧含量变化的重要原因,氨氮通过硝化作用转化为亚硝酸盐和硝酸盐的过程会消耗大量溶解氧^[12]。

活性磷酸盐的含量从河段上游至入海口几乎保持在一个恒定的范围,变化幅度较小,与溶解氧没有显著相关性(表2、3)。大辽河近入海河段水体中活性磷酸盐含量的无规律变化表明磷酸盐已经发生了明显的转移,而水体中悬浮颗粒物质对磷酸盐的吸附-解吸作用,则可能是活性磷酸盐含量无规则变化的主要原因^[13]。

2.3.4 夏季溶解氧与高锰酸盐指数的相关性

影响溶解氧含量的主要生物化学过程是耗氧有机物的氧化分解,而高锰酸盐指数作为表征水体中有机物被氧化所需氧量的指标,可以反映水体中有机污染的程度。大辽河近入海河段夏季溶解氧与高锰酸盐指数之间呈极显著的负相关关系(表2、3),说明有机污染物参与了水体耗氧过程,随着高锰酸盐指数由入海口至河段上游逐渐增大,DO呈降低趋势,并在S12站开始出现低氧现象。由于低氧区受海水潮汐作用影响较弱,因此耗氧有机物的氧化分解可能是导致河段上游溶解氧含量较低的主要原因之一。通常,低氧区比较容易出现在水体底层,但本调查发现表层水体也存在低氧现象。由此推断,在受耗氧有机物严重污染的区域,其表层也可能形成低氧区^[14]。

3 大辽河近入海河段夏季低氧成因的初步分析

大辽河近入海河段夏季溶解氧含量介于1.36~4.77 mg/L之间,平均为3.44 mg/L,其中河段下游的溶解氧含量平均为3.94 mg/L,上游距入海口45 km处开始表底层均出现较大面积的低氧区,低氧区域内溶解氧的平均含量为2.33 mg/L,最低值可达1.36 mg/L。溶解氧含量受物理、生物和化学作用的共同控制,因此可以从温盐特征、生物活动、营养盐以及有机污染物的输入等方面来综合探讨夏季大辽河低氧区的形成原因。由溶解氧与各环境因子的相关性分析可知(表2、3),表层溶解氧含量与温度、叶绿素a、溶解态无机氮和高锰酸盐指数呈显著性负相关,且叶绿素a与溶解态无机氮之间也表现出良好的负相关关系。该结果表明随着夏季温度的升高,营养盐的不断输入会导致表层浮游植物的大

量繁殖,根据“双峰效应”,浮游动物也会随之繁盛,消耗表层的溶解氧。此外,径流携带的有机污染物会在表层浮游细菌的作用下降解耗氧。当溶解氧的消耗量大于浮游植物的光合作用及大气复氧时,表层的溶解氧含量就会降低而形成低氧状态。底层溶解氧含量与溶解态无机氮和高锰酸盐指数呈显著性负相关,表明沉降到水体底层的有机污染物以及浮游生物死亡残骸的分解过程中会消耗大量溶解氧,从而造成底层的缺氧现象。底层溶解氧含量除受营养盐和有机污染物的影响外,还取决于水动力交换条件,夏季表层水温的升高会导致温、密跃层,使表底层的垂直交换作用减弱,因而水体的垂直层化作用是造成底层低氧的主要物理因素。此外,本调查发现溶解氧与盐度之间虽然在总体上表现为显著的正相关,但实际上呈现分段式的“溶解氧-盐度”关系,在盐度<3的河段上游,潮汐作用对溶解氧影响很小,溶解氧与盐度之间没有显著相关性;而在河段的中下游段,溶解氧随盐度的增大而增大,与盐度呈极显著的正相关关系,且高锰酸盐指数、溶解态无机氮也与盐度表现出显著的负相关关系,说明海水的潮汐作用,不仅携带了大量的溶解氧,而且起到了扩散和稀释的作用,增强了河水的自净能力。因此,潮汐作用对大辽河河段中下游及入海口处溶解氧的分布十分重要,但不是河段上游低氧区形成的影响因素。与大辽河近入海河段相比,夏季河口或海区一般在底层形成低氧区,主要原因是海水层状结构的稳定,阻止了表底层DO的垂直交换,从而使底层有机物分解所消耗的氧得不到补充,造成底层DO的严重亏损^[15,16]。由于大辽河上游的有机污染比较严重,而河口与海区的水交换条件较好,海水运动对污染物可以起到稀释和扩散的作用,因此河水底层缺氧的主要原因是有机质耗氧所致,而海水底层缺氧的原因则主要取决于海水的垂直层化作用。综合分析大辽河近入海河段夏季水体溶解氧的分布特征以及溶解氧与各环境因子的相关关系,径流输入及沿岸排放的大量营养物质和耗氧有机污染物分解是河段上游低氧区形成的主要原因,而水体的垂直层化作用等物理过程与上述生物、化学过程一起直接或间接决定了低氧区的规模、程度和持续时间。

4 结论

(1) 大辽河近入海河段水体的溶解氧含量在空间上呈现入海口高、河段上游低,表层高、底层低的分布格局;在时间上呈现白天高于夜间、春季高于夏

季的分布趋势.溶解氧的含量受到温度、盐度、生物活动、营养盐以及有机污染物等多种因素的影响.

(2) 夏季,大辽河河段上游出现较大面积的低氧区,溶解氧含量平均为 2.33 mg/L,最低值达 1.36 mg/L.通过探讨溶解氧与温度、盐度、叶绿素 a、营养盐和高锰酸盐指数的相关关系,发现溶解氧含量与营养盐和有机污染物的相关性最显著,因此营养盐和有机污染物的过度排放是大辽河近入海河段夏季低氧区形成的主要原因,水体的垂直分层作用造成了底层溶解氧含量的进一步降低.

(3) 大辽河近入海河段低氧区的溶解氧含量呈现继续降低的趋势,这与人类活动的加剧有关.由于低氧区的存在会对整个河口甚至邻近海域的水质和生态造成严重影响,因此有必要对低氧区的生消过程和分布区域开展持续的跟踪观测.

参考文献:

- [1] Chapman D V. Water quality assessments: A guide to the use of Biota, sediments and water in environmental monitoring [M]. Melbourne Madras: Chapman & Hall, 1992.
- [2] Schuble J R. Report of workshop “The second phase of an assessment of alternatives to biological nutrient removal at sewage treatment plants for alleviating hypoxia in western Long Island Sound” [R]. NYSB: Marine Science Research Center, 1991.
- [3] Rabalais N N, Turner R E, Justic D, *et al.* Characterization of hypoxia: Topic 1 report for the integrated assessment of hypoxia in the Gulf of Mexico [M]. Maryland: Silver Springs, 1999. 167.
- [4] Jay D, Bowman M. The physical oceanography and water quality of New York Harbor and western Long Island Sound [J]. Marine

Sciences Research, 1975, **23**: 75-77.

- [5] Welsh B L, Eller F C. Mechanisms controlling summertime oxygen depletion in western Long Island Sound Estuaries [J]. Estuaries, 1991, **14**(3): 265-278.
- [6] 李道季,张经,黄大吉,等. 长江口外氧的亏损[J]. 中国科学(D 辑),2002,**32**(8):686-694.
- [7] 李艳云,王作敏. 大辽河口和辽东湾海域水质溶解氧与 COD、无机氮、磷及初级生产力的关系[J]. 中国环境监测, 2006,**2**(3):70-72.
- [8] 董双林,赵文. 养殖水域生态学[M]. 北京:中国农业出版社,2004.
- [9] 白洁,李岍然,李正炎,等. 渤海春季浮游细菌分布与生态环境因子的关系[J]. 青岛海洋大学学报,2003,**33**(6):841-846.
- [10] 万修全,吴德星,鲍献文,等. 2000 年夏季莱州湾主要观测要素的分布特征[J]. 中国海洋大学学报,2004,**34**(1):7-13.
- [11] 王继龙. 辽河口水质调查及低氧区形成机理研究[D]. 北京:北京化工大学,2004.
- [12] 孟春霞,邓春梅,姚鹏,等. 小清河口及邻近海域的溶解氧[J]. 海洋环境科学,2005, **24**(3):25-28.
- [13] 王继龙,郑丙辉,秦延文,等. 辽河口水域溶解氧与营养盐调查与分类[J]. 海洋技术,2004,**23**(3):92-96.
- [14] 王丽芳,戴民汉,翟惟东. 近岸、河口缺氧区域的主要生物地球化学耗氧过程[J]. 厦门大学学报,2007,**46**(Sup. 1):33-37.
- [15] Melanie J B, Sean P P, Hugh J P, *et al.* Benthic biological effects of seasonal hypoxia in a eutrophic estuary predate rapid coastal development [J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2006, **70**(3): 415-422.
- [16] Wang B D. Hydromorphological mechanisms leading to hypoxia off the Changjiang estuary [J]. Marine Environmental Research, 2009, **67**(1): 53-58.