北戴河沿岸海域溶解氧变化分析

王全颖[1,2]，张建乐[1,2]，张勇[1,2]，张万磊[1,2]，褚芹芹[1,2]，张永丰[1,2]，赵洁[1,2]

（1. 自然资源部秦皇岛海洋中心 秦皇岛 066002；2. 自然资源部秦皇岛海洋预报台 秦皇岛 066002）

摘要：溶解氧（Dissolved Oxygen，DO）是反映海洋水质变化的重要指标，对维持海洋生态系统平衡具有重要意义。文章基于 2024 年夏季北戴河沿岸海域 3 个浮标的监测数据，分析了 DO 的时空分布特征及其与环境因子的相关性。结果表明，老虎石和金山嘴海域夏季 DO 日均值的最低值出现在 7 月下旬，分别为 5.67 mg/L 和 5.39 mg/L；洋河口海域 DO 日均值的最低值出现在 8 月上旬，为 6.28 mg/L。7 月下旬以后，降水量剧增，DO 质量浓度大幅波动，8 月 24 日，老虎石、洋河口和金山嘴三个海域同时出现 DO 日均值的夏季最大值，分别为 10.37 mg/L、11.22 mg/L 和 11.41 mg/L。DO 日内最高值出现在 16:00—17:30，最低值出现在 6:00—7:30。Pearson 相关分析发现，老虎石、洋河口和金山嘴三个海域 DO 质量浓度与 pH、叶绿素 a（Chlorophyll-a，Chl *a*）、气压（Atmospheric Pressure，AP）之间均呈极显著正相关。主要环境因子对 DO 质量浓度的通径分析显示，老虎石和金山嘴海域 DO 质量浓度主要受 pH、Chl *a* 影响，而洋河口海域 DO 质量浓度主要受 pH 影响。

关键词：北戴河；溶解氧；多元逐步回归；通径分析

中图分类号：X55；P7 **文献标志码：**A **文章编号：**1005-9857（2025）12-0092-10

Analysis of Dissolved Oxygen Variation in the Coastal Waters of Beidaihe

WANG Quanying[1,2]，ZHANG Jianle[1,2]，ZHANG Yong[1,2]，ZHANG Wanlei[1,2]，CHU Qinqin[1,2]，ZHANG Yongfeng[1,2]，ZHAO Jie[1,2]

（1. Qinhuangdao Marine Center，MNR，Qinhuangdao 066002，China；
2. Qinhuangdao Marine Forecast Station，MNR，Qinhuangdao 066002，China）

Abstract：Dissolved Oxygen（DO），an important indicator reflecting changes in marine water quality，plays a significant role in maintaining the balance of marine ecosystems. Based on monitoring data collected from three buoys in the coastal waters of Beidaihe during the summer of 2024，this study analyzed the spatiotemporal distribution characteristics of DO and its correlations with environmental factors. The results indicated that the lowest daily average values of DO in the summer for the Laohushi and Jinshanzui areas occurred in late July，at 5.67 mg/L and 5.39 mg/L respectively，while the lowest value in the Yanghekou area was in early August，at 6.28 mg/L. After late July，there was a sharp increase in precipitation，leading to significant fluctuations in DO concentrations. On

收稿日期：2025-03-19；**修订日期：**2025-12-22

基金项目：自然资源部北海局科技创新赋能海洋事业高质量发展三年行动项目（2023B03-STC）.

作者简介：王全颖，工程师，研究方向为海洋预警监测

通信作者：张建乐，硕士，正高级工程师，研究方向为海洋预警监测和生态修复技术

August 24th，the maximum daily average values of DO for the summer were observed simultaneously in the three areas of Laohushi，Yanghekou，and Jinshanzui，which were 10.37 mg/L，11.22 mg/L，and 11.41 mg/L respectively．The highest DO value within the day occured between 16:00 and 17:30，and the lowest value occured between 6:00 and 7:30．Pearson correlation analysis revealed that DO concentration in the three areas of Laohushi，Yanghekou，and Jinshanzui was significantly positively correlated with pH，Chlorophyll-a（Chl *a*），and Atmospheric Pressure（AP）．Path analysis of the main environmental factors affecting DO concentration indicated that DO concentration in Laohushi and Jinshanzui areas was mainly influenced by pH and Chl *a*，while in the Yanghekou area，it was primarily affected by pH．

Keywords：Beidaihe，Dissolved Oxygen，Multiple stepwise regression，Path analysis

0　引言

DO 是海洋生态系统中的重要生源要素，也是鱼类和贝类等重要海洋经济物种维持正常生存、生长和繁殖的关键生态因子，对维持海洋生态系统稳定具有极其重要的作用[1]。北戴河周边海域水体交换缓慢，海水循环周期长，纳污能力较低[2]，曾出现由赤潮等生态灾害导致的局部“缺氧”和酸化现象[3-4]。国内学者围绕北戴河及其邻近海域已开展诸多环境特征研究，其中涉及 DO 的研究主要集中于水质评价[5-8]、营养状况分析[9-11]、叶绿素 a 和浮游植物变化特征[12-18]等方面，但关于该海域 DO 的连续变化特征的研究未见报道。为此，本文基于 2024 年夏季北戴河海域浮标观测资料，分析 DO 分布特征及与其他环境因素的关系，以期为该海域低氧区研究和赤潮预警监测提供参考。

1　材料与方法

1.1　研究区概况

北戴河地处河北省东北部，隶属于秦皇岛市，位于（39°47′48″N—39°53′17″N，119°24′08″E—119°31′58″E）。东、南临渤海，西、北与抚宁区接界，东北与海港区毗邻，全区海岸线长 18.4 km，分布有众多的海水浴场，是享誉国内外的滨海旅游胜地。

1.2　数据来源

本文所使用的数据来源于自然资源部秦皇岛海洋中心在北戴河海域设置的 3 套生态浮标，分别位于老虎石海域（1 号）、洋河口海域（2 号）和金山嘴海域（3 号）（图 1）。浮标传感器布设于水面下 0.5 m。为确保数据准确和稳定，定期对浮标进行仪器维护、清洗和传感器校准。本文分析的环境因子包括气压（AP）、海表温度（Sea Surface Temperature，SST）、海表盐度（Sea Surface Salinity，SSS）、pH、溶解氧（DO）、叶绿素 a（Chl *a*）。AP 和 SST 根据计量校准部门出具的校准证书进行校准，SSS、pH、Chl *a* 采用测量已知浓度的标准样品的方法进行校准，DO 采用饱和溶解氧校准法[19]进行校准。

图 1　监测站位

Fig.1　Survey stations in the Beidaihe coastal waters

1.3　数据分析

使用 SPSS Statistics 对 DO 与环境因子进行 Pearson 相关分析和双尾显著性检验；采用多元逐步线性回归，筛选 DO 的主要影响因子并建立函数关系模型；采用通径分析，明确主要影响因子对 DO 的影响程度[20]。

2 结果与分析

2.1 DO 质量浓度变化特征

2.1.1 DO 质量浓度逐日变化特征

图 2 为 2024 年夏季北戴河沿岸的 DO 质量浓度日平均值的分布情况。6 月 1 日，老虎石、洋河口和金山嘴三个海域的 DO 质量浓度日平均值分别为 8.43 mg/L、8.21 mg/L 和 8.54 mg/L，随后震荡下行，7 月下旬老虎石和金山嘴海域出现夏季最低值，分别为 5.67 mg/L 和 5.39 mg/L（图 2）。洋河口海域最低值出现在 8 月上旬，为 6.28 mg/L。7 月下旬以后，降水量剧增，DO 质量浓度大幅波动，8 月 24 日老虎石、洋河口和金山嘴三个海域的 DO 质量浓度出现夏季最大值，分别为 10.37 mg/L、11.22 mg/L 和 11.41 mg/L。整个夏季老虎石、洋河口和金山嘴三个海域的 DO 质量浓度平均值分别为 7.13 mg/L、7.50 mg/L 和 7.34 mg/L。从平面分布来看，6 月初至 7 月 16 日，DO 质量浓度基本表现为 $DO_{金山嘴海域} > DO_{洋河口海域} > DO_{老虎石海域}$；7 月 17 日至 8 月 16 日，表现为 $DO_{洋河口海域} > DO_{老虎石海域} > DO_{金山嘴海域}$；8 月 17 日后，表现为 $DO_{金山嘴海域} > DO_{洋河口海域} > DO_{老虎石海域}$。

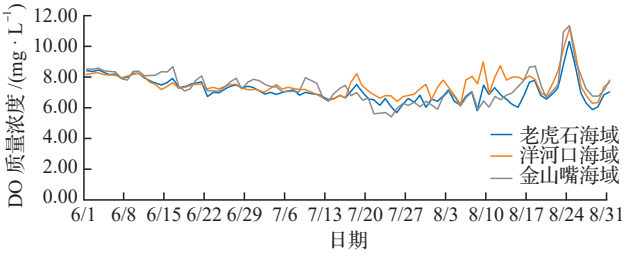


图 2 2024 年夏季北戴河沿岸海域 DO 质量浓度的日平均值变化

Fig.2 Variation in the daily average concentration of Dissolved Oxygen（DO）in the coastal waters of Beidaihe during the summer of 2024

2.1.2 DO 日内逐时变化特征

DO 质量浓度的逐时变化特征如图 3 所示。每个时刻 DO 质量浓度的取值是 2024 年夏季所有该时刻 DO 质量浓度的平均值。

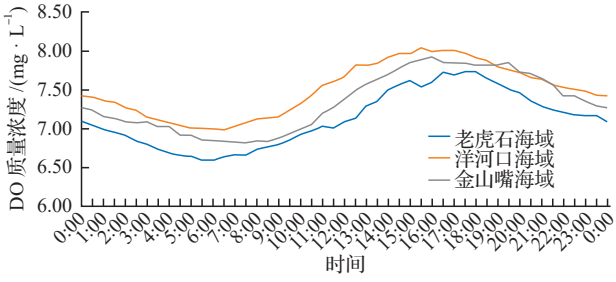


图 3 2024 年夏季北戴河沿岸海域 DO 质量浓度日内逐时变化

Fig.3 Diurnal hourly variations of Dissolved Oxygen（DO）concentration in the coastal waters of Beidaihe during the summer of 2024

老虎石、洋河口和金山嘴三个海域的 DO 质量浓度日内逐时变化具有一致性，表现为午后浓度高、清晨浓度低。老虎石海域的 DO 质量浓度最高值为 7.73 mg/L，出现在 17:30，最低值为 6.60 mg/L，出现在 6:00；洋河口海域的 DO 质量浓度最高值为 8.03 mg/L，出现在 17:30，最低值为 6.98 mg/L，出现在 6:30；金山嘴海域的 DO 质量浓度最高值为 7.92 mg/L，出现在 16:00，最低值为 6.82 mg/L，出现在 7:30。DO 质量浓度平面分布表现为 $DO_{洋河口海域} > DO_{金山嘴海域} > DO_{老虎石海域}$。

2.2 其他环境因子变化特征

2.2.1 pH 逐日变化特征

pH 逐日变化特征与 DO 相似（图 4）。6 月 1 日，洋河口和金山嘴两个海域的 pH 日平均值分别为 8.16、8.18，随后小幅震荡下行，但二者数值差异不大。7 月 16 日至 8 月 24 日，三个海域 pH 震荡幅度加大，数值差距加大，洋河口海域 pH 表现为震荡增大，金山嘴和老虎石海域的 pH 先减小后增大。老虎石海域 pH 的最低值出现在 8 月 8 日，为 7.71；洋河口海域 pH 的最低值出现在 7 月 13 日，为 8.00；金山嘴海域 pH 的最低值出现在 7 月 24 日，为 7.86。三个海域的最高值均出现在 8 月 24 日，分别为 8.15、8.51 和 8.45。8 月 24 日后，三个海域 pH 都出现急剧减小的趋势，这可能与降雨有关。从平面分布来看，6 月初至 7 月 16 日，pH 平面分布特征不明显。7 月 17 日至 8 月 24 日，pH 表现为 $pH_{洋河口海域} > pH_{金山嘴海域} > pH_{老虎石海域}$。8 月 24 日后，pH 表现为 $pH_{金山嘴海域} > pH_{洋河口海域} > pH_{老虎石海域}$。

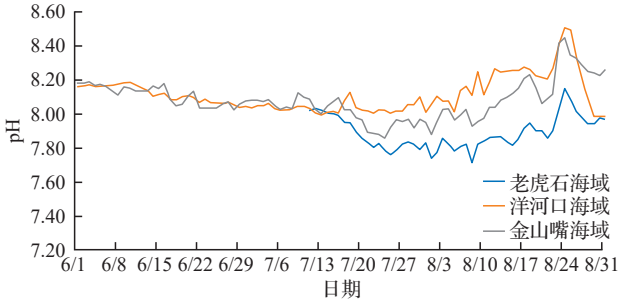


图 4　2024 年夏季北戴河沿岸海域 pH 的日平均值变化

Fig.4　Variation in the daily average pH value in the coastal waters of Beidaihe during the summer of 2024

2.2.2　SST 逐日变化特征

水温逐日变化情况（图 5）显示，6 月 1 日，老虎石、洋河口和金山嘴三个海域的水温分别为 19.40 ℃、19.50 ℃和 18.83 ℃，随后震荡上行，8 月 17 日出现夏季最高温度，分别为 29.48℃、29.29℃和 29.15℃。从平面分布来看，基本表现为 $SST_{洋河口海域}$ > $SST_{老虎石海域}$ > $SST_{金山嘴海域}$。

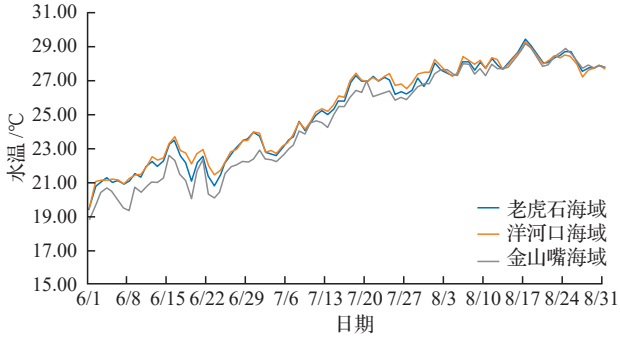


图 5　2024 年夏季北戴河沿岸海域水温的日平均值变化

Fig.5　Variation in the daily average water temperature in the coastal waters of Beidaihe during the summer of 2024

2.2.3　Chl *a* 浓度逐日变化特征

Chl *a* 浓度逐日变化情况（图 6）显示，老虎石、洋河口和金山嘴三个海域的 Chl *a* 质量浓度最小值分别为 1.19 μg/L、0.46 μg/L 和 1.60 μg/L，分别出现在 7 月 15 日、7 月 13 日和 7 月 15 日；最大值分别为 34.64 μg/L、33.05 μg/L 和 27.97 μg/L，分别出现在 8 月 24 日、8 月 27 日和 8 月 24 日。从平面分布来看，6 月 1 日至 7 月 15 日，Chl *a* 质量浓度表现为 $Chl\ a_{金山嘴海域}$ > $Chl\ a_{老虎石海域}$ > $Chl\ a_{洋河口海域}$；7 月 15 日后，Chl *a* 质量浓度表现为 $Chl\ a_{洋河口海域}$ > $Chl\ a_{老虎石海域}$ > $Chl\ a_{金山嘴海域}$。

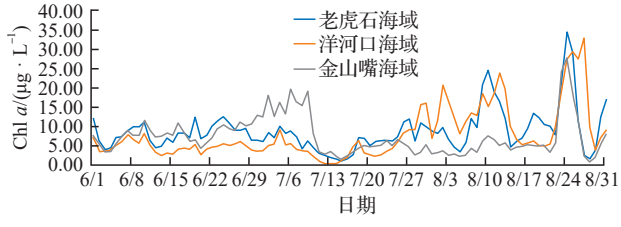


图 6　2024 年夏季北戴河沿岸海域 Chl *a* 浓度的日平均值变化

Fig.6　Variation in the daily average Chlorophyll-a（Chl *a*）concentration in the coastal waters of Beidaihe during the summer of 2024

2.2.4　SSS 逐日变化特征

盐度逐日变化情况如图 7 所示。7 月 24 日之前，SSS 的变化幅度极小，总体较为平稳；此后出现 2 次骤然下降，分别发生在 7 月 24 日和 8 月 20 日。盐度最大值分别为 30.295、30.186 和 29.821，分别出现在 7 月 16 日、6 月 29 日和 6 月 29 日；最小值分别为 21.995、19.178 和 22.653，出现在 8 月 21 日、8 月 22 日和 8 月 21 日。平面分布特征显示，6 月 1 日至 7 月 11 日，SSS 表现为 $SSS_{洋河口海域}$ > $SSS_{老虎石海域}$ > $SSS_{金山嘴海域}$；7 月 11 日至 24 日，SSS 表现为 $SSS_{老虎石海域}$ > $SSS_{洋河口海域}$ > $SSS_{金山嘴海域}$；7 月 24 日至 8 月 13 日，SSS 表现为 $SSS_{金山嘴海域}$ > $SSS_{老虎石海域}$ > $SSS_{洋河口海域}$；8 月 13 日后，SSS 表现为 $SSS_{老虎石海域}$ > $SSS_{金山嘴海域}$ > $SSS_{洋河口海域}$。

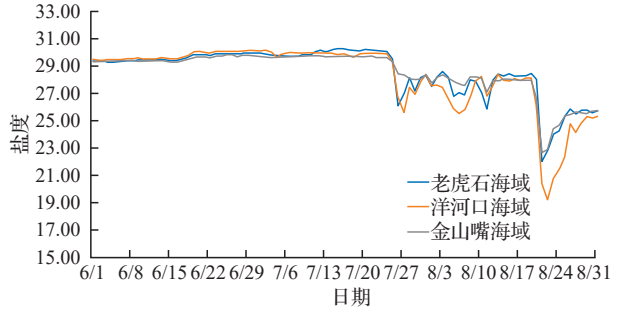


图 7　2024 年夏季北戴河沿岸海域盐度的日平均值变化

Fig.7　Variation in the daily average salinity in the coastal waters of Beidaihe during the summer of 2024

2.2.5 气压逐日变化特征

气压逐日变化情况如图 8 所示。老虎石、洋河口和金山嘴三个海域的气压最低值出现在 8 月 11 日，分别为 98 760 Pa、99 470 Pa 和 99 460 Pa。老虎石和洋河口海域的气压最高值出现在 6 月 5 日，分别为 101 438.7 Pa 和 101 548.1 Pa；金山嘴海域的气压最高值出现在 6 月 4 日，为 101 440 Pa。三个海域的气压随时间变化的趋势具有一致性，老虎石海域的气压低于其他两个海域。

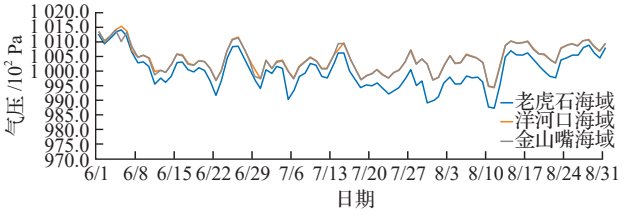


图 8 2024 年夏季北戴河沿岸海域气压的日平均值变化

Fig.8 Variation in the daily average atmospheric pressure in the coastal waters of Beidaihe during the summer of 2024

2.3 DO 与其他环境因子的关系

2.3.1 DO 与其他环境因子的相关性

由 Pearson 相关分析（表 1）发现，老虎石、洋河口和金山嘴三个海域的 DO 与 pH、Chl *a*、气压均呈极显著正相关。此外，老虎石和金山嘴海域，DO 与水温呈极显著负相关；洋河口海域，DO 与盐度呈极显著负相关。

表 1 DO 质量浓度与其他环境因子的 Pearson 相关性分析

Table 1 Pearson correlation analysis between DO and other environmental factors

环境因子	老虎石海域	洋河口海域	金山嘴海域
气压	0.383**	0.297**	0.458**
水温	−0.404**	0.005	−0.269**
盐度	−0.033	−0.366**	−0.176
pH	0.624**	0.815**	0.863**
Chl *a*	0.456**	0.479**	0.561**

注：* 表示显著相关，$P < 0.05$；** 表示极显著相关，$P < 0.01$。

2.3.2 DO 与环境因子的逐步回归分析

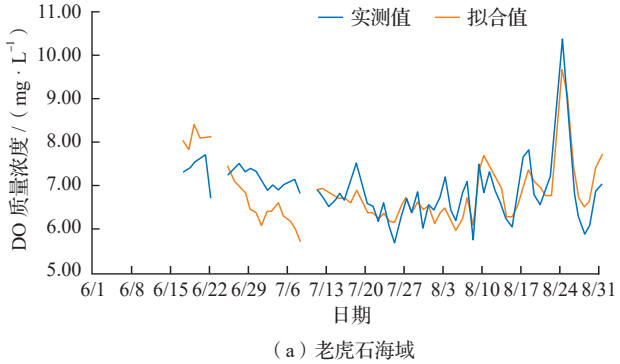
为进一步分析 DO 质量浓度与环境因子之间的定量关系及其主要影响因子，以 DO 质量浓度为因变量，以其他环境因子为自变量，采用逐步回归分析，建立夏季 DO 质量浓度与环境因子间的回归关系，逐步剔除不显著的变量，最终得到多元逐步回归方程（表 2）。

表 2 DO 与环境因子的回归方程

Table 2 Regression equation of DO with environmental factors

海域	逐步回归方程	R^2	F	P
老虎石	DO=−26.909+0.071Chl *a*+4.189pH	0.743	74.724	0.000
洋河口	DO=−42.349+6.307pH−0.053SST	0.689	101.6	0.000
金山嘴	DO=−61.255+7.917pH+0.15SSS+0.043Chl *a*	0.84	160.534	0.000

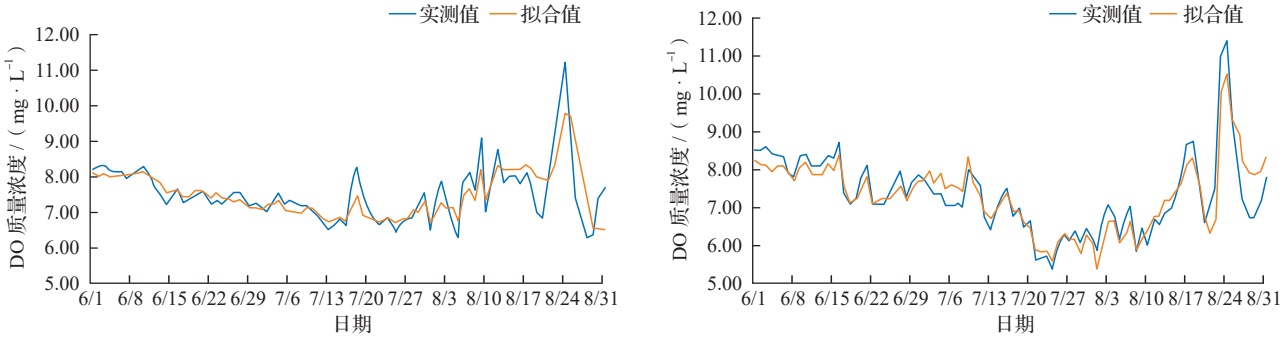
分析结果显示，3 个海域影响 DO 质量浓度的环境因子存在明显差异。其中，老虎石海域在极显著水平下有 2 个环境因子被纳入主要影响因子，分别为 pH 和 Chl *a*；洋河口海域在极显著水平下有 2 个环境因子被纳入主要影响因子，分别为 pH 和水温；金山嘴海域在极显著水平下有 3 个环境因子被纳入主要影响因子，分别为 pH、盐度和 Chl *a*。其中，金山嘴海域构建的回归方程决定系数最大，为 0.84，方程拟合值与实测值吻合度最好（图 9）。



（a）老虎石海域

图 9 2024 年夏季北戴河沿岸 DO 质量浓度拟合值与实测值的对比

Fig.9 The comparison of the predicted and measured values of DO concentrations in the coastal waters of Beidaihe during the summer of 2024



（b）洋河口海域　　（c）金山嘴海域

图 9　2024 年夏季北戴河沿岸 DO 质量浓度拟合值与实测值的对比（续图）

Fig.9　The comparison of the predicted and measured values of DO concentrations in the coastal waters of Beidaihe during the summer of 2024

2.3.3　主要环境因子对 DO 的通径分析

根据 DO 与环境因子的逐步回归分析结果，对老虎石海域的 pH 和 Chl *a* 进行通径分析，对洋河口海域的 pH 和水温进行通径分析，对金山嘴海域的 pH、盐度和 Chl *a* 进行通径分析，计算各主要影响因子的直接和间接通径系数以及决策系数（表 3）。

表 3　DO 与环境因子的简单相关系数分解

Table 3　Decomposition of simple correlation coefficients between DO and environmental factors

海域	自变量	与 DO 的相关系数	直接通径系数	间接通径系数					决策系数
				Chl *a*	pH	SST	SSS	间接通径系数合计	
老虎石	Chl *a*	0.456	0.355	—	0.101	—	—	0.101	0.198
	pH	0.571	0.500	0.071	—	—	—	0.071	0.321
洋河口	pH	0.815	0.855	—	—	−0.040	—	−0.040	0.663
	SST	0.005	−0.182	—	0.187	—	—	0.187	−0.035
金山嘴	pH	0.863	0.886	0.085	—	—	−0.108	−0.023	0.744
	SSS	−0.176	0.238	−0.004	−0.410	—	—	−0.414	−0.140
	Chl *a*	0.561	0.216	—	0.350	—	−0.005	0.345	0.196

对于老虎石海域，由直接通径系数可知，Chl *a* 和 pH 对 DO 质量浓度起正向影响作用且 pH ＞ Chl *a*；由间接通径系数可知 Chl *a* 和 pH 通过对方仍对 DO 质量浓度起间接正向影响作用，但 Chl *a* ＞ pH；由决策系数可知 Chl *a* 和 pH 对 DO 质量浓度起正向影响作用，且 pH ＞ Chl *a*，且 pH 对 DO 具有第一影响力。

对于洋河口海域，由直接通径系数可知，pH 对 DO 质量浓度呈正向影响，SST 对 DO 质量浓度呈负向影响；由间接通径系数可知，SST 通过 pH 对 DO 质量浓度呈间接正向影响，pH 通过 SST 对 DO 质量浓度呈间接负向影响；由决策系数可知，pH 对 DO 质量浓度呈正向影响，SST 对 DO 质量浓度呈负向影响，但 pH 决策系数的绝对值远大于 SST，pH 对 DO 具有第一影响力。

对于金山嘴海域，由直接通径系数可知，Chl *a*、SSS、pH 对 DO 质量浓度均呈正向影响，且影响强度由强到弱依次为 pH、SSS、Chl *a*；由间接通径系数可知，Chl *a* 对 DO 质量浓度具有间接正向影响，pH 和 SSS 对 DO 质量浓度则具有间接负向影响；由决策系数可知，pH 和 Chl *a* 对 DO 质量浓度具有

正向影响，SSS 对 DO 质量浓度具有负向影响，但 pH 决策系数的绝对值远大于 Chl *a* 和 SSS，pH 和 Chl *a* 对 DO 分别具有第一和第二影响力。

为进一步验证上述分析结果，本文统计了 2024 年 8 月 17—25 日金山嘴海域发生的旋链角毛藻、中肋骨条藻和裸甲藻混合型赤潮。该期间赤潮过程中 Chl *a*、DO 和 pH 的逐时变化情况如图 10 所示。8 月 20 日 5:30 至 10:00，该海域连续降水累计 73 mm。受降水和降水形成的陆地径流入海影响，海水 pH 在降水停止 1 小时后开始逐时走低，于当日 23 时降至最低值 7.86，随后开始回升，至 21 日 7:00 才恢复至 8.05。Chl *a* 浓度自 22 日 21:00 出现异常，Chl *a* 质量浓度由半小时前的 9.5 μg/L 骤增至 15 μg/L。一般认为，10 μg/L 是赤潮发生时 Chl *a* 质量浓度的临界值。张水浸[21]、陆斗定等[22]研究发现，当 Chl *a* 质量浓度大于 10 μg/L 时，预示着赤潮可能即将发生。福建省以 Chl *a* 质量浓度作为赤潮在线预警数据的首要指标，规定当某一站位 Chl *a* 质量浓度连续两次（以上）超过 10 μg/L 即判定为有利于赤潮发生[23]。本次研究期间，Chl *a* 质量浓度于 24 日 1:30 升高至最大值 48.1 μg/L，至当日 23:00 后回落至 10 μg/L 以下。相关性分析表明，此次赤潮期间，pH、Chl *a* 均与 DO 变化显著相关（$P < 0.05$），相关系数分别为 0.884 和 0.432，进一步说明 pH 和 Chl *a* 分别是 DO 的第一和第二相关因子。该结果与前文通径分析结果具有较高的一致性，验证了分析的可信度。

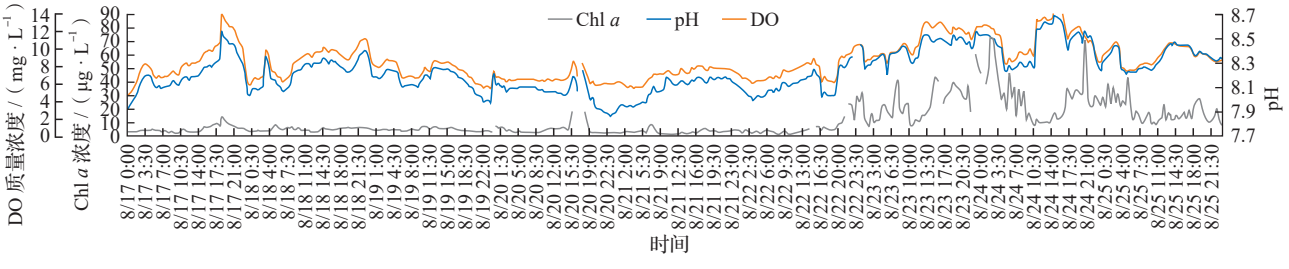


图 10 2024 年 8 月 17—25 日金山嘴海域 Chl *a*、pH 和 DO 逐时变化特征

Fig.10 Diurnal hourly variation characteristics of Chl *a*, pH, and DO in the Laohushi area from August 17 to 25, 2024

3 讨论

3.1 DO 质量浓度的日内逐时变化特征

2024 年夏季，老虎石、洋河口和金山嘴三个海域的 DO 平均质量浓度分别为 7.13 mg/L、7.50 mg/L 和 7.34 mg/L，接近夏季渤海中部海域表层 DO 平均质量浓度（7.49 mg/L）和夏季黄海表层 DO 平均质量浓度（7.45 mg/L）[24-25]。DO 质量浓度是对环境变化非常敏感的指标之一，其日内变化非常显著，最大值比最小值要高出 1 mg/L 以上（图 3）。与历史船舶调查数据相比，浮标数据能更准确地反映 DO 的动态变化特征及其与环境因子之间的关系。受浮游植物光合作用和生物呼吸作用的影响，北戴河海域 DO 质量浓度的日内变化呈现出一定的规律性。白天，海水中的浮游植物和其他光合生物通过光合作用释放 O_2，海水中 DO 质量浓度逐步升高。一般在午后达到最高值；夜间，由于缺乏光照，多数浮游植物停止光合作用，而海洋生物呼吸继续耗氧，导致夜间海水中的 DO 质量浓度逐渐下降，通常在黎明时降至最低。老虎石、洋河口和金山嘴三个海域 DO 质量浓度的日内逐时变化大体符合这一规律，但高峰值和低谷值出现时间略有滞后，即最大值出现在 16:00 以后，最小值出现在 6:00 以后。这主要是由于此次研究期间即夏季（6—8 月）日照时间较长，浮游植物的光合作用也能长时间维持在较高水平，导致 DO 质量浓度峰值推迟出现。

3.2 其他环境因子对 DO 质量浓度的影响分析

Pearson 相关分析表明，老虎石、洋河口和金山嘴三个海域的 DO 质量浓度均与 pH、Chl *a* 和气压呈极显著正相关，按相关系数绝对值由大到小排序为 pH、Chl *a*、气压。

综合研判主要环境因子对 DO 质量浓度的直接

通径系数、间接通径系数和决策系数可知，老虎石和金山嘴海域的 DO 质量浓度主要受 pH 和 Chl *a* 的影响，而洋河口海域的 DO 质量浓度主要受 pH 调控。这可能是因为河口海域水体环境中 DO 变化的调控机制更为复杂。叶绿素 a 虽然与溶解氧的产生有关，但在河口这样复杂的水环境中，叶绿素 a 与溶解氧之间的关系可能会被其他因素所掩盖[26]，pH 可能在某些情况下更能直接反映溶解氧的变化情况。海水中 DO 与气压的相关关系则主要体现在大气压力对 DO 溶解度的影响。

4　结论

（1）对于夏季 DO 质量浓度的日均值，老虎石和金山嘴海域的最低值出现在 7 月下旬，分别为 5.67 mg/L 和 5.39 mg/L；洋河口海域的最低值出现在 8 月上旬，为 6.28 mg/L。7 月下旬以后，受降水影响，DO 质量浓度大幅波动，老虎石、金山嘴和洋河口三个海域在 8 月 24 日同时达到夏季 DO 日均值的最大值，分别为 10.37 mg/L、11.22 mg/L 和 11.41 mg/L。DO 日内最高值出现在 16:00—17:30，最低值出现在 6:00—7:30。

（2）Pearson 相关分析显示，老虎石、洋河口和金山嘴三个海域的 DO 质量浓度与 pH、Chl *a* 和气压均呈极显著正相关。通径分析进一步表明，老虎石海域的 DO 质量浓度主要受 pH 和 Chl *a* 的正向影响，影响强度为 pH ＞ Chl *a*；而洋河口海域的 DO 质量浓度主要受 pH 和 SST 影响，pH 为正向影响，SST 为弱的负向影响；金山嘴海域的 DO 质量浓度主要受 Chl *a*、pH 和 SSS 影响，pH 和 Chl *a* 为正向影响且影响强度为 pH ＞ Chl *a*，SSS 为弱的负向影响。

参考文献（References）：

[1] ENGLE V D，SUMMERS J K，MACAULEY J M. Dissolved oxygen conditions in northern Gulf of Mexico estuaries[J]. Environmental Monitoring and Assessment，1999，57(1)：1-20.

[2] 顾杰，李正尧，冒小丹，等. 夏季北戴河海域 COD 环境容量研究[J]. 海洋环境科学，2017，36(5)：682-687.
GU Jie，LI Zhengyao，MAO Xiaodan，et al. Study of COD environmental capacity in waters of Beidaihe in summer[J]. Marine Environmental Science，2017，36(5)：682-687.

[3] 张华，李艳芳，唐诚，等. 渤海底层低氧区的空间特征与形成机制[J]. 科学通报，2016，61(14)：1612-1620.
ZHANG Hua，LI Yanfang，TANG Cheng，et al. Spatial characteristics and formation mechanisms of bottom hypoxia zone in the Bohai Sea during summer[J]. Science Bulletin，2016，61(14)：1612-1620.

[4] 赵紫涵，宋贵生，赵亮. 秦皇岛外海夏季 DO 与 pH 的变化特征分析[J]. 海洋学报，2020，42(10)：144-154.
ZHAO Zihan，SONG Guisheng，ZHAO Liang. Characteristics of dissolved oxygen and pH variations in summer off the Qinhuangdao[J]. Haiyang Xuebao，2020，42(10)：144-154.

[5] 张万磊，张永丰，张建乐，等. 北戴河赤潮监控区环境质量状况分析[J]. 河北渔业，2012，40(7)：13-68.
ZHANG Wanlei，ZHANG Yongfeng，ZHANG Jianle，et al. Analysis of the environmental quality in the Beidaihe red tide monitoring area[J]. Hebei Fisheries，2012，40(7)：13-68.

[6] 周秋伶，马方方，张永丰，等. 风暴潮过后秦皇岛海域两次赤潮过程浮标数据变化[J]. 海洋技术学报，2018，37(1)：68-73.
ZHOU Qiuling，MA Fangfang，ZHANG Yongfeng，et al. Date changes of buoys during two tides in Qinhuangdao coastal area after a storm surge[J]. Journal of Ocean Technology，2018，37(1)：68-73.

[7] 马方方，张万磊，张永丰，等. 2013—2014 年秦皇岛海域褐潮期间浮标主要水质参数变化[J]. 海洋环境科学，2016，35(4)：520-525.
MA Fangfang，ZHANG Wanlei，ZHANG Yongfeng，et al. Date changes of main water quality parameters of monitoring buoys during brown tide blooms in Qinhuangdao between 2013 and 2014[J]. Marine Environmental Science，2016，35(4)：520-525.

[8] 马方方，王刚，毕玉明，等. 2018 年秦皇岛风暴潮前后岸基站及浮标主要水质参数变化分析[J]. 海洋技术学报，2019，38(6)：68-74.
MA Fangfang，WANG Gang，BI Yuming，et al. Analysis on the variation of main water quality parameters of estuary stations and buoys during a storm surge in Qinhuangdao in 2018[J]. Journal of Ocean Technology，2019，38(6)：68-74.

[9] 张建乐，王全颖，张永丰，等. 秦皇岛海域褐潮生消过程中营养盐特征[J]. 应用生态学报，2020，31(1)：282-292.
ZHANG Jianle，WANG Quanying，ZHANG Yongfeng，et al. Characteristics of seawater nutrients during the occurrence of brown tide in the coastal area of Qinhuangdao[J]. Chinese Journal of Applied Ecology，2020，31(1)：282-292.

[10] 郑克芳，尹杰，赵蓓，等. 秦皇岛近岸海域营养状况及其与赤潮关系的初步研究[J]. 浙江海洋学院学报(自然科学版)，2013，32(6)：521-526.
ZHENG Kefang，YIN Jie，ZHAO Bei，et al. Primary study on the status of eutrophication and the relationship with red tide in Qinhuangdao coastal area[J]. Journal of Zhejiang Ocean University(Natural Science)，2013，32(6)：521-526.

[11] 曹西华，俞志明，宋秀贤，等. 秦皇岛入海河流的污染水平、排放特征及对褐潮暴发区生源要素的影响[J]. 海洋与湖沼，2017，48(5)：970-981.
CAO Xihua，YU Zhiming，SONG Xiuxian，et al. Pollution and discharge from tributaries to the sea along Qinhuangdao coast：impact on the bioactive elements related to brown tide outbreak[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica，2017，48(5)：970-981.

[12] 张建乐，张心宇，张永丰，等. 北戴河海域夏季叶绿素 a 分布特征及其与 pH、DO 的关系[J]. 海洋湖沼通报，2015(4)：155-160.
ZHANG Jianle，ZHANG Xinyu，ZHANG Yongfeng，et al. Distribution of chlorophyll a of the coastal water of Beidaihe and its relationship with pH and dissolved oxygen in summer[J]. Transactions of Oceanology and Limnology，2015(4)：155-160.

[13] 王昆，吴景，杜静，等. 夏季和冬季辽东湾海域水体中叶绿素 a 含量分布特征[J]. 水产科学，2016，35(6)：675-680.
WANG Kun，WU Jing，DU Jing，et al. Distribution of chlorophyll-a concentration in sea waters of Liaodong Bay in summer and winter[J]. Fisheries Ssience，2016，35(6)：675-680.

[14] 王全颖，杜雨蒙，刘龙，等. 2013 年夏季秦皇岛海域叶绿素 a 浓度分布及其与环境因子的关系[J]. 海洋湖沼通报，2022，44(2)：121-127.
WANG Quanying，DU Yumeng，LIU Long，et al. Distribution of chlorophyll a and its relationship with environmental factors in summer 2013[J]. Transactions of Oceanology and Limnology，2022，44(2)：121-127.

[15] 王丹，何恩业，刘桂梅，等. 秦皇岛北戴河赤潮生物与环境因子之间的关系[J]. 海洋预报，2013，30(5)：1-7.
WANG Dan，HE Enye，LIU Guimei，et al. Relationship between red tide organisms and environmental factors in the Beidaihe waters of the Qinhuangdao[J]. Marine Forecasts，2013，30(5)：1-7.

[16] 陈作艺，张甲波，王刚，等. 2019 年秦皇岛海域海洋卡盾藻赤潮与理化因子关系研究[J]. 海洋环境科学，2022，41(4)：595-602.
CHEN Zuoyi，ZHANG Jiabo，WANG Gang，et al. Studies on the relationship between *Chattonella marina* blooms and physico-chemical parameters in Qinhuangdao coastal area in 2019[J]. Marine Environmental Science，2022，41(4)：595-602.

[17] 慕建东，郑向荣，赵振良，等. 秦皇岛海域赤潮期间浮游植物的生态特征[J]. 中国水产科学，2015，22(2)：288-301.
MU Jiandong，ZHENG Xiangrong，ZHAO Zhenliang，et al. Ecological characteristics of phytoplankton in Qinhuangdao coastal areas during the red-tide period[J]. Journal of Fishery Sciences of China，2015，22(2)：288-301.

[18] 徐金涛，姚远，杨雯，等. 2022 年秦皇岛近岸海域赤潮成因初探[J]. 应用生态学报，2024，35(3)：817-826.
XU Jintao，YAO Yuan，YANG Wen，et al. Preliminary investigation on the causes of red tides in Qinhuangdao cosatal aresa in 2022[J]. Chinese Journal of Applied Ecology，2024，35(3)：817-826.

[19] 环境保护部. 便携式溶解氧测定仪技术要求及检测方法：HJ/925-201[S]. 北京：中国环境出版社，2017.
Ministry of Environmental Protection. Technical requirements and test methods for portable dissolved oxygen meters：HJ/925-201[S]. Beijing：China Environmental Science Press，2017.

[20] 杜家菊，陈志伟. 使用 SPSS 线性回归实现通径分析的方法[J]. 生物学通报，2010，45(2)：4-6.
DU Jiaju，CHEN Zhiwei. Method of path analysis implemented with SPSS linear regression[J]. Bulletin of Biology，2010，45(2)：4-6.

[21] 张水浸. 赤潮及其防治对策[M]. 北京：海洋出版社，1994.
ZHANG Shuijin. Red tides and countermeasures for their prevention and control[M]. Beijing：China Ocean Press，1994.

[22] 陆斗定，GOBEL J，王春生，等. 浙江海区赤潮生物监测与赤潮实时预测[J]. 东海海洋，2000，18(2)：33-43.
LU Douding，GOBEL J，WANG Chunsheng. et al. Monitoring of harmful microalgae and nowcasting of red tides in Zhejiang coastal water[J]，East China Sea，2000，18(2)：33-43.

[23] 福建省市场监督管理局. 赤潮预警动态监测规程：DB35/T 2150—2023[S]. 2023.
Fujian Market Supervision and Administration Bureau. Dynamic monitoring specification for early warning of red tide：DB35/T 2150—2023[S]. 2023.

［24］ 刘千，孙群．渤海中部溶解氧浓度年际变化特征分析［J］．天津科技大学学报，2022，37(5)：15-23．
LIU Qian，SUN Qun．Interannual variations of dissolved oxygen concentration in the central Bohai Sea［J］．Journal of Tianjin University of Science & Technology，2022，37(5)：15-23．

［25］ 刘春利，葛长字，张玉娟，等．黄海表层溶解氧时空分布特征［J］．海洋环境科学，2017，36(2)：255-260．
LIU Chunli，GE Changzi，ZHANG Yujuan，et al．Spatial and temporal variations of surface dissolved oxygen in the Yellow Sea［J］．Marine Environmental Science，2017，36(2)：255-260．

［26］ JUSTIC D，KOURAFALOU V，MARIOTTI G，et al．Transport processes in the Gulf of Mexico along the river-estuary-shelf-ocean continuum：a review of research from the Gulf of Mexico research initiative［J］．Estuaries and Coasts，2022，45(3)：621-657．