基于浮标监测的连云港近海紫菜养殖区水环境特征

吴亚楠，李昱蓉，卢霞，孙美萍，卢高丽

（江苏海洋大学 海洋遥感大数据应用中心 连云港 222005）

摘要：为促进海洋渔业经济的健康可持续发展，文章以连云港高公岛附近的紫菜养殖区为研究区域，利用海洋环境综合监测浮标实时监测水环境和气象数据，采用定性和定量相结合的方法，分析紫菜养殖区海域的水温、电导率、水压、溶解氧浓度、pH 值、盐度、叶绿素浓度和浊度等水环境因子的统计和变化特征及其相关性，在此基础上分析气象条件对水环境因子的影响。研究结果表明：研究区域的水温和盐度适宜紫菜养殖，浊度属于强变异性；水温和电导率整体呈逐渐升高的趋势，溶解氧浓度和 pH 值呈逐渐降低的趋势，其他水环境因子呈波动状态；水压的变化与气压具有一致性，水体未受到溶解氧和酸碱污染；水温与电导率之间存在较强的正相关性，水温与溶解氧浓度和 pH 值之间存在较强的负相关性，pH 值与叶绿素浓度和盐度之间存在较强的正相关性；气象条件对水环境因子存在一定的影响，海上大风导致水体浊度陡增。

关键词：紫菜养殖；浮标；海水环境；海洋气象；海洋监测

中图分类号：X824；S968.43；P76 **文献标志码：**A **文章编号：**1005－9857(2020)04－0042－07

Water Environment Characteristics in the Coastal Porphyra Aquaculture of Lianyungang Based on Buoy

WU Yanan，LI Yurong，LU Xia，SUN Meiping，LU Gaoli

(Ocean Remote Sensing Big Data Application Center，Jiangsu Ocean University，Lianyungang 222005，China)

Abstract: In order to promote the healthy and sustainable development of marine fishery economy，this paper took the porphyra aquaculture area near Gaogong Island of Lianyungang as the research area，used the comprehensive monitoring buoy of marine environment to monitor the water environment and meteorological data in real time. By using the method of qualitative and quantitative analysis，the statistical and changing characteristics of water environmental factors such as water temperature，conductivity，water pressure，dissolved oxygen concentration，pH，salinity，chlorophyll concentration and turbidity in the porphyra aquaculture area and their correla-

收稿日期：2019-08-31；**修订日期：**2020-03-20

基金项目：国家自然科学基金项目(41506106)；江苏高校优势学科建设工程资助项目；江苏省海洋技术品牌专业建设项目(PPZY2015B116)；2018 年江苏省研究生实践创新计划项目(SJCX18－0923).

作者简介：吴亚楠，硕士研究生，研究方向为近海海洋生态环境

通信作者：卢霞，教授，博士，研究方向为近海海洋环境立体监测与评价

tion were analyzed. On this basis, the influence of meteorological conditions on water environmental factors was analyzed. The results showed that the water temperature and salinity in the study area were suitable for porphyra aquaculture. The turbidity was strongly variable; the overall water temperature and conductivity were gradually increasing, the dissolved oxygen concentration and pH were gradually decreasing, and other water environmental factors were fluctuating. The change of water pressure was consistent with that of air pressure, and the water body was not polluted by dissolved oxygen and acid and alkali. There was a strong positive correlation between water temperature and conductivity, a strong negative correlation between water temperature and dissolved oxygen concentration and pH, and a strong positive correlation between pH and chlorophyll concentration and salinity. Meteorological conditions had a certain impact on water environment factors. The sea gale caused the water turbidity to increase sharply.

Key words: Porphyra aquaculture, Buoy, Seawater environment, Marine meteorology, Marine monitoring

0　引言

海洋环境监测是了解海洋环境质量的重要手段，对于海洋环境保护和海洋资源开发具有重要意义。传统的监测方法须利用测量船实地进行海水采样再进行分析，而区别于传统的监测方法，海洋浮标具有自动、长期和连续收集海洋环境资料的能力，且不受恶劣环境的影响，在无法实施人工监测时仍能有效工作[1-2]。海洋浮标技术始于 20 世纪 40 年代末至 50 年代初[3]，国内外学者已利用海洋浮标进行一系列的研究，证明其可操作性和稳定性。Schmidt 等[4]设计适用于近岸水产养殖场和海滨浴场的低成本监测浮标，用来监测近岸海水的物理、化学和生物环境变化，从而探讨近岸水产养殖的环境变化特征；戴洪磊等[5]概述截至 2014 年我国黄海、渤海、东海和南海海域以及极地海域布设海洋浮标的情况，包括浮标的用途、种类和海洋环境监测参数等信息；陈旭阳等[6]利用海洋监测浮标研究赤潮发生前后实时监测数据的变化，为赤潮预警提供科学参考；李天深等[7]利用海洋浮标数据探讨水华发生前后水环境因子的变化。

目前利用海洋浮标研究紫菜养殖区水环境变化特征的相关文献较少，现有文献大多采用传统手段获取数据，难以实现实时在线监测的目标，给环境监测和评价带来一定的局限性。殷小琴等[8]采用传统采样方法对 2014—2016 年江苏如东紫菜增养殖区的水质监测数据进行分析和评价，研究结果表明水体温度、盐度和 pH 值适合紫菜生长，但因石油类和砷含量逐年增加，活性磷酸盐含量超出一类海水水质标准，水质开始被污染；张晓昱等[9]利用传统方法对连岛附近紫菜养殖区的海水环境质量进行评价，研究结果表明 2012—2016 年海域环境质量逐渐改善，适宜继续养殖紫菜，且紫菜可吸收和利用水体中的无机氮和磷酸盐，可对海洋环境进行原位生物修复。

本研究以连云港高公岛附近的紫菜养殖区为研究区域，通过海洋环境综合监测浮标获取实时监测的水环境和气象数据，利用定性和定量相结合的方法，分析紫菜养殖区水环境因子的统计和变化特征及其相关性，在此基础上分析气象条件对水环境因子的影响。基于浮标的近海紫菜养殖区水环境动态监测有利于海洋管理部门和养殖户掌握紫菜养殖区水环境和气象数据的实时变化情况，促进海洋渔业经济的健康可持续发展。

1　研究区域和数据

1.1　研究区域

连云港位于南、北气候交界区域，气候适宜，降雨丰沛，年降雨量为 850～1 080 mm，年平均气压为 1 025.2 hPa，受波浪、台风和海雾的影响较小。连云港近岸海域位于老黄河三角洲北侧，是在海洋动力下侵蚀而形成的半封闭海域，即海州湾。海州湾

面积约为 876.39 km^2，主要功能包括港口运输、捕捞养殖和旅游观光[10]。连云港近岸水质受航道运输、陆源排污和海水养殖等的影响，主要污染物为重金属和石油类[11-12]。

本研究的具体区域位于连云港高公岛附近海域的紫菜养殖区。高公岛是连云港重要的紫菜养殖基地之一：2017 年高公岛紫菜产业园的紫菜养殖面积达 1 万 hm^2，鲜菜产量达 10 万 t；紫菜交易所场内成交 11.4 亿张，成交额近 8 亿元[13]。

1.2 数据获取和处理

2019 年 3 月 14 日，在连云港连云区高公岛附近的紫菜养殖区投放 HNF 1.5-Ⅱ监测浮标，投放位置为 34°43′20.88″N、119°30′37.40″E。浮标搭载德国 Lufft 气象传感器（Lufft WS 500-UMB）和美国海鸟水质多参数仪（Sea-Bird Coastal Hydro CAT-EP），实时监测紫菜养殖区的气象和水环境，每 30 min记录 1 组数据，并通过移动卫星通信 RGPS 传输到监控中心。本研究主要选择 2019 年 3 月 15 日 0 时至 4 月 15 日 23 时 30 分的监测数据，开展水环境因子的变化特征分析。其中，水环境数据主要包括水温、电导率、水压、溶解氧浓度、pH 值、盐度、叶绿素浓度和浊度，气象数据主要包括气压、温度、湿度和风速。

采用 SPSS 23.0 软件对水环境因子（水温、电导率、水压、溶解氧浓度、pH 值、盐度、叶绿素浓度和浊度）进行统计分析，获取水环境因子的统计信息；进行 Pearson 相关系数的双侧检验分析，确定水环境因子之间的相互作用机制；利用 Excel 软件制图，分析水环境因子的变化特征[14]。

2 水环境因子特征

2.1 统计特征

研究区域紫菜养殖区水环境因子的数据统计如表 1 所示。

表 1 紫菜养殖区水环境因子统计

项目	最小值	最大值	平均值	标准差	偏度	峰度	变异系数/%
水温	8.40℃	15.73℃	11.43℃	1.42℃	−0.64	0.10	12.42
电导率	31.25 mS/cm	37.30 mS/cm	33.77 mS/cm	1.12 mS/cm	−0.56	−0.04	3.32
水压	2.20 kPa	5.60 kPa	4.20 kPa	0.60 kPa	0.30	−0.46	14.29
溶解氧浓度	7.94 mg/L	10.03 mg/L	9.02 mg/L	0.50 mg/L	−0.86	−0.11	5.54
pH 值	8.56	8.73	8.64	0.03	−0.07	−0.55	0.35
盐度	28.68	29.81	29.44	0.19	1.66	−1.27	0.65
叶绿素浓度	0.58 μg/L	5.89 μg/L	1.57 μg/L	0.60 μg/L	10.12	2.61	38.22
浊度	6.95 NTV	459.76 NTV	34.71 NTV	47.68 NTV	27.47	4.86	137.37

紫菜养殖区的水温为 8.40℃～15.73℃，平均值为 11.43℃；盐度为 28.68～29.81，平均值为 29.44，标准差为 0.19，变化总体不明显。商兆堂等[15]的研究结果表明，江苏沿海养殖条斑紫菜放苗的适宜水温为 12℃～17℃（16℃左右最适宜），大藻体生长发育的适宜水温为 3℃～5℃，成叶期生长发育的适宜水温为 3℃～8℃，最后收割的水温不宜超过 20℃。条斑紫菜的适盐范围较广，在盐度为 13～33 的海水中均能生长[16]。因此，从水温和盐度的条件看，该海区适宜养殖条斑紫菜。

紫菜养殖区的电导率为 31.25～37.30 mS/cm，平均值为 33.77 mS/cm；水压为 2.20～5.60 kPa，平均值为 4.20 kPa，标准差为 0.60 kPa，变化较小；浊度为 6.95～459.76 NTV，平均值为 34.71 NTV，标准差为 47.68 NTV，变化较大，存在不稳定性；叶绿素浓度为 0.58～5.89 μg/L，平均值为 1.57 μg/L；溶解氧浓度为 7.94～10.03 mg/L，平均值为 9.02 mg/L，均超过一类海水水质标准（6 mg/L）[17]，但不会对紫菜的生长产生明显影响；pH 值为 8.56～8.73，平均值为 8.64，标准差为 0.03，变化较小，通常 pH 值为 7.8～8.5 较适合紫菜生长，该海区的 pH 值略高[8]。

综上所述，该紫菜养殖区的水压、溶解氧浓度、pH 值和盐度的变化较小，较为稳定；浊度的变化最大，可能是受大风浪的影响，导致流速改变或海底泥沙上浮，从而影响海水的浊度。

变异系数为数据的标准差与平均值的比值，用来定量分析水环境因子的波动程度，可较为客观地反映不同量纲的水环境因子之间的相对重要程度[18]。连云港近海紫菜养殖区的水环境因子的变异系数由小到大依次为 pH 值、盐度、电导率、溶解氧浓度、水温、水压、叶绿素浓度、浊度。其中，pH 值、盐度、电导率和溶解氧浓度属于弱变异性（变异系数＜10％），水温、水压和叶绿素浓度属于中等变异性（10％≤变异系数≤100％），浊度属于强变异性（变异系数＞100％）。

2.2　变化特征

2.2.1　水温和电导率

紫菜养殖区水温和电导率的变化特征如图 1 所示。

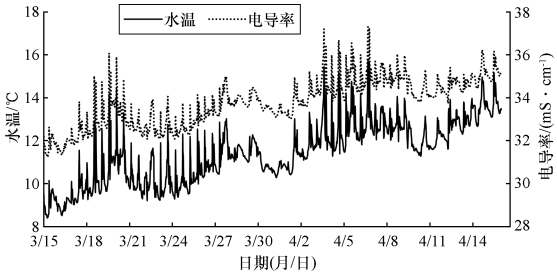

图 1　水温和电导率的变化

由图 1 可以看出：水温基本随当时当地气温的升降而波动，整体呈现逐渐升高的趋势，且均在 20℃以下，适宜紫菜的最后收割；电导率的变化趋势与水温基本相同，整体呈现逐渐升高的趋势，同时验证电导率与水温具有正相关性。

在日变化曲线中，水温通常呈现“一峰一谷”型，最高值出现在 12：00—15：00，最低值则出现在日出前后。

2.2.2　水压

紫菜养殖区水压和气压的变化特征如图 2 所示。

由图 2 可以看出，水压的变化与气压具有一致性。大气气压随大气高度的变化而变化，通常阴天

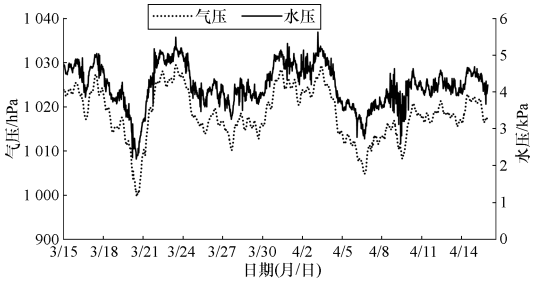

图 2　水压和气压的变化

的大气湿度大、密度小，气压比晴天低，研究期内天气保持阶段性稳定的状态。水压的日变化约为 3 kPa，变化较小，对紫菜生长的影响不大。

2.2.3　溶解氧浓度

溶解氧浓度与海－气交换、水温、盐度、氧的生化循环、生物活动、有机质浓度及其降解率有关，是评价海水环境质量的重要指标。紫菜养殖区溶解氧浓度的变化特征如图 3 所示。

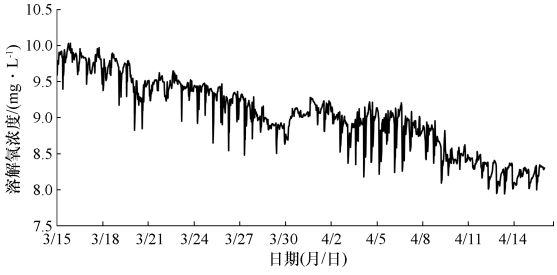

图 3　溶解氧浓度的变化

由图 3 可以看出，溶解氧浓度有平缓下降的趋势，这是由于溶解氧浓度与水温呈负相关关系。由于春季水温较低，浮游生物的消耗较少，溶解氧浓度始终符合一类海水水质标准。受日照影响，溶解氧浓度的日变化约为 0.25 mg/L，波动程度较小。

根据溶解氧的特点，采用内梅罗指数（N. L. Nemerow）评价溶解氧污染指数，计算公式为：

$$P_i = \frac{C_{im} - C_i}{C_{im} - C_{io}}$$

式中：P_i 为溶解氧污染指数；C_{im} 为本次调查中溶解氧浓度的最大值；C_i 为溶解氧浓度的实测值；C_{io} 为溶解氧浓度的评价标准。

当 P_i＜0.5 时，表明水体未受到该因子污染。根据溶解氧浓度的一类海水水质标准（6 mg/L），经

计算，紫菜养殖区的 $P_i=0.25$，因此该海域未受到溶解氧污染。

2.2.4 pH 值

紫菜养殖区 pH 值的变化特征如图 4 所示。

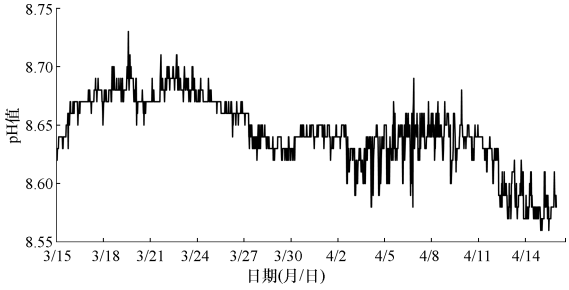

图 4 pH 值的变化

由图 4 可以看出，pH 值整体呈现下降的趋势，且日变化的幅度不明显。全球海水表层 pH 值的平均值约为 8.2，变化范围通常为 7.3～8.5。研究区域的 pH 值为 8.56～8.73，略高于全球海水表层的平均值，表明紫菜养殖可能对海水酸碱度有一定的影响。

酸碱污染指数的计算公式为：

$$P_{pH}=(I_{pH}-7.0)/(I_{pHsmax}-7.0)(I_{pH}>7.0)$$

式中：P_{pH} 为酸碱污染指数；I_{pH} 为 pH 值的实测值；I_{pHsmax} 为 pH 值评价标准值的上限值。

经计算，$P_{pH}=0.91$，表明该海域未受到酸碱污染。

2.2.5 叶绿素浓度

紫菜养殖区叶绿素浓度的变化特征如图 5 所示。

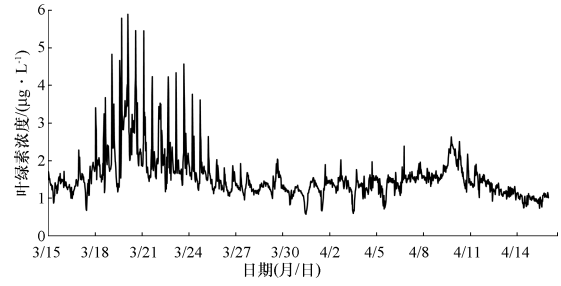

图 5 叶绿素浓度的变化

由图 5 可以看出，叶绿素浓度在 3 月 17—20 日逐渐升高，于 3 月 20 日达到最大值后下降并逐渐平稳，于 4 月 9 日出现小波峰后逐渐降低，且日变化范围逐渐减小（0.4～4.0 μg/L）。在紫菜的收成期，随着紫菜的成熟，海水的叶绿素浓度基本趋于稳定。叶绿素浓度逐渐降低表明紫菜养殖可增加海水中浮游生物的生物量。

2.2.6 浊度

浊度是表征水体中悬浮物浓度的指标，是重要的水质参数之一。紫菜养殖区浊度的变化特征如图 6 所示。

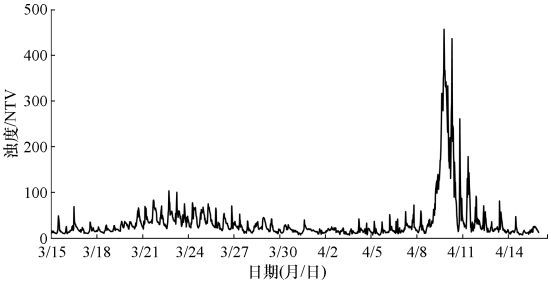

图 6 浊度的变化

由图 6 可以看出，水体浊度除 4 月 9 日和 10 日出现较大波动外，其余时段均保持稳定，约有 75% 的值低于平均值 34.71 NTV。水体浊度的陡增很可能是由于海水中泥沙含量增加。

2.2.7 盐度

海水中含有多种盐类，盐度是海水含盐量的标度，许多海洋现象和过程都与盐度的变化和分布有关。盐度间接影响生物的代谢活动和渗透压，因此盐度不宜过高或过低，保持稳定为宜。紫菜养殖区盐度的变化特征如图 7 所示。

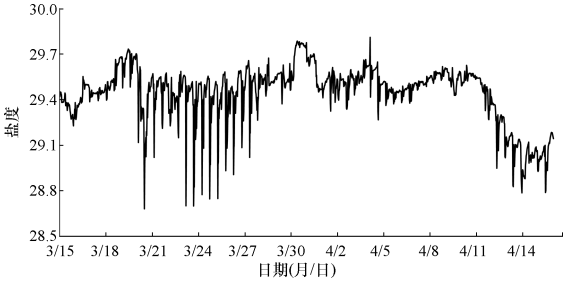

图 7 盐度的变化

由图 7 可以看出，盐度的波动较稳定，约有 33%时间的日变化较大，但变化范围也在 1.0 之内。盐度在近岸受潮流影响较大的区域通常呈现潮流周期的变化[19]。

2.3　水环境因子之间的相关性

紫菜养殖区的水温、电导率、水压、溶解氧浓度、pH 值、叶绿素浓度、浊度和盐度之间的相关性分析结果如表 2 所示。

表 2　水环境因子的相关系数

项目	水温	电导率	水压	溶解氧浓度	pH 值	叶绿素浓度	浊度	盐度
水温	1	0.987**	−0.301**	−0.837**	−0.716**	−0.129**	−0.016	−0.368**
电导率		1	−0.319**	−0.810**	−0.677**	−0.139**	−0.001	−0.213**
水压			1	0.126**	−0.001	−0.263**	−0.070**	−0.018
溶解氧浓度				1	0.816**	0.268**	−0.192**	0.394**
pH 值					1	0.527**	0.077**	0.432**
叶绿素浓度						1	0.274**	−0.019
浊度							1	0.092**
盐度								1

注：**表示在 0.01 上显著相关（双侧检验）。

由表 2 可以看出：水温与电导率之间存在较强的正相关性，相关系数达 0.987，表明海水的电导率随水温升高而升高的变化比较明显；水温与溶解氧浓度和 pH 值之间存在较强的负相关性，相关系数分别为 −0.837 和 −0.716，表明随着水温的升高，海洋生物的呼吸作用会消耗氧气和释放大量二氧化碳，从而降低溶解氧浓度和 pH 值；溶解氧浓度与 pH 值之间存在较强的正相关性，相关系数为 0.816；pH 值与叶绿素浓度和盐度之间存在较强的正相关性，相关系数分别为 0.527 和 0.432，这是由于盐度直接影响海水酸碱度，叶绿素浓度也直接反应海水中浮游植物的生物量和动态变化[20]。

2.4　气象条件对水环境因子的影响

除水环境条件适宜外，气象条件也是影响紫菜养殖的重要因素，主要包括气温、大风、降雨和雾[21]。

利用搭载在海洋环境综合监测浮标上的 Lufft 气象传感器，在研究期内获取气象数据。研究区域气温的平均值为 11.595℃，与水温的平均值 11.430℃相差 0.165℃。过大或过小的降雨量不仅影响海水盐度的变化，而且会成为紫菜病变的诱发因子[22]；研究区域降雨量的平均值为 14.272 mm，盐度的变化也较稳定，因此降雨量没有影响海水盐度的变化，适合紫菜收成。连云港地区的大雾天气较少，且 3－4 月为紫菜的收成期，大雾对紫菜生长及其品质的影响较小。

研究区域风速的平均值为 0.5 m/s，最大值为 1.3 m/s，最小值为 0.1 m/s。风浪会造成海底淤泥搅动，导致海水中悬浮物含量增加，从而影响海水浊度的变化[23]。紫菜养殖区风速和浊度的变化特征如图 8 所示。

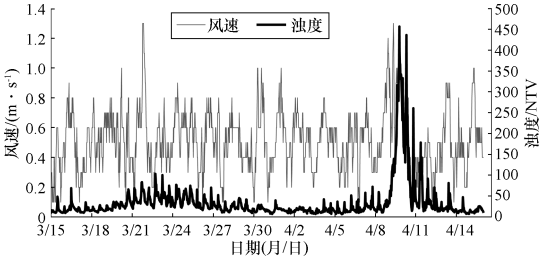

图 8　风速和浊度的变化

由图 8 可以看出，浊度与风速的变化趋势相近，且风速存在 2 个峰值，浊度在对应时段也存在 2 个峰值，表明大风天气对海水浊度的影响很大。经查阅气象资料，2 个峰值时段的海上大风约为 7 级。

3　结语

本研究利用海洋环境综合监测浮标，获取连云港高公岛附近紫菜养殖区的水环境和气象数据，分析水环境因子的统计和变化特征及其相关性，并分析气象条件对水环境因子的影响。连云港高公岛附近紫菜养殖区的水温和盐度适宜紫菜养殖；水温

和电导率整体呈逐渐升高的趋势，溶解氧浓度和pH值呈逐渐降低的趋势，其他水环境因子呈波动状态；气象条件对水环境因子存在一定的影响，海上大风使海水中的悬浮物含量增加，导致水体浊度陡增。

参考文献

[1] 赵聪蛟，周燕.国内海洋浮标监测系统研究概况[J].海洋开发与管理，2013，30(11)：13－18.

[2] 赵聪蛟，何志强，周燕.浙江省海洋水质监测浮标设计与实现[J].海洋技术学报，2015，34(5)：37－42.

[3] MALONE T C.The coastal module of the Global Ocean Observing System(GOOS)：an assessment of current capabilities to detect change[J].Marine Policy，2003，27(4)：295－302.

[4] SCHMIDT W，RAYMOND D，PARISH D，et al.Design and operation of a low-cost and compact autonomous buoy system for use in coastal aquaculture and water quality monitoring[J].Aquacultural Engineering，2018，80：28－36.

[5] 戴洪磊，牟乃夏，王春玉，等.我国海洋浮标发展现状及趋势[J].气象水文海洋仪器，2014，31(2)：118－121.

[6] 陈旭阳，刘保良.海洋在线监测浮标在赤潮监测中的应用研究[J].热带海洋学报，2018，37(5)：20－24.

[7] 李天深，蓝文陆.基于近岸海域自动监测浮标的水华发生过程分析[J].海洋通报，2016，35(2)：201－208.

[8] 殷小琴，张静波，李冰.江苏如东紫菜增养殖区水环境质量评价[J].海洋开发与管理，2017，34(7)：85－88.

[9] 张晓昱，袁广旺，毛成责，等.江苏重点紫菜增养殖区环境质量状况评价[J].淮海工学院学报(自然科学版)，2017，26(4)：78－83.

[10] 田慧娟，刘吉堂，王维志.连云港近海域浮游动物种类组成及其多样性[J].淮海工学院学报(自然科学版)，2009，18(4)：73－76.

[11] 张云峰，周梦佳，刘玉卿.江苏省近岸海域水环境因子现状评价研究[J].环境科学与管理，2018，43(12)：171－175.

[12] 王敏，张晴，周德山，等.连云港近岸海域水质状况初步调查与评价[J].淮海工学院学报(自然科学版)，2011，20(4)：50－53.

[13] 连云港市连云区统计局.2017年连云港市连云区国民经济和社会发展统计公报[Z].2018.

[14] 杜强，贾丽艳.SPSS统计分析：从入门到精通[M].北京：人民邮电出版社，2009.

[15] 商兆堂，蒋名淑，濮梅娟.江苏紫菜养殖概况和气候适宜性分析[J].安徽农业科学，2008(13)：5315－5319.

[16] 陈聚法，赵俊，过锋，等.条斑紫菜对胶州湾湿地浅海富营养化状况的生物修复效果[J].渔业科学进展，2012，33(1)：93－101.

[17] 国家环境保护局.海水水质标准：GB 3097—1997[S].北京：中国标准出版社，1997.

[18] 孙钦帮，高范，王阳，等.广东红海湾海域表层水环境中重金属含量特征及污染评价[J].海洋环境科学，2018，37(5)：685－690，698.

[19] 李凤岐.海洋与环境概论[M].北京：海洋出版社，2013.

[20] 吴奇丽，张坤，陈欢，等.华阳河湖群叶绿素a浓度的季节动态和空间分布[J].水生态学杂志，2019，40(2)：66－72.

[21] 陈松春，王行松.紫菜养殖与气象条件的关系[J].南方农业，2012，6(8)：37－38.

[22] 陆林营，吴彩彬，林秀芳.福鼎坛紫菜养殖气象条件分析[J].现代农业科学，2009，16(5)：86－88.

[23] 陈飞，张耀存，姜有山，等.连云港海区养殖优质条斑紫菜原因研究[J].气象科学，2005(5)：5534－5542.