

夏季强降雨对胶州湾浮游硅藻群落结构的影响

王为民^{1,2}, 陈洪举^{1,2}, 梁生康³, 刘光兴^{1,2}

(1. 中国海洋大学 海洋环境与生态教育部重点实验室, 山东 青岛 266100; 2. 中国海洋大学 环境科学与工程学院, 山东 青岛 266100; 3. 中国海洋大学 化学化工学院, 山东 青岛 266100)

摘要: 为研究强降雨对胶州湾浮游硅藻群落的影响及作用机制, 作者利用2012年夏季暴雨前(7月17日)和暴雨后(8月5日)采集的浮游植物样品, 对暴雨前后胶州湾海域浮游硅藻的种类组成、丰度和群落结构特征等进行了分析, 探讨了台风导致的强降雨天气对浮游硅藻群落结构的影响。结果表明, 暴雨前胶州湾海域共记录到硅藻22属54种, 暴雨后, 共记录到出硅藻18属39种, 浮游硅藻种类数显著下降。暴雨前浮游硅藻的平均丰度为 $2\,953.9 \times 10^4$ 个/m³, 优势种有浮动弯角藻(*Eucampia zoodiacus*)、星脐圆筛藻(*Coscinodiscus asteromphalus*)、拟旋链角毛藻(*Chaetoceros pseudocurvisetus*)和劳氏角毛藻(*Chaetoceros lorenzianus*); 暴雨后浮游硅藻平均丰度为 111.4×10^4 个/m³, 比暴雨前降低了1个数量级, 优势种组成也发生变化, 有浮动弯角藻、星脐圆筛藻、大洋角管藻(*Cerataulina pelagica*)和波状石丝藻(*Lithodesmium undulatum*)。暴雨前后胶州湾海域浮游硅藻平面分布也发生变化, 暴雨前在湾西部丰度值较高, 暴雨后浮游硅藻平面分布相比暴雨前更加均匀。本研究可为深入探讨海洋环境异常变化对浮游硅藻乃至浮游植物群落的影响提供重要依据。

关键词: 强降雨; 群落结构; 浮游植物; 硅藻; 胶州湾

中图分类号: Q948.8

文献标识码: A

文章编号: 1000-3096(2014)02-0046-07

doi: 10.11759/hyxx20130422002

台风等极端天气事件导致的强降雨会为海域带来大量淡水输入(湿沉降和径流流量的增加), 这将改变海水的盐度和营养盐浓度, 使海域初级生产力发生变化, 浮游植物数量、空间分布和群落结构发生显著改变。国外有关降雨对浮游植物影响的研究多有报道, 如 Willey^[1]在北卡罗来纳海域、Paerl^[2-4]在帕姆利科湾和北卡罗来纳州海域进行的研究表明, 降雨导致海水中营养盐浓度升高和盐度下降, 减小营养盐对浮游植物生长的限制, 使海域初级生产力和浮游植物数量升高。另外降雨不仅对浮游植物产生影响, 还可能影响到其他海洋生物(如鱼类), 进而对海洋生态系统产生影响^[5]。

2012年8月2日晚, 台风“达维”登陆青岛, 这是青岛1949年来最强台风, 受其影响, 8月2日6时至3日下午2时, 青岛市降大到暴雨, 全市平均降水量69.9 mm。胶南市大部、黄岛区北部和胶州市南部降水量较大, 在100 mm以上。降雨主要集中在3日凌晨0时至上午10时(52.4 mm), 占总降水量的75.0%(数据来源于青岛市气象局)。

关于胶州湾浮游植物生态群落的研究长期以来一直受到重视, 胶州湾海域近年来环境变化(如富营

养化现象加重等)对浮游植物群落结构影响的研究也多有报道^[6-7]。但是, 有关强降雨对胶州湾海域浮游植物影响的研究少见报道。为研究台风等异常天气导致的强降雨对胶州湾浮游植物群落的影响及其作用机制, 我们在暴雨前(2012年7月17日)和暴雨后两天(2012年8月5日)于胶州湾进行了2次调查, 并以浮游硅藻为主要研究对象, 分析了强降雨对其丰度、平面分布和群落结构特征的影响。本研究对于掌握强降雨对胶州湾生境的影响、了解浮游植物群落对台风等异常降水事件的响应具有重要意义。

1 材料与方法

1.1 调查海区和站位设置

分别于2012年7月17日(暴雨前)和2012年8月5日(暴雨后)在胶州湾进行2次浮游植物调查, 研究站位见图1。

收稿日期: 2013-04-22; 修回日期: 2013-05-14

基金项目: 国家自然科学基金项目(41076085); 海洋公益性行业科研专项经费项目(201205018)

作者简介: 王为民(1989-), 男, 山东邹城人, 主要从事海洋浮游生物生态学研究, 电话: 0532-66781769, E-mail: wwmin@126.com; 刘光兴, 通信作者, 教授, 电话: 0532-66782672, E-mail: gxliu@ouc.edu.cn

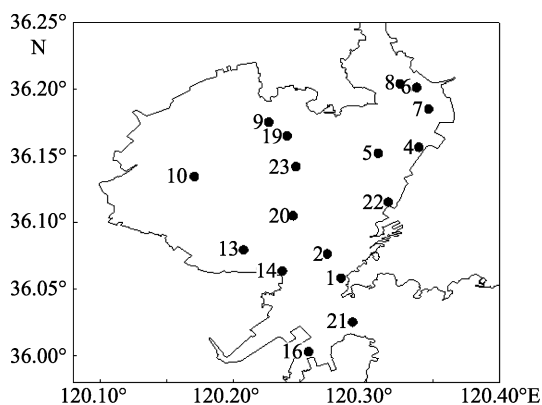


图 1 调查区域和站位

Fig. 1 Investigation area and sampling stations

1.2 样品采集、处理方法及数据收集

样品的采集、保存以及分析均按照《海洋调查规范——海洋生物调查》(GB12763.6-2007)进行。本次调查使用浅水型浮游生物网(网口内径 37 cm, 筛绢网孔径 0.077 mm)由底至表垂直采集浮游植物样品, 样品用 5% 的福尔马林海水溶液固定和保存。样品带回实验室浓缩, 在显微镜下进行种类鉴定和计数。

表层温度和表层盐度采用随船多参数水质仪(Manta, 美国 Eureka 公司)现场测定, 总无机氮(DIN)、硅酸盐(SiO₃²⁻-Si)、活性磷酸盐(PO₄³⁻-P)和富营养化指数等为同步调查数据。

1.3 分析方法

浮游植物的丰度(abundance)根据拖网时的滤水体积, 以每立方米水体中的浮游植物细胞个数(个/m³)表示。

优势度值计算公式^[8]为: $Y = \frac{n_i}{N} f_i$

式中, n_i 为第 i 种浮游植物的丰度, N 为浮游植物总丰度, f_i 为第 i 种浮游植物出现的频率, 优势度 Y 值大于 0.02 的种类为优势种^[9]。

采用 Surfer 8.0 软件绘制站位图、以及表层盐度、胶州湾浮游植物总丰度和各优势种丰度的平面分布等值线图。

2 结果

2.1 暴雨前后的环境变化

暴雨前后胶州湾海水的表层盐度、表层温度和营养盐变化情况见表 1。暴雨前后表层盐度均由北向南逐渐升高。暴雨后, 胶州湾海域表层盐度下降明显, 其平均值由暴雨前的 29.99 降至暴雨后的 28.25。湾北部和西部海域表层盐度值下降最为明显, 在湾口区表层盐度与暴雨前相比下降较不明显(图 2); 氮、硅和磷营养盐浓度都出现了明显的上升, 其最高值出现在湾东北部海域。

2.2 浮游植物的种类组成

暴雨前, 共鉴定浮游硅藻 22 属 54 种, 甲藻 3 属 8 种; 硅藻以角毛藻属种类最多(18 种); 优势种有浮动弯角藻(*Eucampia zoodiacus*)、星脐圆筛藻(*Coscinodiscus asteromphalus*)、拟旋链角毛藻(*Chaetoceros pseudocurvisetus*)和劳氏角毛藻(*Chaetoceros lorenzianus*)。暴雨后, 共鉴定浮游硅藻 18 属 38 种, 甲藻 5 属 9 种; 硅藻门中仍以角毛藻属种类最多(9 种); 优势种有浮动弯角藻、星脐圆筛藻、大洋角管藻(*Cerataulina pelagica*)和波状石丝藻(*Lithodesmium undulatum*)。暴雨前后胶州湾海域浮游硅藻优势种平均丰度与优势度见表 2。

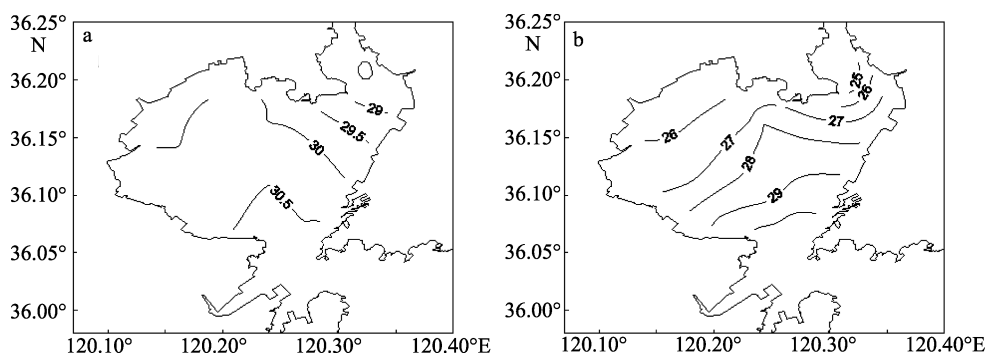


图 2 调查区域表层盐度的平均分布

Fig. 2 Surface salinity distribution of the area surveyed

a.暴雨前; b.暴雨后

a. Before the rainstorm; b. After the rainstorm

表 1 降雨前后各站位表层温度、表层盐度以及营养盐的平均值与最大值

Tab. 1 The average and maximum values of surface temperature, surface salinity and nutrients of the stations surveyed before and after the rainstorm

航次	数值类型	SST(°C)	SSS	DIN(μmol/L)	SiO ₃ ²⁻ -Si(μmol/L)	PO ₄ ³⁻ -P(μmol/L)	富营养化指数
暴雨前	平均	24.79	29.99	25.87	8.55	0.84	4.95
	最高值	26.68	30.94	87.55	22.00	2.21	20.56
暴雨后	平均	26.74	28.25	38.57	20.88	1.78	14.50
	最高值	28.86	30.31	91.53	64.76	4.71	91.89

表 2 暴雨前后浮游硅藻优势种及其优势度和丰度值

Tab. 2 The dominant species, and their dominance and abundance before and after the rainstorm

优势种	平均丰度(×10 ⁴ 个/m ³)	优势度	
		暴雨前	暴雨后
大洋角管藻 <i>Cerataulina pelagica</i>	64.4	8.3	0.019
劳氏角毛藻 <i>Chaetoceros lorenzianus</i>	75.0	0.4	0.025
拟旋链角毛藻 <i>Chaetoceros pseudocurvisetus</i>	189.7	0.3	0.057
星脐圆筛藻 <i>Coscinodiscus asteromphalus</i>	216.8	14.9	0.069
浮动弯角藻 <i>Eucampia zoodiacus</i>	2153.4	68.9	0.729
波状石丝藻 <i>Lithodesmium undulatum</i>	9.7	6.9	0.001

2.3 浮游硅藻丰度的平面分布

暴雨前, 调查海域浮游硅藻平均丰度为 $2\ 953.9 \times 10^4$ 个/m³, 丰度最大值出现在湾西部的 10 号站 ($28\ 980.0 \times 10^4$ 个/m³), 最小值出现在黄岛附近的 14 号站 (175.2×10^4 个/m³), 浮游硅藻丰度高值区分布在湾西部海域(图 3a)。暴雨后, 调查海域各站浮游硅藻平均丰度为 111.4×10^4 个/m³, 其丰度值相比暴雨前降低了一个数量级, 丰度最大值出现在湾东部港口处的 22 号站 (330.1×10^4 个/m³), 最小值出现在湾口的 1 号站 (9.6×10^4 个/m³), 相比暴雨前浮游硅藻水平分布较均匀, 在东部港口处海域有一较小范围的丰度高值区(图 3b)。

暴雨前, 优势种的平面分布情况: 浮动弯角藻在各站均有分布, 是本次调查丰度最大的优势种, 其丰度最大值 $23\ 808.0 \times 10^4$ 个/m³, 出现在湾西部的 10 号站, 其水平分布趋势与硅藻水平分布趋势相似; 星脐圆筛藻丰度值由东北海域向西南方向逐渐减小, 湾中部和湾口处海域丰度值较小, 最大值 $1\ 039.5 \times 10^4$ 个/m³, 出现在湾东北部的 8 号站; 拟旋链角毛藻在湾中央海域丰度值较大, 北部沿岸海域较小, 最大值 $2\ 256.0 \times 10^4$ 个/m³, 出现在 10 号站; 劳氏角毛藻亦在各站均有分布, 在湾西部海域丰度值较高, 丰度最大值 768.0×10^4 个/m³, 也出现在 10 号站。各优势种平面分布见图 4。

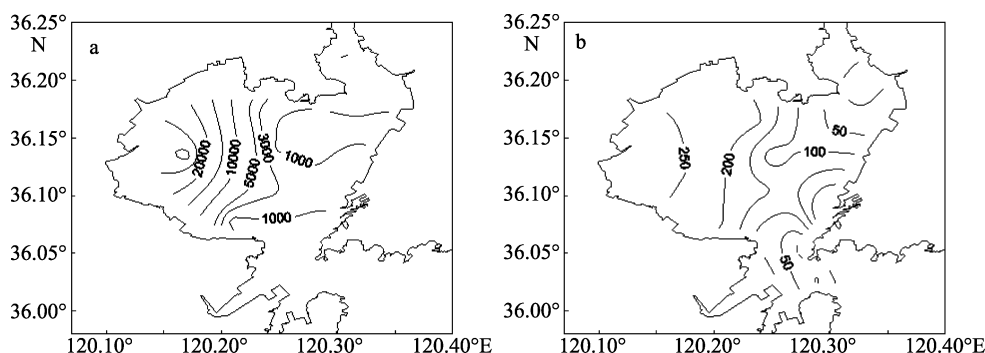


图 3 暴雨前后浮游硅藻丰度平面分布(×10⁴个/m³)

Fig. 3 Abundance distribution of Diatom before and after the rainstorm (×10⁴个/m³)

a.暴雨前; b.暴雨后

a. Before the rainstorm; b. After the rainstorm

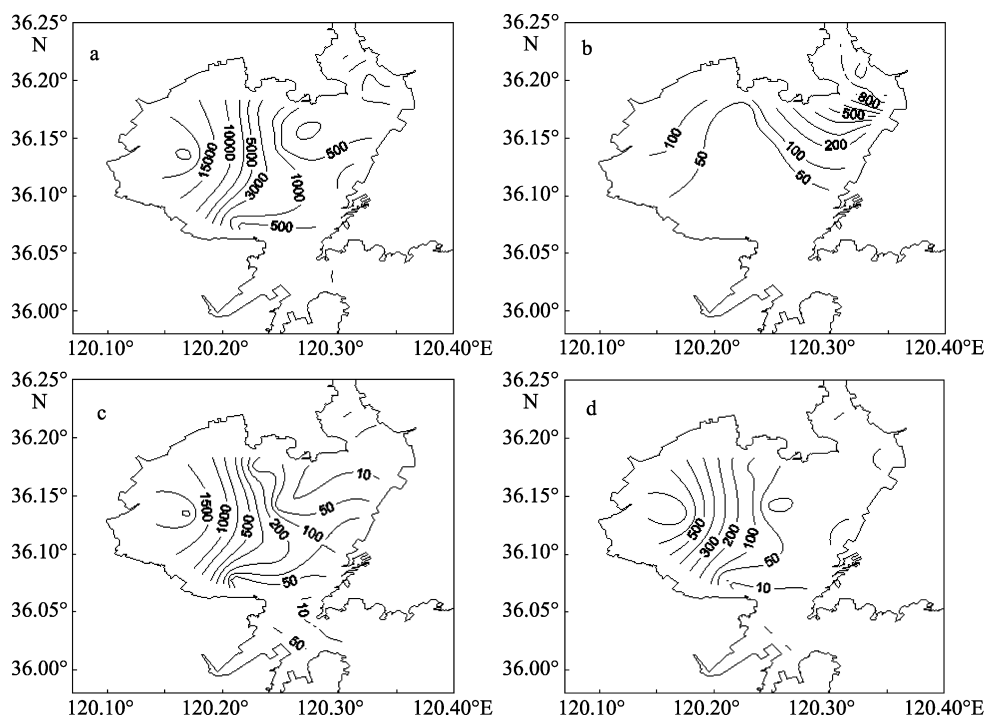


图 4 暴雨前浮游硅藻优势种的平面分布 ($\times 10^4$ 个/ m^3)

Fig. 4 Spatial distribution of dominant species before the rainstorm ($\times 10^4$ cells/ m^3)

a. 浮动弯角藻; b. 星脐圆筛藻; c. 拟旋链角毛藻; d. 劳氏角毛藻

a. *Eucampia zoodiacus*; b. *Coscinodiscus asteromphalus*; c. *Chaetoceros pseudocurvisetus*; d. *Chaetoceros lorenzianus*

暴雨后, 优势种的平面分布情况: 浮动弯角藻在湾中部海域丰度值较大, 最大值为 313.6×10^4 个/ m^3 , 出现在湾东部港口处的 22 站, 在湾北部和湾口海域丰度值较低; 星脐圆筛藻水平分布呈现由西北向东南逐渐减小的趋势, 到湾口海域丰度值较小, 其丰度最大值 77.3×10^4 个/ m^3 , 出现在湾西部的 10 站; 波状石丝藻在湾北部海域丰度值较高, 向南逐渐减小, 丰度最大值 50.4×10^4 个/ m^3 , 出现在湾北部的 9 站; 大洋角管藻在西部海域丰度值较高, 最大值 97.5×10^4 个/ m^3 , 出现在 10 站。各优势种平面分布见图 5。

3 讨论

本研究结果显示, 暴雨后胶州湾浮游硅藻的丰度值出现显著下降, 由暴雨前的 2953.9×10^4 个/ m^3 降到 111.4×10^4 个/ m^3 , 比暴雨前低了一个数量级; 浮游硅藻种类数也出现了下降, 由暴雨前的 54 种降到暴雨后的 39 种。在以往学者关于台风等异常天气导致的强降雨对浮游硅藻影响的研究中, 得到的结果大多是在强降雨后浮游硅藻乃至浮游植物丰度值相比降雨前出现升高, 学者们对于这种现象也给出了解释, 如 Mallin^[10]、Miller^[11]均指出台风导致的降雨可以通过增加水体营养盐浓度使海域初级生产力和浮

游硅藻丰度值升高; Paerl^[12-13]指出台风通过物理作用搅动水体使沉积物中营养物质释放到上层水体中, 在不同的季节都会导致浮游硅藻丰度的升高; 霍文毅等^[14]研究了胶州湾海域降雨后中肋骨条藻赤潮的暴发, 指出中肋骨条藻在强降雨后 2 天开始爆发性增殖引发赤潮, 4 天后进入消亡期。但本次调查中, 得到了与上述研究不同的结果, 浮游硅藻丰度值在强降雨两天后出现了显著下降, 中肋骨条藻的丰度值虽然出现上升, 但并未如霍文毅等^[14]的调查中出现爆发性增殖。Willey^[1]的研究说明叶绿素 a 对降雨的响应存在 2 天的潜伏期; Loftus^[15]研究表明, 降雨 4 天后浮游植物丰度值开始显著升高, 到第 10 天达到最高; 这表明, 降雨对浮游硅藻的影响可能存在滞后性, 浮游植物对降雨的响应可能有一定的周期, 降雨并不能立即造成浮游硅藻丰度值的升高。分析认为, 台风过程及强降水造成的剧烈物理冲击和盐度的快速下降等因素可能会在短期内造成浮游硅藻丰度值的下降。本研究中, 暴雨后的取样是在降雨后 2 天进行的, 浮游硅藻可能因受物理冲击和盐度下降的影响而正处在其丰度值的下降时期。我们推测, 在暴雨若干天之后, 胶州湾浮游硅藻的丰度值也会出现显著上升, 浮游植物丰度值和种类数也

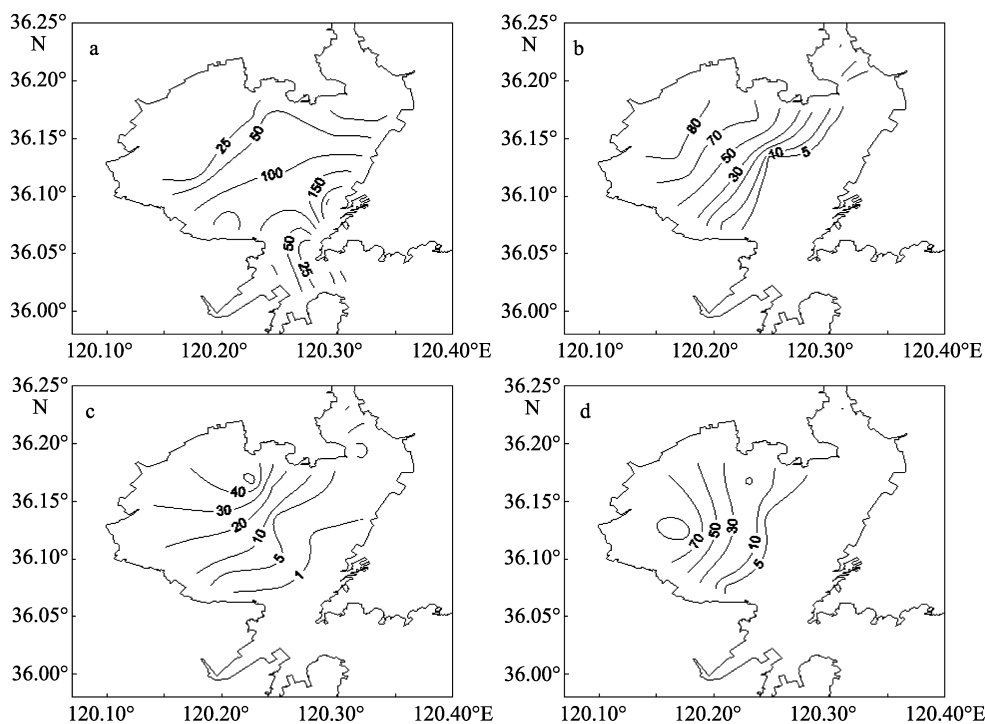


图 5 暴雨后浮游硅藻优势种的平面分布 ($\times 10^4$ 个/ m^3)

Fig.5 Spatial distribution of dominant species after the rainstorm ($\times 10^4$ cells/ m^3)

a. 浮动弯角藻; b. 星脐圆筛藻; c. 波状石丝藻; d. 大洋角管藻

a. *Eucampia zodiacus*; b. *Coscinodiscus asteromphalus*; c. *Lithodesmium undulatum*; d. *Cerataulina pelagica*

会出现上升,但这还有待下一步更多的观测资料来支持。

强降雨后胶州湾浮游硅藻的平面分布趋势也发生了显著变化。降雨前浮游硅藻丰度的高值区出现在湾西部海域,降雨后浮游硅藻丰度值分布较均匀,但西部海域丰度值下降更为显著(图 3)。在汇入胶州湾的河流中,湾西部的大沽河的淡水输入量占胶州湾海域所有河流输入量的大部分(77%),湾东部河流流量较小,降雨后大量淡水由大沽河输入到胶州湾内;湾西部的洋河在降雨后淡水输入量的比例由 0.1%升高到 4.0%左右(数据来源于同步调查监测)。另外,据青岛市气象部门的报告,降雨量较大的区域(胶南市大部、黄岛区北部和胶州市南部)大多分布在胶州湾西部沿岸。由此可见,降雨后径流和湿沉降过程给胶州湾西部海域浮游硅藻的冲击相比东部海域似乎更为剧烈,这可能是导致强降雨后西部海域浮游硅藻丰度值相比东部海域出现更为显著下降的主要原因。

台风带来的强降水导致大量的淡水输入和入海径流量的增大,使近岸海域营养盐浓度发生变化^[12],同时,台风的物理作用可能使底层营养盐被交换到

真光层,也可能导致海水中营养盐浓度的上升^[12-13, 15]。本次调查中,降雨前后 N、P 和 Si 营养盐浓度均大于以往研究中的数据^[14],在这种富营养化的条件下,水体中丰富的营养盐可能并不会成为限制浮游硅藻生长繁殖的因素,所以暴雨前后胶州湾浮游硅藻丰度值与营养盐相关性较小。降雨后浮游硅藻并未出现因营养盐浓度上升而导致的丰度值的上升,而其他因素如物理作用和盐度变化等可能对浮游硅藻影响更大而导致了浮游硅藻丰度值的减小。

浮动弯角藻在暴雨前后都成为优势度最大的优势种,其丰度值分别占浮游硅藻丰度值的 72.9% 和 61.8%。浮动弯角藻是胶州湾重要赤潮种,常在胶州湾海域形成赤潮^[17]。张永山等^[17]在胶州湾浮动弯角藻赤潮生消过程的研究中指出,其生长的适温范围为 23.2~24.6℃,盐度为 30.94~34.61。本次调查中降雨前胶州湾平均温度和盐度分别为 24.79℃ 和 29.99,降雨后为 26.74℃ 和 28.25,降雨后的温盐条件相比降雨前不适合浮动弯角藻的生长和繁殖。降雨前浮动弯角藻主要分布在湾西部海域,而降雨后湾西部海域温盐变化相比其他海域更大,其环境条件也更不适于浮动弯角藻的增殖,降雨后湾西部海

域浮动弯角藻数量出现显著下降,这可能是导致降雨后浮动弯角藻乃至浮游植物总丰度值下降的原因之一。

4 小结

台风“达维”导致的强降雨显著改变了胶州湾浮游硅藻的种类组成,暴雨后,浮游硅藻的种类数量和丰度值明显下降。暴雨后浮游硅藻丰度值降低了1个数量级。胶州湾浮游硅藻的分布也在暴雨前后发生了显著变化,受暴雨影响更大的湾西部海域浮游硅藻丰度下降更明显。暴雨后优势种的组成和其丰度值也发生变化。本研究是在暴雨后2天进行的,得到的降雨后浮游硅藻丰度值变化规律与有些研究报道有所不同,可能与观测时间、浮游植物生长周期等因素有关。作者将继续相关研究,以获取更全面的降雨对浮游硅藻及浮游植物影响等方面的认知。

致谢: 中国海洋大学海洋浮游生物实验室孔维和于浩等同学帮助采集浮游植物样品,谨致谢忱!

参考文献:

- [1] Willey J D, Cahoon L B. Enhancement of chlorophyll *a* production in Gulf Stream surface seawater by rainfall nitrate[J]. *Marine Chemistry*, 1991, 34: 63-75.
- [2] Paerl H W, Bales J D, Ausley L W, et al. Ecosystem impacts of three sequential hurricanes (Dennis, Floyd, and Irene) on the United States' largest lagoonal estuary, Pamlico Sound, NC[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2001, 98(10): 5655-5660.
- [3] Paerl H W. Enhancement of marine primary production by nitrogen-enriched acid rain[J]. *Nature*, 1985, 316: 747-749.
- [4] Paerl H W, Rudek J, Mallin M A. Stimulation of phytoplankton production in coastal waters by natural rainfall inputs: nutritional and trophic implications[J]. *Marine Biology*, 1990, 107(2): 247-254.
- [5] Burkholder J A, Eggleston D, Glasgow H, et al. Comparative impacts of two major hurricane seasons on the Neuse River and western Pamlico Sound ecosystems[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2004, 101(25): 9291-9296.
- [6] 吴玉霖, 孙松, 张永山. 环境长期变化对胶州湾浮游植物群落结构的影响[J]. *海洋与湖沼*, 2005, 36(6): 9-20.
- [7] 王艳玲, 安文超, 刘伟. 胶州湾海域富营养化水平与浮游植物多样性分析[J]. *环境科学与管理*, 2012, 37(10): 76-79.
- [8] 孙儒泳. 动物生态学原理(第二版)[M]. 北京: 北京师范大学出版社, 1992: 356-357.
- [9] 徐兆礼, 陈亚瞿. 东黄海秋季浮游动物优势种聚集强度与鲈鳎渔场的关系[J]. *生态学杂志*, 1989, 8(4): 13-15.
- [10] Mallin M A, Paerl H W, Rudek J, et al. Regulation of estuarine primary production by watershed rainfall and river flow[J]. *Marine Ecology-Progress Series*, 1993, 93: 199.
- [11] Miller W D, Harding L W J. Climate forcing of the spring bloom in Chesapeake Bay[J]. *Marine Ecology Progress Series*, 2007, 331: 11-22.
- [12] Paerl H W, Valdes L M, Peierls B L, et al. Anthropogenic and climatic influences on the eutrophication of large estuarine ecosystems[J]. *Limnology and Oceanography*, 2006, 51(1): 448-462.
- [13] Paerl H W, Valdes L M, Joyner A R, et al. Ecological response to hurricane events in the Pamlico Sound system, North Carolina, and implications for assessment and management in a regime of increased frequency[J]. *Estuaries and Coasts*, 2006, 29(6): 1033-1045.
- [14] 霍文毅, 俞志明, 邹景忠, 等. 胶州湾中肋骨条藻赤潮与环境因子的关系[J]. *海洋与湖沼*, 2001, 32(3): 311-318.
- [15] Loftus M E, Rao D V S, Seliger H H. Growth and dissipation of phytoplankton in Chesapeake Bay. I. Response to a large pulse of rainfall[J]. *Chesapeake Science*, 1972, 13(4): 282-299.
- [16] 孙晓霞, 孙松, 赵增霞, 等. 胶州湾营养盐浓度与结构的长期变化[J]. *海洋与湖沼*, 2011, 42(5): 662-669.
- [17] 张永山, 吴玉霖, 邹景忠, 等. 胶州湾浮动弯角藻赤潮生消过程[J]. *海洋与湖沼*, 2002, 33(1): 55-61.

The influence of heavy rainfall on the community structure of planktonic diatom in Jiaozhou Bay in summer

WANG Wei-min^{1, 2}, CHEN Hong-ju^{1, 2}, LIANG Sheng-kang³, LIU Guang-xing^{1, 2}

(1. Key Laboratory of Marine Environment and Ecology (Ocean University of China), Ministry of Education, Qingdao 266100, China; 2. College of Environmental Science and Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, China; 3. College of Chemistry and Chemical Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, China)

Received: Apr., 22, 2013

Key words: heavy rainfall; community structure; phytoplankton; diatom; Jiaozhou Bay

Abstract: To study the influence of heavy rainfall on diatom, the species composition, abundance and community structure of the diatom in Jiaozhou Bay were analyzed. The samples were collected on Jul.17, 2012 (before the rainstorm) and Aug.5, 2012 (after the rainstorm), and the influence of the rainstorm on diatom was discussed. 54 species of diatom belonging to 22 genera were identified before the rainstorm, , and only 38 species of diatom belonging to 18 genera were recorded after the rainstorm. The species number of diatom decreased significantly. The average abundance of diatom was 2953.9×10^4 cells/m³ before the rainstorm. The main dominant species were *Chaetoceros lorenzianus*, *Chaetoceros pseudocurvisetus*, *Coscinodiscus asteromphalus* and *Eucampia zoodiacus*. After the rainstorm, the average abundance of diatom was 111.4×10^4 cells/m³, and the main dominant species were *Cerataulina pelagica*, *Lithodesmium undulatum*, *C. asteromphalus* and *E. zoodiacus*. The distribution pattern of diatom after the rainstorm changed obviously, and its horizontal distribution was more homogeneous after the rainstorm than that before the rainstorm. This research provided significant information about the influence of the unusual environmental changes on diatom and phytoplankton.

(本文编辑: 梁德海)