

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第4期

Vol.36 No.4

2015

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

中美空气质量指数(AQI)对比研究及启示	高庆先,刘俊蓉,李文涛,高文康(1141)
2013年1月北京市PM _{2.5} 区域来源解析	李璇,聂滕,齐珺,周震,孙雪松(1148)
2013年1月北京市一次空气重污染成因分析	程念亮,李云婷,张大伟,聂滕,邱启鸿,徐文帅(1154)
上海大气总悬浮颗粒物中金属的可溶性特征	常燕,冯冲,瞿建国,张经(1164)
厦门春季PM ₁₀ 中PAHs成分谱特征及其与气象要素相关性分析	张健,樊曙先,孙玉,张悦,魏锦成(1173)
硫氧同位素示踪南京北郊大气PM _{2.5} 中硫酸盐来源	魏英,郭照冰,葛鑫,祝胜男,姜文娟,石磊,陈姝(1182)
结合激光雷达分析2014年春季南京地区一次大气污染过程	包青,贺军亮,查勇,程峰,李倩楠(1187)
春季华东高山背景区域PM _{2.5} 和PM _{2.5-10} 中水溶性无机离子特征	苏彬彬,张智胜,陶俊,许梹洋,纪贤鑫,刘心东,张若宇(1195)
落叶燃烧排放的颗粒物及有机碳、元素碳的研究	杨伟宗,刘刚,李久海,徐慧,吴丹(1202)
四川省秸秆露天焚烧污染物排放清单及时空分布特征	何敏,王幸锐,韩丽,冯小琼,毛雪(1208)
深圳市船舶排放清单与时空特征研究	杨静,尹佩玲,叶斯琪,王水胜,郑君瑜,区家敏(1217)
超细颗粒通过建筑狭缝的传输特性	孙在,陈秋方,蔡志良,杨文俊,汪晗(1227)
空调病房真菌气溶胶浓度及粒径分布特征	张华玲,冯鹤华,方子梁,王本栋,李丹(1234)
基于氢氧稳定同位素的黄土高原云下二次蒸发效应	靳晓刚,张明军,王圣杰,朱小凡,董蕾,任正果,陈粉丽(1241)
黄河小浪底水库水沙调控对DOC输送的影响	张永领,王明仕,董玉龙(1249)
调水调沙工程长期实施对黄河口近岸沉积物粒度分布与黏土矿物组成特征的影响	王苗苗,孙志高,卢晓宁,王伟,王传远(1256)
春季生物作用对山地岩溶池水地球化学特征的影响	于正良,杨平恒,赵瑞一,李林立,张琳,童小容,罗刚(1263)
降雨期间岩溶城镇区地下水重金属变化特征及来源解析	任坤,杨平恒,江泽利,王尊波,师阳,王凤康,李晓春(1270)
北江和珠江广州河段水体的三卤甲烷风险评价	钟惠舟,韦朝海(1277)
丰水期洪湖水水质空间变异特征及驱动力分析	李昆,王玲,李兆华,王祥荣,陈红兵,吴忠,朱鹏(1285)
三峡库区典型干-支流相互作用过程中的营养盐交换:以梅溪河为例	操满,傅家楠,周子然,邓兵,王雨春,汪福顺(1293)
营养盐输入对太湖水体中磷形态转化及藻类生长的影响	王睿喆,王沛芳,任凌霄,王超,王颖雪(1301)
一小型藻华池塘浮游植物群落动态及其影响因子研究	杨文,朱津永,张克鑫,万莉,陆开宏(1309)
昌黎生态监控区夏季浮游植物群落年际变化特征分析	梁晓林,杨阳,王玉良,张月明,赵志楠,韩晓庆,张鉴达,高伟明(1317)
河道曝气提升河流水质的WASP模型研究	朱文博,王洪秀,柳翠,张建,梁爽(1326)
γ辐射降解水中的盐酸丙沙星的研究	祝胜男,郭照冰,赵永富,葛鑫,魏英,陈姝,王静(1332)
电化学氢化物发生法处理含锑废水及对锑的回收	陈京晶,张国平,李海霞,付志平,欧阳小雪,吴琼(1338)
Fe-MCM-41催化臭氧氧化间甲酚废水	孙文静,王亚旻,卫皇墨,王森,李旭宁,李敬美,孙承林,安路阳(1345)
生物阳极及其反转为生物阴极降解氯霉素	孔德勇,梁斌,云慧,王爱杰,任南琪(1352)
308 nm光作用下α-Fe ₂ O ₃ 表面HNO ₃ 的光解	陆军,孙云东,谢晶晶,赵军,邹家骥,朱承强(1359)
L-组氨酸-赤藓红复合膜修饰电极同时检测对苯二酚、邻苯二酚	何家洪,徐强,丁武泉,李强(1365)
酞基功能型高分子生物载体(PET-AQS)制备及催化生物反硝化特性研究	许晴,侯正浩,田秀蕾,牛春梅,郭延凯,廉静,郭建博(1374)
枯草芽孢杆菌对土臭素和2-甲基异冰片的降解动力学特性	马念念,罗国芝,谭洪新,姚妙兰,王晓用(1379)
嗜碱降解菌筛选及其对焦化废水强化处理	李静,李文英(1385)
Fe ³⁺ 对同步硝化反硝化过程氮元素迁移转化及N ₂ O释放的影响	李浩,闫玉洁,谢慧君,贾文林,胡振,张建(1392)
内循环半短程亚硝化工艺运行条件与微生物群落研究	赵志瑞,焦海华,崔丙健,黄迪,曹世超,王云,刘上千,马斌,白志辉(1399)
利用处理含4-氯苯酚模拟废水的剩余污泥培养普通小球藻	王璐,陈秀荣,闫龙,何怡萱,施震东(1406)
进水渗滤液总氮和BOD ₅ /TN对填埋场反应器反硝化和厌氧氨氧化协同脱氮的影响	杨盈盈,陈奕,李明杰,谢冰(1412)
重庆金佛山土壤中PAHs含量的海拔梯度分布及来源解析	师阳,孙玉川,梁作兵,任坤,袁道先(1417)
湖南攸县典型煤矿和工矿区水稻田土壤镉污染特征及污染途径分析	张敏,王美娥,陈卫平,牛俊杰(1425)
沟渠化对三江平原湿地铁元素沉积过程的影响	苏文辉,于晓菲,王国平,栾金花,邹元春(1431)
施用磷酸盐和沸石对土壤镉形态转化的影响	王秀丽,梁成华,马子惠,韩月(1437)
不同条件下皂苷对污染壤土中Cu、Pb的淋洗修复	邓红侠,杨亚莉,李珍,许岩,李荣华,孟昭福,杨亚提(1445)
陕北某化工企业周围污灌区土壤-作物系统重金属积累特征及评价	齐雁冰,楚万林,蒲洁,刘梦云,常庆瑞(1453)
有机无机缓释复合肥对不同土壤微生物群落结构的影响	王菲,袁婷,谷守宽,王正银(1461)
玉米对铅胁迫的响应及体内铅化学形态研究	程海宽,张彪,景鑫鑫,杨素勤,赵鹏,孙晓雪,周志云(1468)
硼锑交互作用对水稻吸收积累锑和硼的影响	向猛,黄益宗,蔡立群,保琼莉,黄永春,王小玲,乔敏,胡莹,金姝兰,李季,王斐(1474)
丛枝菌根真菌对不同含盐量湿地土壤中芦苇生长的影响	郭江源,郭伟,毕娜,付瑞英,赵文静,赵仁鑫,王立新(1481)
滨海区芦苇和香蒲耐盐碱性及除氮磷效果对比研究	陈友媛,孙萍,陈广琳,王宁宁(1489)
不同温度下的土壤微生物呼吸及其与水溶性有机碳和转化酶的关系	吴静,陈书涛,胡正华,张旭(1497)
工业VOCs经济手段和工程技术减排对比性分析	王宇飞,刘昌新,程杰,郝郑平,王铮(1507)
《环境科学》征订启事(1216)	
《环境科学》征稿简则(1248)	
信息(1163,1194,1248,1424)	

昌黎生态监控区夏季浮游植物群落年际变化特征分析

梁晓林¹, 杨阳¹, 王玉良¹, 张月明¹, 赵志楠¹, 韩晓庆², 张鉴达¹, 高伟明^{1*}

(1. 河北师范大学资源与环境科学学院, 河北省环境演变与生态建设实验室, 石家庄 050024; 2. 河北省国土资源利用规划院, 石家庄 050056)

摘要: 为研究昌黎生态监控区夏季浮游植物群落结构特征及其与环境因子关系, 采用2005~2013年夏季(8月)昌黎生态监控区海域浮游植物及环境因子的监测资料, 基于ArcGIS 10.0和Canoco软件平台, 运用典范对应分析方法, 对浮游植物群落结构进行分析。结果表明, 近9 a共鉴定出浮游植物3门23科39属105种, 其中, 硅藻门16科32属90种, 占浮游植物总数的85.7%; 甲藻门共6科6属14种, 占总种类数的13.3%; 金藻门1种。各年的优势种存在很大差异, 按照优势度 Y 值的大小包括辐射圆筛藻(*Coscinodiscus radiatus*)、柔弱角毛藻(*Coscinodiscus debilis*)、笔尖根管藻(*Rhizosolenia styliformis*)、柏氏角管藻(*Cerataulina bergoni*)、威氏圆筛藻(*Coscinodiscus wailesii*)、海链藻(*Thalassiosira* sp.)、三角角藻(*Ceratium tripos*)、洛氏角毛藻(*Coscinodiscus wailesii*)、中肋骨条藻(*Ceratium tripos*)等。夏季细胞丰度年际变化较大, 呈现逐渐降低的趋势。浮游植物的多样性指数 H' 值介于0.015~3.889, 均匀度指数 J 值介于0.009~1, 年际变化幅度较小; 各站位间物种分布不均匀, 优势种较少且优势度较大。对浮游植物群落与环境因子进行典范对应分析(CCA), 结果表明影响夏季浮游植物群落结构变化的环境因子包括水温、营养盐(磷酸盐、硝酸氮、氨氮)、盐度等, 且是各个环境因子相互作用的结果。

关键词: 浮游植物; 生物多样性; 群落结构; 环境因子; 典范对应分析; 昌黎生态监控区

中图分类号: X55 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)04-1317-09 DOI: 10.13227/j.hjks.2015.04.024

Yearly Changes of Phytoplankton Community in the Ecology-monitoring Area of Changli, Hebei in Summer

LIANG Xiao-lin¹, YANG Yang¹, WANG Yu-liang¹, ZHANG Yue-ming¹, ZHAO Zhi-nan¹, HAN Xiao-qing², ZHANG Jian-da¹, GAO Wei-ming^{1*}

(1. Hebei Key Laboratory of Environment Change and Ecological Construction, College of Resource and Environmental Science, Hebei Normal University, Shijiazhuang 050024, China; 2. Land and Resource Using and Planning Institute of Hebei Province, Shijiazhuang 050056, China)

Abstract: Based on the investigation of phytoplankton and water body nutrient concentration in the ecology-monitoring area of Changli in summer from 2005 to 2013, the phytoplankton community structure was analyzed. The result showed that in recent 9 years, 3 phyla including 23 families, 39 genera and 105 species of phytoplankton were identified, in which 85.7% were diatoms and 13.3% were dinoflagellate. Only one species was found belonging to golden algae. There was great difference in dominant species among different years. According to the value of dominance, there were *Coscinodiscus radiatus*, *Coscinodiscus debilis*, *Rhizosolenia styliformis*, *Cerataulina bergoni*, *Coscinodiscus wailesii*, *Thalassiosira* sp., *Ceratium tripos*, *Chaetoceros lorenzianus*, *Skeletonema costatum*. The cell abundance was decreased yearly. The Shannon-Wiener index of phytoplankton community ranged from 0.015 to 3.889, and the evenness index ranged from 0.009 to 1, which showed little yearly change. And phytoplankton species were unevenly distributed among the 19 sites, there were relatively low amount of dominant species, but the dominance was relatively high. Canonical Correspondence Analysis (CCA) results of the phytoplankton community and its environmental factors showed that the environmental factors influencing the change of phytoplankton community structure in summer included water temperature, nutrients (TP, TN and NO_3^- -N, NH_4^+ -N) and salinity, and the structural change was the result of the interactions of different environmental factors.

Key words: phytoplankton; species diversity; community structure; environment factors; CCA; Changli Ecology-monitoring Area

浮游植物是海洋主要初级生产者, 对海洋生态系统的物质循环和能量转化起着重要作用, 其种群变动和群落结构改变直接影响着海洋生态系统的结构和功能^[1]。国外研究发现, 浮游植物通过改变海洋的碳通量、海水的光通量与热通量、云反照率^[2~4]等, 对人类的生存环境产生影响。关于浮游植物的研究涉及到各个方面, 如浮游植物丰度变化

及物种组成^[5~7]、时空分布特征^[8,9]、浮游植物初级生产的影响因素^[10~12]等。近年来, 我国关于海域

收稿日期: 2014-09-19; 修订日期: 2014-11-18

基金项目: 河北省科技支撑计划项目(14273303D); 中国博士后科学基金项目(2014M561197); 河北省高校重点学科建设项目

作者简介: 梁晓林(1986~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为资源评价与可持续利用, E-mail: liangxiaolinn@ sina.net

* 通讯联系人, E-mail: gaowmd@ 263.net

浮游植物群落结构的研究日益增多,先后在渤海湾^[13,14]、胶州湾^[15~17]、雷州半岛^[18]、东海^[19]等海域开展了大量的工作,为了解浮游植物的长期变化规律以及更好地预测海洋生态系统结构和功能变化提供了依据。

昌黎生态监控区海域属于昌黎黄金海岸自然保护区,位于河北省东北部秦皇岛市昌黎县沿海,海域面积 208.5 km²,水质状况较整个秦皇岛海域要好,是国家二级保护物种文昌鱼的栖息地。近年来,国家对该海域的研究和保护逐渐深入,而对浮游植物的长期变化研究较少,本研究以自 2004 年昌黎生态监控区成立以后的 8 月生态监测数据(2005~2013 年)为基础,探讨夏季浮游植物群落的种群变动以及环境对物种动态变化的影响,以期为该海域浮游植物群落演替规律的研究、富营养化海水生态修复的决策和实施提供理论依据,同时也能够为整个秦皇岛海域浮游植物及海水水体变化研究提供一定的参考价值。

1 材料与方法

1.1 调查方法

本研究采用 2005~2013 年 8 月昌黎生态监控区海域监测数据,在 119.20°~119.70°E、39.40°~39.70°N 范围内均匀铺设 19 个调查站位(图 1)。

1.2 样品采集与处理

浮游植物样品采集按照文献^[20]进行,使用浅水Ⅲ型浮游生物网采集样品,用 5% 甲醛固定保存,样品种类的鉴定以及细胞计数在光学显微镜(Nikon-Y100)下进行。环境因子的调查与测定均按照文献^[21]进行,环境因子包括温度、盐度、pH、溶解氧、叶绿素 a、无机氮、磷酸盐等,其中无机氮为 NO₂⁻-N、NO₃⁻-N、NH₄⁺-N 三者之和,测定仪器均使用分光光度计,方法为盐酸萘乙二胺分光光度法、锌镉还原法及溴酸钠氧化法,无机磷(PO₄³⁻-P)含量采用磷钼蓝分光光度法测定。

1.3 数据分析方法

运用生物多样性指标对浮游植物进行计算,本研究选取的指标包括优势度指数(Y)^[22]、物种多样性指数(H')^[22]、均匀度指数(J)和丰富度指数(d)^[23,24],公式如下:

$$Y = (n_i/N)f_i \quad (1)$$

$$H' = - \sum_i P_i \log_2 P_i \quad (2)$$

$$J = \frac{H'}{\log_2 S} \quad (3)$$

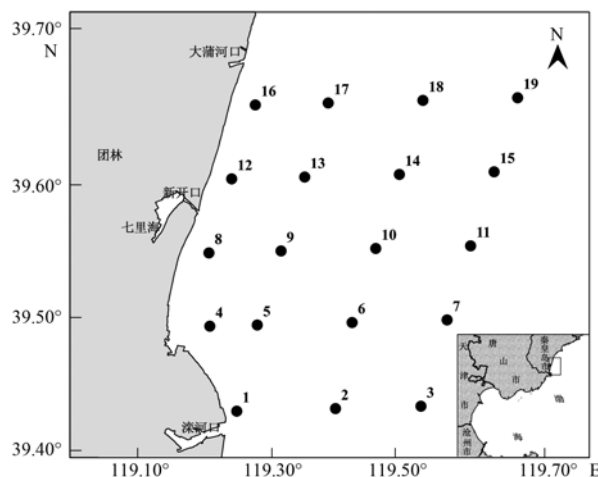


图 1 昌黎生态监控区采样点分布示意

Fig. 1 Distribution of sampling sites in Changli Ecology-monitoring Area

$$d = \frac{S-1}{\ln N} \quad (4)$$

式中, S 为样品中物种的总数, P_i 为第 i 种个体数(n_i)与总个体数(N)的比值, f_i 为该物种在样品中所出现的频率。

运用 ArcGIS 10.0 对浮游植物的细胞丰度等进行时空分布趋势模拟,采用 Canoco of Window 4.5 软件对物种和环境因子进行典范对应分析。物种指标采用浮游植物丰度数据,其条件是在各站点出现的频度 > 25% 且相对丰度至少在一个站点 > 1%^[25]。物种矩阵和环境矩阵(除 pH 值外)都进行 $\log(x+1)$ 转换,排序结果采用物种-环境因子关系双序图表示^[26]。

2 结果与讨论

2.1 浮游植物种类组成

2005~2013 年昌黎生态监控区夏季浮游植物种类丰富,种类组成以广温性物种为主。共检出浮游植物共 3 门 23 科 39 属 105 种,包括硅藻、甲藻和金藻。其中,硅藻门在细胞密度和种类组成上占有绝对优势,共 16 科 32 属 90 种,占总种类数的 85.7%;其次是甲藻门,共 6 科 6 属 14 种,占总种类数的 13.3%;金藻门在检测中只发现一种,即小等刺硅鞭藻(表 1)。硅藻门检测出种类最多的是角毛藻属、圆筛藻属,种类依次为 26 种、15 种;甲藻门种类最多的是角藻,为 4 种。这 3 属占浮游植物总种类数的 42.9%,其他 36 属 60 种占 57.1%。

2.2 浮游植物优势种变化

如表 2 所示,根据 Simpson 优势度公式对浮游

表 1 2005 ~ 2013 年夏季浮游植物种类对比¹⁾

Table 1 Comparison of phytoplankton species in summer from 2005 to 2013

年份	种类总数	硅藻			甲藻			金藻		
		科	属	种	科	属	种	科	属	种
2005	33	7	8	29	3	3	3	1	1	1
2006	43	12	17	40	2	2	3	—	—	—
2007	48	12	17	44	2	2	3	—	—	—
2008	48	10	15	44	2	2	4	—	—	—
2009	36	10	14	28	4	4	7	1	1	1
2010	33	13	16	31	1	1	1	1	1	1
2011	26	10	10	21	4	4	5	—	—	—
2012	44	12	15	37	4	4	6	1	1	1
2013	35	11	13	29	3	3	5	1	1	1

1) “—”表示该年未出现

表 2 不同年份监测海域浮游植物优势种 ($Y \geq 0.02$) 及优势度

Table 2 Dominant species ($Y \geq 0.02$) and dominance of phytoplankton in the survey sea in different years

年份	优势种	频度/%	占细胞丰度百分比/%	优势度指数 (Y)
2005	辐射圆筛藻 (<i>Coscinodiscus radiatus</i>)	94.74	66.96	0.634
	柔弱角毛藻 (<i>Chaetoceras debilis</i>)	73.68	5.92	0.044
	洛氏角毛藻 (<i>Chaetoceras lorenzianus</i>)	73.68	7.62	0.056
	优美辐杆藻 (<i>Bacteriastrum delicatulum</i>)	57.89	4.06	0.024
2006	柔弱角毛藻 (<i>Chaetoceras debilis</i>)	84.21	47.06	0.396
	旋链角毛藻 (<i>Chaetoceras curvisetus</i>)	63.16	43.13	0.272
2007	笔尖根管藻 (<i>Rhizosolenia styliformis</i>)	100	58.22	0.582
	洛氏角毛藻 (<i>Chaetoceras lorenzianus</i>)	78.95	4.74	0.037
	柔弱菱形藻 (<i>Nitzschia delicatissima</i>)	26.32	15.55	0.041
2008	刚毛根管藻 (<i>Rhizosolenia setigera</i>)	89.47	2.56	0.023
	中华盒形藻 (<i>Biddulphia sinensis</i>)	52.63	5.15	0.027
	高盒形藻 (<i>Biddulphia regia</i>)	42.11	47.43	0.200
	柏氏角管藻 (<i>Cerataulina bergoni</i>)	89.47	12.72	0.114
	浮动弯角藻 (<i>Eucampia zoodiacus</i>)	52.63	13.1	0.069
	尖刺菱形藻 (<i>Nitzschia pungens</i>)	78.95	9.28	0.073
2009	威氏圆筛藻 (<i>Coscinodiscus wailesii</i>)	78.95	13.78	0.109
	绕孢角毛藻 (<i>Chaetoceras cinctus</i>)	36.84	21.25	0.078
	梭角藻 (<i>Ceratium fusus</i>)	52.63	8.5	0.045
2010	海链藻 (<i>Thalassiosira</i> sp.)	42.11	83.46	0.351
	夜光藻 (<i>Noctiluca scientillans</i>)	100	29.02	0.290
2011 ¹⁾	圆筛藻 (<i>Coscinodiscus</i> sp.)	52.63	9.03	0.048
	星脐圆筛藻 (<i>Coscinodiscus asteromphalus</i>)	63.16	12.79	0.081
	三角角藻 (<i>Ceratium tripos</i>)	42.11	8.89	0.037
	中肋骨条藻 (<i>Skeletonema costatum</i>)	36.84	16.33	0.060
	圆柱角毛藻 (<i>Chaetoceras teres</i>)	42.11	6.13	0.026
2012	细弱圆筛藻 (<i>Coscinodiscus subtilis</i>)	89.47	12.64	0.113
	琼氏圆筛藻 (<i>Coscinodiscus jonesianus</i>)	73.68	4.97	0.037
	洛氏角毛藻 (<i>Coscinodiscus wailesii</i>)	68.42	21.73	0.149
	窄隙角毛藻 (<i>Chaetoceros affinis</i>)	52.63	15.11	0.08
	缢缩角毛藻 (<i>Chaetoceros constrictus</i>)	68.42	15.2	0.104
2013	中肋骨条藻 (<i>Coscinodiscus wailesii</i>)	52.63	61.77	0.325
	发状角毛藻 (<i>Chaetoceras crinitus</i>)	63.16	3.8	0.024

1) 2011 年各浮游植物细胞数量缺失,以各个站位的浮游植物数量 = 细胞总数/种类数作为参考

植物进行计算,得到各年物种的优势度指数 Y . 本研究以 $Y \geq 0.02$ 的物种作为优势种^[27]. 表 2 列出了近 9 a 年夏季主要优势种及优势度. 各年优势种在数量和种类上存在很大差异,但多以硅藻为主,甲藻中的梭角藻、夜光藻、三角角藻在 2009、2010、2011 年夏季依次出现,且优势度指数都较高,容易引发甲藻赤潮,应加强对其监视.

作为衡量多样性水平的指标,优势度指数能够反映出浮游植物所处的状态以及在整个群落中的地位和作用. 比较各年的优势种 Y 值,大致可以分为 3 个阶段(图 2),2005 ~ 2007 年为第一阶段,第一优势种 Y 值最高,其中 2005 年的第一优势种辐射圆筛

藻的 Y 值为 0.634,处于 9 a 同期的最高值,2006 年的 Y 值较前一年下降,柔弱角毛藻替代辐射圆筛藻,2007 年的第一优势种笔尖根管藻的 Y 值又有所回升,说明 2005 ~ 2007 年夏季第一优势种在整个群落中占据绝对优势地位且发挥很大的导向作用. 2008 ~ 2009 年夏季为第二阶段,第一优势种 Y 值降到最低,第一优势种分别为柏氏角管藻和威氏圆筛藻, Y 值为 0.104 和 0.109,优势种地位偏低,对其他浮游植物种类的生长负面影响较小,有利于物种多样性水平的提高. 2010 ~ 2013 年为第三阶段, Y 值较第二阶段有所升高,除 2012 年的 Y 值有所下降外,2010、和 2013 年的 Y 值变化差别不大.

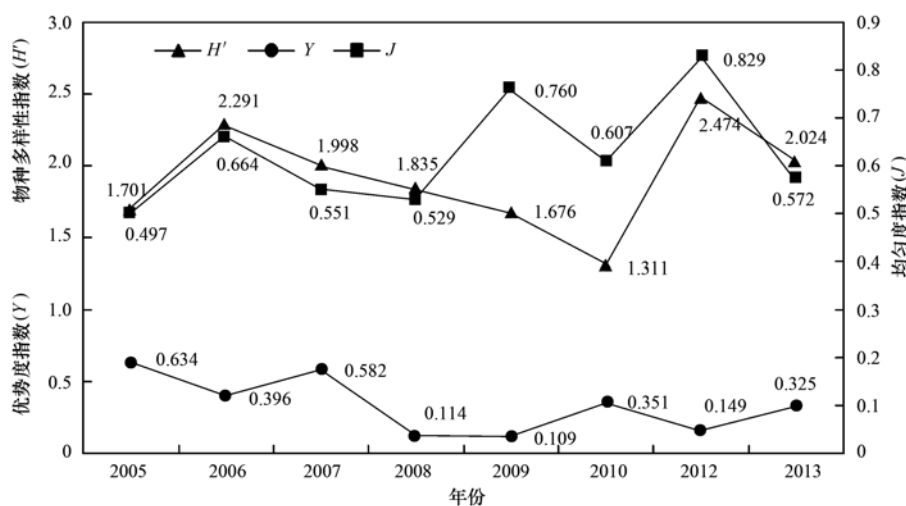


图 2 2005 ~ 2013 年夏季 H' 值、 J 值和第一优势种 Y 值变化对比

Fig. 2 Contrast between H' , J and Y of the first dominant species from 2005 to 2013 in summer

2.3 细胞丰度变化及分布

监控区内 9 a 浮游植物夏季细胞丰度年际变化较大,呈现出逐年降低的趋势. 细胞丰度介于 $42.96 \times 10^4 \sim 97542.87 \times 10^4$ 个· m^{-3} , 平均 17287.37×10^4 个· m^{-3} . 硅藻丰度范围介于 $26.30 \times 10^4 \sim 97496.31 \times 10^4$ 个· m^{-3} , 平均 16798.57×10^4 个· m^{-3} , 占总丰度的 97%. 分析各年细胞丰度的空间分布(图 3),硅藻细胞丰度最高值出现在 2006 年的 6 号站位,最低值出现在 2008 年的 1 号站位;甲藻的丰度范围介于 $0.13 \times 10^4 \sim 921.99 \times 10^4$ 个· m^{-3} , 平均 124.97×10^4 个· m^{-3} ,甲藻细胞丰度最高值出现在 2011 年的 18 号站位,最低值出现在 2012 年的 16 号站位;金藻细胞丰度所占比例最小,平均值为 0.74×10^4 个· m^{-3} ,夏季年际变化幅度不大,仅在个别年份出现,频率较低.

2.4 生物多样性变化分析

2.4.1 年际变化分析

近 9 a 该海域浮游植物物种多样性、均匀度都较为稳定(图 2). 除 2010 年夏季大幅度下降外,其余年份的 H' 值基本上保持在 2.0 上下波动,年际变化浮动不大;均匀度指数 J 值与 H' 值变化趋势基本保持一致,2010 年降到最低,其余年份基本保持在 0.5 上下波动. 浮游植物的异常增殖和过度集中会导致多样性水平降低,如 2010 年夏季, H' 值和 J 值出现明显低值,其主要原因是海链藻数量异常增加,且集中分布于以 9 号站位为高值中心的附近海域,涉及到 4、5、8、12、13、14、16 号站位, H' 值较低的区域主要集中在新开口附近海域,与海链藻数量集中分布区基本吻合,表明该地区海水富营养化状况加重.

Reyholds^[28]在对湖泊浮游植物群落结构特征的

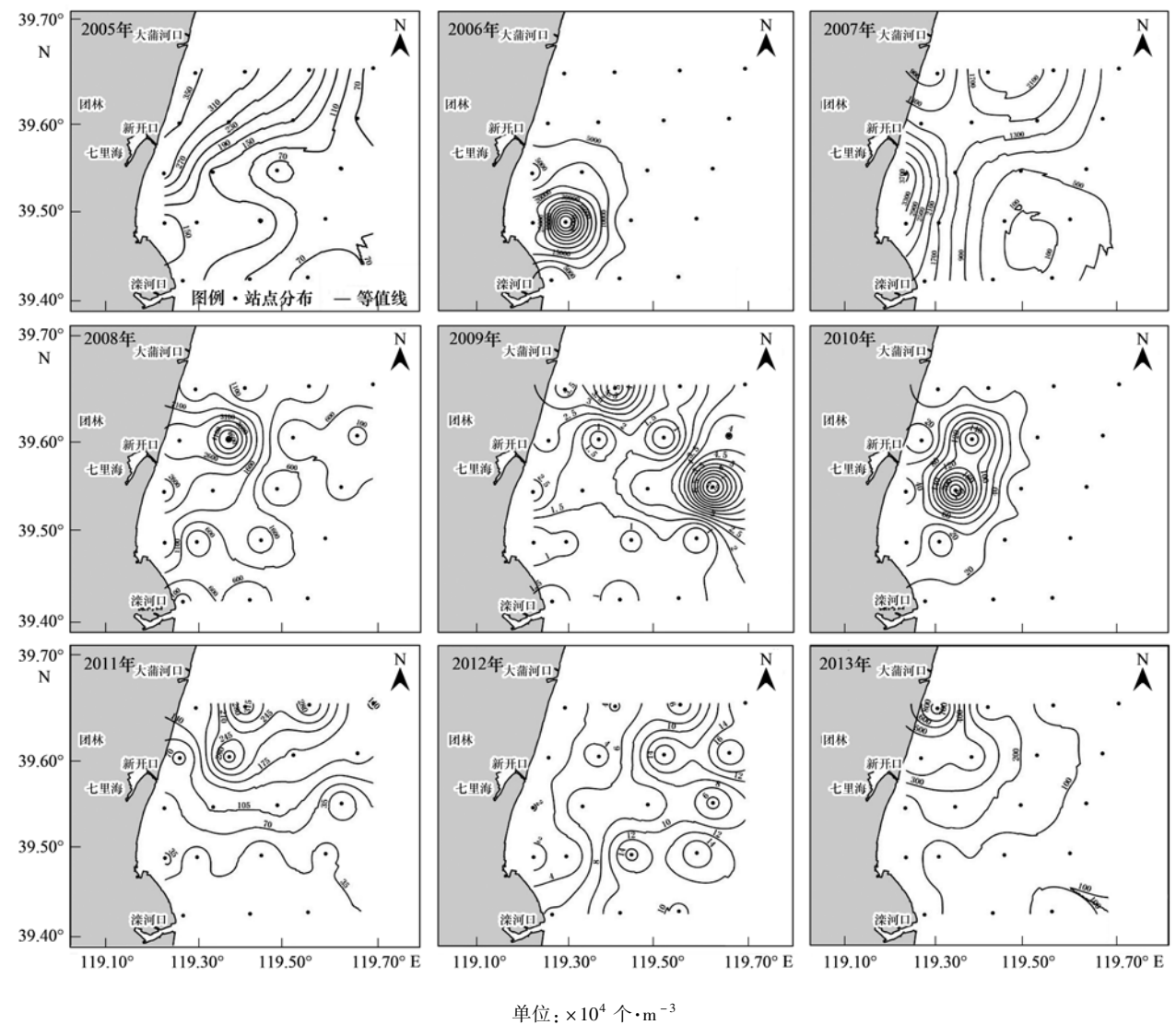


图 3 9 a 监控区夏季浮游植物的空间分布格局

Fig. 3 Spatial distribution of phytoplankton in the survey sea in recent 9 years

研究中认为,浮游植物优势度指数与多样性指数存在负相关的关系,而本研究结果显示,2005 ~ 2013 年夏季昌黎生态监控区浮游植物优势度呈现出下降的趋势,但物种多样性指数却并未出现上升趋势,这与该研究并不相吻合.究其原因,不仅细胞数量能够影响物种多样性的变化,而且浮游植物细胞个体的质量也会影响生物量的改变^[29].另一方面,作为一个开放的水域,受大气、陆域以及海水养殖等的影响,水体本身的不稳定性加强,必然会造成夏季浮游植物多样性年际变化并未与优势度指数协同增加之趋势.

2.4.2 空间分布分析

从 2005 ~ 2013 年夏季浮游植物群落多样性空间分布来看(因 2011 数据不完整,未对该年的多样性进行分析)(图 4),生态监控区浮游植物多样性指

数 H' 值介于 0.015 ~ 3.889,最大值和最小值分别出现在 2007 年的 14 号站位和 8 号站位,说明 2007 年的 H' 值变化幅度较大.除近岸海域的站位外,其余各个监测站位在 9 a 中 H' 值基本保持波动性下降或不变的趋势,近岸海域的 1 号、4 号、8 号、12 号、16 号站位的 H' 值都呈现出波动性增长趋势.均匀度指数 J 值变化范围介于 0.009 ~ 1 之间(图 5),最大值出现在 2009 年的 13 号站位,最小值出现在 2007 年的 8 号站位,2012 年最小 J 值为 0.583,远高于其他年份的最小 J 值,可见 2012 年该区浮游植物的均匀度指数整体偏高,而 2007 年的均匀度指数相对偏低.

陆源污染的排放是近 9 a 该海域 H' 值和 J 值波动变化的最主要原因.以滦河口为例,作为渤海海域主要的陆源接纳出口之一,陆源污染大都来自工

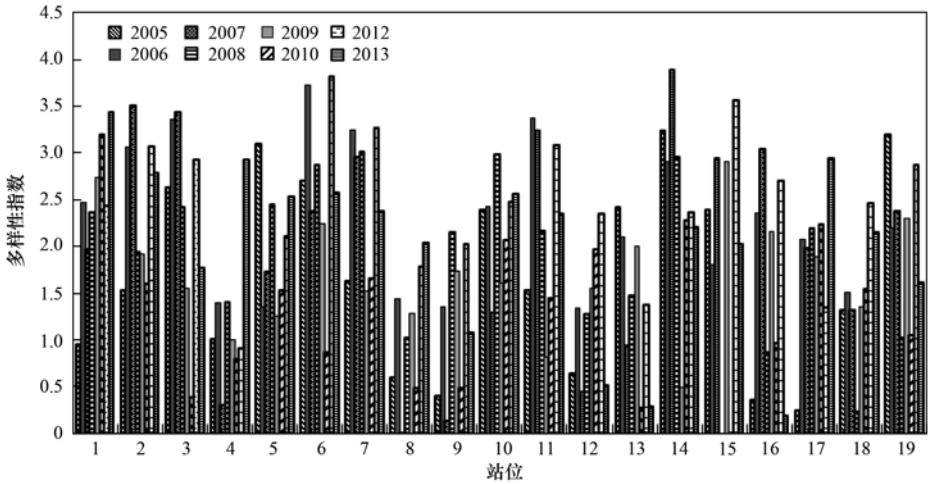


图 4 各站位物种多样性指数(H')值变化趋势

Fig. 4 Trend of the Shannon-Wiener index(H') in different sites

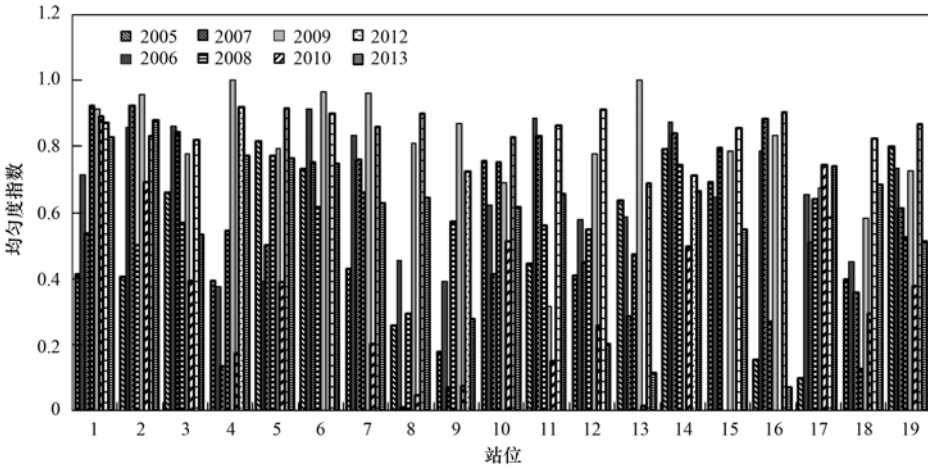


图 5 各站位均匀度指数(J)值变化趋势

Fig. 5 Trend of the evenness index (J) in different sites

农业生产及生活污水,包括化学需氧量(COD)、营养盐、油类、重金属、砷等. 2005~2012 年通过滦河口进入海洋的陆源污染物总量见表 3,在国家二类海水水质标准下,滦河口每年允许 COD 入海排放量是 10 469 t^[30],只有 2005 年的 COD 排放量达到了要求,2006~2012 年 COD 入海排污量均超标,其中,2006 年

实际 COD 排放量超出允许排放量的 16 倍,属于严重超标. 此外,昌黎年降水主要集中在夏季的 6、7、8 月,陆地强降水携带污染物进入到海域以后,使原来稳定的近岸水体结构发生改变,进而造成浮游植物多样性和均匀度发生波动性变化,可见,人类社会经济活动在海域生态变化中扮演着重要角色.

表 3 滦河口入海污染物总量统计¹⁾/t

Table 3 Total pollutant quantity of the Luanhe River/t

年份	COD	营养盐		油类	重金属	砷	污染物排放总量
		磷酸盐	氨氮				
2005	9 269	32.3	155.4	72	19	1.4	9 549.1
2006	164 703		393.2	72.1	25.2	2.1	165 195.1
2007	24 482.5		436.49	84.22	48.31	3.99	25 098.88
2008	62 707.7		589.9	139.08	31.52	7.75	63 475.96
2009	36 797		749	218	23	2	37 789
2010	45 434		389	96	26	3.3	45 948.3
2011	—		—	—	—	—	14 731.69
2012	92 315	4 461		248	78.3	2.9	97 174.2

1) 资料来源: 2005~2012 年河北省海洋环境质量公报

2.4.3 海域动力条件对空间分布影响

海洋是一个开放系统,时刻与周围环境进行着能量流动和物质的交换,进而影响着浮游植物多样性的空间分布.卞红霞^[31]在对渤海浮游植物季节与水动力关系的数值模拟研究中发现,夏季渤海海域的温跃层和盐跃层结构最为明显,表层由于黄海暖流高盐水舌向西延伸扩展,渤海海域盐度形成东高西低的分布,加上河川径流的影响,夏季近岸河口表层海水形成温高盐低的态势,使一些广温低盐浮游植物物种在近岸河口区域聚集,如圆筛藻属、根管藻等.此外,大量学者在对渤海湾近岸海域水动力研究中发现,近岸弱流区流速为 $10 \sim 30 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$,加之波浪潮流沿平行岸线移动,造成近岸污染物不能很快地扩散出去,这也是渤海湾近几年水体富营养化状况加剧,水华现象频繁发生的原因之一.而昌黎生态监控区海域开放性较好,海水流动速度最大能达到 $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,海水污染物在涨落潮作用下能以较快的移动速度迁移出去^[32],同时夏季海水垂直湍流混合运动会造成海水稳定度变差,减少水体营养盐的浓度梯度,不利于浮游植物在表层海水的聚集.在长期对昌黎生态监控区海水的监测中发现,虽然在时间梯度上浮游植物多样性存在年际变动,但与整个秦皇岛甚至是整个渤海海域相比较,海水水质较好,浮游植物生长状况较为稳定,夏季赤潮发生的频率较低.

2.5 浮游植物群落与环境因子的 CCA 分析

为更好地了解研究区海域水质参数对浮游植物物种丰度的影响,选取了水温(t)、pH 值、叶绿素 a (Chla)、溶解氧(DO)、总氮(DIN)、磷酸盐($\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$)、亚硝酸氮($\text{NO}_2^-\text{-N}$)、硝酸氮($\text{NO}_3^-\text{-N}$)、氨氮($\text{NH}_4^+\text{-N}$)、盐度(Sal)等 10 项水质参数指标与浮游植物进行典范对应分析,分析结果见表 4、5,图 6、7.由表 4 可知,前 2 个排序轴的特征值分别为 0.206 和 0.065,物种与环境因子排序轴的相关系数为 0.966 和 0.962,前 4 轴共解释了 82.8% 的环境因子信息,其中第一轴的贡献率最大,到达 48.8%;由表 5 可见,两物种排序轴的相关系数为 0.034,近似垂直,而两环境的排序轴相关系数为 0,说明排序结果具有较高的可信度.

CCA 排序图反映出 21 种(属)浮游植物在环境因子中的适应状况(图 7).在 10 项环境因子当中,水温、营养盐(磷酸盐、总氮、氨氮)、盐度为研究区海域浮游植物主要的环境影响因子.其中,温度、总磷与第一排序轴呈强正相关,相关系数分别为

表 4 浮游植物物种与环境因子间 CCA 分析统计信息

项目	轴			
	1	2	3	4
特征值	0.206	0.065	0.042	0.037
物种-环境相关性	0.966	0.962	0.876	0.878
物种变异累计百分数	34.5	45.3	52.4	58.5
物种-环境变异累计百分数	48.8	64.2	74.1	82.8
全部特征值之和	0.597			
全部典范特征值之和	0.422			

表 5 前 2 个 CCA 排序轴与环境因子的相关系数

Table 5 Correlation coefficients of environmental factors with the first two axes of CCA				
	SPEC AX1	SPEC AX2	ENVI AX1	ENVI AX2
SPEC AX1	1			
SPEC AX2	0.034	1		
ENVI AX1	0.966	0.000	1	
ENVI AX2	0.000	0.962	0.000	1
t	0.714	-0.054	0.740	-0.056
pH	-0.287	-0.180	-0.297	-0.187
Chla	0.354	0.104	0.367	0.109
Sal	-0.506	0.576	-0.524	0.599
DO	-0.175	-0.043	-0.182	-0.045
TN	0.668	-0.306	0.692	-0.318
TP	0.884	0.168	0.915	0.175
$\text{NO}_2^-\text{-N}$	0.109	-0.497	0.113	-0.516
$\text{NO}_3^-\text{-N}$	0.594	-0.287	0.615	-0.298
$\text{NH}_4^+\text{-N}$	0.170	-0.803	0.176	-0.835

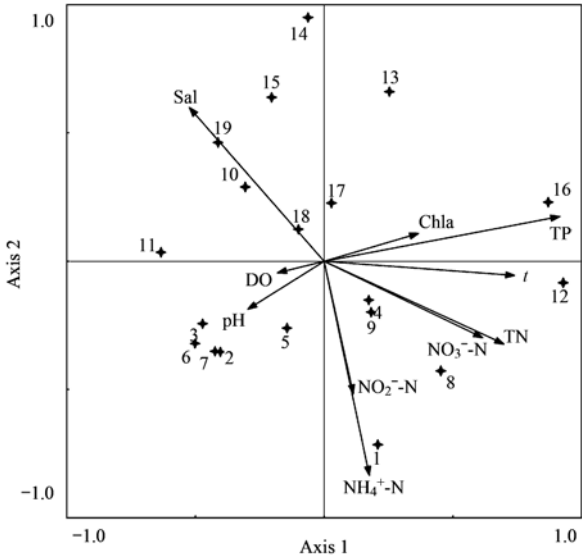
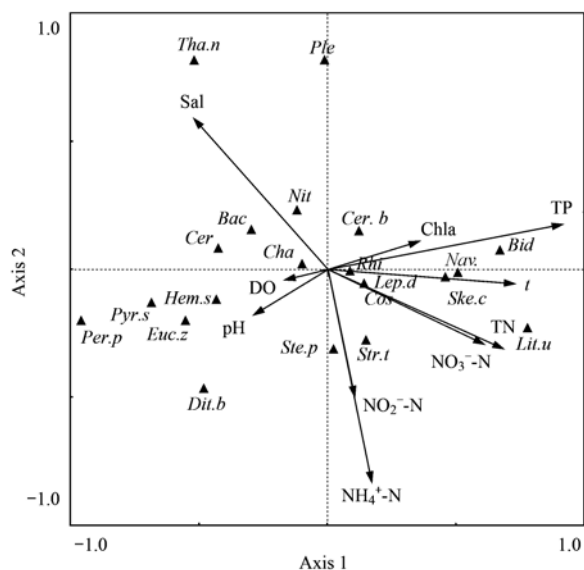


图 6 浮游植物样点与环境因子的 CCA 排序

Fig. 6 CCA ordination biplot between sampling sites and environmental factors in summer

0.714、0.884,其次是总氮和硝酸盐,相关系数分别为 0.668、0.594;氨氮与第二轴的相关系数为



Ple: 曲舟藻属 *Pleufosigma*; Cos: 圆筛藻属 *Coscinodiscu*; Cha: 角毛属 *Chaetoceros*; Cer: 角藻属 *Ceratium*; Rhi: 根管藻属; Bid: 盒形藻属 *Biddulphia*; Bac: 辐杆藻属 *Bacteriastrium*; Ditt.b: 布氏双尾藻 *Ditylum brightwellii*; Ste.p: 掌状冠盖藻 *Stephanopyxis palmeriana*; Ske.c: 中肋骨条藻 *Skeletonema costatum*; Lep.d: 丹麦细柱藻 *Leptocylindrus danicus*; Cer.b: 柏氏角管藻 *Cerataulina bergoni*; Tha.n: 菱形海线藻 *Thalassionema nitzschioides*; Lit.u: 波状石鼓藻 *Lithodesmium undulatum*; Euc.z: 浮动弯角藻 *Eucampia zoodiacus*; Hem.s: 中华半管藻 *Hemiaulus sinensis*; Str.t: 扭鞘藻 *Streptotheca thamesis*; Nit: 菱形藻属 *Nitzschia pungens*; Per.p: 五角多甲藻 *Peridinium pentagonum*; Pyr.s: 斯氏扁甲藻 *Pyrophacus steinii*; Nav.: 舟形藻 *Navicula* sp.

图7 夏季浮游植物物种与环境因子 CCA 排序

Fig. 7 CCA ordination biplot between phytoplankton species and environmental factors in summer

-0.803, 呈现强负相关, 而盐度与第二轴的相关系数为 0.576, 呈现一定的正相关关系. 硅藻门中的圆筛藻属、根管藻属、波状石鼓藻、舟形藻、中肋骨条藻、丹麦细柱藻与水温 and 总氮呈现出显著的正相关关系, 主要分布于距大蒲河口较近的 12、16 站位 (图 6); 盒形藻属、舟形藻、根管藻属、角藻属与总磷呈现出显著的正相关关系, 主要分布区域为近岸海域一线的 4、8、9、12、16 站位, 而角毛属、中华半管藻、浮动弯角藻、斯氏扁甲藻、五角多甲藻则与其呈现显著的负相关关系, 主要的聚集区域为 2、3、5、6、7 站位; 菱形藻属、角藻属、角毛属、辐杆藻属与盐度呈现出显著正相关关系, 主要的聚集区域为 10、18、19 站位附近区域.

调查海域位于昌黎养殖区内, 近 10 年来昌黎养殖区面积不断扩大, 截止到 2012 年底, 昌黎海水养殖面积达到 51 200 hm^2 , 10 年间扩大了近 3 倍; 养殖方式也由单一养殖发展到单养、混养、间养相结

合, 养殖品种涉及到鱼、虾、扇贝、海参等 20 余种. 海水动物养殖的排泄物进入到海洋, 海水温度、流速、pH 值、溶解氧以及营养盐结构会发生变动, 进而影响到浮游植物的生产代谢, 引起浮游植物数量的改变. 以主要养殖品种贝类和鱼类为例, 贝类是一种滤食性被动摄食动物, 主要是依靠滤食海水中的浮游植物和有机颗粒来生长, 把产生的废物排泄到海中, 刘佳等^[33] 在该海域的水域环境以及浮游植物多样性研究中发现, 贝类产生的排泄物主要以氮、磷营养盐为主, 并且每年以 600 t 的增幅逐年增加; 鱼类养殖不仅仅是自身排泄物还包括养殖过程中投放的饵料导致水体中氮磷营养物质过剩, 水体恶化, 海水富营养化状况加重. 夏季是海水养殖的高峰期, 近岸水体中营养盐浓度高于其他季节, 氮磷营养盐成为夏季浮游植物生长的限制性因子, 其 CCA 相关性因此得到提高.

3 结论

(1) 2005 ~ 2013 年昌黎生态监控区夏季共检出浮游植物共 3 门 23 科 39 属 105 种, 细胞丰度范围为 $42.96 \times 10^4 \sim 97\,542.87 \times 10^4$ 个 $\cdot \text{m}^{-3}$, 平均值为 17287.37×10^4 个 $\cdot \text{m}^{-3}$, 其中, 硅藻细胞种类和丰度占调查海域浮游植物的比重最大, 近 9 a 夏季浮游植物细胞丰度年际变化较大, 呈现逐年降低的趋势.

(2) 不同年份主要优势种在数量及优势度上存在很大的差异, 呈现出波动下降的趋势, 物种多样性和均匀度变化幅度较小, 未与优势度呈现协同增加的趋势, 近 9 a 群落结构尚为稳定. 但存在个别年份的部分站位优势种占有绝对优势, 导致各个站位间物种分布不均匀的情况.

(3) 近 9 a 夏季浮游植物群落结构与环境因子进行 CCA 分析, 结果表明, 影响群落结构变化的环境因子主要为温度、营养盐、盐度等. 影响该海域浮游植物夏季年际变动的主要原因来自于人类社会经济的发展, 包括陆地工业和生活污染物排放不断加重, 海水养殖产量逐年增加等. 此外, 海洋水动力条件也会对浮游植物多样性空间分布产生一定的影响. 本研究仅限于局部区域的环境参数和人类社会经济发展进行讨论, 是否与全球气候变化、极端气候事件等大的空间范围下有一定的相关性, 还需更进一步的研究和探讨.

致谢: 感谢河北省昌黎黄金海岸国家级自然保护区管理处为本研究提供相关数据.

参考文献:

- [1] 曹春晖, 孙之南, 王学魁, 等. 渤海天津海域的网采浮游植物群落结构与赤潮植物的初步研究[J]. 天津科技大学学报, 2006, **21**(3): 34-37.
- [2] Sarmiento J L, Toggweiler J R, Najjar R. Ocean carbon-cycle dynamics and atmospheric $p\text{CO}_2$ [J]. Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series A, 1988, **325**(1583): 3-21.
- [3] Sathyendranath S, Gouveia A D, Shetye S R, *et al.* Biological control of surface temperature in the Arabian Sea [J]. Nature, 1991, **349**(6304): 54-56.
- [4] Charlson R J, Lovelock J E, Andreae M O, *et al.* Oceanic phytoplankton, atmospheric sulphur, cloud albedo and climate [J]. Nature, 1987, **326**(6144): 655-661.
- [5] Bursa A. Phytoplankton on coastal waters of the Arctic Ocean at Point Barrow, Alaska [J]. Arctic, 1963, **16**(4): 239-262.
- [6] Seliger H H, Carpenter J H, Loftus M, *et al.* Mechanisms for the accumulation of high concentrations of dinoflagellates in a bioluminescent bay [J]. Limnology and Oceanography, 1970, **15**(2): 234-245.
- [7] Garono R J, Heath R T, Hwang S J. Detrended correspondence analysis of phytoplankton abundance and distribution in Sandusky Bay and Lake Erie [J]. Journal of Great Lakes Research, 1996, **22**(4): 818-829.
- [8] Ming W W, Townsend D W. Phytoplankton and hydrography of the Kennebec estuary, Maine, USA [J]. Marine Ecology Progress Series, 1999, **178**(1): 133-144.
- [9] Carperter E J, Dunham S. Nitrogenous nutrient uptake, primary production, and species composition of phytoplankton in the Carmans River estuary, Long Island, New York [J]. Limnology and Oceanography, 1985, **30**(3): 513-526.
- [10] Smith S V, Wiebe W J, Hollibaugh J T, *et al.* Stoichiometry of C, N, P, and Si fluxes in a temperate-climate embayment [J]. Journal of Marine Research, 1987, **45**(2): 427-460.
- [11] Soetaert K, Herman P M L, Kromkamp J. Living in the twilight: estimating net phytoplankton growth in the Westerschelde Estuary (the Netherlands) by means of an ecosystem model (MOSES) [J]. Journal of Plankton Research, 1994, **16**(10): 1277-1301.
- [12] Harding L W, Meeson B W, Fisher T R. Phytoplankton production in two east coast estuaries: photosynthesis-light functions and patterns of carbon assimilation in Chesapeake and Delaware Bays [J]. Estuarine Coastal and Shelf Science, 1986, **23**(6): 773-806.
- [13] 郭术津, 李彦翔, 张翠霞, 等. 渤海浮游植物群落结构及与环境因子的相关性分析[J]. 海洋通报, 2014, **33**(1): 95-105.
- [14] 周然, 彭士涛, 覃雪波, 等. 渤海湾浮游植物与环境因子关系的多元分析[J]. 环境科学, 2013, **34**(3): 864-873.
- [15] 王妍, 张永, 王玉珏, 等. 胶州湾浮游植物的时空变化特征及其与环境因子的关系[J]. 安全与环境学报, 2013, **13**(1): 163-170.
- [16] 吴玉霖, 孙松, 张永山, 等. 胶州湾浮游植物数量长期动态变化的研究[J]. 海洋与湖沼, 2004, **35**(6): 518-523.
- [17] 刘永健, 杨官品, 门荣新. 胶州湾浮游植物分子遗传多样性初步研究[J]. 青岛海洋大学学报, 2013, **33**(6): 907-916.
- [18] 龚玉艳, 张学才, 孙省利, 等. 2010 年夏季雷州半岛海岸带浮游植物群落结构特征及其与主要环境因子的关系[J]. 生态学报, 2012, **32**(19): 5972-5985.
- [19] 肖武鹏, 柳欣, 黄邦钦. 春季东海近岸表层浮游植物群落结构及其与环境因子的关系[J]. 海洋学研究, 2013, **31**(3): 76-82.
- [20] GB 17378.3-2007, 海洋监测规范 第 3 部分: 样品采集、储存与运输[S].
- [21] GB/T 12763.4-2007, 海洋调查规范 第 4 部分: 海水化学要素调查[S].
- [22] Shannon C E, Weaver W. The mathematical theory of communication [M]. Urbana: University of Illinois Press, 1949. 1-125.
- [23] Pielou E C. An introduction to mathematical ecology [M]. New York: Wiley-Interscience, 1969: 1-286.
- [24] Margalef D R. Information theory in ecology [J]. General Systems, 1958, (3): 36-37.
- [25] 杨亮杰, 余鹏飞, 竺俊全, 等. 浙江横山水库浮游植物群落结构特征及其影响因子[J]. 应用生态学报, 2014, **25**(2): 569-576.
- [26] 孟睿, 何连生, 过龙根, 等. 长江中下游草型湖泊浮游植物群落及其与环境因子的典范对应分析[J]. 环境科学, 2013, **34**(7): 2588-2596.
- [27] 徐兆礼, 陈亚瞿. 东黄海秋季浮游动物优势种聚集强度与鲈鲷渔场的关系[J]. 生态学杂志, 1989, **8**(4): 13-15, 19.
- [28] Reynolds C S. What factors influence the species composition of phytoplankton in lakes of different trophic status [J]. Hydrobiologia, 1998, **369-370**: 11-26.
- [29] 陈家长, 孟顺龙, 尤洋, 等. 太湖五里湖浮游植物群落结构特征分析[J]. 生态环境学报, 2009, **18**(4): 1358-1367.
- [30] 匡翠萍, 刘曙光. 河北省近岸海域环境容量评价报告[R]. 上海: 同济大学, 2009. 1-3.
- [31] 卞红霞. 渤海浮游植物季节变化与水动力关系数值研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2012. 32-40.
- [32] 方成, 刘金成, 柳富田, 等. 2002-2012 年唐山市海洋环境质量变化及影响因素分析[J]. 地质调查与研究, 2014, **37**(3): 217-223.
- [33] 刘佳, 苏艺, 韩晓庆, 等. 河北昌黎生态监控区海洋浮游植物多样性变化趋势研究[J]. 海洋通报, 2012, **31**(6): 646-653.

CONTENTS

Comparative Analysis and Inspiration of Air Quality Index Between China and America	GAO Qing-xian, LIU Jun-rong, LI Wen-tao, <i>et al.</i>	(1141)
Regional Source Apportionment of PM _{2.5} in Beijing in January 2013	LI Xuan, NIE Teng, QI Jun, <i>et al.</i>	(1148)
Formation Mechanism of a Serious Pollution Event in January 2013 in Beijing	CHENG Nian-liang, LI Yun-ting, ZHANG Da-wei, <i>et al.</i>	(1154)
Soluble of Metals within TSP in Shanghai	CHANG Yan, FENG Chong, QU Jian-guo, <i>et al.</i>	(1164)
Analysis of Component Spectral Characteristics of PM ₁₀ -Bound PAHs and the Influence of Weather Conditions During Spring in Xiamen	ZHANG Jian, FAN Shu-xian, SUN Yu, <i>et al.</i>	(1173)
Tracing Sources of Sulfate Aerosol in Nanjing Northern Suburb Using Sulfur and Oxygen Isotopes	WEI Ying, GUO Zhao-bing, GE Xin, <i>et al.</i>	(1182)
Analysis of an Air Pollution Process Using LiDAR in Nanjing, Spring of 2014	BAO Qing, HE Jun-liang, ZHA Yong, <i>et al.</i>	(1187)
Characteristics of Water-soluble Inorganic Ions in PM _{2.5} and PM _{2.5-10} in Mountain Background Region of East China in Spring	SU Bin-bin, ZHANG Zhi-sheng, TAO Jun, <i>et al.</i>	(1195)
Emission of Particulate Matter, Organic and Elemental Carbon from Burning of Fallen Leaves	YANG Wei-zong, LIU Gang, LI Jiu-hai, <i>et al.</i>	(1202)
Emission Inventory of Crop Residues Field Burning and Its Temporal and Spatial Distribution in Sichuan Province	HE Min, WANG Xing-rui, HAN Li, <i>et al.</i>	(1208)
Marine Emission Inventory and Its Temporal and Spatial Characteristics in the City of Shenzhen	YANG Jing, YIN Pei-ling, YE Si-qi, <i>et al.</i>	(1217)
Characteristic of Ultrafine Particles Transferring Through Building Envelopes	SUN Zai, CHEN Qiu-fang, CAI Zhi-liang, <i>et al.</i>	(1227)
Airborne Fungal Aerosol Concentration and Distribution Characteristics in Air-Conditioned Wards	ZHANG Hua-ling, FENG He-hua, FANG Zi-liang, <i>et al.</i>	(1234)
Effect of Below-cloud Secondary Evaporation in Precipitations over the Loess Plateau Based on the Stable Isotopes of Hydrogen and Oxygen	JIN Xiao-gang, ZHANG Ming-jun, WANG Sheng-jie, <i>et al.</i>	(1241)
Effect of the Runoff-sediment Control of the Xiaolangdi Reservoir on DOC Transport	ZHANG Yong-ling, WANG Ming-shi, DONG Yu-long	(1249)
Effects of Long-term Implementation of the Flow-Sediment Regulation Scheme on Grain and Clay Compositions of Inshore Sediments in the Yellow River Estuary	WANG Miao-miao, SUN Zhi-guo, LU Xiao-ning, <i>et al.</i>	(1256)
Influences of Biological Processes on Geochemical Characteristics: An Example of a Mountain Karst Pool in Spring Season	YU Zheng-liang, YANG Ping-heng, ZHAO Rui-yi, <i>et al.</i>	(1263)
Variation Characteristics and Sources of Heavy Metals in an Urban Karst Groundwater System during Rainfall Event	REN Kun, YANG Ping-heng, JIANG Ze-li, <i>et al.</i>	(1270)
Risk Assessment of Trihalomethane Production Using the Beijiang River and the Pearl River, Guangzhou as Drinking Water Sources	ZHONG Hui-zhou, WEI Chao-hai	(1277)
Spatial Variability Characteristics of Water Quality and Its Driving Forces in Honghu Lake During High Water-level Period	LI Kun, WANG Ling, LI Zhao-hua, <i>et al.</i>	(1285)
Nutrient Exchange Between Meixi River and Yangtze River Due to the Typical Interaction Process of the Three Gorges Reservoir and Its Tributary	CAO Man, FU Jia-nan, ZHOU Zi-ran, <i>et al.</i>	(1293)
Effects of Nutrient Inputs on Changes of Phosphorus Forms and Phytoplankton Growth in Taihu Lake	WANG Rui-zhe, WANG Pei-fang, REN Ling-xiao, <i>et al.</i>	(1301)
Community Dynamics of Phytoplankton and Related Affecting Factors in a Eutrophicated Small Pond	YANG Wen, ZHU Jin-yong, ZHANG Ke-xin, <i>et al.</i>	(1309)
Yearly Changes of Phytoplankton Community in the Ecology-monitoring Area of Changli, Hebei in Summer	LIANG Xiao-lin, YANG Yang, WANG Yu-liang, <i>et al.</i>	(1317)
Improvement of River Water Quality by Aeration: WASP Model Study	ZHU Wen-bo, WANG Hong-xiu, LIU Cui, <i>et al.</i>	(1326)
Radiolytic Decomposition of Ciprofloxacin Hydrochloride in Aqueous Solution Using γ Irradiation	ZHU Sheng-nan, GUO Zhao-bing, ZHAO Yong-fu, <i>et al.</i>	(1332)
Removal of Antimony in Wastewater by Electrochemical Hydride Generation and the Recovery of Antimony	CHEN Jing-jing, ZHANG Guo-ping, LI Hai-xia, <i>et al.</i>	(1338)
Degradation of <i>m</i> -Cresol with Fe-MCM-41 in Catalytic Ozonation	SUN Wen-jing, WANG Ya-min, WEI Huang-zhao, <i>et al.</i>	(1345)
Bioanode and Inversion of Bioanode to Biocathode for the Degradation of Antibiotic Chloramphenicol	KONG De-yong, LIANG Bin, YUN Hui, <i>et al.</i>	(1352)
Photolysis of Gaseous HNO ₃ on the α -Fe ₂ O ₃ Films Under 308 nm UV Light	LU Jun, SUN Yun-dong, XIE Jing-jing, <i>et al.</i>	(1359)
Simultaneous Determination of Hydroquinone and Catechol Based on L-Histidine-Erythrosine Composite Film Modified Glassy Carbon Electrode	HE Jia-hong, XU Qiang, DING Wu-quan, <i>et al.</i>	(1365)
Preparation and Characterization of Quinone Functional Polymer Biocarrier (PET-AQS) for Bionitrification Catalysis	XU Qing, HOU Zheng-hao, TIAN Xiu-lei, <i>et al.</i>	(1374)
Kinetic Characteristics of Degradation of Geosmin and 2-Methylisoborneol by <i>Bacillus subtilis</i>	MA Nian-nian, LUO Guo-zhi, TAN Hong-xin, <i>et al.</i>	(1379)
Screening of a Highly Efficient Quinoline-degrading Strain and Its Enhanced Biotreatment on Coking Waste Water	LI Jing, LI Wen-ying	(1385)
Effect of Ferric Iron on Nitrogen Immigration and Transformation and Nitrous Oxide Emission During Simultaneous Nitrification Denitrification Process	LI Hao, YAN Yu-jie, XIE Hui-jun, <i>et al.</i>	(1392)
Running Condition and Bacterial Community Associated with the Partial Nitrification System	ZHAO Zhi-rui, JIAO Hai-hua, CUI Bing-jian, <i>et al.</i>	(1399)
Using Excess Activated Sludge Treated 4-Chlorophenol Contained Waste Water to Cultivate <i>Chlorella vulgaris</i>	WANG Lu, CHEN Xiu-rong, YAN Long, <i>et al.</i>	(1406)
Effects of Total Nitrogen and BOD ₅ /TN on Anaerobic Ammonium Oxidation-Denitrification Synergistic Interaction of Mature Landfill Leachate in Aged Refuse Bioreactor	YANG Ying-ying, CHEN Yi, LI Ming-jie, <i>et al.</i>	(1412)
Altitudinal Gradient Distribution and Source Analysis of PAHs Content of Topsoil in Jinpo Mountain, Chongqing	SHI Yang, SUN Yu-chuan, LIANG Zuo-bing, <i>et al.</i>	(1417)
Characteristics and Inputs of Cd Contamination in Paddy Soils in Typical Mining and Industrial Areas in Youxian County, Hunan Province	ZHANG Min, WANG Mei-e, CHEN Wei-ping, <i>et al.</i>	(1425)
Effects of Canalization on the Iron Deposition in Sanjiang Plain	SU Wen-hui, YU Xiao-fei, WANG Guo-ping, <i>et al.</i>	(1431)
Effects of Phosphate and Zeolite on the Transformation of Cd Speciation in Soil	WANG Xiu-li, LIANG Cheng-hua, MA Zi-hui, <i>et al.</i>	(1437)
Leaching Remediation of Copper and Lead Contaminated Lou Soil by Saponin Under Different Conditions	DENG Hong-xia, YANG Ya-li, LI Zhen, <i>et al.</i>	(1445)
Accumulation Characteristics and Evaluation of Heavy Metals in Soil-Crop System Affected by Wastewater Irrigation Around a Chemical Factory in Shenmu County	QI Yan-bing, CHU Wan-lin, PU Jie, <i>et al.</i>	(1453)
Effects of Organic and Inorganic Slow-Release Compound Fertilizer on Different Soils Microbial Community Structure	WANG Fei, YUAN Ting, GU Shou-kuan, <i>et al.</i>	(1461)
Response of Maize to Lead Stress and Relevant Chemical Forms of Lead	CHENG Hai-kuan, ZHANG Biao, JING Xin-xin, <i>et al.</i>	(1468)
Effect of Boron-antimony Interaction on the Uptake and Accumulation of Antimony and Boron by Rice Seedling	XIANG Meng, HUANG Yi-zong, CAI Li-qun, <i>et al.</i>	(1474)
Effects of Arbuscular Mycorrhizal Fungi on the Growth of Reeds in Wetland Soils with Different Salt Content	GUO Jiang-yuan, GUO Wei, BI Na, <i>et al.</i>	(1481)
A Contrastive Study on Salt-alkaline Resistance and Removal Efficiency of Nitrogen and Phosphorus by <i>Phragmites australis</i> and <i>Typha angustifolia</i> in Coastal Estuary Area	CHEN You-yuan, SUN Ping, CHEN Guang-lin, <i>et al.</i>	(1489)
Soil Microbial Respiration Under Different Soil Temperature Conditions and Its Relationship to Soil Dissolved Organic Carbon and Invertase	WU Jing, CHEN Shu-tao, HU Zheng-hua, <i>et al.</i>	(1497)
Comparison Analysis of Economic and Engineering Control of Industrial VOCs	WANG Yu-fei, LIU Chang-xin, CHENG Jie, <i>et al.</i>	(1507)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 汤鸿霄 陈吉宁 孟 伟 周宗灿 林金明
欧阳自远 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2015年4月15日 第36卷 第4期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 4 Apr. 15, 2015

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	欧阳自远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行人