

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第34卷 第3期

Vol.34 No.3

2013

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

BP网络框架下MODIS气溶胶光学厚度产品估算中国东部PM _{2.5}	郭建平, 吴业荣, 张小曳, 李小文(817)
北京市近地层颗粒物浓度与气溶胶光学厚度相关性分析研究	林海峰, 辛金元, 张文煜, 王跃思, 刘子锐, 陈传雷(826)
气象因素对长三角背景地区甲烷浓度的影响分析	浦静姣, 徐宏辉, 顾骏强, 马千里, 方双喜, 周凌晔(835)
密闭化填埋作业条件下的场内恶臭污染分布情况与分析	路鹏, 吴世新, 戴志锋, 张晓辉, 苏昭辉, 周小飞, 代占国, 卢旭飞, 郑斌, 沈凯, 卫潘明(842)
冬季中国东海海水中挥发性卤代烃的分布特征和海-气通量	何真, 陆小兰, 杨桂朋(849)
2000~2010年大鹏湾颗粒有机物的年变化和年际变化	李绪录, 周毅频, 夏华永(857)
渤海湾浮游植物与环境因子关系的多元分析	周然, 彭士涛, 覃雪波, 石洪华, 丁德文(864)
青藏高原淡水湖泊水化学组成特征及其演化	王鹏, 尚英男, 沈立成, 伍坤宇, 肖琼(874)
漳卫南运河流域非点源污染负荷估算及最佳管理措施优选	徐华山, 徐宗学, 刘品(882)
面向对象的湖泊污染控制智能工程设计方法	邹锐, 周璟, 刘永, 朱翔, 赵磊, 阳平坚, 郭怀成(892)
九龙江口湿地植物凋落物对沉积物有机质赋存的贡献	罗专溪, 邱昭政, 王振红, 颜昌宙(900)
修复达标土壤回填对地下水环境影响的层次化评估方法应用研究	钟茂生, 姜林, 姚珏君, 樊艳玲, 夏天翔, 李婷婷, 田美影(907)
去除地下水中硝酸盐的渗透性反应墙研究	李秀利, 杨君君, 卢晓霞, 张姝, 侯珍(914)
北京城区雨水管道沉积物污染负荷研究	李海燕, 徐波平, 徐尚玲, 崔爽(919)
城市污水处理厂及其受纳水体中5种典型PPCPs的赋存特征和生态风险	温智皓, 段艳平, 孟祥周, 陈玲(927)
城市景观娱乐水体微生物风险评价	孙傅, 沙婧, 张一帆, 刘彦华(933)
模拟曝气生物滤池去除邻苯二甲酸二(2-乙基己基)酯试验研究	李伟, 赵晶, 余健, 任文辉(943)
膜生物反应器处理工业废水中膜污染及膜过滤特性研究	范举红, 余素林, 张培帅, 兰亚琼, 刘锐, 陈吕军(950)
γ -Al ₂ O ₃ 负载磷钨酸催化强化电化学法处理水中酸性大红3R的研究	岳琳, 王开红, 郭建博, 杨景亮, 刘宝友, 廉静, 王涛(955)
活性炭催化过硫酸钠降解金橙G动力学	杨梅梅, 周少奇, 刘琳, 郑可(962)
ABR反应器处理碱减量印染废水的启动研究	杨波, 钟启俊, 李方, 田晴(968)
O ₃ -BAF深度处理制革废水中沿程污染物降解规律	余彬, 刘锐, 程家迪, 范举红, 李昌湖, 冉坤, 曹国华, 陈吕军(974)
规模化猪场养殖废水UASB-SFSBR-MAP处理工艺中试研究	王亮, 陈重军, 陈英旭, 吴伟祥(979)
连续流态下以城市污水培养好氧颗粒污泥及颗粒特性研究	牛姝, 段百川, 张祚薰, 刘士峰, 张家铭, 王聪, 周丹丹(986)
乙酸/丙酸作为EBPR碳源的动力学模型研究(Ⅰ)——模型的建立	张超, 陈银广(993)
乙酸/丙酸作为EBPR碳源的动力学模型研究(Ⅱ)——动力学模拟	张超, 陈银广(998)
乙酸/丙酸作为EBPR碳源的动力学模型研究(Ⅲ)——模型的应用	张超, 陈银广(1004)
三峡水库两条支流水-气界面CO ₂ 、CH ₄ 通量比较初探	李哲, 白镭, 郭劲松, 方芳, 蒋滔(1008)
不同土地利用方式下土壤呼吸空间变异的影响因素	陈书涛, 刘巧辉, 胡正华, 刘艳, 任景全, 谢薇(1017)
黄土区农田和草地生态系统土壤呼吸差异及其影响因素	周小刚, 张彦军, 南雅芳, 刘庆芳, 郭胜利(1026)
层次化健康风险评估方法在苯污染场地的应用及效益评估	姜林, 钟茂生, 梁竞, 姚珏君, 夏天翔, 樊艳玲, 李敬东, 唐振强(1034)
海州湾滩涂重金属污染的历史记录	张瑞, 张帆, 刘付程, 尹福军, 丁迎军, 高金荣, 陈晶, 邵威(1044)
草海典型高原湿地表层沉积物重金属的积累、分布与污染评价	张清海, 林昌虎, 谭红, 林绍霞, 杨鸿波(1055)
大金山岛土壤重金属污染评价及相关性分析	程芳, 程金平, 桑恒春, 于金莲, 席磊, 皮帅帅(1062)
典型有色金属矿山城市小河流沉积物重金属形态分布及风险评估	李如忠, 姜艳敏, 潘成荣, 陈婧, 徐晶晶(1067)
典型有色金属矿业城市零星菜地蔬菜重金属污染及健康风险评估	李如忠, 潘成荣, 徐晶晶, 陈婧, 姜艳敏(1076)
城市表层土壤磁化率与重金属含量分布的相关性研究	陈秀端, 卢新卫, 杨光(1086)
典型热带林地土壤团聚体颗粒中重金属的分布特征及其环境意义	龚仓, 徐殿斗, 成杭新, 任雅阁, 刘志明, 刘应汉, 刘飞, 聂海峰, 郑祥, 马玲玲(1094)
生态沟渠底泥属性与磷吸附特性研究	张树楠, 贾兆月, 肖润林, 杨凤飞, 余红兵, 刘锋, 吴金水(1101)
三峡库区澎溪河底泥及消落区土壤磷的形态及吸附特性研究	孙文彬, 杜斌, 赵秀兰, 何丙辉(1107)
Triton X-100在黄土上的吸附行为及影响因素	钟金魁, 赵保卫, 朱琨, 钱小龙, 张杰西(1114)
新疆哈密地区有机氯农药大气、土壤残留特征、气-土交换及潜在生态风险	马子龙, 毛蒲萱, 丁中原, 高宏, 黄韬, 田慧, 郭强(1120)
青海省西宁市与天峻县大气中得克隆与十溴联苯醚的水平与来源	何畅, 金军, 马召辉, 王英, 扎西卓玛, 马丽花(1129)
太湖沉积物中多溴联苯醚和类二噁英多氯联苯的水平垂直分布	马召辉, 金军, 元学奎, 王英, 姜霞, 何松洁, 李明圆(1136)
典型电器工业区河涌沉积物中有机污染物特征分析	刘近, 邓代永, 许玫英, 孙国萍(1142)
柴油轿车颗粒多环芳烃的排放特性	谭丕强, 周舟, 胡志远, 楼狄明(1150)
机械炼焦过程生成飞灰中多环芳烃分布特征研究	牟玲, 彭林, 刘效峰, 白慧玲, 张建强(1156)
污泥干化床与芦苇床稳定化污泥中多环芳烃的含量比较	崔玉波, 孙红杰, 冉春秋, 李金凤, 谢瑶(1161)
固体添加剂对污泥焚烧过程中重金属迁移行为的影响	刘敬勇, 孙水裕, 陈涛(1166)
铸造废砂的环境毒性研究	张海凤, 王玉珏, 王劲磷, 黄天佑, 熊鹰(1174)
Cr ⁶⁺ 生物可利用度检测的微生物全细胞传感器CB10的构建及其响应特征	侯启会, 马安周, 庄绪亮, 庄国强(1181)
反硝化脱硫工艺中微生物群落结构及动态分析	于皓, 王爱杰, 陈川(1190)
农业废物好氧堆肥中环境因子对nirK、nirS和nosZ数量的影响	胡春晓, 陈耀宁, 张嘉超, 唐聪, 曾光明(1196)
蚯蚓体内过氧化物还原蛋白PRDX基因对土壤PAHs污染胁迫的转录响应	林康丽, 郑森林, 宋玉芳, 邱晓燕, 薛文玲(1204)
有序介孔碳载金/L-赖氨酸/纳米金修饰电极的制备及其对邻苯二酚、对苯二酚的检测响应研究	周耀渝, 汤琳, 李贞, 刘媛媛, 杨贵德, 伍梦诗, 雷晓霞, 曾光明(1211)
新建核电站风险信息沟通实证研究	贺桂珍, 吕永龙(1218)
《环境科学》征订启事(942) 《环境科学》征稿简则(992) 信息(932, 949, 1061, 1210) 专辑征稿通知(1173)	

渤海湾浮游植物与环境因子关系的多元分析

周然¹, 彭士涛^{1,2*}, 覃雪波^{1,3}, 石洪华², 丁德文²

(1. 交通运输部天津水运工程科学研究所, 天津 300456; 2. 国家海洋局第一海洋研究所, 青岛 266061; 3. 南开大学环境科学与工程学院, 天津 300071)

摘要: 2007年春季和夏季对渤海湾的浮游植物和环境因子进行调查, 运用多元分析技术分析浮游植物在渤海湾的分布特征及其与环境因子之间的关系。调查期间共发现浮游植物26种, 其中春季17种, 夏季23种。春季浮游植物平均数量为 $115 \times 10^4 \text{ cells} \cdot \text{m}^{-3}$, 显著高于夏季($3.1 \times 10^4 \text{ cells} \cdot \text{m}^{-3}$)。应用主成分分析(PCA)浮游植物分布特征, 结果表明, 春季浮游植物主要分布于渤海的中北部, 是硝酸盐含量较高的水域; 夏季浮游植物分布于各个水域, 但优势种主要分布于河口附近。运用冗余分析(RDA)探讨浮游植物分布与环境因子之间的关系, 结果表明, 影响渤海湾浮游植物分布的关键环境因子, 春季是硝酸盐、亚硝酸盐和溶解性活性磷酸盐, 夏季是氨氮和水温。

关键词: 浮游植物; 环境因子; 多元分析技术; 春夏季; 渤海湾

中图分类号: X173 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2013)03-0864-10

Phytoplankton Assemblages and Their Relation to Environmental Factors by Multivariate Statistic Analysis in Bohai Bay

ZHOU Ran¹, PENG Shi-tao^{1,2}, QIN Xue-bo^{1,3}, SHI Hong-hua², DING De-wen²

(1. Tianjin Research Institute for Water Transport Engineering, Ministry of Transport, Tianjin 300456, China; 2. First Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, Qingdao 266061, China; 3. College of Environmental Science and Engineering, Nankai University, Tianjin 300071, China)

Abstract: A detailed field survey of hydrological, chemical and biological resources was conducted in the Bohai Bay in spring and summer 2007. The distributions of phytoplankton and their relations to environmental factors were investigated with multivariate analysis techniques. Totally 17 and 23 taxa were identified in spring and summer, respectively. The abundance of phytoplankton in spring was $115 \times 10^4 \text{ cells} \cdot \text{m}^{-3}$, which was significantly higher than that in summer ($3.1 \times 10^4 \text{ cells} \cdot \text{m}^{-3}$). Characteristics of phytoplankton assemblages in the two seasons were identified using principal component analysis (PCA), while redundancy analysis (RDA) was used to examine the environmental variables that may explain the patterns of variation of the phytoplankton community. Based on PCA results, in the spring, the phytoplankton was mainly distributed in the center and northern water zone, where the nitrate nitrogen concentration was higher. However, in summer, phytoplankton was found distributed in all zones of Bohai Bay, while the dominant species was mainly distributed in the estuary. RDA indicated that the key environmental factors that influenced phytoplankton assemblages in the spring were nitrate nitrogen ($\text{NO}_3^- \text{-N}$), nitrite nitrogen ($\text{NO}_2^- \text{-N}$) and soluble reactive phosphorus (SRP), while ammonium nitrogen ($\text{NH}_4^+ \text{-N}$) and water temperature (WT) played key roles in summer.

Key words: phytoplankton; environmental factors; multivariate analysis techniques; spring and summer; Bohai Bay

渤海湾是一个典型的半封闭海湾, 由于与外海的水交换非常缓慢, 导致营养盐容易累积, 加速水体富营养化, 赤潮现象时有发生^[1]。赤潮严重影响海洋渔业, 危害当地经济^[2]。更为严重的是, 一些有害的赤潮藻类暴发, 这些藻类被鱼类等动物食用, 藻类中的有毒有害物质如多莫酸等通过食物链传递和富集, 最终危害人类健康^[3]。赤潮是由于海洋浮游植物的过快生长繁殖造成的, 它受到各种环境因子的控制, 如水温、营养盐、盐度、水体的稳定性等^[4,5]。因此, 了解渤海湾浮游植物与环境因子之间关系对于制定控制赤潮措施具有重要的现实意义。

渤海湾的浮游植物与环境因子之间的关系受到广泛的研究, 然而多数研究主要基于一元相关关系

的分析方法^[6~8]。由于浮游植物的生长繁殖受到多种环境因子共同作用, 单一的相关分析难以准确地反映环境因子对浮游植物的影响。冗余分析(redundancy analysis, RDA)是一种线性多元直接梯度分析, 它基于统计学的角度评价一个或一组变量与另一组多变量数据之间的关系^[9]。RDA分析方法能有效地对多个环境指标进行统计检验, 并确定对群落变化具最大解释能力的最小变量组, 从而更好地反映群落与环境之间关系^[10]。近年来, 国内学

收稿日期: 2012-06-13; 修订日期: 2012-09-11

基金项目: 海洋公益性行业科研专项(200805080)

作者简介: 周然(1981~), 女, 博士研究生, 高级工程师, 主要研究方向为环境生态学。

* 通讯联系人, E-mail: pengshitaotj@126.com

者已开始将 RDA 分析方法应用于浮游植物研究,取得了良好的效果,但多集中于淡水浮游植物^[11,12],对海洋浮游植物的研究不多。

本研究的主要目的就是在对渤海湾的浮游植物和环境因子进行调查和测定的基础上,运用多元分析技术分析浮游植物分布特征及其与环境因子之间的关系,识别出影响浮游植物变化的关键环境因子,以期为该海区的赤潮防治提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 站位布设

从渤海湾南部至北部,均匀设置 30 个站位(图 1),其中 S7 位于南部水域,邻近热电厂; S13 邻近海河河口; S19 位于北塘河口; S25 位于天津市汉沽区附近。

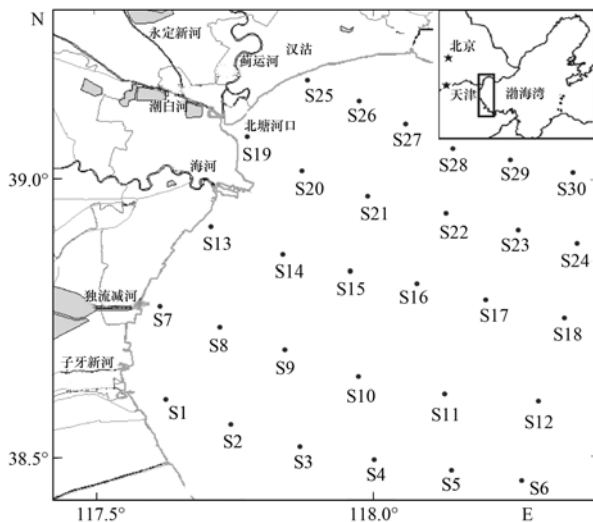


图 1 渤海湾浮游植物调查站位

Fig. 1 Sampling stations in Bohai bay

1.2 样品采集与分析

样品采集时间为 2007 年春季(5 月 16 ~ 30 日)和夏季(8 月 6 ~ 24 日),在各个站位采集表层和底层水样,混合后保存。浮游植物样品分析按 Utermöhl 方法进行:取 25 mL 浮游植物样品于 Hyrobios 的 Utermöhl 计数框,用 AO 倒置显微镜,在 200 和 400 倍下进行物种鉴定与计数。浮游植物数量表示为 $\text{cells} \cdot \text{m}^{-3}$ 。

透明度根据文献[13]进行测定;水温(WT)、pH 值、盐度和溶解氧(DO)等环境参数由便携式多参数水质分析低仪(MS5, HACH)现场测定。营养盐,包括亚硝酸盐($\text{NO}_2^- - \text{N}$)、硝酸盐($\text{NO}_3^- - \text{N}$)、氨氮($\text{NH}_4^+ - \text{N}$)、溶解性活性磷酸盐(soluble reactive

phosphorus, SRP)和硅酸盐(SiO_4),参考文献[14]的方法进行分析。

1.3 数据处理

环境因子和浮游植物数量的季节间差异采用 t 检验,站位间差异采用单因素方差分析(One-way ANOVA),数据分析均在 SPSS 13.0 上进行。

浮游植物与环境因子的排序分析采用多元分析技术进行,在 Canoco for Windows 4.5 软件包上进行。进入排序的浮游植物要经过筛选,只有至少在一个站位数量占该站位总数量 5% 以上的种类才考虑^[15]。分析前,浮游植物数量和环境因子(除 pH 外)均转换成 $\lg(x+1)$ 形式。首先对浮游植物数量进行除趋势对应分析(detrended correspondence analysis, DCA),以确定其属于单峰型分布或线型分布^[16]。DCA 结果表明,春夏两季所有轴中梯度最长的分别为 2.45 和 2.14,小于 3,适合用于基于线性的主成分分析(principal component analysis, PCA)和 RDA^[16]。PCA 用于分析浮游植物分布特征;RDA 用于分析浮游植物与环境因子之间关系,相关显著性用 Monte Carlo 法进行检验。由于环境因子之间可能存在较高的相关性,对于偏相关系数($r > 0.8$)和变异波动指数大于 20 的环境因子都不进入 RDA 分析^[17]。

2 结果与分析

2.1 海区环境特征

渤海湾水环境因子见表 1, t 检验表明,除了透明度(SD)和 pH 值外,各个环境因子在春夏两季间差异明显($P < 0.01$),水温和营养盐表现为春季低于夏季,溶解氧和盐度则表现为春季高于夏季(表 1)。

春季,除了 S7、S8 受到热电厂温水排放的影响而呈现较高水温外,其它站位的水温差异不明显($P > 0.05$),水温的空间分布没有明显的规律性(图 2)。夏季站位间水温差异明显($P < 0.001$),除南部的 S1 ~ S6 及 S12 水温较低外,其它站位水温相对较高。春季,站位间盐度差异不显著($P > 0.05$),但 S7 ~ S9 盐度相对较高;夏季,盐度空间分布呈现区域性差异:南部至中部水域(S1 ~ S18)盐度高于北部(S19 ~ S30);S1 ~ S18 站位间差异不明显($P > 0.05$),但 S19 ~ S30 站位间差异明显($P < 0.001$)且呈现从近岸到外海增高的趋势(图 2)。

营养盐的空间分布受到入海径流的影响,春季除了硝酸盐、亚硝酸盐、溶解性活性磷酸盐,夏季

表 1 环境因子平均值及变化范围

Table 1 Mean and ranges of environmental variables

项目	春季				夏季				P
	平均值	标准差	最大值	最小值	平均值	标准差	最大值	最小值	
WT/°C	17.96	0.27	21.50	16.00	27.12	0.19	28.60	25.10	0.001
SD/m	0.54	0.04	1.00	0.20	0.49	0.02	0.80	0.30	0.45
pH	8.18	0.01	8.28	8.05	7.98	0.02	8.09	7.79	0.62
DO/mg·L ⁻¹	8.31	0.22	9.93	5.66	6.20	0.09	6.95	5.31	0.009
盐度	32.07	0.05	32.84	31.61	31.10	0.15	31.89	29.19	0.001
NO ₂ ⁻ -N/mg·L ⁻¹	0.04	0.01	0.10	0.00	0.08	0.01	0.21	0.02	0.001
NO ₃ ⁻ -N/mg·L ⁻¹	0.44	0.03	0.66	0.17	0.55	0.06	1.38	0.14	0.001
NH ₄ ⁺ -N/mg·L ⁻¹	0.03	0.00	0.11	0.00	0.20	0.05	0.89	0.02	0.004
SRP/mg·L ⁻¹	0.004	0.001	0.014	0.000	0.018	0.004	0.067	0.000	0.008
SiO ₄ /mg·L ⁻¹	0.32	0.02	0.51	0.07	0.74	0.07	1.47	0.21	0.006

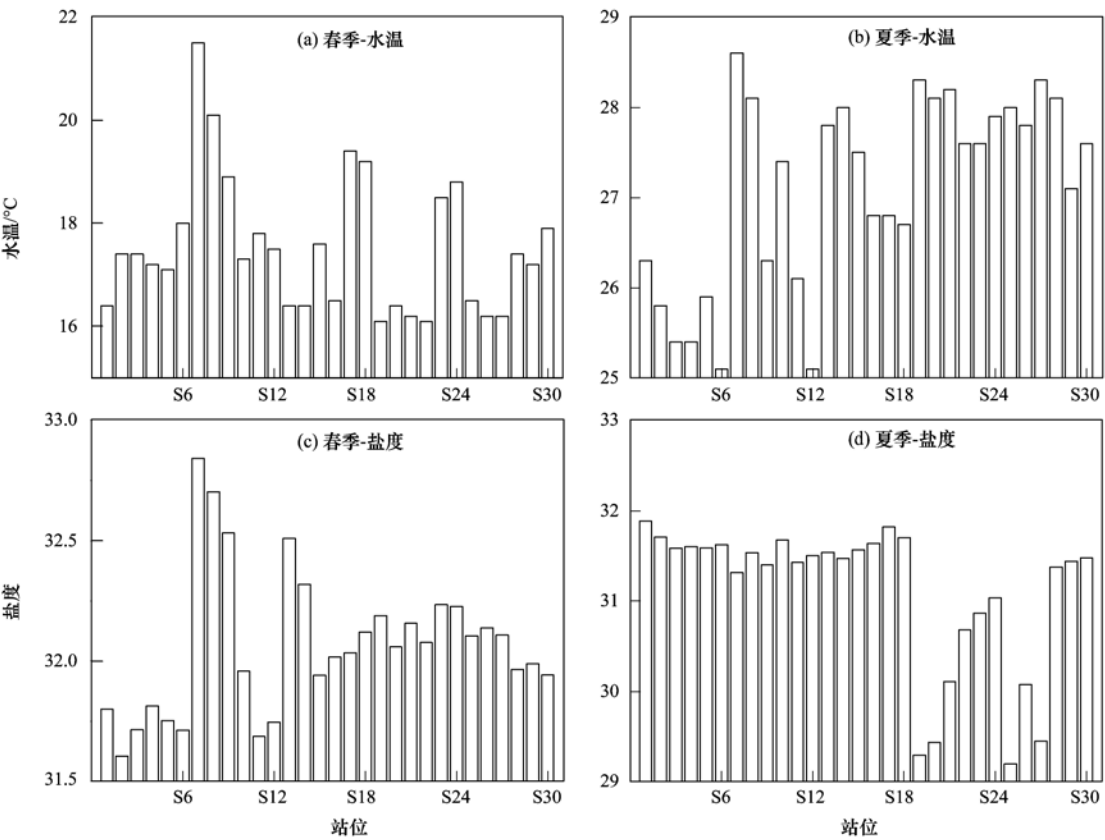


图 2 水温和盐度分布

Fig. 2 Distribution of water temperature and salinity

除氨氮外,营养盐浓度变化基本上都是由近岸向外海逐渐降低(图 3),表明河流是海洋营养盐的重要来源.

2.2 浮游植物物种组成

调查期间,在渤海湾共发现浮游植物 26 种,其中春季 17 种,夏季 23 种. 春夏分别有 8、16 种浮游植物至少在一个站点的数量占该站点总数量 5% 以上(表 2).

春季浮游植物平均数量为 $115 \times 10^4 \text{ cells} \cdot \text{m}^{-3}$,

显著高于夏季 ($3.1 \times 10^4 \text{ cells} \cdot \text{m}^{-3}$, $P < 0.01$). 无论是春季还是夏季,浮游植物数量较高的站点均主要分布于近岸水域(图 4). 春季,最高值出现在 S25,高达 $960 \times 10^4 \text{ cells} \cdot \text{m}^{-3}$,最低值出现在 S6 ($1.6 \times 10^4 \text{ cells} \cdot \text{m}^{-3}$); 夏季,最高值出在 S7 ($337 \times 10^4 \text{ cells} \cdot \text{m}^{-3}$),最低值出现在 S22 ($0.20 \times 10^4 \text{ cells} \cdot \text{m}^{-3}$).

调查期间共发现 6 个明显的优势种,其中春季 4 种,夏季 3 种,这些优势种的数量之和占到各季节

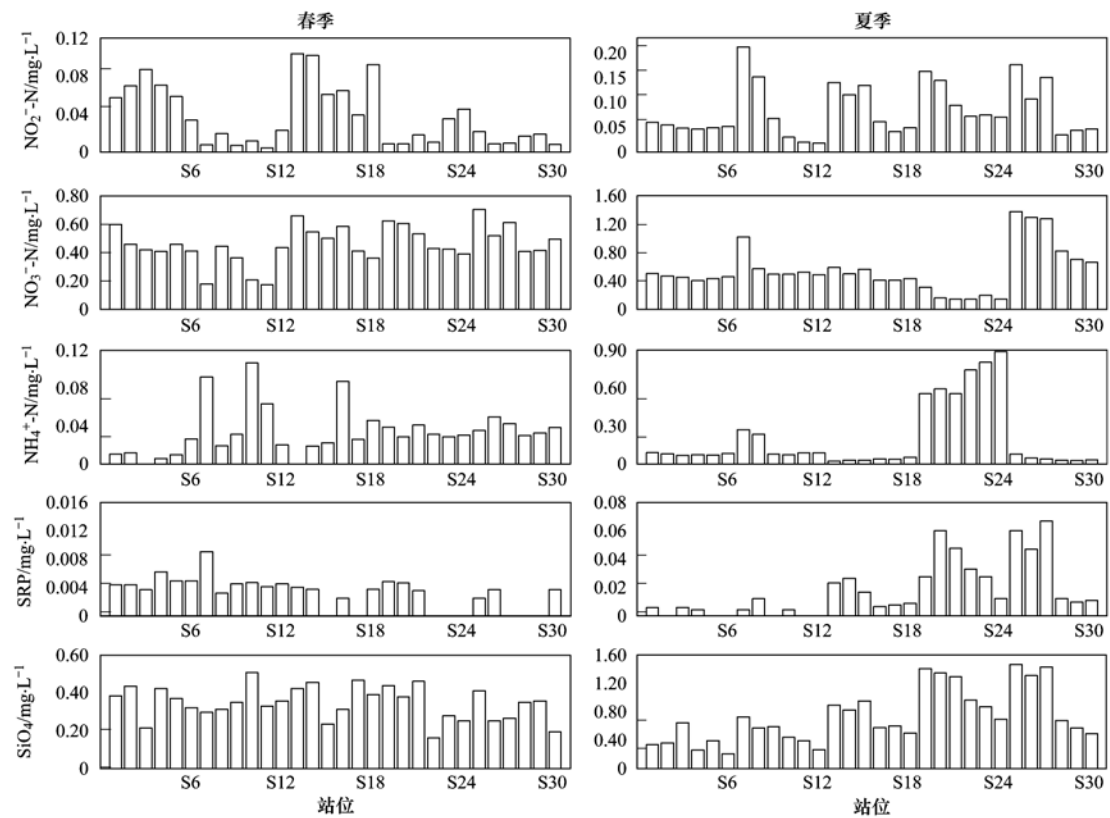


图3 营养盐分布

Fig. 3 Distribution of nutrients in Bohai Bay

表2 渤海湾主要浮游植物名录

Table 2 Main phytoplankton species in Bohai Bay				
代码	中文名	拉丁名	春季	夏季
n1	日本星杆藻	<i>Asterionella japonica</i>		+
n2	中华盒形藻	<i>Biddulphia sinensis</i>	+	+
n3	叉状角藻	<i>Ceratium furca</i>		+
n4	窄隙角毛藻	<i>Chaetoceros affinis</i>		+
n5	角毛藻	<i>Chaetoceros</i> sp.	+	+
n6	格氏圆筛藻	<i>Coscinodiscus granii</i>		+
n7	琼氏圆筛藻	<i>Coscinodiscus jonesianus</i>	+	+
n8	圆筛藻	<i>Coscinodiscus</i> sp.	+	+
n9	威氏圆筛藻	<i>Coscinodiscus wailesii</i>		+
n10	布氏双尾藻	<i>Ditylum brightwellii</i>	+	
n11	夜光藻	<i>Noctiluca scintillans</i>	+	+
n12	相似曲舟藻	<i>Pleurosigma affine</i>	+	+
n13	柔弱根管藻	<i>Rhizosolenia delicatula</i>		+
n14	刚毛根管藻	<i>Rhizosolenia setigera</i>		+
n15	扭鞘藻	<i>streptotheca thamesis</i>	+	+
n16	海链藻	<i>Thalassiosira</i> sp.		+
n17	菱形海线藻	<i>Thalssionema nitzschiodes</i>		+

浮游植物总数的95%以上,形成绝对的优势种(表3).

圆筛藻在两个季节均成为优势种,另外5种分别在其中一个季节成为优势种.春季,除了夜光藻主要分布于南部的S7附近外,其它3种主要分布于

S13~S30,即渤海湾的中北部水域.夏季,除了圆筛藻主要分布于S7外,另外两种优势种在各个站位均有分布.无论是春季还是夏季,优势种主要分布于近岸水域,特别是河口附近,如S7、S13、S19等(图5).

表3 浮游植物优势种及其数量

Table 3 Dominant species and amount of phytoplankton			
季节	优势种	平均数量 × 10 ⁴ /cells·m ⁻³	所占比例/%
春季	圆筛藻	79.15	68.82
	中华盒形藻	13.24	11.51
	夜光藻	15.31	13.32
	布氏双尾藻	5.52	4.80
	合计	113.22	98.45
夏季	格氏圆筛藻	10.31	33.32
	圆筛藻	10.5	31.51
	琼氏圆筛藻	10.34	32.44
	合计	30.7	96.27

2.3 浮游植物分布特征

应用PCA分析浮游植物分布特征,结果表明,春夏两季的前2个特征值的累计贡献率分别为73.3%和50%,可以较好地反映浮游植物空间分布特征(图6).春季,8种重要浮游植物(包括优势种中华盒形藻、圆筛藻、布氏双尾藻)中有6种位于

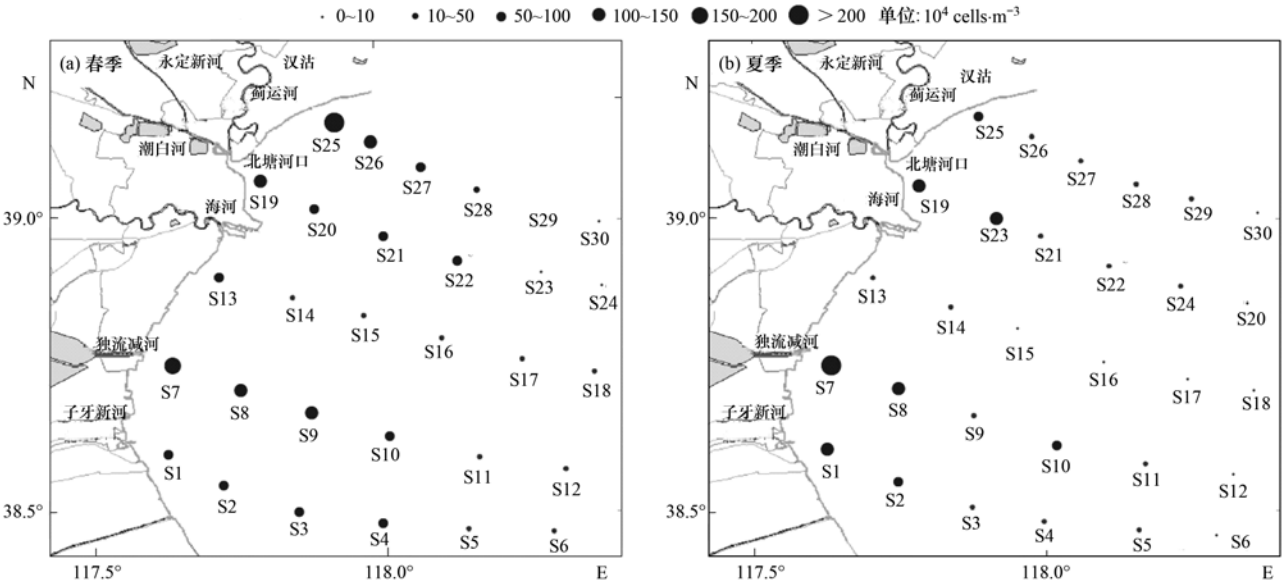


图 4 浮游植物数量空间分布示意
Fig. 4 Distribution of phytoplankton amount

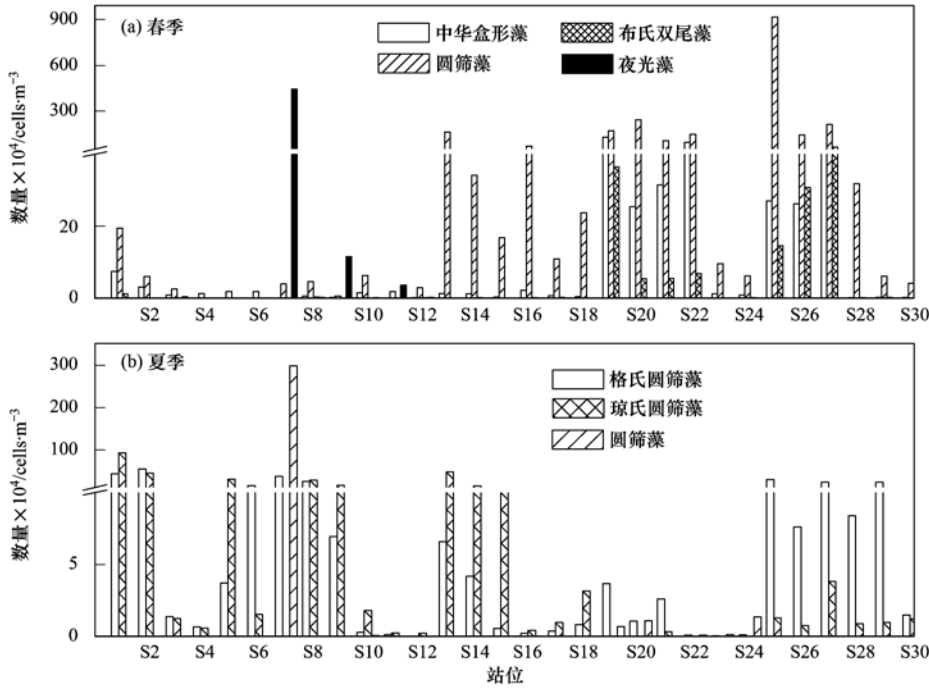


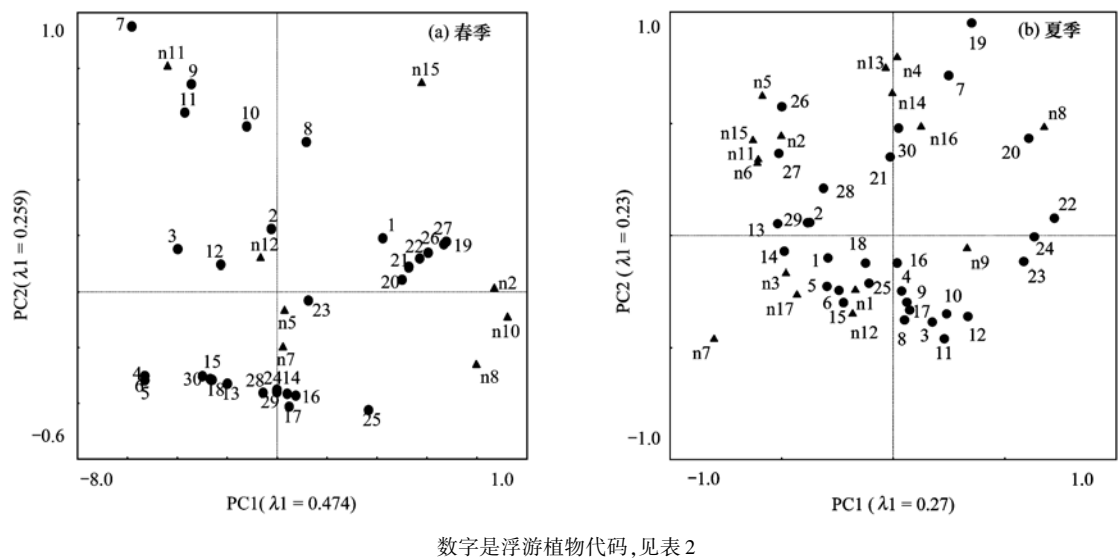
图 5 浮游植物优势种分布
Fig. 5 Distribution of dominant species

第一轴的右边,即渤海湾的中北部水域,该水域硝酸盐含量较高,另外 2 种(其中夜光藻为优势种)分布于第一轴左边,即渤海湾的南部水域,该水域溶解性活性磷酸盐含量较高。夏季,大多浮游植物主要分布第一轴的左边,站位遍布各水域,既有南部(如 S1、S2、S5),也有北部(S26~S29),还有中部(S13、S15、S18),但优势种主要分布于近岸的河口附近,

这些水域氨氮含量较高。可见,浮游植物这种分布特征与环境因子相关。

2.4 浮游植物与环境因子关系

对两季节的环境因子进行偏相关分析发现,春季,氨氮与盐度,pH 值与盐度之间偏相关系数大于 0.8,因此盐度不进入 RDA 分析;夏季,盐度与 pH 值,pH 值与硅酸盐,溶解性活性磷酸盐与盐度,硅酸



数字是浮游植物代码,见表2

图6 浮游植物分布特征的PCA分析

Fig. 6 Location in ordination space (PCA) of the first and second axis of samples and phytoplankton taxa

盐与盐度,硅酸盐与溶解性活性磷酸盐,亚硝酸盐与硝酸盐等6对环境因子之间偏相关系数均大于0.8,因此,pH值、溶解性活性磷酸盐、盐度和亚硝酸盐不进入RDA分析. RDA分析结果表明,两个季节Monte Carlo置换检验所有排序轴均达到显著水平($P < 0.001$),说明排序效果理想. 所选择的环境因子共解释了春季56.6%、夏季39.9%的物种变化信息,前两轴累计解释了春季49.1%、夏季31.2%的物种变化信息和春季86.7%、夏季78.2%的物种-环境关系信息(表4).

表4 浮游植物与环境因子的RDA分析

Table 4 Redundancy analysis results of phytoplankton and environmental factors						
季节	项目	特征值	物种-环境相关性	累积百分比/%		总典特征值
				物种	物种-环境相关性	
春季	轴1	0.358	0.894	35.8	63.2	0.566
	轴2	0.133	0.699	49.1	86.7	
	轴3	0.031	0.664	52.1	92.1	
	轴4	0.022	0.674	54.3	95.9	
夏季	轴1	0.198	0.871	19.8	49.5	0.399
	轴2	0.114	0.755	31.2	78.2	
	轴3	0.044	0.674	35.6	89.2	
	轴4	0.027	0.695	38.3	96.0	

利用向前引入法(forward selection)对环境因子进行逐步筛选, Monte Carlo置换检验结果显示,春季,硝酸盐($F = 8.44, P = 0.002$)、亚硝酸盐($F = 6.56, P = 0.002$)和溶解性活性磷酸盐($F = 3.28, P = 0.016$),夏季,氨氮($F = 6.36, P = 0.002$)和水温($F = 3.58, P = 0.002$),对渤海湾浮游植物分布的影响达到显著水平,而其它环境因子影响达不到显著水平($P > 0.05$),表明硝酸盐、亚硝酸盐和溶解性活性磷酸盐是影响春季渤海湾浮游植物分布的关键环境因子,而夏季则是氨氮和水温.

为揭示关键环境因子各自对浮游植物分布的影响,运用偏冗余分析(variation partitioning analysis)对各个显著环境因子进行分析,结果见表5. 春季,

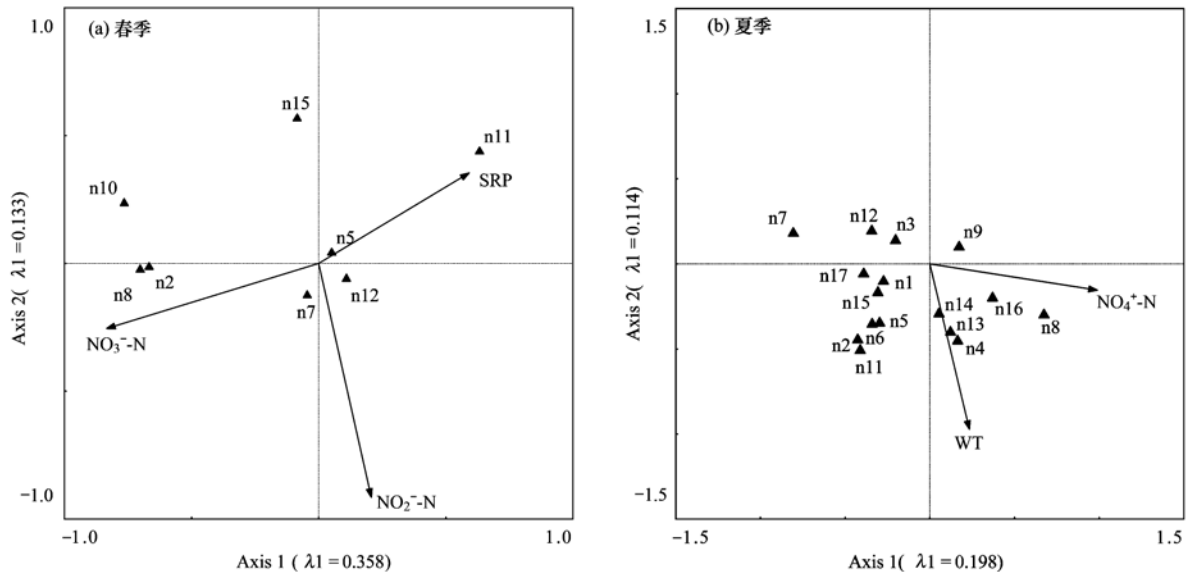
硝酸盐、亚硝酸盐和溶解性活性磷酸盐分别解释了20%、14.8%和6.9%浮游植物变化,夏季氨氮和水温分别解释了18.2%和9.5%浮游植物变化.

表5 浮游植物与显著环境因子的偏冗余分析

Table 5 Variation partitioning analysis of the significant environmental factors on the phytoplankton					
季节	环境因子	特征值	解释变量	F	P
春季	NO ₃ ⁻ -N	0.20	20	8.44	0.002
	NO ₂ ⁻ -N	0.148	14.8	6.56	0.002
	SRP	0.069	6.9	3.28	0.016
	共同作用	0.451	45.1	7.35	0.002
夏季	NH ₄ ⁺ -N	0.182	18.2	6.36	0.002
	WT	0.095	9.5	3.58	0.002
	共同作用	0.28	28	5.86	0.002

渤海湾浮游植物与环境因子之间的关系可以很好地在 RDA 排序图中表现出来(图 7). 春季, 第一轴与溶解性活性磷酸盐呈显著正相关($r = 0.503, P < 0.001$), 与硝酸盐呈显著负相关($r = -0.7085, P < 0.001$), 代表硝酸盐和溶解性活性磷酸盐的浓度变化特征. 沿第一轴, 浮游植物变化由栖息于高硝酸盐含量的圆筛藻过渡到喜欢高磷酸盐的夜光藻; 第二轴与亚硝酸盐含量呈显著负

相关($r = -0.6192, P < 0.001$), 代表亚硝酸盐浓度变化特征, 浮游植物主要分布亚硝酸盐较高的水域(图 7). 夏季, 第一轴与氨氮呈显著正相关($r = 0.844, P < 0.001$), 代表氨氮含量变化, 浮游植物沿氨氮呈现梯度变化; 第二轴与水温呈显著负相关($r = -0.6604, P < 0.001$), 代表水温的变化, 浮游植物由广温种的圆筛藻类过渡到暖温种的夜光藻.



数字是浮游植物代码, 见表 2

图 7 浮游植物与环境因子 RDA 排序图

Fig. 7 Correlation plots of the redundancy analysis (RDA) on the relationship between the environmental variables and phytoplankton taxa

3 讨论

3.1 渤海湾浮游植物数量年际变化

渤海湾所在区域是我国重要的经济区, 经济比较发达, 各种经济活动产生的大量废水通过河流排入到渤海湾. 据统计, 渤海湾每年接收大约 1 亿 t 来自北京、天津和河北省等环渤海地区的废水^[18]. 由于废水中含有大量的氮、磷等元素, 使得渤海湾无机氮和无机磷含量严重超标^[19], 加剧了渤海湾的富营养化, 造成浮游植物大量的增长. 通过与历年同期的数据相比较发现, 进入 21 世纪以来, 渤海湾的浮游植物数量大幅增长, 如 1992 年为 $20 \times 10^4 \text{ cells} \cdot \text{m}^{-3}$ ^[8], 而此次为 $115 \times 10^4 \text{ cells} \cdot \text{m}^{-3}$, 增加了近 6 倍, 这与近年来该地区工农业、养殖业及港口等行业快速发展相关, 使渤海湾海域的生态环境发生了较大的变化, 富营养化加剧, 浮游植物大量繁殖. 这同时也表明, 渤海湾有赤潮暴发的潜在风险.

3.2 环境因子对浮游植物的影响

无论是浮游植物种类还是数量, 渤海湾春夏两季差异明显, 造成这种差异与环境因子相关. 浮游植物的生长受温度、盐度、光照、营养盐等环境因素的影响. 水温是影响浮游植物季节变化的重要环境因子^[21]. 硅藻是渤海湾浮游植物中最重要的浮游植物, 种类和数量均占到总数 95% 以上. 硅藻喜低温, 最适合的温度通常低于 18°C ^[22,23]. 春季, 渤海湾平均水温为 16°C , 是硅藻生长的理想温度, 能促进其大量繁殖, 形成明显的优势种. 因此, 春季浮游植物的数量远高于夏季. 这与 Sun 等^[24]报道的渤海浮游植物季变化受水温控制的结论相一致. 盐度又是另一个控制浮游植物季变化的重要环境因子^[25]. 渤海湾夏季的盐度较低, 这是由于夏季是丰水期, 大量的河水入海稀释了海水的盐度, 从而造成夏季盐度相对较低. 尽管近海的浮游植物多为广盐种类, 能适应各种盐度^[26], 然而, 它们也存在沿盐度梯度变化的特征^[27], 由此可以解释春季浮游植物数量高于夏季的原因. 以圆筛藻为例, 该藻在春夏两

季均是优势种,但春季的数量是夏季近 7 倍(表 3),这与其喜高盐度水域的生态习性相关^[28]. 营养盐也是一个影响浮游植物季节变化的重要环境因子^[29,30]. 在海洋生态系统中,浮游植物对氮磷的利用通常按照 Redfield 比率($N:P = 15:1$)进行,当氮磷比超过 15 时,磷是限制性因子,低 15 时,氮是限制性因子. 在本研究中, $N:P$ 比(DIN/SRP , DIN 为 3 个氮盐之和)春季为 128,夏季 46,均表现为磷限制. 春季 SRP 含量为 $0.004\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,明显低于夏季($0.018\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$),然而,春季的浮游植物数量($115 \times 10^4\text{ cells}\cdot\text{m}^{-3}$)却高于夏季($3.1 \times 10^4\text{ cells}\cdot\text{m}^{-3}$),似乎又不能确定磷是限制因子. 这可能与渤海春季的硅藻水华暴发造成营养盐急剧下降有关^[24],这也表明,浮游植物不仅受到环境因子的影响,它本身也影响着环境. 此外,水深和水体分层也对浮游植物的分布和生长产生影响. 春季,由于渤海湾风大,加之是枯水期,水深较低,在风的扰动下,水体混合明显,使底层的营养盐输送到表层,有利于浮游植物的生长繁殖;而在夏季,恰相反,风小且水深较高,水体分层明显,限制下层营养盐输送到上层,从而限制性浮游植物的生长. 这也是造成春季浮游植物明显高于夏季的原因.

与浮游植物季节变化受到的影响不同,春夏两季的浮游植物分布受不同的环境因子影响. 对渤海湾的浮游植物与环境因子的 RDA 分析表明,不同季节影响浮游植物分布的关键环境因子不同.

春季,影响浮游植物分布的关键环境因子是硝酸盐、亚硝酸盐和溶解性活性磷酸盐. 在本研究中,中华盒形藻、圆筛藻、布氏双尾藻和夜光藻是优势种,它们数量之和占到总数量的 98.45% (表 3). 由于优势种对整个群落具有控制性影响,因此分析优势种与环境的关系可以代表整个群落与环境的关系. 从排序图中可以看出,中华盒形藻、圆筛藻和布氏双尾藻距硝酸盐向量垂直距离最近,说明硝酸盐是影响它们的分布重要原因之一. 与此同时,3 种浮游植物与硝酸盐呈正相关(图 7),表明它们主要分布于硝酸盐含量较高海域. 造成 3 种优势浮游植物种的分布特征与它们的生态习性相关,它们均为硅藻,相关研究表明,硅藻偏好于硝酸盐丰富的水体,其快速增殖与硝酸盐的增加密切相关^[31,32]. 以布氏双尾藻为例,室内培养实验表明,在加入等量的不同的氮盐,硝酸盐更能提高布氏双尾藻的生长率^[33]. 因此,在 PCA 排序图中,这 3 种优势浮游植物主要分布于渤海湾中北部水域,特别是

河口附近,如 S19、S25 等(图 6),这几个站位在春季硝酸盐含量均较高(图 3). 夜光藻在 RDA 排序图上与溶解性活性磷酸盐呈正相关,表明夜光藻主要分布于磷酸盐含量较高的水域,同样与其生态习性相关. 夜光藻是一种甲藻,喜欢生活在磷浓度高的环境中^[34]. 因此在本研究中,夜光藻分布于渤海湾南部水域的站位(S7 ~ S11,图 6),这些站位的溶解性活性磷酸盐相对较高,特别是 S7,是所有站位中溶解性活性磷酸盐含量最高的,达到 $0.0091\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$.

夏季,氨氮和水温是控制渤海湾浮游植物分布的关键环境因子. 在本研究中,圆筛藻是夏季优势种之一,与氨氮关系最为密切,表明氨氮对圆筛藻影响最为明显. 圆筛藻夏季在渤海湾主要分布于南部的 S7 和北部的 S19,两站位均位于河口附近,由于夏季是丰水期,河流携带的大量营养盐入海,使其氨氮含量相对较高(图 3). 作为一种重要的氮源,氨氮同样影响浮游植物的生长繁殖,一方面,氨氮能被海洋浮游植物可直接利用,但利用程度取决于浮游植物种类^[35,36]. 在本研究中,圆筛藻与氨氮向量呈正相关(图 7),可以推测圆筛藻能够直接利用氨氮;另一方面,氨氮对生物产生直接或协同的毒性效应^[37]. 在本研究中,琼氏圆筛藻位于 RDA 排序图中左上角,与氨氮向量呈反方向,表明其可能受到氨氮的毒害作用,因此主要分布于氨氮含量较低的水域,即除了北部北塘河口(S19 ~ S24)以外的水域. 水温作为浮游植物生长发育的重要的环境因子,也影响浮游植物的分布^[21]. 格氏圆筛藻位于 RDA 排序图中的左下角,与水温呈正相关,表明其喜欢水温较高的海域. 通常认为硅藻喜欢栖息于水温较低的水域中^[22],但本研究发现,格氏圆筛藻却主要分布于水温较高的水域,如 S26、S27(图 3),这与其生态习性相关,因为它是广温性藻类,对水温适应范围很广,可以在不同的水温中生活^[28,38].

4 结论

(1) 渤海湾浮游植物数量时空差异明显,在季节上,春季浮游植物数量显著高于夏季;在空间上,春夏两季浮游植物数量均呈现从近海到外海降低的趋势.

(2) 春季浮游植物主要分布于营养盐较高的渤海湾中北部水域,夏季浮游植物分布于各个水域,但以河口附近的浮游植物数量较高.

(3) 渤海湾浮游植物分布受到环境因子的影

响,春季,硝酸盐、亚硝酸盐和溶解性活性磷酸盐对浮游植物影响最明显,而夏季则是氨氮和水温。

参考文献:

- [1] Tang D L, Kawamura H, Oh I S, *et al.* Satellite evidence of harmful algal blooms and related oceanographic features in the Bohai Sea during autumn 1998 [J]. *Advances in Space Research*, 2006, **37**(4): 681-689.
- [2] Richlen M L, Morton S L, Jamali E A, *et al.* The catastrophic 2008-2009 red tide in the Arabian Gulf region, with observations on the identification and phylogeny of the fish-killing dinoflagellate *Cochlodinium polykrikoides* [J]. *Harmful Algae*, 2010, **9**(2): 163-172.
- [3] Flewelling L J, Naar J P, Abbott J P, *et al.* Brevetoxicosis: red tides and marine mammal mortalities [J]. *Nature*, 2005, **435**(7043): 755-756.
- [4] Byun D S, Wang X H, Zavatarelli M, *et al.* Effects of resuspended sediments and vertical mixing on phytoplankton spring bloom dynamics in a tidal estuarine embayment [J]. *Journal of Marine Systems*, 2007, **67**(1-2): 102-118.
- [5] Paerl H W, Xu H, McCarthy M J, *et al.* Controlling harmful cyanobacterial blooms in a hyper-eutrophic lake (Lake Taihu, China): the need for a dual nutrient (N & P) management strategy [J]. *Water Research*, 2011, **45**(5): 1973-1983.
- [6] 费尊乐, 毛兴华, 朱明远, 等. 渤海生产力研究——I. 叶绿素 a 的分布特征与季节变化 [J]. *海洋学报*, 1988, **10**(1): 99-96.
- [7] 崔毅, 宋云科, 杨琴芳, 等. 渤海浮游植物与理化环境关系初探 [J]. *海洋环境科学*, 1992, **11**(3): 56-59.
- [8] 王俊. 渤海近岸浮游植物种类组成及其数量变动的研究 [J]. *海洋水产研究*, 2003, **24**(4): 44-50.
- [9] Borcard D, Legendre P, Drapeau P. Partialling out the spatial component of ecological variation [J]. *Ecology*, 1992, **73**(3): 1045-1055.
- [10] Nobes K, Uthicke S, Henderson R. Is light the limiting factor for the distribution of benthic symbiont bearing foraminifera on the Great Barrier Reef? [J]. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 2008, **363**(1-2): 48-57.
- [11] Wang L, Cai Q H, Xu Y Y, *et al.* Weekly dynamics of phytoplankton functional groups under high water level fluctuations in a subtropical reservoir-bay [J]. *Aquatic Ecology*, 2010, **45**(2): 197-212.
- [12] Xiao L J, Wang T, Hu R, *et al.* Succession of phytoplankton functional groups regulated by monsoonal hydrology in a large Canyon-shaped Reservoir [J]. *Water Research*, 2011, **45**(16): 5009-5019.
- [13] 国家质量监督检验检疫总局. 海洋调查规范 [M]. 北京: 中国标准出版社, 1992. 17-20.
- [14] APHA. Standard methods for the examination of water and wastewater (20th ed.) [M]. Washington: APHA-AWWA-WPCF, 1998. 408-509.
- [15] Leira M, Sabater S. Diatom assemblages distribution in catalan rivers, NE Spain, in relation to chemical and physiographical factors [J]. *Water Research*, 2005, **39**(1): 73-82.
- [16] Lepš J, Šmilauer P. Multivariate analysis of ecological data using CANOCO [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2003. 1-269.
- [17] Tang T, Cai Q H, Liu J K. Using epilithic diatom communities to assess ecological condition of Xiangxi River system [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2006, **112**(1-3): 347-361.
- [18] Duan L Q, Song J M, Li X G, *et al.* Distribution of selenium and its relationship to the eco-environment in Bohai Bay seawater [J]. *Marine Chemistry*, 2010, **121**(1-4): 87-99.
- [19] Peng S T, Dai M X, Hu Y D, *et al.* Long-term (1996-2006) variation of nitrogen and phosphorus and their spatial distributions in Tianjin Coastal Seawater [J]. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 2009, **83**(3): 416-421.
- [20] 杨世民, 董树刚, 李锋, 等. 渤海湾海域生态环境的研究 I. 浮游植物种类组成和数量变化 [J]. *海洋环境科学*, 2007, **26**(5): 442-445.
- [21] Dupuis A P, Hann B J. Warm spring and summer water temperatures in small eutrophic lakes of the Canadian prairies: potential implications for phytoplankton and zooplankton [J]. *Journal of Plankton Research*, 2009, **31**(5): 489-502.
- [22] Da Silva C A, Train S, Rodrigues L C. Phytoplankton assemblages in a Brazilian subtropical cascading reservoir system [J]. *Hydrobiologia*, 2005, **537**(1-3): 99-109.
- [23] Wasmund N, Tuimala J, Suikkanen S, *et al.* Long-term trends in phytoplankton composition in the western and central Baltic Sea [J]. *Journal of Marine Systems*, 2011, **87**(2): 145-159.
- [24] Sun J, Liu D Y, Qian S B. Preliminary study on seasonal succession and development pathway of phytoplankton community in the Bohai Sea [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2001, **20**(2): 251-260.
- [25] McQuoid M R. Influence of salinity on seasonal germination of resting stages and composition of microplankton on the Swedish west coast [J]. *Marine Ecology-Progress Series*, 2005, **289**(3): 151-163.
- [26] Balzano S, Sarno D, Kooistra W H C F. Effects of salinity on the growth rate and morphology of ten *Skeletonema* strains [J]. *Journal of Plankton Research*, 2011, **33**(6): 937-945.
- [27] Bergesch M, Garcia M, Odebrecht C. Diversity and morphology of *Skeletonema* species in Southern Brazil, Southwestern Atlantic Ocean [J]. *Journal of Phycology*, 2009, **45**(6): 1348-1352.
- [28] Varona-Cordero F, Gutiérrez-Mendieta F J, Del Castillo M E M. Phytoplankton assemblages in two compartmentalized coastal tropical lagoons (Carretas-Pereyra and Chantuto-Panzacola, Mexico) [J]. *Journal of Plankton Research*, 2010, **32**(9): 1283-1299.
- [29] Lope M, Chan K S, Ciannelli L, *et al.* Effects of environmental conditions on the seasonal distribution of phytoplankton biomass in the North Sea [J]. *Limnology and Oceanography*, 2009, **54**(2): 512-524.
- [30] 邱小琮, 赵红雪, 孙晓雪. 宁夏沙湖浮游植物与水环境因子

- 关系的研究[J]. 环境科学, 2012, **33**(7): 2265-2271.
- [31] Goldman J C. Potential role of large oceanic diatoms in new primary production [J]. Deep-Sea Research, 1993, **40**(1): 159-168.
- [32] Lomas M W, Glibert P M. Comparisons of nitrate uptake, storage, and reduction in marine diatoms and flagellates [J]. Journal of Phycology, 2000, **36**(5): 903-913.
- [33] Brussaard C P D, Brookes R, Noordeloos A A M, *et al.* Recovery of nitrogen-starved cultures of the diatom *Ditylum brightwellii* (Bacillariophyceae) upon nitrogen resupply [J]. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology, 1998, **227**(2): 237-250.
- [34] 蒲新明, 吴玉霖. 浮游植物的营养盐限制研究进展[J]. 海洋科学, 2000, **24**(2): 27-30.
- [35] Strom S L, Bright K J. Inter-strain differences in nitrogen use by the coccolithophore *Emiliania huxleyi*, and consequences for predation by a planktonic ciliate [J]. Harmful Algae, 2009, **8**(5): 811-816.
- [36] Balode M, Purina I, Beéchemin C, *et al.* Effects of nutrient enrichment on the growth rates and community structure of summer phytoplankton from the Gulf of Riga, Baltic Sea [J]. Journal of Plankton Research, 1998, **20**(12): 2251-2272.
- [37] Newman R M, Perry J A. The combined effects of chlorine and ammonia on litter breakdown in outdoor experimental streams [J]. Hydrobiologia, 1989, **184**(1-2): 69-78.
- [38] Choudhury A K, Pal R. Phytoplankton and nutrient dynamics of shallow coastal stations at Bay of Bengal, Eastern Indian coast [J]. Aquatic Ecology, 2010, **44**(1): 55-71.

CONTENTS

Estimation of PM _{2.5} over Eastern China from MODIS Aerosol Optical Depth Using the Back Propagation Neural Network	GUO Jian-ping, WU Ye-rong, ZHANG Xiao-ye, <i>et al.</i> (817)
Comparison of Atmospheric Particulate Matter and Aerosol Optical Depth in Beijing City	LIN Hai-feng, XIN Jin-yuan, ZHANG Wen-yu, <i>et al.</i> (826)
Impacts of Meteorological Factors on Atmospheric Methane Mole Fractions in the Background Area of Yangtze River Delta	PU Jing-jiao, XU Hong-hui, GU Jun-qiang, <i>et al.</i> (835)
Dispersion and Analysis of Odor Pollution in Landfill Area Under the Enclosed Operation Condition	LU Peng, WU Shi-xing, DAI Zhi-feng, <i>et al.</i> (842)
Distribution Characteristics and Sea-Air Fluxes of Volatile Halocarbons in the East China Sea in Winter	HE Zhen, LU Xiao-lan, YANG Gui-peng (849)
Intra- and Inter-annual Variabilities of Particulate Organic Matter in the Mirs Bay from 2000 to 2010	LI Xu-lu, ZHOU Yi-pin, XIA Hua-yong (857)
Phytoplankton Assemblages and Their Relation to Environmental Factors by Multivariate Statistic Analysis in Bohai Bay	ZHOU Ran, PENG Shi-tao, QIN Xue-bo, <i>et al.</i> (864)
Characteristics and Evolution of Hydrochemical Compositions of Freshwater Lake in Tibetan Plateau	WANG Peng, SHANG Ying-nan, SHEN Li-cheng, <i>et al.</i> (874)
Estimation of Nonpoint Source Pollutant Loads and Optimization of the Best Management Practices (BMPs) in the Zhangweinan River Basin	XU Hua-shan, XU Zong-xue, LIU Pin (882)
An Object-Oriented Intelligent Engineering Design Approach for Lake Pollution Control	ZOU Rui, ZHOU Jing, LIU Yong, <i>et al.</i> (892)
Contribution of Plant Litters to Sediments Organic Matter in Jiulong River Estuary Wetland	LUO Zhuan-xi, QIU Zhao-zheng, WANG Zhen-hong, <i>et al.</i> (900)
Application of Tiered Approach to Assess the Impact of Backfilling Remediated Soil on Groundwater	ZHONG Mao-sheng, JIANG Lin, YAO Jue-jun, <i>et al.</i> (907)
Removal of Nitrate from Groundwater Using Permeable Reactive Barrier	LI Xiu-li, YANG Jun-jun, LU Xiao-xia, <i>et al.</i> (914)
Research on Pollution Load of Sediments in Storm Sewer in Beijing District	LI Hai-yan, XU Bo-ping, XU Shang-ling, <i>et al.</i> (919)
Occurrence and Risk Assessment of Five Selected PPCPs in Municipal Wastewater Treatment Plant and the Receiving Water	WEN Zhi-hao, DUAN Yan-ping, MENG Xiang-zhou, <i>et al.</i> (927)
Microbial Risk Assessment of Urban Water Bodies for Aesthetical and Recreational Uses	SUN Fu, SHA Jing, ZHANG Yi-fan, <i>et al.</i> (933)
Study on Removal of Di-(2-Ethylhexyl) Phthalate by Using of Small-Scale Biological Aerated Filter	LI Wei, ZHAO Jing, YU Jian, <i>et al.</i> (943)
Mechanism of Membrane Fouling and Filtration Characteristics in a Membrane Bioreactor for Industrial Wastewater Treatment	FAN Ju-hong, YU Su-lin, ZHANG Pei-shuai, <i>et al.</i> (950)
Enhanced Electro-Chemical Oxidation of Acid Red 3R Solution with Phosphotungstic Acid Supported on γ -Al ₂ O ₃	YUE Lin, WANG Kai-hong, GUO Jian-bo, <i>et al.</i> (955)
Degradation Kinetics of Activated Carbon Catalyzed Persulfate Oxidation Orange G	YANG Mei-mei, ZHOU Shao-qi, LIU Dan, <i>et al.</i> (962)
Study on the Start-up of the Anaerobic Baffled Reactor for Treating Alkali-dewighting and Dyeing-printing Wastewater	YANG Bo, ZHONG Qi-jun, LI Fang, <i>et al.</i> (968)
Study on the Pollutants Removal Performance Along the Advanced Treatment in Tannery Wastewater by O ₃ -BAF	YU Bin, LIU Rui, CHENG Jia-di, <i>et al.</i> (974)
Effect of Pilot UASB-SFSBR-MAP Process for the Large Scale Swine Wastewater Treatment	WANG Liang, CHEN Chong-jun, CHEN Ying-xu, <i>et al.</i> (979)
Cultivation of Aerobic Granular Sludge with Municipal Wastewater and Studies on Its Characteristics Under the Continuous Flow	NIU Shu, DUAN Bai-chuan, ZHANG Zuo-li, <i>et al.</i> (986)
Kinetic Model of Enhanced Biological Phosphorus Removal with Mixed Acetic and Propionic Acids as Carbon Sources (I) : Model Constitution	ZHANG Chao, CHEN Yin-guang (993)
Kinetic Model of Enhanced Biological Phosphorus Removal with Mixed Acetic and Propionic Acids as Carbon Sources (II) : Process Simulation	ZHANG Chao, CHEN Yin-guang (998)
Kinetic Model of Enhanced Biological Phosphorus Removal with Mixed Acetic and Propionic Acids as Carbon Sources (III) : Model Application	ZHANG Chao, CHEN Yin-guang (1004)
Comparative Study on Water-air CO ₂ , CH ₄ Flux in Two Tributaries in the Three Gorges Reservoir, China	LI Zhe, BAI Lei, GUO Jin-song, <i>et al.</i> (1008)
Factors Influencing the Spatial Variability in Soil Respiration Under Different Land Use Regimes	CHEN Shu-tao, LIU Qiao-hui, HU Zheng-hua, <i>et al.</i> (1017)
Differences in Soil Respiration Between Cropland and Grassland Ecosystems and Factors Influencing Soil Respiration on the Loess Plateau	ZHOU Xiao-gang, ZHANG Yan-jun, NAN Ya-fang, <i>et al.</i> (1026)
Application and Benefit Evaluation of Tiered Health Risk Assessment Approach on Site Contaminated by Benzene	JIANG Lin, ZHONG Mao-sheng, LIANG Jin, <i>et al.</i> (1034)
History of Heavy Metal Pollution from Tidal Flat in Haizhou Bay	ZHANG Rui, ZHANG Fan, LIU Fu-cheng, <i>et al.</i> (1044)
Accumulation, Distribution and Pollution Assessment of Heavy Metals in Surface Sediment of Caohai Plateau Wetland, Guizhou Province	ZHANG Qing-hai, LIN Chang-hu, TAN Hong, <i>et al.</i> (1055)
Assessment and Correlation Analysis of Heavy Metals Pollution in Soil of Dajinshan Island	CHENG Fang, CHENG Jin-ping, SANG Heng-chun, <i>et al.</i> (1062)
Fraction Distribution and Risk Assessment of Heavy Metals in Stream Sediments from a Typical Nonferrous Metals Mining City	LI Ru-zhong, JIANG Yan-min, PAN Cheng-rong, <i>et al.</i> (1067)
Contamination and Health Risk for Heavy Metals via Consumption of Vegetables Grown in Fragmentary Vegetable Plots from a Typical Nonferrous Metals Mine City	LI Ru-zhong, PAN Cheng-rong, XU Jing-jing, <i>et al.</i> (1076)
Correlativity Study of the Distribution of Soil Magnetic Susceptibility and the Heavy Metal Contents in Xi'an City	CHEN Xiu-duan, LU Xin-wei, YANG Guang (1086)
Distribution Characteristics and Environmental Significance of Heavy Metals in Soil Particle Size Fractions from Tropical Forests in China	GONG Cang, XU Dian-dou, CHENG Hang-xin, <i>et al.</i> (1094)
Study on Phosphorus Adsorption Characteristic of Sediments in an Ecological Ditch	ZHANG Shu-nan, JIA Zhao-yue, XIAO Run-lin, <i>et al.</i> (1101)
Fractions and Adsorption Characteristics of Phosphorus on Sediments and Soils in Water Level Fluctuating Zone of the Pengxi River, a Tributary of the Three Gorges Reservoir	SUN Wen-bin, DU Bin, ZHAO Xiu-lan, <i>et al.</i> (1107)
Sorption Behavior of Triton X-100 on Loess and Affecting Factors	ZHONG Jin-kui, ZHAO Bao-wei, ZHU Kun, <i>et al.</i> (1114)
Residual Levels in Air, Soil and Soil-Air Exchange of Organochlorine Pesticides in Hami Region of Xinjiang and Its Potential Ecological Risk	MA Zi-long, MAO Xiao-xuan, DING Zhong-yuan, <i>et al.</i> (1120)
Levels and Sources of Decabromodiphenyl Ether and Dechlorane Plus in Xining and Tianjun, Qinghai Province, China	HE Chang, JIN Jun, MA Zhao-hui, <i>et al.</i> (1129)
Vertical Distribution of PBDEs and DL-PCBs in Sediments of Taihu Lake	MA Zhao-hui, JIN Jun, QI Xue-kui, <i>et al.</i> (1136)
Characteristics of Organic Pollutants in the Sediments from a Typical Electronics Industrial Zone	LIU Jin, DENG Dai-yong, XU Mei-ying, <i>et al.</i> (1142)
Emission Characteristics of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Exhaust Particles from a Diesel Car	TAN Pi-qiang, ZHOU Zhou, HU Zhi-yuan, <i>et al.</i> (1150)
Characterization of PAHs in Fly Ashes from Coke Production	MU Ling, PENG Lin, LIU Xiao-feng, <i>et al.</i> (1156)
Comparison of PAHs Distribution in Stabilized Sludge by Sludge Drying Bed and Reed Bed	CUI Yu-bo, SUN Hong-jie, RAN Chun-qiu, <i>et al.</i> (1161)
Effects of Adsorbents on Partitioning and Fixation of Heavy Metals in the Incineration Process of Sewage Sludge	LIU Jing-yong, SUN Shui-yu, CHEN Tao (1166)
Environmental Toxicity of Waste Foundry Sand	ZHANG Hai-feng, WANG Yu-jue, WANG Jin-lin, <i>et al.</i> (1174)
Construction and Properties of a Microbial Whole-cell Sensor CB10 for the Bioavailability Detection of Cr ⁶⁺	HOU Qi-hui, MA An-zhou, ZHUANG Xu-liang, <i>et al.</i> (1181)
Structure and Dynamics of Microbial Community in the Denitrifying Sulfide Removal Process	YU Hao, WANG Ai-jie, CHEN Chuan (1190)
Effects of Physico-chemical Parameters on the Abundance of the Denitrification-associated Genes <i>nirK</i> , <i>nirS</i> and <i>nosZ</i> During Agricultural Waste Composting	HU Chun-xiao, CHEN Yao-ning, ZHANG Jia-chao, <i>et al.</i> (1196)
Impact of PAHs on the Expression of PRDX in Earthworm (<i>Eisenia fetida</i>)	LIN Kang-li, ZHENG Sen-lin, SONG Yu-fang, <i>et al.</i> (1204)
Preparation of OMC-Au/L-Lysine/Au Modified Glassy Carbon Electrode and the Study on Its Detection Response to Hydroquinone and Catechol	ZHOU Yao-yu, TANG Lin, LI Zhen, <i>et al.</i> (1211)
Risk Communication in Construction of New Nuclear Power Plant	HE Gui-zhen, LÜ Yong-long (1218)

《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)

2013年3月15日 34卷 第3期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 34 No. 3 Mar. 15, 2013

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: 90.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发刊