

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

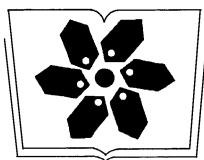
Acta Ecologica Sinica



第33卷 第15期 Vol.33 No.15 **2013**

中国生态学学会
中国科学院生态环境研究中心
科学出版社

主办
出版



中国科学院科学出版基金资助出版

生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

第 33 卷 第 15 期

2013 年 8 月 (半月刊)

目次

前沿理论与学科综述

- 红树林生态系统遥感监测研究进展..... 孙永光,赵冬至,郭文永,等 (4523)
- 基于能值分析方法的都市代谢过程研究——理论与方法 刘耕源,杨志峰,陈 彬 (4539)
- 关于生态文明建设与评价的理论思考 赵景柱 (4552)

个体与基础生态

- 长江口及邻近海域秋冬季小型底栖动物类群组成与分布..... 于婷婷,徐奎栋 (4556)
- 灌河口邻近海域春季浮游植物的生态分布及其营养盐限制..... 方 涛,贺心然,冯志华,等 (4567)
- 春季海南岛近岸海域尿素与浮游生物的脲酶活性..... 黄凯旋,张云,欧林坚,等 (4575)
- 模拟酸雨对蒙古栎幼苗生长和根系伤流量的影响..... 梁晓琴,刘 建,丁文娟,等 (4583)
- 有机酸类化感物质对甜瓜的化感效应..... 张志忠,孙志浩,陈文辉,等 (4591)
- 稻田土壤氧化态有机碳组分变化及其与甲烷排放的关联性..... 吴家梅,纪雄辉,霍莲杰,等 (4599)
- 双氰胺单次配施和连续配施的土壤氮素形态和蔬菜硝酸盐累积变化..... 王煌平,张 青,翁伯琦,等 (4608)
- 不同类型土壤中分枝杆菌噬菌体分离率的比较..... 徐凤宇,苏胜兵,马红霞,等 (4616)
- 模拟酸雨对小麦产量及籽粒蛋白质和淀粉含量及组分的影响 卞雅姣,黄 洁,孙其松,等 (4623)
- 麻花秦艽种子休眠机理及其破除方法 李兵兵,魏小红,徐 严 (4631)
- 4 种金色叶树木对 SO₂ 胁迫的生理响应 种培芳,苏世平 (4639)
- 硫丹及其主要代谢产物对紫色土中酶活性的影响..... 熊佰炼,张进忠,代 娟,等 (4649)

种群、群落和生态系统

- 群落水平食物网能流季节演替特征..... 徐 军,周 琼,温周瑞,等 (4658)
- 千岛湖岛屿社鼠的种群数量动态特征..... 张 旭,鲍毅新,刘 军,等 (4665)
- 黄土丘陵沟壑区不同植被区土壤生态化学计量特征..... 朱秋莲,邢肖毅,张 宏,等 (4674)
- 青藏高原高寒草甸退化与人工恢复过程中植物群落的繁殖适应对策..... 李媛媛,董世魁,朱 磊,等 (4683)
- 杉木人工林土壤质量演变过程中土壤微生物群落结构变化..... 刘 丽,徐明恺,汪思龙,等 (4692)
- 不同玉米品种(系)对玉米蚜生长发育和种群增长的影响 赵 曼,郭线茹,李为争,等 (4707)
- 伏牛山自然保护区森林冠层结构对林下植被特征的影响..... 卢训令,丁圣彦,游 莉,等 (4715)
- 内蒙古武川县农田退耕还草对粪金龟子群落的影响 刘 伟,门丽娜,刘新民 (4724)
- 铜和营养缺失对海州香薷两个种群生长、耐性及矿质营养吸收的差异影响 柯文山,陈世俭,熊治廷,等 (4737)
- 新疆喀纳斯国家自然保护区植被叶面积指数观测与遥感估算..... 咎 梅,李登秋,居为民,等 (4744)

景观、区域和全球生态

基于 LUCC 的生态系统服务空间化研究——以张掖市甘州区为例 梁友嘉,徐中民,钟方雷,等 (4758)

人工管理和自然驱动下盐城海滨湿地互花米草沼泽演变及空间差异 张华兵,刘红玉,侯明行 (4767)

基于 PCA 的滇西北高原纳帕海湿地退化过程分析及其评价 尚 文,杨永兴,韩大勇 (4776)

基于遥感和地理信息系统的图们江地区生态安全评价..... 南 颖,吉 喆,冯恒栋,等 (4790)

呼中林区森林景观的历史变域模拟及评价..... 吴志丰,李月辉,布仁仓,等 (4799)

降水时间对内蒙古温带草原地上净初级生产力的影响..... 郭 群,胡中民,李轩然,等 (4808)

研究简报

我国中东部不同气候带成熟林凋落物生产和分解及其与环境因子的关系.....

..... 王健健,王永吉,来利明,等 (4818)

期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 304 * zh * P * ¥90.00 * 1510 * 32 * 2013-08



封面图说:石质山区的退耕还林——桂西北地区是我国喀斯特集中分布的地区之一,这里的石漠化不仅造成土地退化、土壤资源逐步消失、干旱缺水和土地生产力下降,而且还导致生态系统退化和植被消亡。桂西北严重的地质生态环境问题,威胁着当地居民的基本生存,严重制约了当地社会经济的发展。增加植被覆盖是防治石漠化的重要举措。随着国家退耕还林、生态移民等治理措施的实施,区域植被碳密度显著增加,生态环境有所好转。图为喀斯特地区农民见缝插针用来耕种的鸡窝地(指小、碎、分散的土地),已经退耕还林了。

彩图及图说提供:陈建伟教授 北京林业大学 E-mail: cites.chenjw@163.com

DOI: 10.5846/stxb201205020627

方涛, 贺心然, 冯志华, 陈斌林. 灌河口邻近海域春季浮游植物的生态分布及其营养盐限制. 生态学报, 2013, 33(15): 4567-4574.

Fang T, He X R, Feng Z H, Chen B L. Ecological distribution and nutrient limitation of phytoplankton in adjacent sea of Guanhe Estuary in spring. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(15): 4567-4574.

灌河口邻近海域春季浮游植物的生态分布 及其营养盐限制

方 涛^{1,*}, 贺心然², 冯志华¹, 陈斌林³

(1. 淮海工学院江苏省海洋生物技术重点实验室, 连云港 222005;

2. 连云港市环境监测中心站, 连云港 222001; 3. 连云港市环境保护局, 连云港 222001)

摘要: 2011 年 4 月通过灌河口邻近海域的现场调查及营养加富培养实验, 研究了春季灌河口邻近海域浮游植物生态分布特征以及硝酸盐、磷酸盐对浮游植物生长的限制作用, 结果表明: 共发现浮游植物 68 种, 其中硅藻 61 种, 优势度最高的为中肋骨条藻 (*Skeletonema costatum*, $Y=0.53$), 各个站位浮游植物的丰度介于 0.84×10^6 — 2.25×10^6 个/L, 均值为 1.54×10^6 个/L, 种类范围为 29—39 种, 均值为 35 种, 叶绿素 a 浓度呈现近岸高外海低的特征, 在 2.66 — $6.67 \mu\text{g/L}$ 变化, 均值为 $3.89 \mu\text{g/L}$, 多样性指数介于 2.60 — 3.79 , 均值为 3.20 , 海域环境基本适宜浮游植物的生长; 调查海域磷酸盐浓度的范围为 0.35 — $0.90 \mu\text{mol/L}$, 均值为 $0.58 \mu\text{mol/L}$, 亚硝酸盐浓度范围为 1.57 — $3.93 \mu\text{mol/L}$, 均值为 $3.08 \mu\text{mol/L}$, 两者分布均具有近岸高外海低的特征; 铵盐浓度范围为 3.14 — $5.43 \mu\text{mol/L}$, 均值为 $3.95 \mu\text{mol/L}$, 其分布则是近岸低外海高; 硝酸盐浓度严重偏高, 在 31.21 — $37.00 \mu\text{mol/L}$ 之间变化, 均值为 $34.55 \mu\text{mol/L}$, 导致调查区域具有高 N/P 比 (42 — 112), 且浮游植物叶绿素 a 与磷酸盐浓度有显著的正相关 ($R^2=0.80$), 而与无机氮线性关系不明显 ($R^2=0.11$); 在 P 加富培养实验中, 磷酸盐在 3 个培养组 (对照, +P, ++P) 中的比吸收速率分别为 0.36 、 0.43 、 0.51d^{-1} , 加 P 促进了 P 本身的吸收, 硝酸盐和亚硝酸盐的吸收也得以促进, 但没有磷酸盐那么显著, 而铵盐浓度基本呈增加趋势, P 的添加也促进了藻类的生长, 培养结束后叶绿素 a 浓度最大值分别为 77.24 、 90.57 、 $96.49 \mu\text{g/L}$ 。在 N 加富培养实验中, 硝酸盐的比吸收速率分别为 0.39 、 0.049 、 0.025d^{-1} , 加 N 未促进硝酸盐本身的吸收, 磷酸盐浓度在 3 个实验组变化曲线相似, 其吸收也没有得到促进, 亚硝酸盐在加 N 组中浓度是增加的, 培养结束后加 N 组 (+N, ++N) 叶绿素 a 浓度最大值分别为 72.31 、 $69.62 \mu\text{g/L}$, 都小于对照组, N 的添加也未促进藻类的生长。上述研究表明了春季灌河口邻近海域浮游植物的生长主要受到 P 的限制, 而不是 N 限制。

关键词: 灌河口; 浮游植物; 磷酸盐; 硝酸盐

Ecological distribution and nutrient limitation of phytoplankton in adjacent sea of Guanhe Estuary in spring

FANG Tao^{1,*}, HE Xinran², FENG Zhihua¹, CHEN Binlin³

1 Jiangsu Key Laboratory of Marine Biotechnology, Huaihai Institute of Technology, Lianyungang 222005, China

2 Lianyungang Environmental Center Monitoring Station, Lianyungang 222001, China

3 Lianyungang Environmental Protection Bureau, Lianyungang 222001, China

Abstract: In April 2011, field investigation and laboratory nutrient enrichment incubation experiments were carried out to study the phytoplankton ecology and the possible nutrient limitation to the phytoplankton growth, in adjacent sea of Guanhe Estuary. A total of 68 species were identified during the investigation, of which 61 species were Bacillariophyta and the first

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目 (40906054); 江苏省环保厅项目 (2010043); 河口海岸学国家重点实验室开放基金资助项目 (SKLEC-KF201208); 淮海工学院江苏省海洋生物技术重点实验室研究基金 (2010HS12)

收稿日期: 2012-05-02; 修订日期: 2012-10-23

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: tomtaofang@163.com

dominant species was *Skeletonema costatum*. The phytoplankton cell density at each station ranged from 0.84×10^6 to 2.25×10^6 ind/L, with an average value of 1.54×10^6 ind/L. The amounts of species at each station ranged from 29 to 39 and were averaged to be 35. Chlorophyll *a* concentrations ranged from 2.66 to 6.67 $\mu\text{g/L}$ and were averaged to be 3.89 $\mu\text{g/L}$, and high values were mainly found at inshore stations. The calculated Shannon-Wiener index ranged from 2.60 to 3.79 with an average value of 3.20, which showed that, during the sampling period the ecological environment in the study area was basically suitable for the phytoplankton growth. Concentrations of phosphate and nitrite measured during the investigation were in the range of 0.35 to 0.90 $\mu\text{mol/L}$ and 1.57 to 3.93 $\mu\text{mol/L}$ and were averaged to be 0.58 and 3.08 $\mu\text{mol/L}$, respectively, and both the two nutrients generally showed higher concentrations at inshore stations than at offshore stations. At the same time, the concentrations of ammonium, ranged from 3.14 to 5.43 $\mu\text{mol/L}$ and were averaged to be 3.95 $\mu\text{mol/L}$, seemed to show an opposite trend that higher concentrations were generally observed at offshore stations rather than at inshore stations. The concentrations of nitrate at each station ranged from 31.21 to 37.00 $\mu\text{mol/L}$ and averaged to be at 34.55 $\mu\text{mol/L}$, and these high concentrations resulted in high N/P ratios of 42 to 112 for the study areas. Concentrations of chlorophyll *a* and phosphate were significantly and linearly correlated ($R^2 = 0.80$), while such relationship was not observed for the two parameters of chlorophyll and DIN (nitrate + nitrite + ammonium). In the phosphate-enriched incubations, the addition of phosphate stimulated its uptake rates in the three groups, i. e., Blank, +P, and ++P with rate values of 0.36, 0.43, and 0.51 d^{-1} , respectively. The uptake rates of nitrate and nitrite were also elevated, although not as evident as that of phosphate. During these incubations, ammonium concentrations showed an increasing trend, probably ascribed to the release of phytoplankton. The addition of phosphate also enhanced the phytoplankton growth, with the chlorophyll *a* peak values of 77.24, 90.57, 96.49 $\mu\text{g/L}$, respectively, for the three experimental groups at the end of incubations. During the incubation of nitrate enrichment, the addition of nitrate failed to promote its own uptake rates, with rates values of 0.39, 0.049, 0.025 d^{-1} for the three groups. And in these nitrate-enriched experiments, the variation curves of phosphate concentrations were similar, suggesting that the addition of nitrate also did not promote the phosphate uptakes. The concentration of nitrite increased because phytoplankton could release nitrite, and nitrite concentrations did not increase in groups of P addition might be due to the absence of N, and the released nitrite could be used for the growth of phytoplankton. The ammonium concentration was also roughly increased. The addition of nitrate did not promote phytoplankton growth, with the chlorophyll *a* peak value of 72.31 and 69.62 $\mu\text{g/L}$, respectively, for the groups of +N and ++N at the end of incubations, which were lower than that of the blank. These results of nutrient enrichment incubation experiments showed that the growth of phytoplankton was P-limited rather than N-limited, in adjacent sea of Guanhe Estuary in spring.

Key Words: Guanhe Estuary; phytoplankton; phosphate; nitrate

在不同环境下的河口,限制浮游植物初级生产的营养元素往往不同。如有学者在对北 Carolina 州的河口研究发现,N 是这些河口系统主要限制因子,P 偶尔发生协同发展^[1],但 Smith 指出有一些河口海岸最终 P 将限制初级生产力^[2],而 Chesapeake 湾,春季硅藻水花由可溶性硅所控制^[3]。长江口过高 N/P 使江口外沿的浮游植物受到 P 限制^[4],黄河口区 5 月和 8 月份 N/P 变化范围分别是 10—140 和 30—300,明显高于正常值 16^[5]。而珠江口海域丰富的氮、磷、硅和较高的 N/P 均可能是形成该海域多年来浮游植物群落以硅藻类占优势的主要原因^[6]。相比而言,灌河口相关研究就显得十分缺乏。目前灌河口及上游地区形成了较为发达的工业园区,大量工业污水的排放势必对邻近海域的生态环境产生重要影响。因此开展相关海域环境调查尤其是浮游植物的生态分布及营养盐限制的研究就显得十分有意义。

1 站位与方法

1.1 研究站位与分析方法

2011 年 4 月于灌河口邻近海域共设置现场调查站位 7 个(图 1),浮游植物采用浅水 III 型浮游生物网从

底至表层垂直拖网获取和采水器采集表层水样 500mL,现场用 5% 福尔马林溶液固定,在实验室进行种类鉴定及个体计数,另取表层水样经 $0.45\mu\text{m}$ 孔径的醋酸纤维滤膜过滤,滤液储存于 125mL 聚乙烯塑料瓶中,用于测定磷酸盐、铵盐、亚硝酸盐和硝酸盐,滤膜储存于 10mL 离心管,用于萃取测定叶绿素 a。

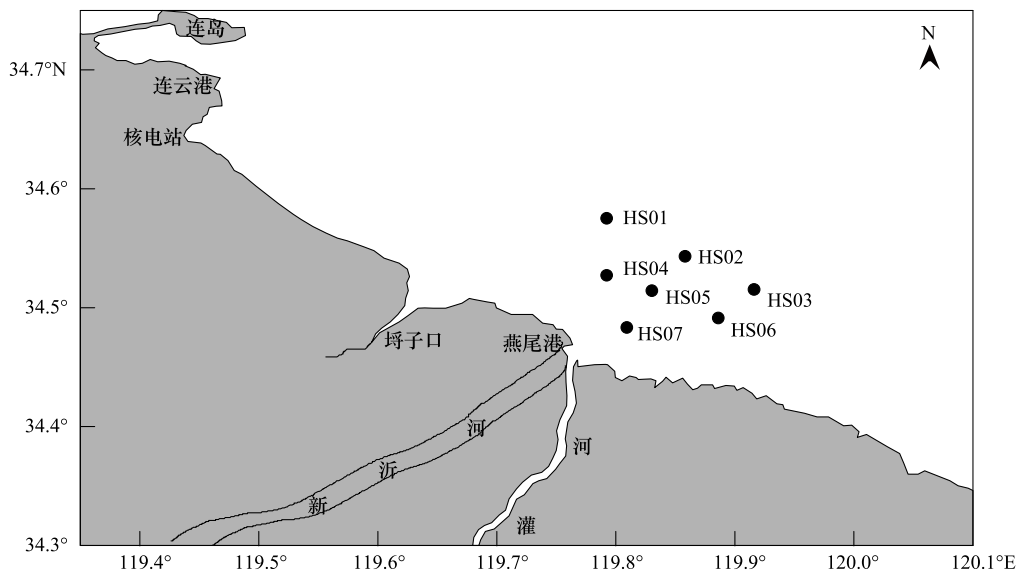


图1 现场采样站位

Fig.1 Sampling Locations

各监测指标的样品采集、预处理、分析与鉴定均按《海洋监测规范》(GB17378.1—7—1998)和相关标准方法进行。磷酸盐测定采用磷钼蓝法,氨的测定采用靛酚蓝法,亚硝酸盐的测定采用 α -萘-乙二胺-偶氮法,硝酸盐首先经过镉-铜柱还原为亚硝酸盐,而后同上述测定亚硝酸盐的方法分析。叶绿素 a 于 630nm、647nm、664nm、752nm 波长下分别测定吸收度值,按下述公式计算:

$$\text{Chla} = 11.85E_{664} - 1.54E_{647} - 0.08E_{630}$$

叶绿素 a 单位为 $\mu\text{g/L}$ 。式中, E 为经 750nm 波长校正后的吸光值,即 E 值应扣除 E_{750} 的数值。

现场培养实验开展于 HS05 站位,取表层海水经孔径为 $100\mu\text{m}$ 的筛绢滤出较大型浮游生物的明显干扰^[7],混匀后分装入 5 个 5L 透明塑料瓶中。根据以往灌河口海域氮磷营养盐浓度变化范围的数据资料^[8],确定往培养瓶中添加不同量的 5mmol/L NaH_2PO_4 溶液或 0.4 mol/L NaNO_3 溶液,使得培养瓶中磷酸盐和硝酸盐处于不同的浓度水平(表 1)。培养瓶固定在岸边通有循环海水的水槽中,循环海水是由泵不断从海上抽取的表层海水,从而使培养介质的温度与现场海水相近。

表1 实验组的设计

Table 1 The design of experimental groups

实验组 Experimental groups	加 5mmol/L NaH_2PO_4 体积数/mL Volumes of 5mmol/L NaH_2PO_4 added	加 0.4 mol/L NaNO_3 体积数/mL Volumes of 0.4 mol/L NaNO_3 added
对照 Blank	—	—
+P	0.75	—
++P	1.00	—
+N	—	0.75
++N	—	1.00

培养实验从 23 日 22:00 开始至 28 日 11:00 结束,培养过程天气晴好。每次采样前先摇动培养瓶,以使水样混匀,并用光照度计测量当日的自然光强,现场培养实验的测定参数主要包括 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2\text{-N}$ 、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 、 $\text{PO}_4\text{-P}$ 和叶绿素 a。现场试验记录如表 2。

表 2 现场加富培养实验记录

Table 2 Records of *In situ* experiments

采样时间 Sampling time	采样体积/mL Sampling volumes	水槽水温/℃ Water temperature	光照度/lx Sunlight intensity
22:00, 23rd	300	16.7	—
11:00, 24th	300	17.8	720×10 ²
22:00, 24th	300	16.8	—
11:00, 25th	300	17.1	740×10 ²
22:00, 25th	300	16.2	—
11:00, 26th	200	17.6	680×10 ²
22:00, 26th	200	16.5	—
11:00, 27th	200	17.4	680×10 ²
11:00, 28th	200	17.6	590×10 ²

1.2 数据处理

1.2.1 Shannon-Weaver 多样性指数 (H) 和优势度指数 (Y) 计算公式分别如下:

$$H = - \sum_{i=1}^s \left(\frac{n_i}{N} \right) \log_2 \left(\frac{n_i}{N} \right), Y = f_i \left(\frac{n_i}{N} \right)$$

式中, S 为样品中的种类总数, n_i 为第 i 种浮游植物的密度, f_i 为该种在各站位出现的频率, N 为浮游植物总密度。

1.2.2 营养盐的吸收速率用以下公式计算^[9]:

$$\mu = \frac{\ln \frac{N_t}{N_0}}{t - t_0}$$

式中, μ 为比吸收速率, N_t 和 N_0 分别为 t (结束) 和 t_0 (起始) 时刻营养盐浓度。

2 结果与讨论

2.1 浮游植物的生态分布

春季调查海域共鉴定出浮游植物 6 门 24 科 36 属 68 种, 其中硅藻门 29 属 61 种, 占总种类数的 89.71%, 其次为甲藻和绿藻, 各有 2 种, 其他金藻门、蓝藻门和裸藻门各有 1 种, 硅藻在浮游植物种类组成及群落结构中占有重要地位。整个调查海域优势种类 ($Y \geq 0.02$) 共 15 种。主要优势种类为中肋骨条藻 (*Skeletonema costatum*)、冰河拟星杆藻 (*Asterionellopsis glacialis*)、长菱形藻 (*Nitzschia longissima*)、尖刺伪菱形藻 (*Pseudo-Nitzschia pungens*)、新月菱形藻 (*Nitzschia closterium*)、刚毛根管藻 (*Rhizosolenia setigera*)、舟形鞍链藻 (*Campylosira cymbelliformis*), 优势度分别达 0.53、0.21、0.083、0.080、0.076、0.059、0.056。

春季调查海域浮游植物的丰度范围为 0.84×10^6 — 2.25×10^6 个/L, 均值为 1.54×10^6 个/L, 种类范围为 29—39 种, 均值为 35 种, 丰度和种类数从整个调查区域来看, 都主要呈现西边高东边低的特征; 浮游植物的多样性指数变化范围为 2.60—3.79, 均值为 3.20, 呈现出北边低南边高的特征, 在所有采样站位中只有 HS01 和 HS02 两站的多样性指数介于 2 和 3 之间, 属于轻度污染, 其它站位的多样性指数介于 3 和 4 之间, 属于清洁状态, 本区海域环境尚适宜浮游植物的生长。浮游植物叶绿素 a 浓度范围为 2.66—6.67 $\mu\text{g/L}$, 平均值为 3.89 $\mu\text{g/L}$, 总体呈现近岸高外海低的特征 (图 2)。

2.2 氮磷营养盐的分布及其对浮游植物的限制

调查海域磷酸盐浓度的范围为 0.35—0.90 $\mu\text{mol/L}$, 平均值为 0.58 $\mu\text{mol/L}$, 亚硝酸盐浓度范围为 1.57—3.93 $\mu\text{mol/L}$, 平均值为 3.08 $\mu\text{mol/L}$, 两者分布均具有近岸高外海低的特征; 铵盐浓度范围为 3.14—5.43 $\mu\text{mol/L}$, 平均值为 3.95 $\mu\text{mol/L}$, 其分布则是近岸低外海高; 硝酸盐浓度在 31.2—37.00 $\mu\text{mol/L}$ 之间变化, 平均值为 34.55 $\mu\text{mol/L}$, 整个分布大小比较近似, 差异不明显 (图 2)。

可以看出春季灌河口邻近海域无机氮 ($\text{DIN} = \text{NO}_3\text{-N} + \text{NO}_2\text{-N} + \text{NH}_4\text{-N}$) 浓度严重偏高, 均超出四类标准 (《海水水质标准》(GB 3097—1997)), 磷酸盐浓度相对较低, 均未超出二类标准, 这可能与灌河径流的变化以及浮游植物的数量有关系, 春季灌河进入汛期, 径流量大, 对河口污染物起到一定的稀释作用, 而春季又是浮游植物旺发时期, 丰度较高的浮游植物会消耗一定量的磷酸盐, 而无机氮绝对浓度较高, 因此导致调查区域 N/P 比严重偏高 (图 2), 最小值为 42, 最大值可达到 112。

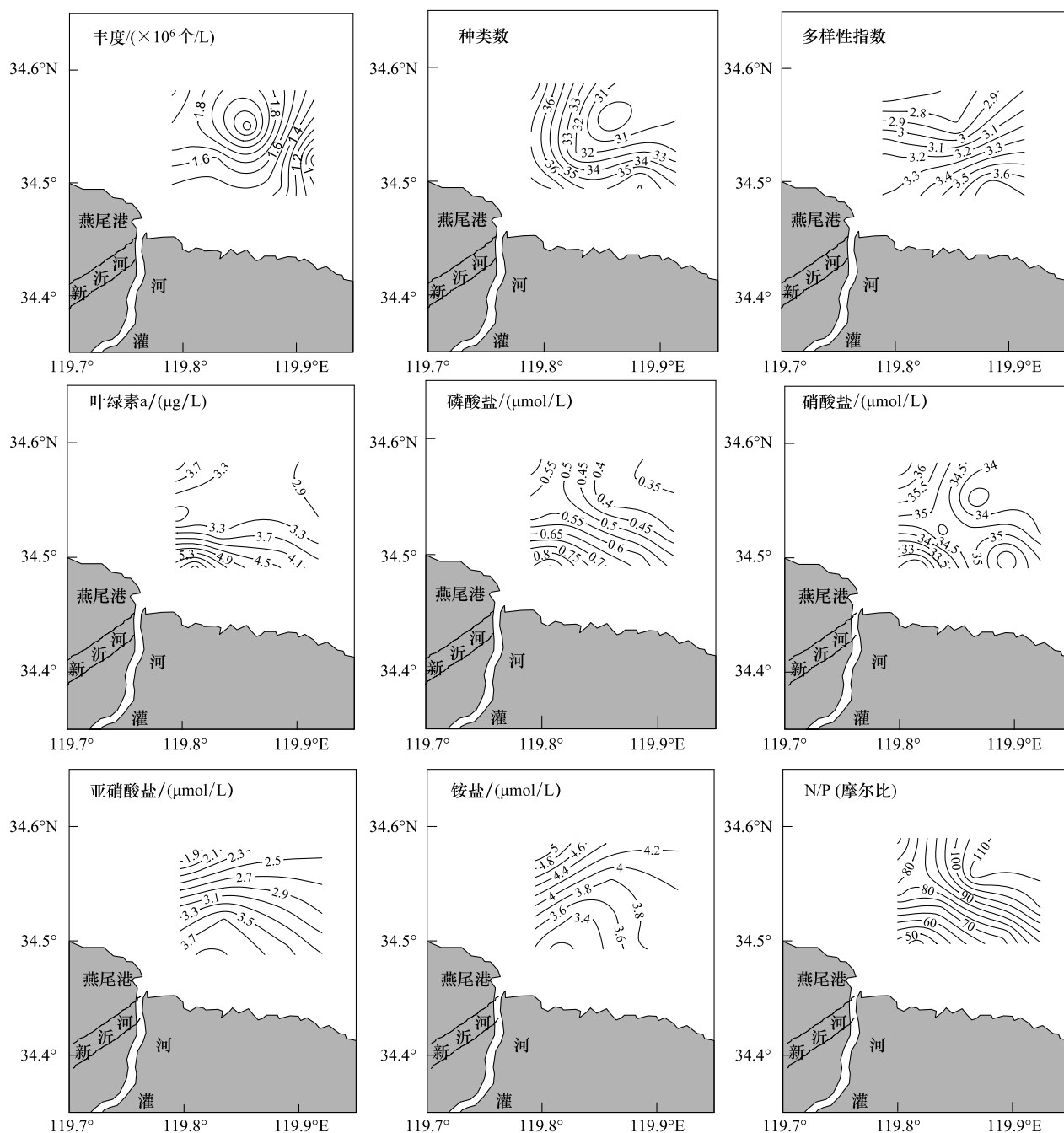


图 2 灌河口邻近海域表层浮游植物丰度、种类数、多样性、叶绿素 a 以及磷酸盐、硝酸盐、亚硝酸盐、铵盐及 N/P 比的分布

Fig. 2 Distribution of phytoplankton abundance, number of phytoplankton species, Shannon-Wiener index, chlorophyll a, phosphate, nitrate, nitrite, ammonium concentration and N/P ratios in surface water of adjacent sea of Guanhe Estuary

根据溶解态的 N、P 原子比确定水体中限制性的营养盐因子的研究已有不少, 如 Bernhard^[10] 指出在美国 Puget Sound 北部的一个泥沼河口, 所有实验期间, 可溶解无机 N 与 P 比例小于 16:1, 因此推测 N 是这些河口

光合作用的限制因子。Jiao^[11]等根据国内海岸河口 N/P 范围(30:1—80:1),认为浮游植物可利用 N 含量远大于 P,浮游植物生长的 P 限制超过 N。胡明辉^[12]研究了三角褐指藻等 4 种藻的生长所需要的最佳 N/P 比,并以此值同长江口的 N/P 比相比而得出长江口浮游植物受磷限制的结论。本次调查灌河口邻近海域 N/P 范围为 42—112,据此,可初步推测春季灌河口邻近海域浮游植物的生长受到 P 限制。

通过浮游植物叶绿素 a 浓度与磷酸盐和无机氮的相关性分析(图 3),春季调查水域叶绿素 a 与磷酸盐有着显著的正相关,而叶绿素 a 浓度与无机氮之间线性关系不显著。在某种营养盐为限制因子的海域,如添加该营养盐,会促进藻类的生长,因此这种营养盐浓度高的水域,叶绿素 a 浓度也较高,若营养盐增加致游藻类大量繁殖,甚至发生赤潮时,浮游植物势必会大量消耗该营养盐,从而导致该营养盐浓度快速降低,而表现出营养盐浓度与叶绿素 a 的负相关。从本文叶绿素 a 浓度与磷酸盐的相关性来看,虽然不能得出春季灌河口邻近海域浮游植物生长的营养盐限制因子是 P,但 P 可能是潜在的限制因子。

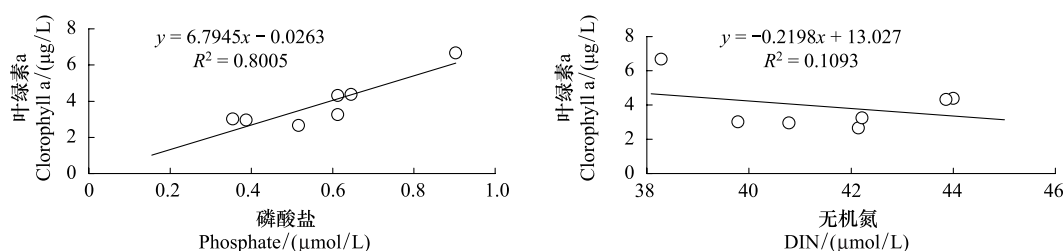


图 3 浮游植物叶绿素 a 与磷酸盐和无机氮的相关性

Fig. 3 The lineal relationship between chlorophyll a and phosphate or DIN concentration

2.3 现场营养盐加富的藻类培养实验

根据 N/P 比例判断营养盐限制因子的方法存在一定的不足,首先这种方法没有考虑到各种类型的藻类吸收 N、P 的比例不完全相同,得出的结论有一定的片面性;其次,不同种类的藻类可吸收利用的 N 源不同,且三态 N 之间可以相互转换,所以只能以总溶解无机氮作为标准,但带来的问题就是不能把藻类吸收的 N 的不同形态这个因素考虑进去,得出的结论会有一些偏差。再次,近岸受人类活动的影响较大,营养盐浓度比例变动较大,需要特别考虑。相比较而言,现场的营养盐加富培养实验,更接近于自然状况,是检验水体中营养盐限制的较好的办法,在国外应用已很普遍^[10,13-15]。

本次现场培养实验开展于 HS05 站位,磷酸盐、铵盐、硝酸盐、亚硝酸盐和叶绿素 a 的初始浓度分别为 0.61 µmol/L、3.36 µmol/L、35.14 µmol/L、3.71 µmol/L 和 3.25 µg/L。在 P 加富培养实验中,磷酸盐可由初始浓度的 0.61、1.22、1.65 µmol/L 分别降至培养结束后的 0.12、0.18、0.17 µmol/L,磷酸盐的比吸收速率分别为 0.36、0.43、0.51 d⁻¹,加 P 后促进了 P 本身的吸收;与此同时,P 的添加也促进了硝酸盐和亚硝酸盐的吸收,铵盐浓度由于浮游植物的释放总体上呈增大趋势。由于培养海水事先都滤除了大型浮游动物的干扰,且固定在 5L 的培养桶中,与外界海水不流通,相对平静,加上现场光照强度以及水温都比较适宜,从而导致培养结束后叶绿素 a 浓度较高,对照组最大值可达到 77.24 µg/L,而 +P 组和 ++P 组叶绿素 a 浓度最大值分别为 90.57、96.49 µg/L,P 的添加也促进了藻类的生长(图 4)。

在 N 加富培养实验中,硝酸盐由初始浓度的 35.14、89.11、108.86 µmol/L 分别降至培养结束后的 6.21、71.34、97.32 µmol/L,硝酸盐的比吸收速率分别为 0.39、0.049、0.025 d⁻¹,加 N 后并未促进硝酸盐本身的吸收速率,而亚硝酸盐在加 N 组中浓度反而是增加的,这主要与藻类存在的亚硝酸盐释放机制有关,至于图 4 中无此现象,可能是加磷实验体系中氮少,释放的亚硝酸盐又被浮游植物所吸收所致。同样磷酸盐的吸收也没有得到促进,培养期间 3 个实验组磷酸盐浓度变化曲线相似,铵盐总体上依然呈增大趋势,培养结束后 +N 组和 ++N 组叶绿素 a 浓度最大值分别为 72.31、69.62 µg/L,都小于对照组的 77.24 µg/L,表明 N 的添加也未促进藻类的生长(图 5)。

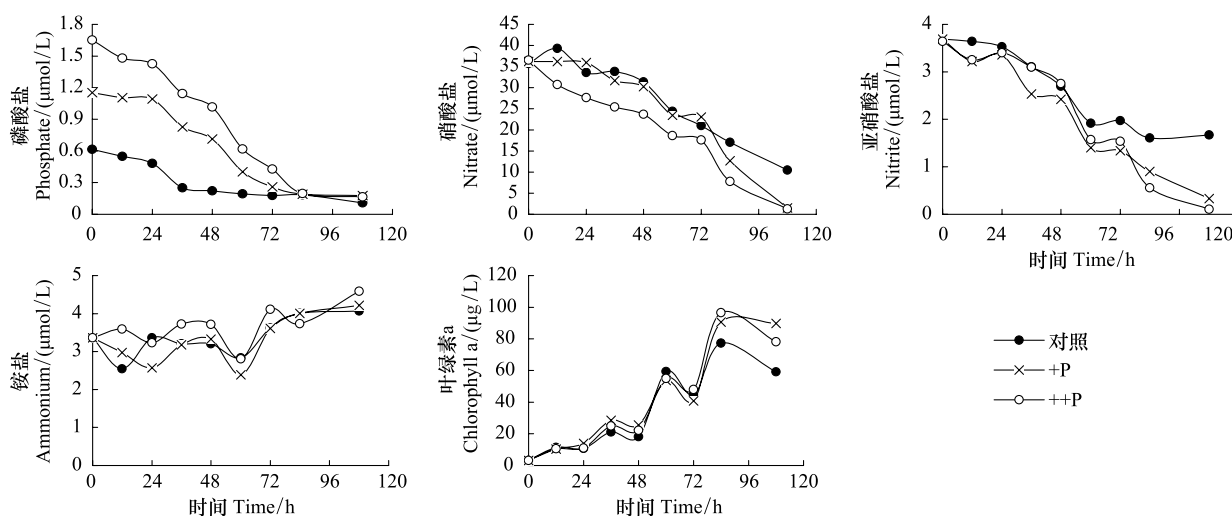


图4 P 加富培养实验中氮磷营养盐及叶绿素 a 浓度的变化

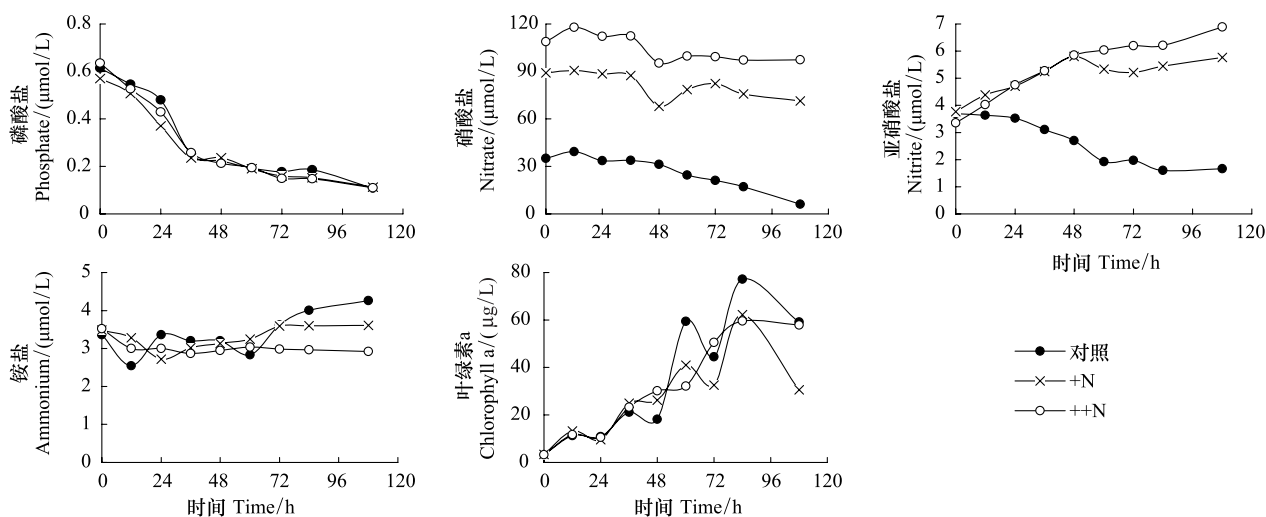
Fig. 4 Changes of phosphate, nitrate, nitrite, ammonium and chlorophyll *a* concentration during P enrichment incubations

图5 N 加富培养实验中氮磷营养盐及叶绿素 a 浓度的变化

Fig. 5 Changes of phosphate, nitrate, nitrite, ammonium and chlorophyll *a* concentration during N enrichment incubations

利用现场培养实验检验水体中营养盐限制在国内也逐渐得到了广泛的应用,如邹立和张经^[16]通过现场外加营养盐的受控培养实验,发现在莱州湾附近浮游植物生长受到显著的磷限制,硅酸盐尚不成为限制因子,而渤海海峡及渤海中部不存在营养盐的限制问题。王勇^[17]等在胶州湾采用现场添加营养盐的实验方法指出在夏季,N 或单独、或与 P 同时限制浮游植物的生长,在秋季则可能是 N 与 P 共同对浮游植物群落产生调控作用,而在冬季,Si 是首要的限制浮游植物生长的营养元素。蒲新明^[18]等通过现场加富的实验,发现添加 KNO_3 的两组与对照组的生长曲线基本一致,而添加 Na_2HPO_4 的两组与 N、P 都加的两组的生长曲线基本一致,表明:P 是起限制作用的营养盐,而 N 不是。相比较而言,本文现场加 P 后促进了浮游植物的生长以及对营养盐的吸收,而加 N 并未促进,表明了春季灌河口邻近海域浮游植物的生长主要受到 P 的限制,而不受 N 的限制。

3 结论

(1) 春季调查海域共鉴定出浮游植物 6 门 24 科 36 属 68 种,其中硅藻门 29 属 61 种,占总种类数的 89.71%,优势度最高的为中肋骨条藻(*Skeletonema costatum*)。浮游植物丰度介于 0.84×10^6 — 2.25×10^6 个/L,

种类范围为 29—39 种,叶绿素 a 浓度在 2.66—6.67 $\mu\text{g/L}$ 变化,多样性指数介于 2.60—3.79,基本处于清洁状态。

(2) 春季调查海域磷酸盐浓度介于 0.35—0.90 $\mu\text{mol/L}$,硝酸盐浓度在 31.21—37.00 $\mu\text{mol/L}$ 变化,灌河口邻近海域无机氮浓度严重偏高,均超出四类标准,磷酸盐浓度相对较低,均未超出二类标准,导致调查区域 N/P 比严重偏高,且浮游植物叶绿素 a 与磷酸盐浓度有显著的正相关,而与无机氮无明显线性关系。

(3) 在 P 加富培养实验中,加 P 明显促进了 P 本身的吸收,也促进了硝酸盐和亚硝酸盐的吸收,但没有磷酸盐那么显著,铵盐基本上呈增加趋势,P 的添加也明显促进了藻类的生长。在 N 加富培养实验中,加 N 并未促进硝酸盐本身和磷酸盐的吸收速率,亚硝酸盐在加 N 组中浓度是增加的,铵盐依然呈增加趋势,培养结束后加 N 组叶绿素 a 浓度都小于对照组,N 的添加也未促进藻类的生长。加富培养实验表明了春季灌河口邻近海域浮游植物的生长主要受到 P 的限制,而不是 N 限制。

References:

- [1] Mallin M A. Phytoplankton ecology of North Carolina estuaries. *Estuaries and Coasts*, 1994, 17(3): 561-574.
- [2] Smith S V, Wiebe W J, Hollibaugh J T, Dollar S J, Hager S J, Cole B E, Tribble G W, Wheeler P A. Stoichiometry of C, N, P, and Si fluxes in a temperate-climate embayment. *Journal of Marine Research*, 1987, 45(2): 427-460.
- [3] Malone T C, Conley D J, Fisher T R, Glibert P M, Harding L W, Sellner K G. Scales of nutrient-limited phytoplankton productivity in Chesapeake Bay. *Estuaries and Coasts*, 1996, 19(2): 371-385.
- [4] Harrison P J, Hu M H, Yang Y P, Lu X. Phosphate limitation in estuarine and coastal waters of China. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 1990, 140(1/2): 79-87.
- [5] Chen S Z, Gu Y Q, Liu M G, Zhang M X, Yang S H, Li J. Nutrient distribution at the Huanghe River Estuary. *Journal of Ocean University of Qingdao*, 1991, 21(1): 34-42.
- [6] Dong Y H, Cai J D, Qian H L. Nutrient ratios and its relationship with phytoplankton in the Pearl river estuary. *Marine Science Bulletin*, 2009, 28(1): 3-10.
- [7] Probyn T A. Size-fractionated measurements of nitrogen uptake in aged upwelled waters: implications for pelagic food webs. *Limnology and Oceanography*, 1990, 35(1): 202-210.
- [8] Song W H, Xu J X, Lin B, Zhang G L. The character of changes and distributions of inorganic nitrogen and active phosphorus in Guanhe River Estuary. *Ocean Development and Management*, 2009, 26(10): 106-110.
- [9] Collos Y, Vaquer A, Bibent B, Slawyk G, Garcia N, Souchu P. Variability in nitrate uptake kinetics of phytoplankton communities in a mediterranean coastal lagoon. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 1997, 44(3): 369-375.
- [10] Bernhard A E, Peele E R. Nitrogen limitation of phytoplankton in a shallow embayment in northern Puget Sound. *Estuaries and Coasts*, 1997, 20(4): 759-769.
- [11] Jiao N Z, Wang R. Size structures of microplankton biomass and production in Jiaozhou Bay, China. *Journal of Plankton Research*, 1994, 16(12): 1609-1625.
- [12] Hu M H, Yang Y P, Xu C L, Harrelson J P. Phosphate limitation of phytoplankton in Changjiang Estuary. *Acta Oceanologica Sinica*, 1989, 11(4): 439-443.
- [13] Hein M, Riemann B. Nutrient limitation of phytoplankton biomass or growth rate: an experimental approach using marine enclosures. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 1995, 188(2): 167-180.
- [14] Beardall J, Berman T, Heraud P, Kadiri M O, Light B R, Patterson G, Roberts S, Sulzberger B, Sahan E, Uehlinger U, Wood B. A comparison of methods for detection of phosphate limitation in microalgae. *Aquatic Sciences*, 2001, 63(1): 107-121.
- [15] Schlüter L. The influence of nutrient addition on growth rates of phytoplankton groups, and microzooplankton grazing rates in a mesocosm experiment. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 1998, 228(1): 53-71.
- [16] Zhou L, Zhang J. Experimental study on the nutrient limitation in the spring of Bohai sea. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2001, 32(6): 673-678.
- [17] Wang Y, Jiao N Z. Response of phytoplankton to nutrient addition in Jiaozhou Bay. *Marine Science*, 2002, 26(4): 8-12.
- [18] Pu X M, Wu Y L, Zhang Y S. Nutrient limitation of phytoplankton in the Changjiang Estuary II. Condition of nutrient limitation in spring. *Acta Oceanologica Sinica*, 2001, 23(3): 57-65.

参考文献:

- [5] 陈淑珠, 顾郁翘, 刘敏光, 张敏秀, 杨淑海, 李静. 黄河口及其邻近海域营养盐分布特征. *青岛海洋大学学报: 自然科学版*, 1991, 21(1): 34-42.
- [6] 董燕红, 蔡建东, 钱宏林. 珠江口海域营养盐比及与浮游植物的关系. *海洋通报*, 2009, 28(1): 3-10.
- [8] 宋伟华, 徐娇霞, 林柏, 张国亮. 灌河口海域无机氮及活性磷酸盐的变化与分布特征分析. *海洋开发与管理*, 2009, 26(10): 106-110.
- [12] 胡明辉, 杨逸萍, 徐春林, 哈里森 J P. 长江口浮游植物生长的磷酸盐限制. *海洋学报*, 1989, 11(4): 439-443.
- [16] 邹立, 张经. 渤海春季营养盐限制的现场实验. *海洋与湖沼*, 2001, 32(6): 673-678.
- [17] 王勇, 焦念志. 胶州湾浮游植物对营养盐添加的相应关系. *海洋科学*, 2002, 26(4): 8-12.
- [18] 蒲新明, 吴玉霖, 张永山. 长江口区浮游植物营养限制因子的研究 II. 春季的营养盐限制情况. *海洋学报*, 2001, 23(3): 57-65.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol. 33, No. 15 Aug. ,2013(Semimonthly)

CONTENTS

Frontiers and Comprehensive Review

- A review on the application of remote sensing in mangrove ecosystem monitoring SUN Yongguang, ZHAO Dongzhi, GUO Wenyong, et al (4523)
- Urban metabolism process based on emergy synthesis: Theory and method LIU Gengyuan, YANG Zhifeng, CHEN Bin (4539)
- Theoretical considerations on ecological civilization development and assessment ZHAO Jingzhu (4552)

Autecology & Fundamentals

- Assemblage composition and distribution of meiobenthos in the Yangtze Estuary and its adjacent waters in autumn-winter season Yu Tingting, XU Kuidong (4556)
- Ecological distribution and nutrient limitation of phytoplankton in adjacent sea of Guanhe Estuary in spring FANG Tao, HE Xinran, FENG Zhihua, et al (4567)
- The distribution of urea concentrations and urease activities in the coastal waters of Hainan Island during the spring HUANG Kaixuan, ZHANG Yun, OU Linjian, et al (4575)
- Effects of simulated acid rain on growth and bleeding sap amount of root in *Quercus mongolica* LIANG Xiaoqin, LIU Jian, DING Wenjuan, et al (4583)
- Allelopathic effects of organic acid allelochemicals on melon ZHANG Zhizhong, SUN Zhihao, CHEN Wenhui, et al (4591)
- Fraction changes of oxidation organic carbon in paddy soil and its correlation with CH₄ emission fluxes WU Jiamei, JI Xionghui, HUO Lianjie, et al (4599)
- Changes of soil nitrogen types and nitrate accumulation in vegetables with single or multiple application of dicyandiamide WANG Huangping, ZHANG Qing, WENG Boqi, et al (4608)
- Comparison of isolation rate of mycobacteriophage in the different type soils XU Fengyu, SU Shengbing, MA Hongxia, et al (4616)
- Effects of different acidity acid rain on yield, protein and starch content and components in two wheat cultivars BIAN Yajiao, HUANG Jie, SUN Qisong, et al (4623)
- The causes of *Gentiana straminea* Maxim. seeds dormancy and the methods for its breaking LI Bingbing, WEI Xiaohong, XU Yan (4631)
- Physiological responses of four golden-leaf trees to SO₂ stress CHONG Peifang, SU Shiping (4639)
- Influence of endosulfan and its metabolites on enzyme activities in purple soil XIONG Bailian, ZHANG Jinzhong, DAI Juan, et al (4649)

Population, Community and Ecosystem

- Seasonal dynamics of food web energy pathways at the community-level XU Jun, ZHOU Qiong, WEN Zhourui, et al (4658)
- Population dynamics of *Niviventer confucianus* in Thousand Island Lake ZHANG Xu, BAO Yixin, LIU Jun, et al (4665)
- Soil ecological stoichiometry under different vegetation area on loess hilly-gully region ZHU Qiulian, XING Xiaoyi, ZHANG Hong, et al (4674)
- Adaptation strategies of reproduction of plant community in response to grassland degradation and artificial restoration LI Yuanyuan, DONG Shikui, ZHU Lei, et al (4683)
- Effect of different *Cunninghamia lanceolata* plantation soil qualities on soil microbial community structure LIU Li, XU Mingkai, WANG Silong, et al (4692)
- Effects of different maize hybrids (inbreds) on the growth, development and population dynamics of *Rhopalosiphum maidis* Fitch ZHAO Man, GUO Xianru, LI Weizheng, et al (4707)
- Effects of forest canopy structure on understory vegetation characteristics of Funiu Mountain Nature Reserve LU Xunling, DING Shengyan, YOU Li, et al (4715)

- Influence of restoring cropland to grassland on dung beetle assemblages in Wuchuan County, Inner Mongolia, China LIU Wei, MEN Lina, LIU Xinmin (4724)
- Cu and nutrient deficiency on different effects of growth, tolerance and mineral elements accumulation between two *Elsholtzia haichouensis* populations KE Wenshan, CHEN Shijian, XIONG Zhiting, et al (4737)
- Measurement and retrieval of leaf area index using remote sensing data in Kanas National Nature Reserve, Xinjiang ZAN Mei, LI Dengqiu, JU Weimin, et al (4744)
- Landscape, Regional and Global Ecology**
- An spatial ecosystem services approach based on LUCC: a case study of Ganzhou district of Zhangye City LIANG Youjia, XU Zhongmin, ZHONG Fanglei, et al (4758)
- Spatiotemporal characteristics of *Spartina alterniflora* marsh change in the coastal wetlands of Yancheng caused by natural processes and human activities ZHANG Huabing, LIU Hongyu, Hou Minghang (4767)
- Process analysis and evaluation of wetlands degradation based on PCA in the lakeside of Napahai, Northwest Yunnan Plateau SHANG Wen, YANG Yongxing, HAN Dayong (4776)
- On eco-security evaluation in the Tumen River region based on RS&GIS NAN Ying, JI Zhe, FENG Hengdong, et al (4790)
- Evaluation and simulation of historical range of variability of forest landscape pattern in Huzhong area WU Zhifeng, LI Yuehui, BU Rencang, et al (4799)
- Effects of precipitation timing on aboveground net primary productivity in inner mongolia temperate steppe GUO Qun, HU Zhongmin, LI Xuanran, et al (4808)
- Research Notes**
- Litter production and decomposition of different forest ecosystems and their relations to environmental factors in different climatic zones of mid and eastern China WANG Jianjian, WANG Yongji, LAI Liming, et al (4818)

《生态学报》2013 年征订启事

《生态学报》是由中国科学技术协会主管,中国生态学学会、中国科学院生态环境研究中心主办的生态学高级专业学术期刊,创刊于 1981 年,报道生态学领域前沿理论和原始创新性研究成果。坚持“百花齐放,百家争鸣”的方针,依靠和团结广大生态学科工作者,探索生态学奥秘,为生态学基础理论研究搭建交流平台,促进生态学研究深入发展,为我国培养和造就生态学科人才和知识创新服务、为国民经济建设和发展服务。

《生态学报》主要报道生态学及各分支学科的重要基础理论和应用研究的原始创新性科研成果。特别欢迎能反映现代生态学发展方向的优秀综述性文章;研究简报;生态学新理论、新方法、新技术介绍;新书评价和学术、科研动态及开放实验室介绍等。

《生态学报》为半月刊,大 16 开本,300 页,国内定价 90 元/册,全年定价 2160 元。

国内邮发代号:82-7,国外邮发代号:M670

标准刊号:ISSN 1000-0933 CN 11-2031/Q

全国各地邮局均可订阅,也可直接与编辑部联系购买。欢迎广大科技工作者、科研单位、高等院校、图书馆等订阅。

通讯地址:100085 北京海淀区双清路 18 号 电 话:(010)62941099; 62843362

E-mail: shengtaixuebao@rcees.ac.cn 网 址: www.ecologica.cn

本期责任副主编 赵景柱

编辑部主任 孔红梅

执行编辑 刘天星 段 靖

生 态 学 报

(SHENGTAI XUEBAO)

(半月刊 1981 年 3 月创刊)

第 33 卷 第 15 期 (2013 年 8 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 33 No. 15 (August, 2013)

编 辑	《生态学报》编辑部 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085 电话:(010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn	Edited by	Editorial board of ACTA ECOLOGICA SINICA Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China Tel:(010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn
主 编	王如松	Editor-in-chief	WANG Rusong
主 管	中国科学技术协会	Supervised by	China Association for Science and Technology
主 办	中国生态学学会 中国科学院生态环境研究中心 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085	Sponsored by	Ecological Society of China Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China
出 版	科 学 出 版 社 地址:北京东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717	Published by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷	北京北林印刷厂	Printed by	Beijing Bei Lin Printing House, Beijing 100083, China
发 行	科 学 出 版 社 地址:东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717 电话:(010)64034563 E-mail:journal@csppg.net	Distributed by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China Tel:(010)64034563 E-mail:journal@csppg.net
订 购	全国各地邮局	Domestic	All Local Post Offices in China
国外发行	中国国际图书贸易总公司 地址:北京 399 信箱 邮政编码:100044	Foreign	China International Book Trading Corporation Add:P. O. Box 399 Beijing 100044, China
广告经营 许 可 证	京海工商广字第 8013 号		



ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

国内外公开发行

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 90.00 元