

中国百种杰出学术期刊
中国精品科技期刊
中国科协优秀期刊
中国科学院优秀科技期刊
新中国 60 年有影响力的期刊
国家期刊奖

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica

(Shengtai Xuebao)

第 31 卷 第 2 期
Vol.31 No.2
2011



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 31 卷 第 2 期 2011 年 1 月 (半月刊)

目次

长白山山杨种群的性比格局及其空间分布	潘春芳, 赵秀海, 夏富才, 等 (297)
冬季融冻过程中白三叶叶片抗氧化酶活力和渗透调节物含量变化与抗冻性的关系	赵梅, 周瑞莲, 刘建芳, 等 (306)
黄土高原主要森林类型自然性的灰色关联度分析	王乃江, 刘增文, 徐钊, 等 (316)
两种抗生素对龙须菜的光合生理效应	简建波, 邹定辉, 刘文华, 等 (326)
典型喀斯特峰丛洼地植被群落凋落物 C:N:P 生态化学计量特征	潘复静, 张伟, 王克林, 等 (335)
塔里木河下游地下水埋深对胡杨气体交换和叶绿素荧光的影响	陈亚鹏, 陈亚宁, 徐长春, 等 (344)
基于 MODIS/NDVI 的陕北地区植被动态监测与评价	宋富强, 邢开雄, 刘阳, 等 (354)
火因子对荒漠化草原草本层片植物群落组成的影响	贺郝钰, 苏洁琼, 黄磊, 等 (364)
4 种阔叶幼苗对 PEG 模拟干旱的生理响应	冯慧芳, 薛立, 任向荣, 等 (371)
城市带状绿地宽度与温湿效益的关系	朱春阳, 李树华, 纪鹏, 等 (383)
西藏斧钺水鸟多样性及斑头雁繁殖活动区的变化	张国钢, 刘冬平, 钱法文, 等 (395)
王朗自然保护区大熊猫生境选择	康东伟, 康文, 谭留夷, 等 (401)
东方田鼠警觉对其功能反应的作用格局	陶双伦, 杨锡福, 邓凯东, 等 (410)
台州市路桥区重金属污染对土壤动物群落结构的影响	白义, 施时迪, 齐鑫, 等 (421)
青岛湾小型底栖生物周年数量分布与沉积环境	杜永芬, 徐奎栋, 类彦立, 等 (431)
叉尾斗鱼种群遗传变异与亲缘地理	王培欣, 白俊杰, 胡隐昌, 等 (441)
C ₃ 和 C ₄ 植物寄主对华北地区棉铃虫越冬代和第一代的影响	叶乐夫, 付雪, 戈峰 (449)
3 种海拔高度茶园中 2 种害虫与其天敌间的数量和空间关系	毕守东, 柯胜兵, 徐劲峰, 等 (455)
坝上地区农田和恢复生境地地表甲虫多样性	刘云慧, 宇振荣, 王长柳, 等 (465)
若尔盖高寒湿地干湿土壤条件下微生物群落结构特征	牛佳, 周小奇, 蒋娜, 等 (474)
红枣贮藏期果面微生物多样性	沙月霞 (483)
CO ₂ 和温度升高情况下白粉菌侵染对西葫芦生长特性的影响	刘俊稚, 葛亚明, Pugliese Massimo, 等 (491)
丛枝菌根真菌对中性紫色土土壤团聚体特征的影响	彭思利, 申鸿, 袁俊吉, 等 (498)
新疆断裂带泉水中细菌群落结构的 PCR-DGGE 分析	吴江超, 高小其, 曾军, 等 (506)
石油污染对海洋浮游植物群落生长的影响	黄逸君, 陈全震, 曾江宁, 等 (513)
不同耐性水稻幼苗根系对镉胁迫的形态及生理响应	何俊瑜, 任艳芳, 王阳阳, 等 (522)
基于 CLUE-S 模型的密云县面源污染控制景观安全格局分析	潘影, 刘云慧, 王静, 等 (529)
基于生态足迹的生态地租分析	龙开胜, 陈利根, 赵亚莉 (538)
深圳市植被受损分级评价及其与景观可达性的关系	刘语凡, 陈雪, 李贵才, 等 (547)
专论与综述	
美国、加拿大环境和健康风险管理方法	贺桂珍, 吕永龙 (556)
植物蜡质及其与环境的关系	李婧婧, 黄俊华, 谢树成 (565)
油田硫酸盐还原菌酸化腐蚀机制及防治研究进展	庄文, 初立业, 邵宏波 (575)
叶际微生物研究进展	潘建刚, 呼庆, 齐鸿雁, 等 (583)

石油污染对海洋浮游植物群落生长的影响

黄逸君, 陈全震*, 曾江宁, 江志兵

(国家海洋局海洋生态系统与生物地球化学重点实验室 国家海洋局第二海洋研究所, 杭州 310012)

摘要: 为了解石油污染对海洋浮游植物的慢性毒性影响, 运用实验生态学手段, 在不同季节对采自浙江省乐清湾的浮游植物进行原油污染慢性(15 d)毒性效应研究。通过对浮游植物叶绿素 a(chla)和细胞密度的测定, 发现高浓度(≥ 2.28 mg/L)原油胁迫对浮游植物的生长有极显著抑制作用($P < 0.001$), 表现为浮游植物 chla 和细胞密度下降; 低浓度(≤ 1.21 mg/L)不会抑制浮游植物生长, 反而可促进其生长。各个季节原油对浮游植物的慢性毒性效应存在差异, 表现为不同自然水温下浮游植物对原油胁迫的耐受性不同, 夏季浮游植物对油污染的耐受性较冬季差。浮游植物 chla 和细胞密度有极显著的正相关性($P < 0.001$)。石油污染对浮游植物的影响随培养时间延长存在差异, 培养后期石油烃逐渐在水中降解, 低浓度试验组中浮游植物可恢复生长。

关键词: 原油水溶性成分; 海洋浮游植物; 叶绿素 a; 细胞密度

The impact of oil pollution on marine phytoplankton community growth change

HUANG Yijun, CHEN Quanzhen*, ZENG Jiangning, JIANG Zhibing

Key Laboratory of Marine Ecosystem and Biogeochemistry, Second Institute of Oceanography, Hangzhou 310012, China

Abstract: Increasing demands for and utilizations of petrochemicals have resulted in an increase in levels of petroleum hydrocarbons in marine, coastal and estuarine environment. Maritime oil contamination usually caused by maritime incidents has catastrophic impacts on the marine environment. More generally, merchant ships can have a significant environmental impact due to on-going human activities, e. g. air and sea pollutions caused by oil, fuel, waste disposal, and the effects of ballast water exchange processes. The oil contamination in the marine environment can pose a significant threat to marine life, especially the phytoplankton. As one of the most important marine planktons, phytoplankton possesses the basic status and function in the marine food chains, and also plays an important role in dynamics of material and energy fluxes. It is therefore very important to study the impact of oil pollution on marine phytoplankton.

The effect of oil pollution on marine planktonic organisms has been studied both in the laboratory and in the field. The median effective concentrations (EC_{50}) of certain kinds of microalgae exposed to oil were measured and the toxicities of different oil components and oil products were compared. Field researchers investigated the changes in phytoplankton after oil spillage in certain sea areas. Some researchers focused on the gene or protein levels of certain types of microalgae exposed to oil contamination, and others discussed whether the environmental factors such as ultraviolet radiation (UV) in natural sunlight enhanced the oil toxicity or not. However, the responses of phytoplankton community under the stress of oil contamination have not been highlighted yet. Our work is to simulate oil contamination on the natural phytoplankton community and study the community growth. The objectives of this paper are to study the influences of oil pollution on the ecological effects of marine phytoplankton, and provide the basis data for the loss assessment of marine living resources and marine ecosystems caused by oil spills and oil pollution.

In four seasons from November 2008 to July 2009, the experimental phytoplankton was collected from the Yueqing Bay

基金项目: 国家 973 课题资助项目(2010CB428903); 国家专项资助项目(908-01-BC06); 国家海洋局第二海洋研究所基本科研业务费专项资助项目(JG0921, JT0806); 海洋公益性行业科研专项资助项目(200805069)

收稿日期: 2009-11-25; **修订日期:** 2010-09-15

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: chenqz6509@126.com

in Zhejiang Province. Eight groups of crude oil water accommodated fraction (WAF) were set to perform the 15-day culture experiments of phytoplankton. The chlorophyll a and cell density of phytoplankton were measured at every 24 h to reflect the growth change of phytoplankton community.

It is indicated that crude oil pollution of high concentration (≥ 2.28 mg/L) would greatly restrain the growth of phytoplankton ($P < 0.001$) shown by decreased chlorophyll a content and cell density, while crude oil pollution of low concentration (≤ 1.21 mg/L) would promote the growth of phytoplankton instead. The chronic toxicity of crude oil to phytoplankton have seasonal differences due to different natural water temperatures, e. g. phytoplankton is less tolerant to pollution in summer than in winter because of higher temperature. There is a close relationship with positive correlation between the chlorophyll a and cell density of phytoplankton ($P < 0.001$). In addition, the impact of crude oil pollution on phytoplankton varies with time. The phytoplankton communities with low concentration crude oil pollution could recover to grow, as the oil hydrocarbons were decomposed in the anaphase of culture period.

Key Words: crude oil water accommodated fraction (WAF); marine phytoplankton; chlorophyll a; cell density

随着我国石油需求的不断增长,海洋原油开采、船舶溢油和含油废水排放导致的石油污染日趋严重。石油类已成为我国近海的第三大污染物^[1],它给海洋环境带来了严峻考验。而浮游植物作为最主要的初级生产者,在海洋食物链中有着举足轻重的地位,对生态系统物质循环与能量流动起关键作用。因此,有关石油类污染对海洋浮游植物的影响备受关注。但目前,报道多集中在油类及石油烃中某一类化合物对单种微藻的毒性^[2-6]及不同浓度范围对浮游植物不同影响的研究^[7-9]上,而缺少对浮游植物群落的慢性毒性效应研究。鉴于此,本文以自然海域浮游植物群落为研究对象,整体评估原油胁迫对浮游植物的毒性效应,旨在丰富石油类污染对海洋浮游生物生态效应的研究内容,也可定量研究石油类污染对海洋生物资源的影响及海洋生态损失量的评估提供基础数据。

1 材料与方法

1.1 材料

实验于 2008—2009 年进行,分春(2009 年 4 月)、夏(2009 年 7 月)、秋(2008 年 11)、冬(2009 年 2 月)四季。实验所用自然海水均取自浙江省乐清湾海域($28^{\circ}19'N, 121^{\circ}09'E$,如图 1),选择在晴天于平潮时进行采样,取水点离岸 2000 m 左右,现场观察水质较清澈(透明度为 0.5—0.6 m)、海面无漂浮物,使用有机玻璃采水器于表层采水,并用 CQ14 标准筛绢(505 μm)滤去浮游动物,浮游植物优势种组成见表 1。实验开始前测定水质,水质状况见表 2。

实验母液原油水溶性成分(water accommodated fraction, WAF)的制备:将原油与二次砂滤海水按体积比 1:9 混合,置于磁力搅拌机上连续高速搅拌 24 h,静置 3 h 后分离出水相(实验母液),4—6 $^{\circ}C$ 下保存^[10-11]。用紫外分光光度法(T6 新世纪紫外可见分光光度计,北京普析通用仪器公司)测定其浓度^[12](检出限 3.5 $\mu g/L$)。

1.2 方法

实验容器采用 46 cm $\times$ 33 cm $\times$ 27 cm 水族箱,每个

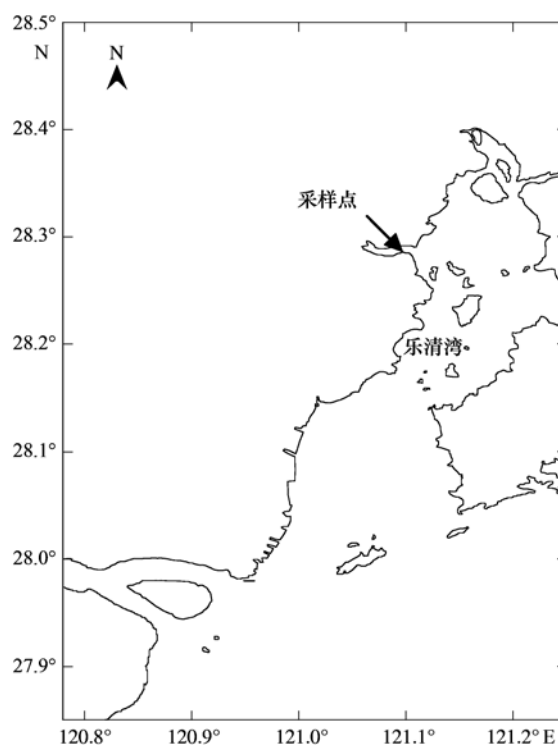


图 1 浮游植物采样点

Fig. 1 Sampling station

表 1 各季节浮游植物群落的优势种及其占细胞总数的百分比

Table 1 Dominant species of phytoplankton population and their percent of total cell density in different seasons

季节 Seasons	优势种 Dominant species	占细胞总数的百分比/% Percent of total cell density
春 Spring	中肋骨条藻 <i>Skeletonema costatum</i>	42
	长菱形藻 <i>Nitzschia longissima</i>	32
夏 Summer	中肋骨条藻 <i>S. costatum</i>	59
	长菱形藻 <i>N. longissima</i>	11
秋 Autumn	曲舟藻 <i>Pleurosigma</i> sp.	33
	中肋骨条藻 <i>S. costatum</i>	18
冬 Winter	中肋骨条藻 <i>S. costatum</i>	35
	念珠直链藻 <i>Melosira moniliformis</i>	32

表 2 各季节浮游植物实验水质参数

Table 2 Sea water parameters of phytoplankton chronic toxicity experiment

水质参数 Parameters	春 Spring	夏 Summer	秋 Autumn	冬 Winter
温度 Temperature/℃	20.5	28.5	16.5	10.5
盐度 Salinity	24.20	23.58	25.67	25.18
pH	8.20	8.05	8.20	8.10
DO/(mg/L)	9.15	8.92	9.05	9.21
亚硝酸盐 NO ₂ ⁻ /(mg/L)	0.023	0.036	0.015	0.072
硝酸盐 NO ₃ ⁻ /(mg/L)	0.413	0.752	0.645	1.056
铵盐 NH ₄ ⁺ /(mg/L)	0.527	0.108	0.212	0.615
磷酸盐 PO ₄ ³⁻ /(mg/L)	0.076	0.067	0.044	0.089

水族箱中盛自然海水 20 L。经预实验确定石油烃浓度范围后,将母液加入到实验水族箱内稀释成不同浓度,试验浓度梯度设 8 组,其中 1 组为对照,每组各设 3 个平行样。以自然水温为起始水温培养 15d,采用日光灯控制光照强度,光强(1000±50) lx,光暗比 12 h:12 h。春、夏、秋、冬季培养期间温度的变化范围分别为 19.5—21.5℃、28.0—29.0℃、15.5—17.5℃、9.5—11.5℃。由于海洋浮游植物生命周期普遍较短,从几小时至几天不等^[13-14],因此 15d 的培养时间已足够反应不同原油 WAF 浓度对其的影响。在实验开始后,每隔 48 h 测定 500 mL 试验海水,用紫外分光光度法(T6 新世纪紫外可见分光光度计,北京普析通用仪器公司)测定其浓度^[12](检出限 3.5 μg/L)。

叶绿素 a(chla)的测定 实验开始时取水样 100 mL,之后每隔 24 h 每组取水样 100 mL 用 Whatman GF/F 滤膜进行减压过滤,抽滤压力小于 50 kPa。为防止叶绿素 a 降解,在过滤前加入 1 mL 10 g/L 的 MgCO₃ 悬浊液。用 10 mL 体积分数为 90% 的丙酮于 0℃、黑暗条件下萃取 24 h。使用 Turner design Trilogy 荧光仪测定海水中 chla 浓度^[15]。

细胞计数 在实验开始时取对照组水样 500 mL,之后每隔 24 h 每组取水样 500 mL,加入 5 mL 1% 鲁哥氏液固定,静置 24 h 后浓缩到适当体积,用取样管搅拌均匀,迅速将样品移入 0.1 mL 浮游植物计数框于显微镜(Olympus B42)下进行细胞计数,重复计数 3 次^[15]。

1.3 数据处理

数据统计采用 SPSS 15.0 软件,绘图采用 SigmaPlot 9.0 软件。

2 结果与分析

原油 WAF 浓度在 15d 培养时间内的变化如图 2,各试验组原油 WAF 在培养初期降解迅速,而到中期后原油 WAF 浓度趋于平稳。各个季节原油 WAF 降解情况基本相同,夏季由于水温较高,和冬季低水温相比降解较快。

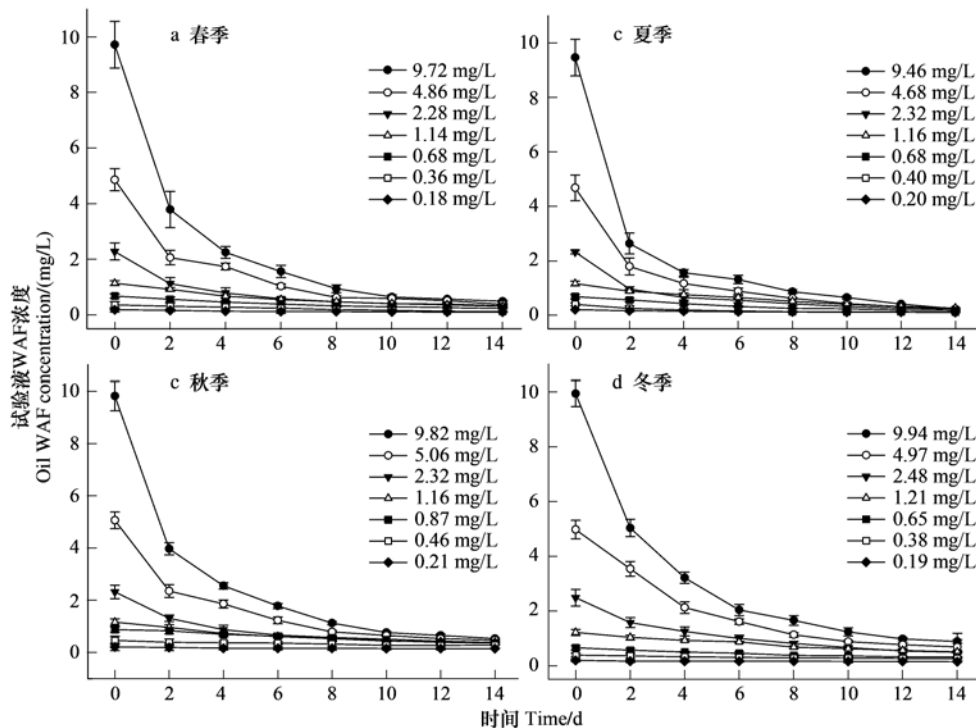


图2 各个季节各试验液原油 WAF 降解的时间变化

Fig. 2 The oil WAF degradation changes of experimental groups in 15 d in four seasons

2.1 原油 WAF 对浮游植物叶绿素 a 的影响

不同季节浮游植物受到 WAF 污染后,chl_a 浓度变化见图 3。

春季(图 3a) WAF 浓度 ≥ 4.86 mg/L 时,浮游植物 chl_a 随培养时间延长而降低,说明浮游植物生长受到了高浓度 WAF 的抑制。当 WAF 浓度为 2.28 mg/L 时,培养前期,chl_a 随时间延长而减少,但第 10 天后 chl_a 恢复到对照组水平,且随时间延长超过了对照组水平。这说明浮游植物在初期遭受污染后生长被抑制,但随着污染物在水中的降解,其抑制作用降低,浮游植物恢复生长。当 WAF 浓度 0.36—1.14 mg/L 时,chl_a 在培养中期迅速增长(5.92—9.72 $\mu\text{g/L}$),远高于对照组(2.41—2.65 $\mu\text{g/L}$)水平,说明浮游植物在这一低浓度范围内爆发性增长。WAF 浓度 0.18 mg/L 时 chl_a 变化与对照组相似,可见更低浓度的油污染对浮游植物影响不大。

夏季(图 3b) WAF 浓度 ≥ 4.68 mg/L 时,浮游植物 chl_a 随培养时间增长而降低,且 chl_a 到第 8 天趋向于 0,说明浮游植物在受到高浓度油污染后生长完全受抑制,并无法恢复。当 WAF 浓度为 2.32 mg/L 时,培养前期,chl_a 随时间延长而降低,直到第 13 天时 chl_a 才恢复到对照组水平。当 WAF 浓度 0.68—1.16 mg/L 时,chl_a 在培养中期迅速升高(12.62—12.82 $\mu\text{g/L}$),且远高于对照组(2.87—2.97 $\mu\text{g/L}$)水平,说明浮游植物在这一低浓度范围内爆发性增长。WAF 浓度 ≤ 0.40 mg/L 时 chl_a 在初始培养的 3d 内低于对照组水平,但随培养时间延长,均恢复到对照组水平,且之后的变化趋势与对照组相似,说明这一范围对浮游植物影响不大。

秋季(图 3c) WAF 浓度 ≥ 2.32 mg/L 时,浮游植物 chl_a 随培养时间延长而降低,说明浮游植物生长受到了高浓度 WAF 的抑制。但 WAF 为 2.32—5.06 mg/L 浓度组中 chl_a 到培养后期重新升高,恢复到了对照组水平。当 WAF 浓度 0.46—1.16 mg/L 时,chl_a 在培养中期迅速升高(4.97—8.75 $\mu\text{g/L}$),且远高于对照组(2.32—2.58 $\mu\text{g/L}$)水平,说明这一低浓度范围会促进浮游植物生长。WAF 浓度 0.21 mg/L 时 chl_a 变化与对照组相似,可见更低浓度的油污染并不会对浮游植物产生影响。

冬季(图 3d) WAF 浓度 ≥ 2.48 mg/L 时,初始浮游植物 chl_a 随着培养时间增长而降低,但到 6 d 后 chl_a 变化趋势由降低转为升高,并逐渐恢复。当 WAF 浓度 0.38—1.21 mg/L 时,chl_a 在培养中期迅速增长(7.66—

8.89 $\mu\text{g/L}$), 远高于对照组(3.26—3.48 $\mu\text{g/L}$)水平, 且在这一污染浓度范围内随浓度升高、增长现象出现的时间推迟。WAF 浓度 0.19 mg/L 时 chla 变化与对照组相似。

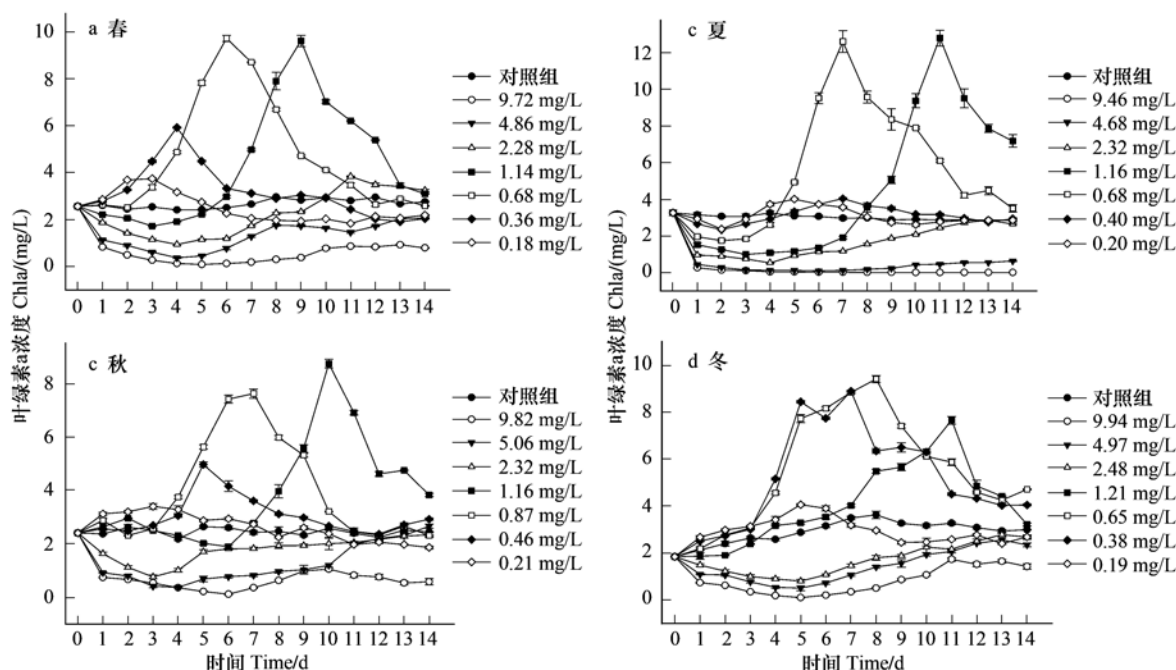


图3 不同 WAF 浓度下自然海水浮游植物叶绿素 a 的四季变化

Fig. 3 Seasonal change of marine phytoplankton chl a under different WAF concentrations

2.2 原油 WAF 对浮游植物细胞密度的影响

不同季节浮游植物在不同浓度 WAF 污染中培养 15d, 细胞密度变化与 chl a 相似(如图 4)。

春季(图 4a) WAF 浓度 ≥ 4.86 mg/L 时, 浮游植物细胞密度始终低于对照组, 且随时间延长而降低, 说明浮游植物生长受到了高浓度 WAF 污染的抑制。当 WAF 浓度为 2.28 mg/L 时, 培养后期, 细胞密度逐渐恢复, 接近于对照组水平。当 WAF 浓度 0.36—1.14 mg/L 时, 细胞密度在培养中期迅速升高 (10.72 — 29.02×10^3 个/L), 高于对照组 (2.36 — 4.14×10^3 个/L) 水平, 说明浮游植物在这一低浓度范围内爆发性增长, 且在这一污染浓度范围内随浓度升高、增长现象出现的时间推迟。WAF 浓度 0.18 mg/L 时细胞密度变化与对照组相似, 可见更低浓度的油污染对浮游植物的影响不大。

夏季(图 4b) WAF 浓度 ≥ 2.32 mg/L 时, 浮游植物细胞密度始终低于对照组水平, 且 WAF 浓度 ≥ 4.68 mg/L 组中细胞密度到第 8 天趋向于 0, 说明浮游植物在受到高浓度油污染后生长完全受抑制, 并无法恢复。当 WAF 浓度 0.40—1.16 mg/L 时, 细胞密度在培养中期迅速升高 (75.23 — 109.65×10^3 个/L), 说明浮游植物在这一低浓度范围内爆发性增长。WAF 浓度 0.20 mg/L 细胞密度变化趋势与对照组相似。

秋季(图 4c) WAF 浓度 ≥ 5.06 mg/L 时, 浮游植物细胞密度的变化趋势随培养时间延长而降低, 但 5.06 mg/L 组中细胞密度到第 10 天开始恢复, 且到第 12 天时超过了对照组水平。WAF 浓度为 2.32 mg/L 的试验组中细胞密度在初始 4d 内受到抑制, 之后开始恢复, 第 9 天后超过对照组水平。当 WAF 浓度 0.46—1.16 mg/L 时, 细胞密度在培养中期迅速升高 (6.02 — 14.20×10^3 个/L), 远高于对照组 (2.85 — 3.15×10^3 个/L) 水平。WAF 浓度 0.21 mg/L 时细胞密度变化与对照组相似。

冬季(图 4d) WAF 浓度 ≥ 2.48 mg/L 时, 初始浮游植物细胞密度随培养时间延长均低于对照组水平, 但第 8 天后细胞密度变化趋势由降低转为升高, 并逐渐恢复。当 WAF 浓度 0.38—1.21 mg/L 时, 细胞密度在培养一定时间后均出现 1 个生长峰值 (13.77 — 26.24×10^3 个/L), 远高于对照组 (3.05 — 3.61×10^3 个/L) 水平, 且在这一污染浓度范围内随浓度越高、峰值出现的时间越晚。WAF 浓度 0.19 mg/L 时细胞密度变化与对照组

相似。

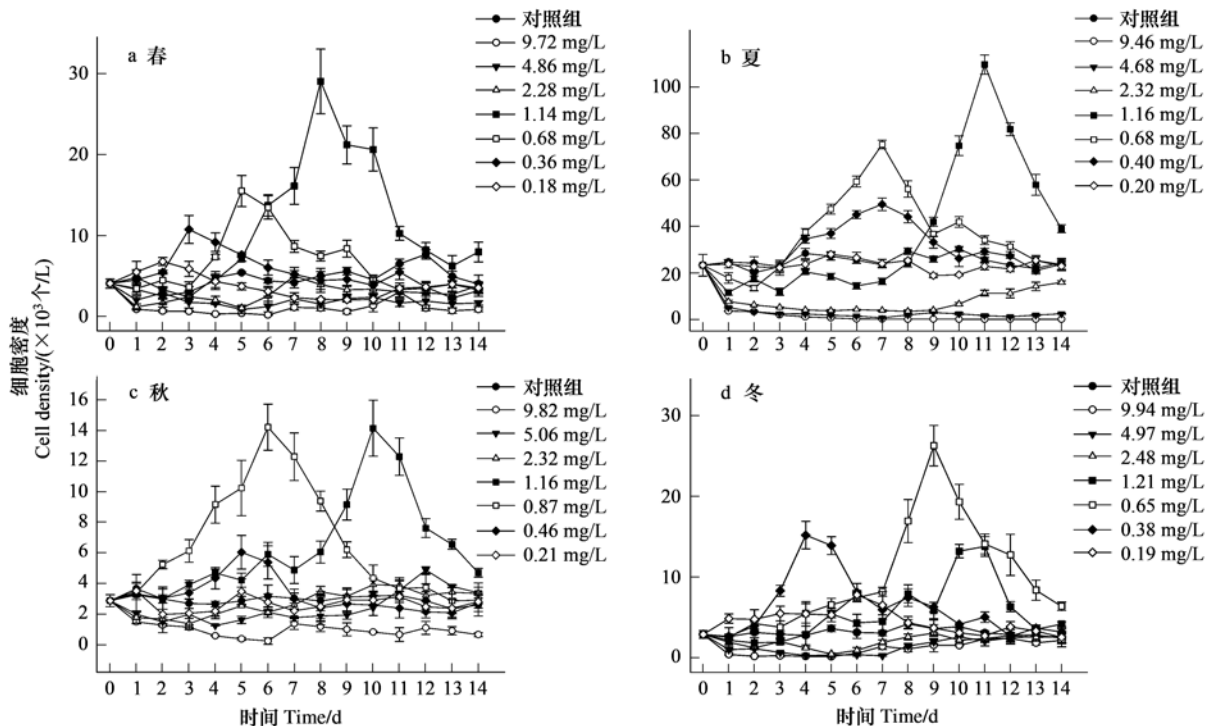


图4 不同 WAF 浓度下自然海水浮游植物细胞密度的四季变化

Fig. 4 Seasonal change of marine phytoplankton cell density under different WAF concentrations

2.3 浮游植物叶绿素 a 与细胞密度的相关性

SPSS 显著性检验结果差异极显著 ($P < 0.001$), 说明浮游植物 chl_a 与细胞密度具有极显著的正相关性。

3 讨论

实验结果显示, 高浓度原油 WAF (≥ 4.68 mg/L) 试验组的浮游植物 chl_a 和细胞密度远低于对照组, 说明该浓度原油 WAF 会严重抑制浮游植物的生长。石油烃对浮游植物生长的抑制作用与石油烃污染物的直接毒性效应相关^[16]。许多研究表明油类 WAF 浓度过高会改变浮游植物体内的生化组成^[17-20]。油类中的 WAF 通常会降低浮游植物对 CO₂ (碳源) 和营养盐的吸收、阻止细胞分裂, 使 chl_a 含量和细胞数量降低, 并抑制其光合作用和呼吸作用, 从而导致其初级生产力下降^[21-22]。

然而, 浮游植物在低浓度 WAF (如春季 WAF 浓度 0.36—1.14 mg/L) 培养下会发生爆发性增长。许多室内研究和野外围隔实验也表明, 海水中较低浓度的石油类 WAF 并不会抑制浮游植物的生长, 反而起生长促进作用^[7, 23-26]。因此, 在一定条件下低浓度的石油烃污染物导致浮游植物大量繁殖, 这可能是诱发赤潮的因素之一。目前, 关于低浓度石油污染物对能促进浮游植物生长的原因尚未有定论。王悠等^[24]认为浮游植物细胞受到石油污染物胁迫后, 体内活性氧自由基增加。在低浓度范围内, 活性氧自由基一定程度的升高刺激了微藻细胞 SOD 含量的升高, 增强了藻细胞对活性氧的防御反应, 同时适当浓度的活性氧会刺激细胞生长, 使

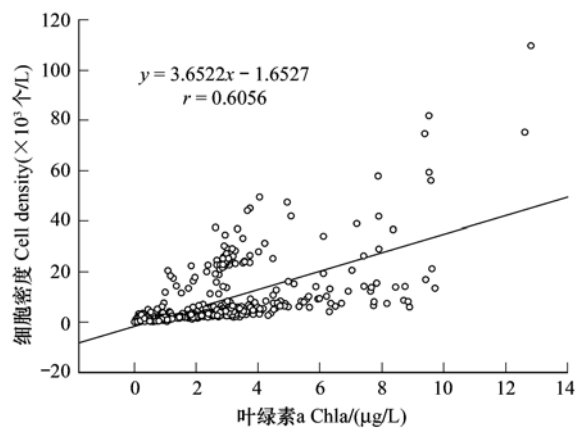


图5 浮游植物叶绿素 a 与细胞密度的相关性

Fig. 5 The relationship of phytoplankton chl_a and cell density

细胞密度升高。而且,微藻自身可对油类 WAF 进行降解和生物转化^[27-28],如小球藻属(*Chlorella*)、舟形藻属(*Navicula*)、菱形藻属(*Nitzschia*)等。另外,也有研究^[25-26]推测低浓度石油烃对浮游植物的促生长作用与水体微生物也有一定关系,随实验时间延长,石油烃中某些长链化合物通过降解成为可被浮游植物利用的碳源(C_3),从而促进其生长,表现出低浓度石油烃的促生长效应。

各季节浮游植物对石油污染的耐受能力存在差异,自然水温和浮游植物群落组成的不同是导致这种差异的主要原因。如本实验中,春、夏季自然水温分别为 20.5℃、28.5℃,而浮游植物优势种组成类似,均为中肋骨条藻和长菱形藻(表 1),但在同一浓度原油 WAF 胁迫下,夏季浮游植物对油污染的耐受性较春季差,其 chl a 和细胞密度恢复较春季慢。这表明自然水温影响浮游植物对油污染的耐受性。江志兵等研究也发现,自然水温越高,毒物(氯)对浮游植物的毒害作用越大^[29]。温度是影响浮游植物生长和繁殖的重要环境因子之一,在适宜温度范围内,温度升高,新陈代谢速率随之加快,促进了生物对毒物的吸收,使毒性增大。另外,秋、冬季自然水温均较低,但浮游植物优势种组成存在差异(表 1),在同一浓度(0.38—1.21 mg/L)原油 WAF 胁迫下,实验中冬季念珠直链藻细胞密度迅速升高,而秋季则是曲舟藻快速繁殖,这说明不同浮游植物种类对原油 WAF 耐受不同。这种现象说明浮游植物群落组成本身也影响原油 WAF 对其的毒性效应。

本文采用 chl a 和细胞密度两组参数来描述毒性实验的结果。测定污染物质对微藻毒性的传统方法就是通过测量微藻细胞密度,但这种方法比较繁杂、耗时。chl a 含量是反映光合强度的重要指标,当微藻受到污染胁迫时,各种生理过程都会受到影响,直接或间接地影响到 chl a 的含量。因此,chl a 含量下降可以看成是微藻受伤害后的重要生理响应,下降幅度可以反应其受伤害程度。实验结果的相关性分析表明 chl a 和细胞密度存在极显著的正相关关系,因此今后通过测定 chl a 来反应微藻生长更方便快捷。

4 结论

(1)高浓度石油烃(≥ 2.28 mg/L)对浮游植物的生长有抑制作用,培养初期各季节浮游植物 chl a 和细胞密度均下降,但到培养后期 WAF ≤ 2.48 mg/L 的试验组中浮游植物可逐渐恢复生长;但低浓度石油烃(≤ 1.21 mg/L)不但不会抑制其生长,反而能促进其生长,一定低浓度范围内(春季 0.36—1.14 mg/L、夏季 0.40—1.16 mg/L、秋季 0.46—1.16 mg/L、冬季 0.38—1.21 mg/L)浮游植物 chl a 和细胞密度在培养中期急剧升高,出现一峰值,远高于对照组值,且在这一污染浓度范围内浓度越高、峰值出现的时间越晚。

(2)各个季节石油对浮游植物的慢性毒性效应存在差异,表现为不同自然水温下浮游植物对石油烃污染物耐受性不同,夏季浮游植物对石油污染的耐受性较冬季差。夏季由于水温较高,培养后期高浓度 WAF 试验组(≥ 4.68 mg/L)浮游植物 chl a 和细胞密度趋向于 0,说明浮游植物已无法恢复。而冬季,即使 WAF 浓度达 9.94 mg/L,浮游植物生长仍不会被完全遏制,培养后期开始恢复,逐渐接近对照组水平。

(3)浮游植物 chl a 和细胞密度有极显著正相关性($P < 0.001$),线性回归方程 $y = 3.6522x - 1.6527$,相关系数 $r = 0.6056$ 。

致谢:杭州炼油厂为本实验提供海洋陆丰原油;温州市海洋环保设备厂提供 MH 消油剂;浙江省海洋水产养殖研究所清江试验场提供实验场所;谢起浪、柴雪良、郑金和、李晓勇、张炯明、胡利华、肖国强、闫茂仓、刘伟成、陆荣茂、王侃、赵一强等给予帮助,特此一并致谢。

References:

- [1] State Oceanic Administration. China Marine Environmental Quality Communiqué in 2008. Jan., 2009. <http://www.soa.gov.cn/hyjww/hygb/hyjzlg/2009/02/1225332550476526.htm>.
- [2] El-Dib M A, Abou-Waly H F, El-Naby A H. Fuel oil effect on the population growth, species diversity and chlorophyll a content of freshwater microalgae. International Journal of Environmental Health Research, 2001, 11: 189-197.
- [3] Djomo J E, Dauta A, Ferrier V, Narbonne J F, Monkiedje A, Njine T, Garrigues P. Toxic effects of some major polyaromatic hydrocarbons found in crude oil and aquatic sediments on *Scenedesmus subspicatus*. Water Research, 2004, 38: 1817-1821.
- [4] Zhang L, Wang X L, Han X R, Zhu C J, Shi X Y, Jiang F H, Yang R J. Effects of petroleum hydrocarbon on the growth of marine algae:

- experiment versus model. Journal of Ocean University of Qingdao, 2002, 32(5): 804-810.
- [5] Tang X X, Huang J, Wang Y L, Wang M, Wang L L. Interaction of UV-B radiation and anthracene on DNA damage of *Phaeodactylum tricornutum*. Acta Ecologica Sinica, 2002, 22(3): 375-378.
- [6] Wang X L, Yang R J, Zhu C J. Studies on size effect on *Chaetoceros curvisetus* in different concentrations of petroleum hydrocarbon. Periodical of Ocean University of China, 2004, 34(5): 849-853.
- [7] Koshikawa H, Xu K Q, Liu Z L, Kohata K, Kawachi M, Maki H, Zhu M Y, Watanabe M. Effects of the water-soluble fraction of diesel oil on bacterial and primary production and the trophic transfer to mesozooplankton through a microbial food web in Yangtze estuary, China. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2007, 71: 68-80.
- [8] Hjorth M. Plankton stress responses from PAH exposure and nutrient enrichment. Marine Ecology Progress Series, 2008, 363: 121-130.
- [9] Zhang J, Wang X L, Han X R, Zhu C J, Shi X Y. Kinetic model for bioconcentration of No. 0 diesel water-accommodated fraction by phytoplankton. Environmental Science, 2004, 25(1): 14-19.
- [10] Anderson J W, Neff J M, Cox B A, Tatem H E, Hightower G M. Characteristics of dispersion and water-soluble extracts of crude and refined oils and their toxicity to estuarine crustaceans and fish. Marine Biology, 1974, 27: 75-88.
- [11] Gulec I, Holdway D A. Toxicity of Dispersant, Oil and Dispersed Oil to Two Marine Organisms. Australia: International Oil Spill Conference, 1997:1010.
- [12] Standardization Administration of China. GB/T 17378.4-2007 The Specification for Marine Monitoring. Beijing: China Standards Press, 2008.
- [13] Werner, D. Productivity studies on diatom cultures. Helgoland Marine Research, 1970, 20: 97-103.
- [14] Jewson, D H. Size reduction, reproductive strategy and the life cycle of a centric diatom. Philosophical Transactions: Biological Science, 1992, 336, 191-213.
- [15] Standardization Administration of China. GB/T 12763.6-2007 The Specification for Oceanographic Survey. Beijing: China Standards Press, 2008.
- [16] Fleeger J W, Carman K R, Nisbet R M. Indirect effects of contaminants in aquatic ecosystems. Science of the Total Environment, 2003, 317: 207-233.
- [17] Fiala M, Delille D. Annual changes of microalgae biomass in Antarctic sea ice contaminated by crude oil and diesel fuel. Polar Biology, 1999, 21(6): 391-396.
- [18] Shi X Y, Wang X L, Han X R, Jiang Y, Zhu M Y, Chen S, Koshikawa H. Relationship between petroleum hydrocarbon and plankton in a mesocosm experiment. Acta Oceanologica Sinica, 2001, 20(2): 231-240.
- [19] Li K Q, Wang X L, Zhu C J, Shi X Y, Hu H Y, Li R X, Sun S Y. Ecological effects of No.0 diesel water accommodated fraction on marine algae. Environmental Science, 2007, 28(2): 304-308.
- [20] Hjorth M. Plankton stress responses from PAH exposure and nutrient enrichment. Marine Ecology Progress Series, 2008, 363: 121-130.
- [21] Singh A K, Kumar H D. Inhibitory effects of petroleum oil on photosynthetic electron transport system in the cyanobacterium *Anabaena doliolum*. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology, 1991, 47: 890-895.
- [22] Sargian P, Mas S, Pelletier E, Demers S. Multiple stressors on an Antarctic microplankton assemblage: water soluble crude oil and enhanced UVBR level at Ushuaia (Argentina). Polar Biology, 2007, 30: 829-841.
- [23] Sibley P K, Harris M L, Bestari K T J, Steele T A, Robinson R D, Gensemer R W, Day K E, Solomon K R. Response of phytoplankton communities to liquid creosote in freshwater microcosms. Environmental Toxicology and Chemistry, 2001, 20(12): 2785-2793.
- [24] Wang Y, Tang X X, Li Y Q, Li Y. Stimulation effect of anthracene on marine microalgae growth. Chinese Journal of Applied Ecology, 2002, 13(3): 343-346.
- [25] Ohwada K, Nishimura M, Wada M, Nomura H, Shibata A, Okamoto K, Toyoda K, Yoshida A, Takada H, Yamada M. Study of the effect of water-soluble fractions of heavy-oil on coastal marine organisms using enclosed ecosystems, mesocosms. Marine Pollution Bulletin, 2003, 47: 78-84.
- [26] Nayar S, Gohb P L, Chou L M. Environmental impacts of diesel fuel on bacteria and phytoplankton in a tropical estuary assessed using in situ mesocosms. Ecotoxicology, 2005, 14: 397-412.
- [27] Semple K T, Cain R B, Schmidt S. Biodegradation of aromatic compounds by microalgae. Fems Microbiology Letters, 1999, 170(2), 291-300.
- [28] Juhasz A L, Naidu R. Bioremediation of high molecular weight polycyclic aromatic hydrocarbons: a review of the microbial degradation of benzo[a] pyrene. International Biodeterioration and Biodegradation. , 2000, 45(1/2): 57-88.
- [29] Jiang Z B, Zeng J N, Chen Q Z, Liao Y B, Shou L, Xu X Q, Liu J J, Huang Y J. Dynamic change of phytoplankton cell density after thermal

shock and chlorination in a subtropical bay in China. *Journal of Plant Ecology*, 2008, 32(6): 1386-1396.

参考文献:

- [1] 国家海洋局. 2008 年中国海洋环境质量公报. 北京, 2009 [1 月]. <http://www.soa.gov.cn/hyjww/hygb/hyhjzlgb/2009/02/1225332550476526.htm>.
- [4] 张蕾, 王修林, 韩秀荣, 祝陈坚, 石晓勇, 蒋凤华, 杨汝君. 石油烃污染物对海洋浮游植物生长的影响——实验与模型. *青岛海洋大学学报*, 2002, 32(5): 804-810.
- [5] 唐学玺, 黄键, 王艳玲, 王蒙, 王丽丽. UV-B 辐射和萘对三角褐指藻 DNA 伤害的相互作用. *生态学报*, 2002, 22(3): 375-378.
- [6] 王修林, 杨茹君, 祝陈坚. 石油烃污染物存在下旋链角毛藻生长的粒度效应初步研究. *中国海洋大学学报*, 2004, 34(5): 849-853.
- [9] 张军, 王修林, 韩秀荣, 祝陈坚, 石晓勇. 海洋浮游植物对 0 号柴油水溶组分的生物富集动力学模型. *环境科学*, 2004, 25(1): 14-19.
- [12] 国家标准化管理委员会. GB/T 17378.4-2007 海洋监测规范. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- [15] 国家标准化管理委员会. GB/T 12763.6-2007 海洋调查规范. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- [19] 李克强, 王修林, 祝陈坚, 石晓勇, 胡海燕, 李瑞香, 孙胜玉. No. 0 柴油水溶组分海洋浮游植物生态效应研究. *环境科学*, 2007, 28(2): 304-308.
- [24] 王悠, 唐学玺, 李永祺, 刘泳. 低浓度萘对两种海洋微藻生长的兴奋效应. *应用生态学报*, 2002, 13(3): 343-346.
- [29] 江志兵, 曾江宁, 陈全震, 廖一波, 寿鹿, 徐晓群, 刘晶晶, 黄逸君. 热冲击和加氯后亚热带海区浮游植物细胞数量的动态变化. *植物生态学报*, 2008, 32(6): 1386-1396.

CONTENTS

Sex ratio and spatial pattern in <i>Populus davidiana</i> in Changbai Mountain	PAN Chunfang, ZHAO Xiuhai, XIA Fucui, et al	(297)
The relationship between freeze-tolerance and changes in activities of antioxidant enzymes and osmolyte content in the leaves of white clover during early winter freeze-thaw cycles	ZHAO Mei, ZHOU Ruilian, LIU Jianfang, et al	(306)
Gray correlation analysis on naturalness of the primary forest types on the Losses Plateau	WANG Naijiang, LIU Zengwen, XU Zhao, et al	(316)
Photosynthetic responses of <i>Gracilaria lemaneiformis</i> to two antibiotics	JIAN Jianbo, ZOU Dinghui, LIU Wenhua, et al	(326)
Litter C:N:P ecological stoichiometry character of plant communities in typical Karst Peak-Cluster Depression	PAN Futing, ZHANG Wei, WANG Kelin, et al	(335)
Effects of groundwater depth on the gas exchange and chlorophyll fluorescence of <i>Populus euphratica</i> in the lower reaches of Tarim River	CHEN Yapeng, CHEN Yaning, XU Changchun, et al	(344)
Monitoring and assessment of vegetation variation in Northern Shaanxi based on MODIS/NDVI	SONG Fuqiang, XING Kaixiong, LIU Yang, et al	(354)
Effects of fire on the structure of herbage synusia vegetation in desertified steppe, North China	HE Haoyu, SU Jieqiong, HUANG Lei, et al	(364)
Physiological responses of four broadleaved seedlings to drought stress simulated by PEG	FENG Huifang, XUE Li, REN Xiangrong, et al	(371)
Effects of the different width of urban green belts on the temperature and humidity	ZHU Chunyang, LI Shuhua, JI Peng, et al	(383)
Diversity of waterbirds and change in home range of bar-headed geese <i>Anser indicus</i> during breeding period at Hangcuo Lake of Tibet, China	ZHANG Guogang, LIU Dongping, QIAN Fawen, et al	(395)
The habitat selection of Giant panda in Wanglang Nature Reserve, Sichuan Province, China	KANG Dongwei, KANG Wen, TAN Liuyi, et al	(401)
Effects of vigilance on the patterns of functional responses of foraging in voles (<i>Microtus fortis</i>)	TAO Shuanglun, YANG Xifu, DENG Kaidong, et al	(410)
Influence of heavy metal pollution on soil animal community in Luqiao, Taizhou City	BAI Yi, SHI Shidi, QI Xin, et al	(421)
Annual quantitative distribution of meiofauna in relation to sediment environment in Qingdao Bay	DU Yongfen, XU Kuidong, LEI Yanli, et al	(431)
Population genetic variations and phylogeography of <i>Macropodus opercularis</i>	WANG Peixin, BAI Junjie, HU Yinchang, et al	(441)
Contribution of C ₃ and C ₄ host plants for the overwintering and 1 st generation of <i>Helicoverpa armigera</i> (Hübner) in Northern China	YE Lefu, FU Xue, GE Feng	(449)
Relationships between two species of insect pests and their natural enemies in tea gardens of three different altitudes	BI Shoudong, KE Shengbing, XU Jinfeng, et al	(455)
The diversity of ground-dwelling beetles at cultivated land and restored habitats on the Bashang plateau	LIU Yunhui, YU Zhenrong, WANG Changliu, et al	(465)
Characteristics of soil microbial communities under dry and wet condition in Zoige alpine wetland	NIU Jia, ZHOU Xiaoqi, JIANG Na, et al	(474)
Microbial diversity of the jujube (<i>Zizyphus jujuba</i> Mill.) fruits surface during harvesting and storage stages	SHA Yuexia	(483)
Effects of powdery mildew infection on zucchini growth under elevated CO ₂ and temperature	LIU Junzhi, GE Yaming, Pugliese Massimo, et al	(491)
Impacts of arbuscular mycorrhizal fungi on soil aggregation dynamics of neutral purple soil	PENG Sili, SHEN Hong, YUAN Junji, et al	(498)
The bacterial community structures in Xinjiang fault belt spring analyzed by PCR-DGGE	WU Jiangchao, GAO Xiaoqi, ZENG Jun, et al	(506)
The impact of oil pollution on marine phytoplankton community growth change	HUANG Yijun, CHEN Quanzhen, ZENG Jiangning, et al	(513)
Root morphological and physiological responses of rice seedlings with different tolerance to cadmium stress	HE Junyu, REN Yanfang, WANG Yangyang, et al	(522)
Non-point pollution control for landscape conservation analysis based on CLUE-S simulations in Miyun County	PAN Ying, LIU Yunhui, WANG Jing, et al	(529)
Analysis on ecological land rent based on ecological footprint	LONG Kaisheng, CHEN Ligen, ZHAO Yali	(538)
Relationship of vegetation degradation classification and landscape accessibility classification in Shenzhen	LIU Yufan, CHEN Xue, LI Guicai, et al	(547)
Review and Monograph		
Risk management approaches for environmental and human health risks in the United States and Canada	HE Guizhen, LÜ Yonglong	(556)
Plant wax and its response to environmental conditions: an overview	LI Jingjing, HUANG Junhua, XIE Shucheng	(565)
Acid corrosion mechanism of the sulfate-reducing bacteria and protecting studies in oilfield	ZHUANG Wen, CHU Liye, SHAO Hongbo	(575)
Advance in the research of phyllospheric microorganism	PAN Jiangang, HU Qing, QI Hongyan, et al	(583)

2009 年度生物学科总被引频次和影响因子前 10 名期刊*

(源于 2010 年版 CSTPCD 数据库)

排序 Order	期刊 Journal	总被引频次 Total citation	排序 Order	期刊 Journal	影响因子 Impact factor
1	生态学报	11764	1	生态学报	1.812
2	应用生态学报	9430	2	植物生态学报	1.771
3	植物生态学报	4384	3	应用生态学报	1.733
4	西北植物学报	4177	4	生物多样性	1.553
5	生态学杂志	4048	5	生态学杂志	1.396
6	植物生理学通讯	3362	6	西北植物学报	0.986
7	JOURNAL OF INTEGRATIVE PLANT BIOLOGY	3327	7	兽类学报	0.894
8	MOLECULAR PLANT	1788	8	CELL RESEARCH	0.873
9	水生生物学报	1773	9	植物学报	0.841
10	遗传学报	1667	10	植物研究	0.809

★《生态学报》2009 年在核心版的 1964 种科技期刊排序中总被引频次 11764 次,全国排名第 1;影响因子 1.812,全国排名第 14;第 1—9 届连续 9 年入围中国百种杰出学术期刊;中国精品科技期刊

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 31 卷 第 2 期 (2011 年 1 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA
(Semimonthly, Started in 1981)
Vol. 31 No. 2 2011

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	冯宗炜	Editor-in-chief	FENG Zong-Wei
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@cspg.net	Distributed by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China Tel:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.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		

