

ISSN 1000-0933

CN 11-2031/Q

生态学报

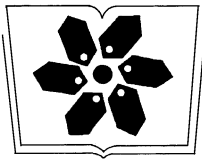
Acta Ecologica Sinica



第 32 卷 第 22 期 Vol.32 No.22 **2012**

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 32 卷 第 22 期

2012 年 11 月 (半月刊)

目 次

CO ₂ 浓度和温度升高对噬藻体 PP 增殖的联合作用	牛晓莹,程 凯,荣茜茜,等 (6917)
1956—2009 年内蒙古苏尼特左旗荒漠草原的降水格局	陈 军,王玉辉 (6925)
两个污水处理系统的能值与经济综合分析	李 敏,张小洪,李远伟,等 (6936)
退化草地阿尔泰针茅种群个体空间格局及关联性	赵成章,任 珩 (6946)
地表覆盖栽培对雷竹林凋落物养分及其化学计量特征的影响	刘亚迪,范少辉,蔡春菊,等 (6955)
福州酸雨区次生林中台湾相思与银合欢叶片的 12 种元素含量	郝兴华,洪 伟,吴承祯,等 (6964)
“雨花露”水蜜桃主要害虫与其捕食性天敌的关系	柯 磊,施晓丽,邹运鼎,等 (6972)
大兴安岭林区 10 小时时滞可燃物湿度的模拟	胡天宇,周广胜,贾丙瑞 (6984)
陕北风沙区不同植被覆盖下的土壤养分特征	李文斌,李新平 (6991)
南方型杨树人工林土壤呼吸及其组分分析	唐罗忠,葛晓敏,吴 麟,等 (7000)
黑河下游土壤水盐对生态输水的响应及其与植被生长的关系	鱼腾飞,冯 起,刘 蔚,等 (7009)
树木胸径大小对树干液流变化格局的偏度和时滞效应	梅婷婷,赵 平,倪广艳,等 (7018)
外来植物紫茎泽兰入侵对土壤理化性质及丛枝菌根真菌(AMF)群落的影响	于文清,刘万学,桂富荣,等 (7027)
基于 Landsat TM 的热带精细地物信息提取的模型与方法——以海南岛为例	王树东,张立福,陈小平,等 (7036)
雪被去除对川西高山冷杉林冬季土壤水解酶活性的影响	杨玉莲,吴福忠,杨万勤,等 (7045)
不同土壤水分处理对水稻光合特性及产量的影响	王唯逍,刘小军,田永超,等 (7053)
木蹄层孔菌不同居群间生长特性、木质素降解酶与 SRAP 标记遗传多样性	曹 宇,徐 晔,王秋玉 (7061)
加拿大一枝黄花入侵对土壤动物群落结构的影响	陈 雯,李 涛,郑荣泉,等 (7072)
间作对玉米品质、产量及土壤微生物数量和酶活性的影响	张向前,黄国勤,卞新民,等 (7082)
接种 AM 真菌对玉米和油菜种间竞争及土壤无机磷组分的影响	张宇亭,朱 敏,钱岩相注,等 (7091)
大亚湾冬季不同粒级浮游生物的氮稳定同位素特征及其与生物量的关系	柯志新,黄良民,徐 军,等 (7102)
太湖水华期间有毒和无毒微囊藻种群丰度的动态变化	李大命,叶琳琳,于 洋,等 (7109)
锌胁迫对小球藻抗氧化酶和类金属硫蛋白的影响	杨 洪,黄志勇 (7117)
基于国家生态足迹账户计算方法的福建省生态足迹研究	邱寿丰,朱 远 (7124)
能源活动 CO ₂ 排放不同核算方法比较和减排策略选择	杨喜爱,崔胜辉,林剑艺,等 (7135)
基于生境等价分析法的胶州湾围填海造地生态损害评估	李京梅,刘铁鹰 (7146)
县级生态资产价值评估——以河北丰宁县为例	王红岩,高志海,李增元,等 (7156)
专论与综述	
丛枝菌根提高宿主植物抗旱性分子机制研究进展	李 涛,杜 娟,郝志鹏,等 (7169)
城市土壤碳循环与碳固持研究综述	罗上华,毛齐正,马克明,等 (7177)
基于遥感的光合有效辐射吸收比率(FPAR)估算方法综述	董泰锋,蒙继华,吴炳方 (7190)
光衰减及其相关环境因子对沉水植物生长影响研究进展	吴明丽,李叙勇 (7202)
浮游动物化学计量学稳态性特征研究进展	苏 强 (7213)
研究简报	
2010 年两个航次獐子岛海域浮游纤毛虫丰度和生物量	于 莹,张武昌,张光涛,等 (7220)
基于熵值法的我国野生动物资源可持续发展研究	杨锡涛,周学红,张 伟 (7230)
残落物添加对农林复合系统土壤有机碳矿化和土壤微生物量的影响	王意锟,方升佐,田 野,等 (7239)
人工湿地不同季节与单元之间根际微生物多样性	陈永华,吴晓芙,张珍妮,等 (7247)

期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 338 * zh * P * ¥70.00 * 1510 * 36 * 2012-11



封面图说: 水杉农田防护林中的小麦熟了——水杉曾广泛分布于北半球,第四纪冰期以后,水杉属的其他种类全部灭绝,水杉却在中国川、鄂、湘边境地带得以幸存,成为旷世奇珍,野生的水杉是国家一级保护植物。由于水杉耐水,适应力强,生长极为迅速,其树干通直挺拔,高大秀颀,树冠呈圆锥形,姿态优美,自发现后被人们在中国南方广泛种植,不仅成为了湖边、道路两旁的绿化观赏植物,更成为了农田防护林的重要树种。此图中整齐划一的水杉防护林像忠实的哨兵一样,为苏北农村即将成熟的麦田站岗。

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

DOI: 10.5846/stxb201110091477

柯志新, 黄良民, 徐军, 马艳娥. 大亚湾冬季不同粒级浮游生物的氮稳定同位素特征及其与生物量的关系. 生态学报, 2012, 32(22): 7102-7108.

Ke Z X, Hung L M, Xu J, Ma Y E. The stable nitrogen isotope of size-fractioned plankton and its relationship with biomass during winter in Daya Bay. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(22): 7102-7108.

大亚湾冬季不同粒级浮游生物的氮稳定同位素特征及其与生物量的关系

柯志新¹, 黄良民^{1,*}, 徐 军², 马艳娥¹

(1. 中国科学院南海海洋研究所 海洋生物资源可持续利用重点实验室, 广州 510301;

2. 中国科学院水生生物研究所, 武汉 430072)

摘要:生物量在营养级上的分布作为一种生态系统的指示指标,可以指示因人类干扰和环境变化导致的生态系统的改变,揭示生态系统功能的差异性。调查了冬季大亚湾不同区域各粒级浮游生物的生物量大小及其氮稳定同位素丰度比值($\delta^{15}\text{N}$)与环境因子的关系,通过构建营养级谱比较了大亚湾不同区域浮游食物网结构的差异。研究结果显示,浮游生物的 $\delta^{15}\text{N}$ 值基本随着粒径的增大而增加,但100—212 μm 粒级的 $\delta^{15}\text{N}$ 值为5.08‰,略低于1.2—100 μm 粒级的5.58‰。>500 μm 粒级的 $\delta^{15}\text{N}$ 值最大,平均为8.16‰。在湾口和敞水带的S1、S9站各粒级的 $\delta^{15}\text{N}$ 都要小于其他站位,而各粒级 $\delta^{15}\text{N}$ 的最大值一般都出现在湾底的S8站。在各粒级颗粒物中,1.2—100 μm 粒级的 $\delta^{15}\text{N}$ 最适合用来指示水体的环境状况,受陆源输入影响较小的海域的 $\delta^{15}\text{N}$ 值小。生物量与氮稳定同位素构建的营养级谱的斜率与总溶解氮的浓度和氮磷比呈显著负相关关系。处于湾口的站位的营养级谱的谱线要更陡峭一些,表明该处捕食者/被捕食者的比率更低。

关键词:氮稳定同位素;浮游生物;浮游食物网;营养级谱;大亚湾

The stable nitrogen isotope of size-fractioned plankton and its relationship with biomass during winter in Daya Bay

KE Zhixin¹, HUNG Liangmin^{1,*}, XU Jun², MA Yan'e¹

1 Key Laboratory of Marine Bio-resource Sustainable Utilization, South China Sea Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510301, China

2 Institute of Hydrobiology, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430072, China

Abstract: The relationship between abundance and trophic level is an ecosystem-level indicator of anthropogenic influences and environmental changes, and can reveal the differences in ecosystem structure and function. The present study investigated the relationship between the biomass and $\delta^{15}\text{N}$ value of size-fractioned particulate organic matters, and compared the structure of pelagic food web of Daya Bay using the method of trophic spectrum. Sample sites were selected: S1 in the mouth of Daya Bay, S3 in the aquaculture area, S5 in the effluent area of Nuclear Power Plant, S8 in the inner area of Daya Bay, S9 in the pelagic area, and S11 in the mouth of Fanhe Cove. Plankton samples were separated into four size fractions: 1.2—100 μm , 100—212 μm , 212—500 μm , and > 500 μm . The average biomass of four size fractions were 12.04 mg dry wt/L, 2.92 mg dry wt/L, 0.032 mg dry wt/L, and 0.015 mg dry wt/L in the six sample sites respectively. The average $\delta^{15}\text{N}$ values of four size fractions were 5.58‰, 5.08‰, 7.36‰, and 8.16‰ respectively. The

基金项目:国家自然科学基金(41006066,41130855);中国科学院南海海洋研究所青年人才领域前沿项目(SQ200907);广东省科技计划项目(2009B030600004);中国科学院海洋生物资源可持续利用重点实验室开放基金

收稿日期:2011-10-09; 修订日期:2012-08-24

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: hlm@scsio.ac.cn

results showed that the $\delta^{15}\text{N}$ values of size-fractionated plankton generally increased with the size class except the 100—212 μm fraction. The average $\delta^{15}\text{N}$ value of 100—212 μm fraction was lower than the 1.2—100 μm fraction, which may be attributed to the more micro-zooplankton and detritus in the 1.2—100 μm fraction. The $\delta^{15}\text{N}$ of each size fractions was low in the mouth of Daya Bay (S1) and pelagic area (S9). The tendency of $\delta^{15}\text{N}$ was $\text{S1} < \text{S9} < \text{S11} < \text{S3} < \text{S5} < \text{S8}$ in the fractions of 1.2—100 μm and $> 500 \mu\text{m}$. In the fraction of 100—212 μm , the tendency of $\delta^{15}\text{N}$ changed to $\text{S5} < \text{S1} < \text{S9} < \text{S11} < \text{S3} < \text{S8}$. In the inner zone of Daya Bay (S8), $\delta^{15}\text{N}$ values were higher in each fractions than those of other sites. Previous studies suggested that anthropogenic nutrient inputs can increase the $\delta^{15}\text{N}$ value of particulate organic matters and their $\delta^{15}\text{N}$ value can well indicate the anthropogenic eutrophication in aquatic ecosystems. Our results showed that the $\delta^{15}\text{N}$ value of 1.2—100 μm fraction was most suitable to indicate the variation of environmental condition among the size fractions, which was significantly correlated with Chl *a*, SiO_3 , NO_3 , DIN and DIN/DIP. We constructed the trophic spectrum according to the biomass and $\delta^{15}\text{N}$ value of size-fractionated plankton in the six sites. The average slope of trophic spectrum was -0.95 . The slope of trophic spectrum was steepest in S1 with a value of -1.3 and was gentlest in S5 with a value of -0.7 . The slope value of trophic spectrum were $\text{S1} < \text{S3} < \text{S9} < \text{S11} < \text{S8} < \text{S5}$. There were significantly negative correlation between the slopes of trophic spectrum and DIN and DIN/DIP. The concentration of DIN and Chl *a* were highest in the steepest S1. It suggested that the high nutrient concentration and primary production favor to a steeper trophic spectrum and a lower predator/prey ratio in the pelagic food web in winter of Daya Bay.

Key Words: stable nitrogen isotope; plankton; pelagic food web; trophic spectrum; Daya Bay

生物体氮稳定同位素技术广泛地应用于生态系统的研究中。在食物链传递中,氮稳定同位素(^{15}N)通常随着营养等级升高而富集,并且每个营养等级富集量相对恒定(3‰—5‰),一般被用于研究生物之间的营养级关系^[1]。通过测定同一生态环境中动物组织的氮稳定同位素比值($\delta^{15}\text{N}$),就可以划分动物的营养级位置。近年来越来越多的研究表明,生物体稳定性同位素比值的改变能够灵敏地指示因为环境改变、人类活动影响^[2-4]和外来物种的入侵^[5-6]等所导致的食物网结构的改变。

海洋食物网有着典型的大小结构特征,捕食者的个体总是大于被捕食者^[7]。通过调查不同粒径浮游生物类群的稳定同位素值的差异来研究浮游食物网的结构成为如今生态学家研究微型食物网的一个常用手段^[8-10]。Rolff^[9]发现粒径为 20—500 μm 的悬浮有机质(POM)的 $\delta^{15}\text{N}$ 值和粒径的对数呈显著的线性相关,认为在海洋浮游食物网中存在以个体大小为基础的消费关系。Loick 等^[11]通过研究发现越南上升流海区的浮游生物的 $\delta^{15}\text{N}$ 值随个体体型的变大而增加,并由此推论更大的浮游生物拥有更高的营养生态位。大小粒径的同位素技术的应用,可以估算食物网捕食者和被捕食者的生物量比例和能量在各营养级中的转换效率^[12]。海洋生态系统中各种生物之间的摄食关系错综复杂,而且生物的食性随环境食物种类和浓度的变化还经常发生变化,食物网结构和功能的研究非常困难。粒径谱理论为人们提供了一个快速简洁的方法对海洋生态系统进行分析并对其结构功能做出快速评估^[13]。生物量在营养级上的分布(营养级谱)作为一种生态系统的指示指标,可以指示因人类干扰和环境变化导致的生态系统的改变,揭示不同生态系统功能的差异^[12-14]。国内关于浮游食物网粒级结构的研究很少,蔡德陵等对渤海分粒级的浮游动物的碳稳定同位素(^{13}C)研究发现浮游生物的营养层次随颗粒的增大而升高^[15]。左涛等对南黄海和长江口的浮游生物粒级大小与现存量的关系进行了研究,认为浮游动物的种类多样性对标准生物量谱的特征参数有较显著的影响^[16-17]。目前国内还没有关于浮游生物的稳定氮同位素比值与现存量的相关研究。

大亚湾是我国亚热带海域的重要海湾之一,海区环境的变化过程以及生态系统的响应是当前大亚湾生态环境研究所面临的亟需解决的关键性科学技术问题之一^[18]。人类活动、环境变化对海洋食物网的结构和生态系统功能的影响应该得到人们的重视。应用稳定同位素技术对大亚湾浮游食物网的生态学研究还未见有报道。本研究探讨了冬季大亚湾不同区域各粒级浮游生物的生物量大小及其与氮稳定同位素含量的关系,通

过构建营养级谱比较了大亚湾不同区域浮游食物网结构的差异,希望能为认识大亚湾食物网结构的区域差异以及环境变化对浮游食物网结构的影响提供帮助。

1 材料与方法

本研究的采样工作是 2010 年 1 月跟随中科院大亚湾海洋监测站的采样船进行的,共设 6 个采样站位,分别代表了大亚湾的几个不同的典型生境^[19]。其中,S1 位于湾口,S3 和 S8 处于养殖活动影响的区域;S5 位于核电站温排水的影响区;S9 位于大亚湾中部;S11 位于范和港的湾口(图 1)。

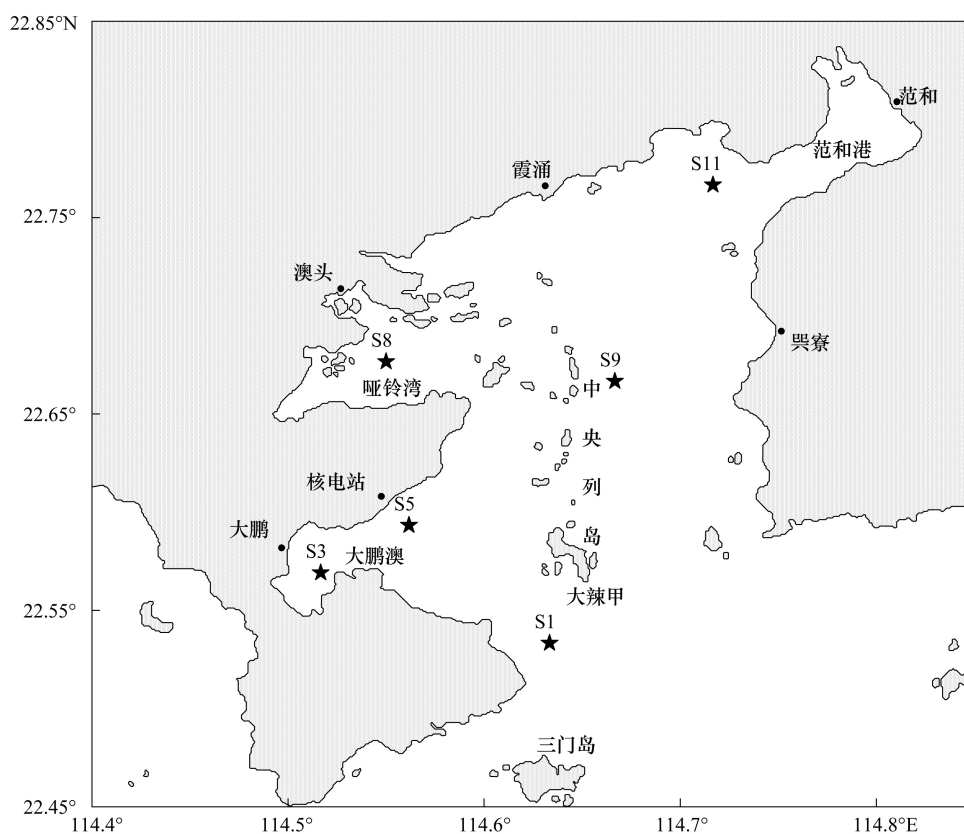


图 1 大亚湾略图及采样站位分布

Fig. 1 Map of Daya Bay and sampling stations

浮游生物粒级的划分和采样方法参考 Rau 等^[8]和 Rolff^[9]。浮游生物的粒级梯度为 1.2—100 μm 、100—212 μm 、212—500 μm 和 > 500 μm 。各粒径组样品的采样方法如下:在各站位取表、底层水样,混合均匀后用 212 μm 的尼龙筛绢预过滤。取 5 升混合水样用 100 μm 的筛绢过滤分离出颗粒物,将筛绢上的颗粒物反洗到蒸馏水中,再用 GF/C 滤膜过滤获得 100—212 μm 粒级的样品;取 1.5 L 经 100 μm 尼龙筛绢预过滤的水样用 GF/C 滤膜过滤,获得 1.2—100 μm 粒级的样品。由于 212—500 μm 和 > 500 μm 粒径组的生物量在水体中一般比较少,先用浅水 II 型浮游生物网(网孔为 160 μm)自水体从底至表垂直拖网进行定量采集,然后对采集到的样品依次用 500 μm 和 212 μm 的筛绢过滤分离,用蒸馏水反洗后用 GF/C 滤膜收集。拖网采集的时候记录拖网绳长和流量计的读数,以便进行生物密度的定量换算。每个站位设 2 个重复。所有的用于样品富集的 GF/C 滤膜都预先于马弗炉里经过 450℃ 预灼烧 4h 以除去可能的有机质的影响,保存在干燥器中,使用前用十万分之一的电子天平称出滤膜的初始重量。

将承载了各样品的滤膜用锡纸包裹,置于 -20℃ 冰箱保存,到实验室于 60℃ 烘干 24 h 至恒重,然后放入干燥器中冷却至室温,用天平再次称重,根据前后滤膜重量差值和过滤水量便可计算出相应样品的生物量大小。将经称量分析之后的各样品用研钵研磨成均匀粉末,放入干燥器保存留待 $\delta^{15}\text{N}$ 的分析。分析仪器为

Delta Plus Finnegan 同位素质谱仪。获得各粒径组的氮稳定同位素比值后,结合各粒径组的生物量大小分析各站位浮游食物网结构的特征。叶绿素 *a* 用萃取荧光法于 Turner 荧光计下测定。海水的营养盐浓度用注射式营养盐自动分析仪(Lachat Inc. USA)测定。

2 结果

2.1 各粒径浮游生物的生物量大小

1.2—100 μm 的生物量平均为 12.04 mg 干重/L,最高值发生在 S9 站(14.73 mg 干重/L),最低值发生在 S5 站(10.13 mg 干重/L)。100—212 μm 粒级的生物量在各站位间的差异较小,平均为 2.92 mg 干重/L,最高值发生在 S1 站(3.83 mg 干重/L),最低值发生在 S8 站(2.29 mg 干重/L)。在小于 212 μm 的颗粒物中,1.2—100 μm 粒级的平均占生物量的 80.5%,100—212 μm 粒级的平均占 19.5%。

212—500 μm 和 > 500 μm 的粒级生物量在各站位间的差异比较明显。212—500 μm 粒级的生物量平均为 0.032 mg 干重/L,最高值发生在 S5 站(0.049 mg 干重/L),最低值发生在 S3 站(0.016 mg 干重/L)。>500 μm 粒级的生物量平均为 0.015 mg 干重/L,最高值发生在 S5 站(0.024 mg 干重/L),最低值发生在 S8 站(0.0064 mg 干重/L)。在大于 212 μm 的浮游生物中,212—500 μm 粒级的平均占生物量的 68%, > 500 μm 粒级的平均占 32%。

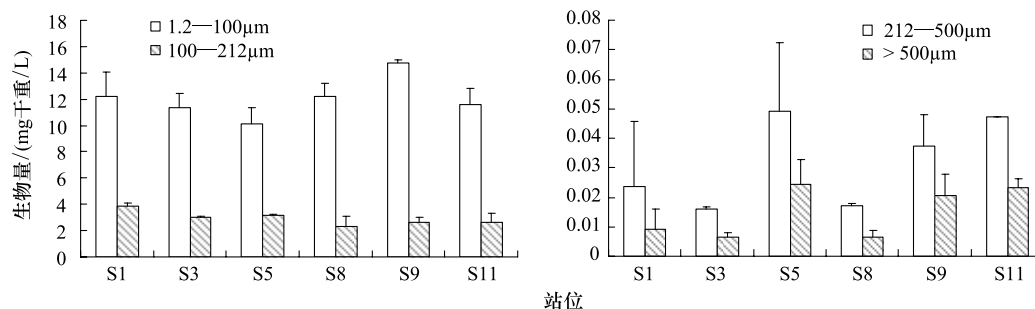


图2 各站位不同粒径的浮游生物的生物量大小

Fig. 2 Biomass of size-fractionated plankton in the six sampling stations

2.2 各粒径浮游生物的 $\delta^{15}\text{N}$ 含量

平均来看,不同粒径的浮游生物的 $\delta^{15}\text{N}$ 值基本随着粒径的增大而增大(图3),但 100—212 μm 粒级的 $\delta^{15}\text{N}$ 平均值为 5.08‰,略低于 1.2—100 μm 粒级的 5.58‰。200—500 μm 粒级的平均 $\delta^{15}\text{N}$ 值为 7.36‰; >500 μm 粒级的 $\delta^{15}\text{N}$ 值最大,平均为 8.16‰。在 S1 和 S9 站,1.2—100 μm 与 100—212 μm 粒级的 $\delta^{15}\text{N}$ 值基本没有差异,而在其他站位 100—212 μm 粒级的 $\delta^{15}\text{N}$ 值都比 1.2—100 μm 粒级的小。差异最大的在 S5 站,在这个站位 1.2—100 μm 的 $\delta^{15}\text{N}$ 值为 5.9‰,而 100—212 μm 的 $\delta^{15}\text{N}$ 值只有 4.8‰。除了 100—212 μm 粒级以外,其余粒级的 $\delta^{15}\text{N}$ 值在 S1 和 S9 站都要小于其他站位。1.2—100 μm 和 > 500 μm 粒级的 $\delta^{15}\text{N}$ 值在各站位的分布趋势都为: S1 < S9 < S11 < S3 < S5 < S8; 100—212 μm 粒级的 $\delta^{15}\text{N}$ 值在 S5 站最小,在各站位中的分布趋势为 S5 < S1 < S9 < S11 < S3 < S8。

2.3 按粒径的 $\delta^{15}\text{N}$ 值和生物量构建的营养级谱

各粒径浮游生物的生物量与 $\delta^{15}\text{N}$ 含量所构建的谱线如图 4 所示。各站位所获得的营养级谱的斜率平均

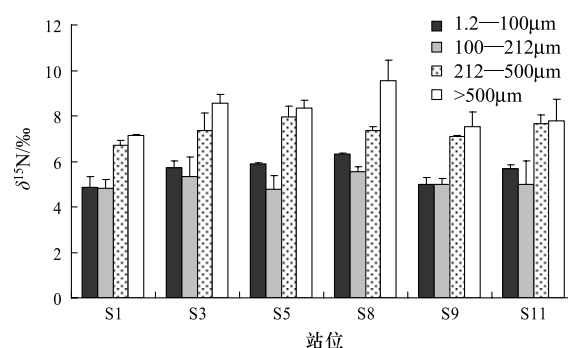


图3 各站点不同粒径浮游生物的 $\delta^{15}\text{N}$ 值

Fig. 3 $\delta^{15}\text{N}$ of size-fractionated plankton in the six sampling stations

为-0.95,其中 S1 站的谱线最陡峭,斜率为-1.3,S5 站位的谱线最平缓,斜率为-0.70。各站位的营养级谱的斜率大小趋势依次为:S1 < S3 < S9 < S11 < S8 < S5。

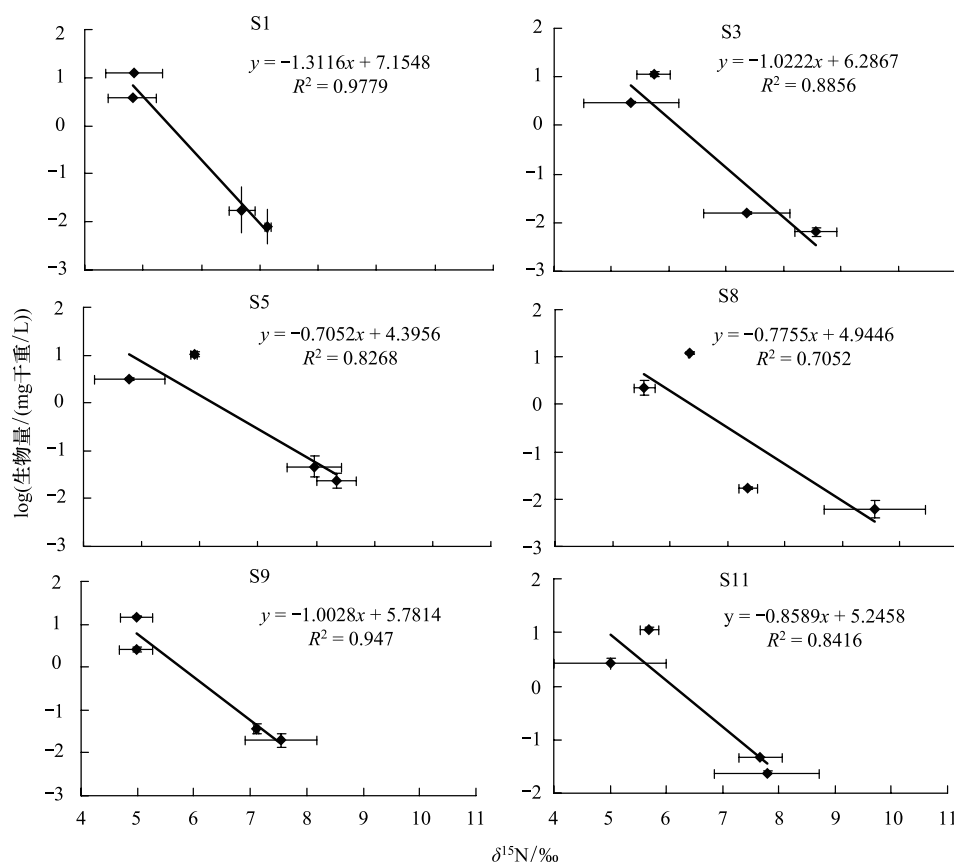


图4 各站点不同粒级浮游生物的生物量与 $\delta^{15}\text{N}$ 的关系

Fig. 4 The relationships between biomass and $\delta^{15}\text{N}$ of size-fractioned plankton in the six sampling stations

3 讨论

3.1 大亚湾水体浮游生物的 $\delta^{15}\text{N}$ 含量的空间和粒级差异

研究结果显示,在湾口和敞水带的 S1、S9 站各粒级的 $\delta^{15}\text{N}$ 都要小于其他站位,而各粒级 $\delta^{15}\text{N}$ 的最大值基本都出现在 S8 站。生物体 $\delta^{15}\text{N}$ 值的差异可以很好的指示人类污染的影响,人类活动和陆源输入会引起水体浮游生物的 $\delta^{15}\text{N}$ 值升高^[3, 20]。研究结果基本与这个规律相符,在受污染较少的湾口和中心站位各粒级的 $\delta^{15}\text{N}$ 值最低。S8 站位的富营养化程度最高,经常发生赤潮^[19, 21],各粒级浮游生物的 $\delta^{15}\text{N}$ 在此站点也都具有最高值。相关分析显示,各粒级的 $\delta^{15}\text{N}$ 值对环境因子的指示作用有很大的差异(表 1)。1.2—100 μm 粒级的 $\delta^{15}\text{N}$ 值与理化因子关系最密切,其与叶绿素、硅酸盐、硝氮、总溶解氮和氮磷比均呈显著的负相关($P < 0.05$)。1.2—100 μm 粒级的 $\delta^{15}\text{N}$ 应该最适于指示水体的环境状况。1.2—100 μm 粒级的悬浮颗粒物主要由小型及微型的浮游植物、部分微型浮游动物和有机碎屑组成,基本代表的是水体的初级生产者,对营养盐的吸收以及 $\delta^{15}\text{N}$ 分馏周转的速率较快,能及时反映当时的水体的环境状况;而大于 200 μm 的基本都是由一些浮游动物组成,环境因子的变化经食物链传递反映到浮游动物的 $\delta^{15}\text{N}$ 值的变化需要一定的周转时间,其 $\delta^{15}\text{N}$ 值则能更客观的反映该站点在一段时间内的环境状况。

许多研究已经指出在海洋浮游食物网中存在以个体大小为基础的消费关系,浮游生物的 $\delta^{15}\text{N}$ 值随个体体型的变大而增加^[9, 11]。对大亚湾网采浮游生物的分粒级样品镜检发现,> 500 μm 粒级的样品中肉食性的箭虫和莹虾的比例要远大于 200—500 μm 粒径组,200—500 μm 粒级则主要由植食性或杂食性的桡足类和枝角类组成。测得的 $\delta^{15}\text{N}$ 值结果基本能体现粒级之间的营养级差异(图 3),但是 100—212 μm 粒级的 $\delta^{15}\text{N}$ 略

低于 1.2—100 μm 粒级。分析认为,小于 212 μm 的悬浮颗粒物主要由浮游植物、微型浮游动物和有机碎屑等组成,这个范围内的颗粒物的 $\delta^{15}\text{N}$ 可能没有显著的随粒径递增的规律。1.2—100 μm 粒级的悬浮物可能包含了更多的有机碎屑或纤毛虫等微型浮游动物,导致呈现出比较高的 $\delta^{15}\text{N}$ 值。在受有机物质外源输入影响较小的 S1 和 S9 站,100—212 μm 和 1.2—100 μm 粒级的 $\delta^{15}\text{N}$ 值没有明显的差异,都处于一个比较低的水平。

表 1 各粒级浮游生物的 $\delta^{15}\text{N}$ 含量及营养级谱斜率与理化因子的相关分析 (* $P < 0.05$)

Table 1 Correlation coefficients between $\delta^{15}\text{N}$, slope of trophic spectrum, and environmental factors (* $P < 0.05$)

粒径 Size fractions/ μm	Chl a	SiO ₃	DIP	NH ₄	NO ₂	NO ₃	DIN	DIN/DIP
1.2—100	-0.908 *	-0.839 *	-0.16	-0.511	-0.795	-0.866 *	-0.861 *	-0.912 *
100—212	-0.632	-0.802	-0.098	-0.462	-0.697	-0.622	-0.656	-0.712
212—500	-0.695	-0.511	-0.367	-0.394	-0.634	-0.738	-0.718	-0.675
>500	-0.765	-0.812 *	0.077	-0.605	-0.725	-0.739	-0.788	-0.903 *
营养级谱斜率 Slop of trophic spetrum	-0.706	-0.698	-0.211	-0.722	-0.687	-0.760	-0.835 *	-0.847 *

3.2 营养级谱的环境指示作用

食物网结构是一个衡量生态系统对扰动反应的基本参数^[22]。海洋食物网错综复杂,人们一直寻求一个简化食物网的方法来研究浮游生态系统的结构和功能。Sheldon 于 1972 年首先提出了粒径谱理论^[23],然后在粒径谱的基础上,人们不断发展了生物量谱,能量谱。但是,在不同的生态系统中,捕食者和猎物的重量比变异很大,简单的用生物个体粒径或生物量来衡量生物的营养级有时也会存在很大的偏差^[24],这在很大程度上会限制粒径谱分析结果的精确性和科学性。稳定氮同位素 $\delta^{15}\text{N}$ 能够准确的确定食物链中各生物的营养级别^[1],用 $\delta^{15}\text{N}$ 确定的生物营养级作为级别划分的对象来分析食物网中不同营养级的生物量分布规律,可以更准确的体现浮游生态系统的结构和功能特征^[12]。

构建的 6 个站位的营养级谱的斜率与环境因子的相关分析表明,营养级谱的斜率与总溶解氮的浓度和氮磷比值呈显著负相关关系(表 1),与叶绿素的浓度接近显著负相关($P = 0.079$)。在大亚湾湾口的 S1 站的营养级谱的斜率最陡峭,而湾内的 S5 和 S8 站的营养级谱的斜率最平缓。海洋食物网粒径谱研究表明,健康的生态系统的生物量谱的斜率一般在 -1 左右^[19]。在对食物网个体生物量与丰度的研究中,Jennings 和 Mackinson 认为稳定的生态系统的生物量谱直线更陡峭,具有更长的食物链和较低的捕食者/被捕食者比率^[25]。研究显示,营养级谱斜率最陡峭的 S1 站的 DIN 和叶绿素浓度在各站位中是最高的,分别达到 11.20 $\mu\text{M/L}$ 和 6.09 $\mu\text{g/L}$ 。这似乎也说明,在大亚湾冬季氮营养盐浓度高、初级生产力高的区域的营养级谱的谱线要更陡峭一些,在这些站位中捕食者/被捕食者的比率更低。平均来看,大亚湾营养级谱斜率的平均值为 -0.95,但只有 S1 和 S9 站的营养级谱相关性达到显著水平($P < 0.05$),其他站位的营养级谱的相关性不显著。在经常发生赤潮的 S8 站,营养级谱的相关性最差,显示该站位不稳定的生态系统结构。营养级谱的相关性可能受到水体的富营养化水平、陆源输入或人类活动等因素的影响。目前本研究的环境梯度变化还比较小,数据量也较少,对于用稳定氮同位素构建的营养级谱特征值的范围及其生态学意义尚需进一步的研究。

致谢:本研究的样品采集得到大亚湾海洋生物综合实验站的钟瑜、王玉图等工作人员的热情帮助,特此致谢。

References:

- [1] Peterson B J, Frb B. Stable isotopes in ecosystem studies. Annual Reviews of Ecological Systematics, 1987, 18: 293-320.
- [2] Corbisier T N, Soares L S H, Petti M A V, Muto E Y, Silva M H C, McClelland J, Valiela I. Use of isotopic signatures to assess the food web in a tropical shallow marine ecosystem of Southeastern Brazil. Aquatic Ecology, 2006, 40: 381-390.
- [3] Vizzini S, Mazzola A. The effects of anthropogenic organic matter inputs on stable carbon and nitrogen isotopes in organisms from different trophic levels in a southern Mediterranean coastal area. Science of the Total Environment, 2006, 368: 723-731

- [4] Carlier A, Riera P, Amouroux J M, Bodiou J Y, Desmalades M, Grémare A. Food web structure of two Mediterranean lagoons under varying degree of eutrophication. *Journal of Sea Research*, 2008, 60: 264-275.
- [5] Gorokhova E, Hansson S, Höglander H, Andersen C M. Stable isotopes show food web changes after invasion by the predatory cladoceran *Cercopagis pengoi* in a Baltic Sea bay. *Oecologia*, 2005, 143: 251-259.
- [6] Brusati E D, Grosholz E D. Effect of native and invasive cordgrass on *Macoma petalum* density, growth, and isotopic signatures. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2007, 71: 517-522.
- [7] Brown J H, Gillooly J F. Ecological food webs: High-quality data facilitate theoretical unification. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2003, 100(4): 1467-1468.
- [8] Rau G H, Teyssie J L, Rassoulzadegan F, Fowler S W. $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ and $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$ variations among size-fractionated marine particles: implications for their origin and trophic relationships. *Marine Ecology Progress Series*, 1990, 59: 33-38.
- [9] Rolff C. Seasonal variation in C and N of size-fractionated plankton at a coastal station in the northern Baltic proper. *Marine Ecology Progress Series*, 2000, 203: 47-65.
- [10] Norkko A, Thrush S F, Cummings V J, Gibbs M M, Andrew N L, Norkko J, Schwarz A M. Trophic structure of coastal Antarctic food webs associated with changes in sea ice and food supply. *Ecology*, 2007, 88(11): 2810-2820.
- [11] Loick N, Dippner J, Doan H N, Liskow I, Voss M. Pelagic nitrogen dynamics in the Vietnamese upwelling area according to stable nitrogen and carbon isotope data. *Deep-sea Research I*, 2007, 54: 596-607.
- [12] Jennings S, Warr K J, Mackinson S. Use of size-based production and stable isotope analyses to predict trophic transfer efficiencies and predator-prey body mass ratios in food webs. *Marine Ecology Progress Series*, 2002, 240: 11-20.
- [13] Zhou L B, Tan Y H, Huang L M, Lian X P. The advances in the aquatic particle /biomass size spectra study. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(12): 3319-3333.
- [14] Gascuel D, Bozec Y M, Chassot E, Colomb A, Laurans M. The trophic spectrum: theory and application as an ecosystem indicator. *ICES Journal of Marine Science*, 2005, 62: 443-452.
- [15] Cai D L, Wang R, Bi H S. Trophic relationships in the Bohai ecosystem: preliminary investigation from $\delta^{15}\text{C}$ analysis. *Acta Ecologica Sinica*, 21(8): 1354-1359.
- [16] Zuo T, Wang J, Tang Q S, Jin X S. Biomass size spectrum of net plankton in the southern Huanghai Sea in autumn. *Acta Oceanologica Sinica*, 2008, 30(5): 71-80.
- [17] Zuo T, Wang J, Jin X S, Li Z Y, Tang Q S. Biomass size spectrum of net plankton in the adjacent area near the Yangtze River Estuary in spring. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(3): 1174-1182.
- [18] Wang Y S, Wang Z D, Huang L M. Environment changes and trends in Daya Bay in recent 20 years. *Journal of Tropical Oceanography*, 2004, 23(5): 85-95.
- [19] Wu M L, Wang Y S. Using chemometrics to evaluate anthropogenic effects in Daya Bay, China. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2007, 72: 732-742.
- [20] Cole M L, Valiela I, Kroeger K D, Tomasky G L, Cebrian J, Wigand C, McKinney R A, Grady S P. Assessment of a $\delta^{15}\text{N}$ isotopic method to indicate anthropogenic eutrophication in aquatic ecosystems. *Journal of Environmental Quality*, 2004, 33: 124-132.
- [21] Song X Y, Huang L M, Zhang J L, Huang H H, Li T, Su Q. Harmful algal blooms (HABs) in Daya Bay, China: An in situ study of primary production and environmental impacts. *Marine Pollution Bulletin*, 2009, 58: 1310-1318.
- [22] Laymen C A, Winemiller K O, Arrington D A, David B J. Body size and trophic position in a diverse tropical food web. *Ecology*, 2005, 86(9): 2530-2535.
- [23] Sheldon R W, Parkash A, Sutcliffe W H. The size distribution of particles in the ocean. *Limnology and Oceanography*, 1972, 17: 327-340.
- [24] Bode A, Alvarez-Ossorio M T, Cunha M E, Garrido S, Peleteiro J B, Porteiro C, Valdés L, Varela M. Stable nitrogen isotope studies of the pelagic food web on the Atlantic shelf of the Iberian Peninsula. *Progress in Oceanography*, 2007, 74: 115-131.
- [25] Jennings S, Mackinson S. Abundance-body mass relationships in size-structured food webs. *Ecology Letters*, 2003, 6: 971-974.

参考文献:

- [13] 周林滨, 谭辉, 黄良民, 连喜平. 水生生物粒径谱/生物量谱研究进展. *生态学报*, 2010, 30(12): 3319-3333.
- [15] 蔡德陵, 王荣, 毕洪生. 渤海生态系统的营养关系: 碳同位素研究的初步结果. *生态学报*, 21(8): 1354-1359.
- [16] 左涛, 王俊, 唐启升, 金显仕. 秋季南黄海网采浮游生物的生物量谱. *海洋学报*, 2008, 30(5): 71-80.
- [17] 左涛, 王俊, 金显仕, 李忠义, 唐启升. 春季长江口邻近外海网采浮游生物的生物量谱. *生态学报*, 2008, 28(3): 1174-1182.
- [18] 王友绍, 王肇鼎, 黄良民. 近20年来大亚湾生态环境的变化及其发展趋势. *热带海洋学报*, 2004, 23(5): 85-95.

CONTENTS

The combined effects of elevated CO ₂ and elevated temperature on proliferation of cyanophage PP	NIU Xiaoying, CHENG Kai, RONG Qianqian, et al (6917)
Precipitation pattern of desert steppe in Inner Mongolia, Sunite Left Banner: 1956—2009	CHEN Jun, WANG Yuhui (6925)
Emergy and economic evaluations of two sewage treatment systems	LI Min, ZHANG Xiaohong, LI Yuanwei, et al (6936)
Individual spatial pattern and spatial association of <i>Stipa krylovii</i> population in Alpine Degraded Grassland	ZHAO Chengzhang, REN Heng (6946)
Litter characteristics of nutrient and stoichiometry for <i>Phyllostachys praecox</i> over soil-surface mulching	LIU Yadi, FAN Shaohui, CAI Chunju, et al (6955)
Characteristics of leaf element concentrations of twelve nutrients in <i>Acacia confusa</i> and <i>Leucaena glauca</i> in secondary forests of acid rain region in Fuzhou	HAO Xinghua, HONG Wei, WU Chengzhen, et al (6964)
Relationships between main insect pests and their predatory natural enemies in “Yuhualu” juicy peach orchard	KE Lei, SHI Xiaoli, ZOU Yunding, et al (6972)
Simulating 10-hour time-lag fuel moisture in Daxinganling	HU Tianyu, ZHOU Guangsheng, JIA Bingrui (6984)
Soil nutrient characteristics under different vegetations in the windy and sandy region of northern Shaanxi	LI Wenbin, LI Xinpeng (6991)
Partitioning of autotrophic and heterotrophic soil respiration in southern type poplar plantations	TANG Luozhong, GE Xiaomin, WU Lin, et al (7000)
Soil water and salinity in response to water deliveries and the relationship with plant growth at the lower reaches of Heihe River, Northwestern China	YU Tengfei, FENG Qi, LIU Wei, et al (7009)
Effect of stem diameter at breast height on skewness of sap flow pattern and time lag	MEI Tingting, ZHAO Ping, NI Guangyan, et al (7018)
Invasion of exotic <i>Ageratina adenophora</i> Sprengel. alters soil physical and chemical characteristics and arbuscular mycorrhizal fungus community	YU Wenqing, LIU Wanxue, GUI Furong, et al (7027)
Models and methods for information extraction of complex ground objects based on LandSat TM images of Hainan Island, China	WANG Shudong, ZHANG Lifu, CHEN Xiaoping, et al (7036)
Effects of snow pack removal on soil hydrolase enzyme activities in an alpine <i>Abies faxoniana</i> forest of western Sichuan	YANG Yulian, WU Fuzhong, YANG Wanqin, et al (7045)
Effects of different soil water treatments on photosynthetic characteristics and grain yield in rice	WANG Weixiao, LIU Xiaojun, TIAN Yongchao, et al (7053)
Growth characteristics, lignin degradation enzyme and genetic diversity of <i>Fomes fomentarius</i> by SRAP marker among populations	CAO Yu, XU Ye, WANG Qiuyu (7061)
Effects of the invasion by <i>Solidago canadensis</i> L. on the community structure of soil animals	CHEN Wen, LI Tao, ZHENG Rongquan, et al (7072)
Effects of intercropping on quality and yield of maize grain, microorganism quantity, and enzyme activities in soils	ZHANG Xiangqian, HUANG Guoqin, BIAN Xinmin, et al (7082)
Influence of mycorrhizal inoculation on competition between plant species and inorganic phosphate forms	ZHANG Yuting, ZHU Min, XIAN Yanxiangwa, et al (7091)
The stable nitrogen isotope of size-fractionated plankton and its relationship with biomass during winter in Daya Bay	KE Zhixin, HUNG Liangmin, XU Jun, et al (7102)
Dynamics of toxic and non-toxic <i>Microcystis</i> spp. during bloom in the large shallow hypereutrophic Lake Taihu	LI Daming, YE Linlin, YU Yang, et al (7109)
Activities of antioxidant enzymes and Zn-MT-like proteins induced in <i>Chlorella vulgaris</i> exposed to Zn ²⁺	YANG Hong, HUANG Zhiyong (7117)
Ecological footprint in fujian based on calculation methodology for the national footprint accounts	QIU Shoufeng, ZHU Yuan (7124)
The comparison of CO ₂ emission accounting methods for energy use and mitigation strategy: a case study of China	YANG Xiai, CUI Shenghui, LIN Jianyi, et al (7135)
Ecological damage assessment of jiaozhou bay reclamation based on habitat equivalency analysis	LI Jingmei, LIU Tieying (7146)
The value assessment of county-level ecological assets: a case in Fengning County, Hebei Province	WANG Hongyan, GAO Zhihai, LI Zengyuan, et al (7156)
Review and Monograph	
Molecular basis for enhancement of plant drought tolerance by arbuscular mycorrhizal symbiosis: a mini-review	LI Tao, DU Juan, HAO Zhipeng, et al (7169)
A review of carbon cycling and sequestration in urban soils	LUO Shanghua, MAO Qizheng, MA Keming, et al (7177)
overview on methods of deriving fraction of absorbed photosynthetically active radiation (FPAR) using remote sensing	DONG Taifeng, MENG Jihua, WU Bingfang (7190)
Research progress on influencing of light attenuation and the associated environmental factors on the growth of submersed aquatic vegetation	WU Mingli, LI Xuyong (7202)
The framework of stoichiometry homeostasis in zooplankton elemental composition	SU Qiang (7213)
Scientific Note	
Abundance and biomass of planktonic ciliates in the sea area around Zhangzi Island, Northern Yellow Sea in July and August 2010	YU Ying, ZHANG Wuchang, ZHANG Guangtao, et al (7220)
Research of wildlife resources sustainable development based on entropy method in China	YANG Xitao, ZHOU Xuehong, ZHANG Wei (7230)
Influence of residue composition and addition frequencies on carbon mineralization and microbial biomass in the soils of agroforestry systems	WANG Yikun, FANG Shengzuo, TIAN Ye, et al (7239)
Seasonal changes in microbial diversity in different cells of a wetland system constructed for municipal sewage treatment	CHEN Yonghua, WU Xiaofu, ZHANG Zhenni, et al (7247)

《生态学报》2013 年征订启事

《生态学报》是中国生态学学会主办的生态学专业性高级学术期刊,创刊于 1981 年。主要报道生态学研究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;新书评介和学术、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

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 32 卷 第 22 期 (2012 年 11 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 32 No. 22 (November, 2012)

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:1000717	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		



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 70.00 元