

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica



第34卷 第3期 Vol.34 No.3 **2014**

中国生态学会
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 34 卷 第 3 期

2014 年 2 月 (半月刊)

目次

前沿理论与学科综述

- 灾后生态恢复评价研究进展 刘孝富,王文杰,李京,等 (527)
- 基于生态能量视角的我国小水电可持续性分析 庞明月,张力小,王长波 (537)

个体与基础生态

- 北部湾北部海域夏季微型浮游动物对浮游植物的摄食压力 马璐,曹文清,张文静,等 (546)
- 鲶鱼和胡子鲶的两性异形与雌性个体生育力 樊晓丽,林植华,丁先龙,等 (555)
- 环境温度对白头鹇代谢产热和蒸发失水的影响 林琳,曹梦婷,胡益林,等 (564)
- 灌溉对沙拐枣幼苗生长及氮素利用的影响 黄彩变,曾凡江,雷加强,等 (572)
- PAHs 污染土壤植物修复对酶活性的影响 朱凡,洪湘琦,闫文德,等 (581)
- 基于修正 RISKE 模型的重庆岩溶地区地下水脆弱性评价 魏兴萍,蒲俊兵,赵纯勇 (589)
- 排水沟蓄水条件下农田与排水沟水盐监测 潘延鑫,罗纨,贾忠华,等 (597)

种群、群落和生态系统

- 高寒退化草地不同海拔梯度狼毒种群分布格局及空间关联性 高福元,赵成章,卓马兰草 (605)
- 捕食者对空心莲子草叶甲种群的生物胁迫 刘雨芳,李菲,桂芳艳,等 (613)
- 夏、冬季南海北部浮游植物群落特征 马威,孙军 (621)
- 磨盘山天然次生林凋落物数量及动态 范春楠,郭忠玲,郑金萍,等 (633)
- 持续干旱对樱桃根际土壤细菌数量及结构多样性影响 刘方春,邢尚军,马海林,等 (642)
- 随机森林算法基本思想及其在生态学中的应用——以云南松分布模拟为例 张雷,王琳琳,张旭东,等 (650)
- 基于水文平衡的湿地退化驱动因子定量研究 侯鹏,申文明,王桥,等 (660)
- 华北低丘山地人工林蒸散的控制因子 黄辉,孟平,张劲松,等 (667)
- 新疆天山高寒草原不同放牧管理下的 CO_2 , CH_4 和 N_2O 通量特征 贺桂香,李凯辉,宋韦,等 (674)

景观、区域和全球生态

- 宁夏生态足迹影响因子的偏最小二乘回归分析 马明德,马学娟,谢应忠,等 (682)
- 引黄灌区土壤有机碳密度剖面特征及固碳速率 董林林,杨浩,于东升,等 (690)
- 自养微生物同化 CO_2 的分子生态研究及同化碳在土壤中的转化 吴小红,简燕,陈晓娟,等 (701)

资源与产业生态

- 基于能值分析法的矿区循环经济系统生态效率分析 孙玉峰,郭全营 (710)

基于 AD-AS 模型的海岸带生态系统综合承载力评估——以舟山海岸带为例 苏盼盼,叶属峰,过仲阳,等 (718)

城乡与社会生态

基于增强回归树和 Logistic 回归的城市扩展驱动力分析 李春林,刘 淼,胡远满,等 (727)

研究简报

陕西省不同生态区大气氮素干湿沉降的时空变异 梁 婷,同延安,林 文,等 (738)

不同覆盖方式对旱地果园水热特征的影响 刘小勇,李红旭,李建明,等 (746)

长白山苔原带土壤动物群落结构及多样性..... 王振海,殷秀琴,蒋云峰 (755)

最大可允许填海面积模拟——厦门西海域案例研究 林琛琛,饶欢欢,刘 岩,等 (766)

学术信息与动态

2013 年水文土壤学与自然资源可持续利用国际学术研讨会述评 张 骁,赵文武 (774)

期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 252 * zh * P * ¥90.00 * 1510 * 29 * 2014-02



封面图说: 云南松树冠——云南松为松科松属裸子植物,多生长在海拔 1000—3500m 的高山,喜光、耐干旱、耐瘠薄,适应酸性的红壤、黄壤,在其他树种不能生长的贫瘠石砾地或冲刷严重的荒山坡分布,易于天然更新。主要分布于四川西南部、云南、西藏东南部、贵州西部、广西西部,常形成大面积纯林,尤以云南分布最广,故有云南松之称。云南松树高可达 30m,胸径达 1m,树皮呈灰褐色,叶通常 3 针一束,鲜有两针,球果圆锥状卵圆形,种子近卵圆形或倒卵形。树干通直,木质轻软细密,是优质造纸、人造板原料,富含松脂是云南松的重要特点之一。

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/stxb201207201034

马璐, 曹文清, 张文静, 林元烧, 郑连明, 杨位迪, 王宇杰. 北部湾北部海域夏季微型浮游动物对浮游植物的摄食压力. 生态学报, 2014, 34(3): 546-554.

Ma L, Cao W Q, Zhang W J, Lin Y S, Zheng L M, Yang W D, Wang Y J. An ecological study on zooplankton in the northern Beibu Gulf V: the effects of microzooplankton grazing on phytoplankton in summer. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(3): 546-554.

北部湾北部海域夏季微型浮游动物对 浮游植物的摄食压力

马 璐, 曹文清*, 张文静, 林元烧, 郑连明, 杨位迪, 王宇杰

(厦门大学海洋与地球学院, 厦门大学海洋生物多样性与全球变化实验室, 厦门 361005)

摘要: 2011 年 8 月份于北部湾北部海域 5 个观测站位获得的分层水样, 分析了表层叶绿素 a 含量和表层微型浮游动物丰度以及类群组成; 同时于现场采用稀释培养法研究了该海域浮游植物生长率(μ)和微型浮游动物的摄食率(g)。分析和测定结果表明: 调查海区的微型浮游动物丰度 400—1167 个/L, 类群组成以无壳纤毛虫为主; 浮游植物的生长率为 -1.50 — 1.13 d^{-1} , 微型浮游动物摄食率为 0.33 — 1.08 d^{-1} ; 推算微型浮游动物对浮游植物现存量以及初级生产力的摄食压力分别为 28.1% — 66.0% 和 -7.4% — 438.4% 。相对于中国其他海区, 8 月份北部湾北部海域微型浮游动物摄食速率处于中等水平。调查期间, 广西沿海高生产力海区, 浮游植物生长率大于微型浮游动物动物的摄食率, 浮游植物生物量处于积累期; 涠洲岛以南海域, 浮游植物生产力较低, 微型浮游动物摄食作用是控制浮游植物生长的重要因素。

关键词: 微型浮游动物; 摄食压力; 浮游植物; 稀释法; 北部湾

An ecological study on zooplankton in the northern Beibu Gulf V: the effects of microzooplankton grazing on phytoplankton in summer

MA Lu, CAO Wenqing*, ZHANG Wenjing, LIN Yuanshao, ZHENG Lianming, YANG Weidi, WANG Yujie

Laboratory of Marine Biology Diversity and Goble Change, Collage of Marine & Earth Science, Xiamen University, Xiamen 361005, China

Abstract: In August 2011, we quantified the impact of microzooplankton grazing on phytoplankton production in the surface waters of the northern Beibu Gulf, Vietnam. Shipboard dilution incubation experiments were carried out at five stations to calculate phytoplankton specific growth rates and the specific rates of grazing losses to microzooplankton. Dilution experiments using chlorophyll a (Chl a) as a tracer were used to estimate daily rates in two size fractions; image-analyzed microscopy provided quantitative estimates of microzooplankton standing stock (including ciliate and vertebrate larvae). PFW (particle-free water) was used to dilute seawater to five target dilutions of 0%, 20%, 40%, 60%, and 80%. Microzooplankton grazing and phytoplankton growth rates were estimated by the linear regression of AGR (apparent growth rate) versus dilution factor. We estimated the grazing impact of microzooplankton on phytoplankton by calculating the percentage of phytoplankton standing stock and potential primary production ingested. Average total chlorophyll a concentration was $(0.67 \pm 0.58)\text{ }\mu\text{g/L}$. Small-celled phytoplankton dominated this particular community. A notable characteristic of the phytoplankton community structure was that nano- and picoplankton made up a significant portion. Aloricate ciliates dominated the microzooplankton samples, in particular *Strombidium*, which accounted for 27.2% of total aloricate ciliate abundance. In addition, loricate ciliates and copepod nauplii were recorded. Microzooplankton density

基金项目: 海湾公益项目(201005012)

收稿日期: 2012-07-20; 修订日期: 2013-06-21

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: wqcao@xmu.edu.cn

varied from 400 to 1167 ind/L. The horizontal distribution of microzooplankton was greater in nearshore than in offshore waters. Abundance did not differ significantly with chlorophyll a concentration in this study; however, there was a positive correlation between microzooplankton abundance and temperature. The phytoplankton growth rate ($< 200 \mu\text{m}$) ranged between -1.50 and 1.13 d^{-1} , with the highest values being associated with nearshore waters. Meanwhile phytoplankton mortality due to microzooplankton grazing ($0.33\text{--}1.08 \text{ d}^{-1}$) was highest at the same nearshore sites; however, growth rates were low at these sites. Consequently, microzooplankton consumed 28.1%—66.0% of chlorophyll a standing stocks and $-8.1\%\text{--}438.4\%$ of the primary production per day. However, the grazing rate of microzooplankton on nanoplankton ($2\text{--}20 \mu\text{m}$) varied from 1.87 to 0.52 d^{-1} , with an average of $(0.94 \pm 0.57) \text{ d}^{-1}$. Given that the rates of grazing on phytoplankton of $< 200 \mu\text{m}$ were lower than those on nanoplankton, we conclude that microzooplankton prefer to graze on nanoplankton. There was a positive correlation between phytoplankton growth rate and grazing rate; in addition, significant differences between grazing rate and chlorophyll a were found. This suggests that microzooplankton grazing activity is the main factor regulating the community structure and restraining the growth of phytoplankton. During the investigation period, microzooplankton grazing effectively controlled the growth of phytoplankton, consuming 176.2% of primary production on average. When grazing rates are far greater than phytoplankton growth rates, energy is transferred from lower to higher trophic levels more effectively. In the surface waters of the northern Beibu Gulf, microzooplankton largely control the growth of phytoplankton by grazing offshore rather than in nearshore waters where primary production is high. The growth and grazing rates combined promote planktonic ecosystem stability in this area. These results indicate that grazing by microzooplankton is a key process controlling the growth of phytoplankton in this area.

Key Words: microzooplankton; grazing pressure; phytoplankton; dilution technique; Beibu Gulf

海洋微型浮游动物 (Microzooplankton) 是指体长介于 $2\text{--}200 \mu\text{m}$ 的浮游动物, 主要由原生动物、异养鞭毛虫、某些后生动物以及无脊椎动物幼体等组成。有研究^[1-3]表明在海洋生态系统中, 微型浮游动物的摄食活动可消耗 60%—70% 的初级生产力。因此, 微型浮游动物在初级生产者和后生动物的能量传递中起到连接作用, 在海洋生态系统的能量传递和碳流过程中扮演着重要的角色。

北部湾北部海域位于南海北部季风区内亚热带半封闭海湾的一部份, 该海域海洋生物资源丰富, 拥有红树林、珊瑚礁和海草床三类最典型的海洋自然生态系统^[4-5]。这种复合型的生态系统其初级生产力通过微型浮游动物向上传递的效率如何? 本文利用现场稀释培养法, 结合微型浮游动物的空间分布, 对北部湾北部微型浮游动物对浮游植物摄食压力进行了研究, 旨在评价微型浮游动物在海洋生态系统物流与能流过程中所做的贡献。

1 材料和方法

1.1 研究站位

2011 年 8 月 6—13 日, 利用“天龙号”科学考察

船在北部湾北部 21 个站位进行了物理水文、化学和生物的综合调查, 其中于 HB17、HB19、HB21、HB30 和 HB32 站位进行了微型浮游动物种类组成以及摄食速率的研究 (图 1)。

1.2 叶绿素样品采集和测定

采集表层水样, 经 $200 \mu\text{m}$ 筛绢过滤, 再分别使用 $20 \mu\text{m}$ 的筛绢、 $2 \mu\text{m}$ 的 Millipore 膜和 $0.7 \mu\text{m}$ 的 GF/F 膜 (Whatman) 过滤 400 mL 水样。将载有浮游植物样品的滤膜装入锡纸包好的 10 mL 带盖离心管中, 放入 $-20 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 冰箱中保存。带回实验室后, 加入 8 mL 90% 的丙酮, 放入 $4 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 冰箱中黑暗萃取 24 h, 利用 Turner Designs 10-AU-005-CE 荧光光度计, 测定 Chl a 的浓度^[6], 同步获得相关站位的主要环境参数如表 1 所示。

1.3 微型浮游动物采集和样品分析

采集表层水样 1 L 于塑料采样瓶中, 加入酸性 Lugol's 液, 终浓度为 2%, 带回实验室镜检。水样在阴凉处保存, 静止沉降 48 h 以上, 用底端具有 $20 \mu\text{m}$ 筛绢的虹吸管吸取上清液, 浓缩水样至 5 mL, 保存于 $8 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 黑暗环境中, 吸取 100 μL , 至于计数框中, 重复 6 个平行样, 倒置显微镜下放大 200 倍以上进行微型

浮游动物的样品的鉴定^[7-9]和计数(纤毛虫和无脊椎动物幼虫(体))。换算成微型浮游动物在自然水体中的丰度,计算公式如下:

$$CA = N \times V_1 / (V_2 \times V_3)$$

式中, CA 为微型浮游动物总丰度(个/L); N 为镜检得到的总个体数; V_1 为浓缩水样体积; V_2 为采集水样的体积; V_3 为计算水样体积。

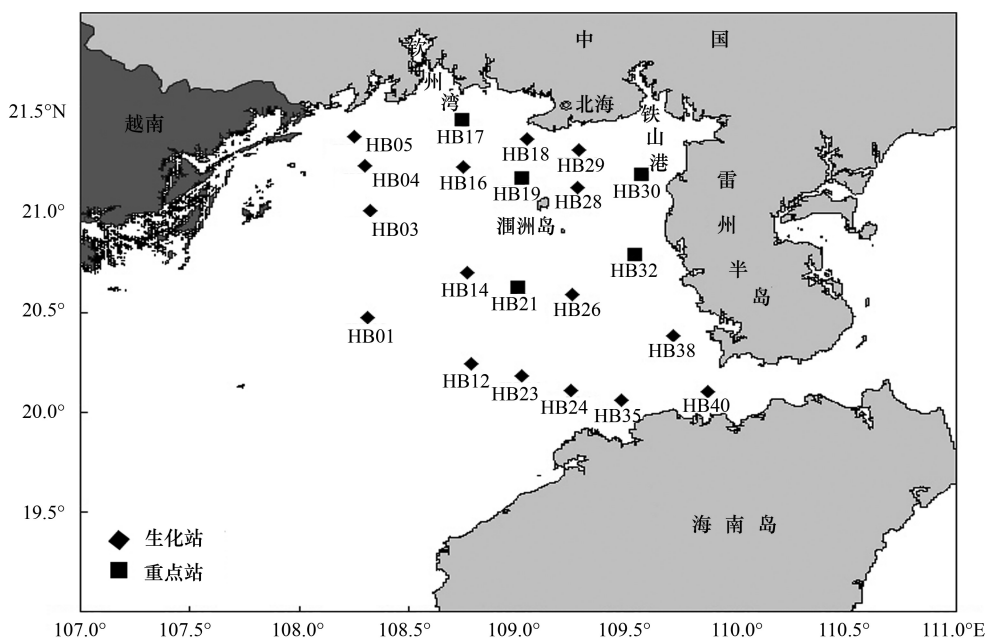


图1 北部湾北部调查站位

Fig.1 Location of sampling stations in northern of Beibu Gulf

1.4 微型浮游动物摄食速率的测定

1.4.1 稀释培养

采集表层水样,用 200 μm 的筛绢过滤得到天然海水,取一部分水样再经过孔径为 0.7 μm 的 GF/F 膜(Whatman)过滤得到稀释海水。将稀释海水和天然海水以 25%、50%、75% 以及 100% 的比例混合。将各稀释比例水样装入 4 L 的透明培养瓶中(培养瓶使用前经 10% 盐酸浸泡 24 h,用超纯水冲洗干净),再放入培养箱,在甲板上利用自然海水流动循环培养 24 h,使得培养条件尽可能接近自然条件。

培养前后,每个培养瓶采集 400 mL 水样,分别使用 20 μm 的筛绢和 0.7 μm 的 GF/F 膜(Whatman)以及 2 μm Millipore 膜过滤,保存以及测定叶绿素 a,方法同上。

1.4.2 微型浮游动物的摄食率和生长率计算

根据稀释法原理^[10-11],浮游植物生长遵循指数方程:

$$\text{AGR} = \mu - g = \ln(P_t/P_0)/t$$

式中, AGR 为表观生长率; μ 为浮游植物的生长率; g 为微型浮游动物的摄食率; P_0 和 P_t 分别为培养前后

叶绿素 a 的值; t 为培养时间(h)。

将 AGR 与稀释因子(自然海水占混合海水的比例)进行线性回归,截距是浮游植物的生长率 μ (d^{-1}),斜率是微型浮游动物的摄食率 g (d^{-1})。

微型浮游动物摄食对浮游植物现存量 P_s 以及初级生产力的摄食压力 P_p 计算公式,表示如下:

$$P_s = 1 - e^{-gt} \times 100\%$$

$$P_p = (e^{\mu t} - e^{(\mu-g)t}) / (e^{\mu t} - 1) \times 100\%$$

2 结果

2.1 水文条件和环境因子^①

调查站位表层平均水温 (30.6 ± 0.4) $^{\circ}\text{C}$, 总体呈现湾顶向外递减的趋势;表层平均盐度 31.77 ± 1.14 , 分布趋势与温度相反,近岸低,远岸高(表 1),其中钦州湾海域以及涠洲岛以南海域为两个最典型的区域,前者高温低盐,后者低温高盐。

① 现场理化因子数据均采自厦门大学海洋与地球学院环境化学组,在此予以致谢

表 1 研究站位的表层环境参数

Table 1 Environmental parameters at studying stations

站号 Station	温度/℃ Temperature	盐度 Salinity	硅酸盐 SiO_3^- /($\mu\text{mol/L}$)	磷酸盐 PO_4^- /($\mu\text{mol/L}$)	硝酸盐 NO_3^- /($\mu\text{mol/L}$)	铵盐 NH_4^+ /($\mu\text{mol/L}$)	亚硝酸盐 NO_2^- /($\mu\text{mol/L}$)	叶绿素 aChl a /($\mu\text{g/L}$)
HB17	31.0	30.01	1.93	0.00	0.47	0.66	0.002	0.08
HB19	30.8	31.78	3.73	0.03	0.00	0.48	0.001	0.47
HB21	30.0	33.09	0.94	0.01	2.83	0.74	0.002	0.27
HB30	30.7	31.62	0.11	0.02	0.02	2.00	0.001	1.02
HB32	30.7	32.36	1.75	0.11	0.53	0.73	0.021	1.50

调查海域营养盐种类组成,主要以 SiO_3^- 和 TIN (包括 NO_3^- 、 NO_2^- 和 NH_4^+) 为主。TIN 范围为 0.48—3.57 $\mu\text{mol/L}$, 平均含量为 (1.70 ± 1.17) $\mu\text{mol/L}$, 主要由 NO_3^- 以及 NH_4^+ 组成, 分别占 TIN 总量的 45.4% 以及 54.3%, NO_2^- 盐含量总体偏低, 对 TIN 的贡献仅 0.3%。表层 PO_4^- 盐含量平均浓度仅为 (0.04 ± 0.04) $\mu\text{mol/L}$, 除雷州半岛西侧海域外, 均低于 0.05 $\mu\text{mol/L}$, 其中钦州湾海域含量低于最低检测值。 SiO_3^- 盐含量与 TIN 相当为 (1.69 ± 1.35) $\mu\text{mol/L}$, 除铁山港海区最低 (0.11 $\mu\text{mol/L}$), 其余各海区均接近 1.00 $\mu\text{mol/L}$ 或者超过 1.00 $\mu\text{mol/L}$ 。营养盐水平分布未出现明显特征, 同一海域中各营养盐分配差异性较

大, 其中以雷州半岛西侧海区相对平均。

北部湾北部海域表层水体中 Chl a 含量为 (0.67 ± 0.58) $\mu\text{g/L}$, 高值区出现在雷州半岛西侧以及铁山港海域, 高于 1.00 $\mu\text{g/L}$, 低值区则位于钦州湾海域, 仅为 0.08 $\mu\text{g/L}$ 。叶绿素分粒径结果 (图 2) 显示, Nano 级 (2—20 μm) 和 Pico 级 (0.7—2 μm) 浮游植物占绝对优势; 铁山港和钦州湾海域浮游植物粒径结构相似, 以 Nano 级和 Micro 级组成, Pico 级浮游植物对 Chl a 浓度贡献非常少, 几乎为 0, 其中 Nano 级占绝对优势; 其余调查海域浮游植物对 Chl a 浓度的贡献以 Nano 级和 Pico 级为主, 且 Pico 级占相对优势。

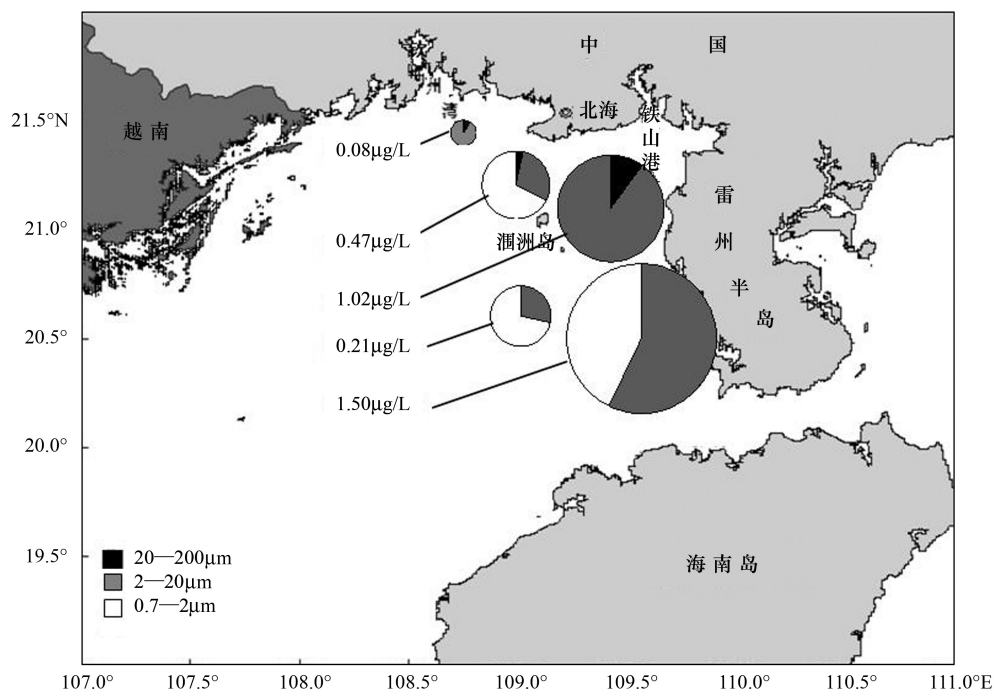


图 2 0.7—2 μm 、2—20 μm 以及 20—200 μm 浮游植物水平分布

Fig 2 Horizontal profiles of chlorophyll a for phytoplankton in the 20—200 μm , 2—20 μm and 0.7—2 μm size fractions

2.2 微型浮游动物组成和分布特点

北部湾北部海域微型浮游动物共鉴定 17 属, 48

种, 总丰度为 (842 ± 322) 个/L, 水平分布具有湾顶向外递减的特征。微型浮游动物丰度最高值位于铁山

港海域,达 1167 个/L,低值区位于离湾顶最远的涠洲岛以南海域,仅为 400 个/L(表 2)。

微型浮游动物类群组成上,以无壳纤毛虫为主(图 3),平均丰度(565 ± 304) 个/L,总丰度占微型浮游动物总量的 67.1%,最高值出在涠洲岛和北海之间的海域,达 942 个/L,最低值出现涠洲岛南部海域,仅 142 个/L;种类组成上以急游虫类为主,其中丁丁急游虫(*Strombidium tintinnodes*)为最优势种类,

共出现 775 个/L,占无壳纤毛虫总丰度的 27.2%。砂壳纤毛虫与桡足类幼体数量相当,丰度分别占总丰度的 16.2%和 16.6%;前者集中在铁山港以及雷州半岛西侧海域,平均丰度为(137 ± 89) 个/L,种类组成上以拟铃虫属(*Tintinnopsis* spp.)为主,其总丰度为 383 个/L,占砂壳类总丰度的 56.1%;后者则主要聚集在湾顶(钦州湾以及铁山港海区),平均丰度为(140 ± 59) 个/L。

表 2 北部湾北部海域不同类群微型浮游动物丰度
Table 2 The abundance of different group of microzooplankton in northern of Beibu Gulf

种类 Taxa	站位 Station				
	HB17	HB19	HB21	HB30	HB32
砂壳纤毛虫 <i>Aloricate ciliates</i> /(个/L)	42	50	167	250	175
无壳纤毛虫 <i>Loricata ciliates</i> /(个/L)	575	958	142	708	442
桡足类幼体 <i>Copepod nauplii</i> /(个/L)	192	133	92	208	75
总计 Total	808	1,142	400	1,167	692

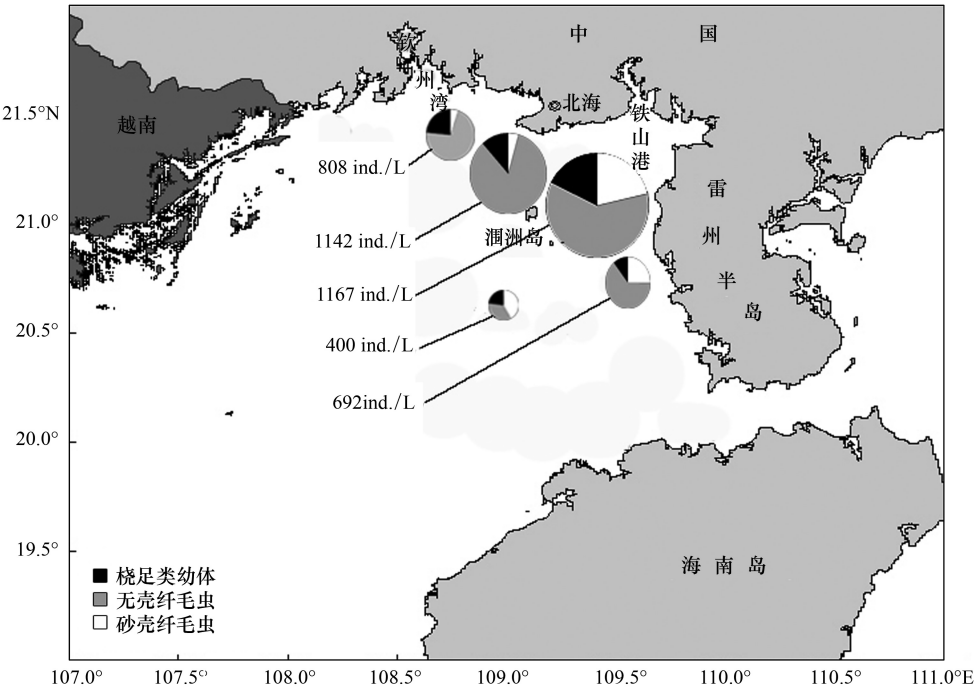


图 3 北部湾北部海域不同类群微型浮游动物水平分布
Fig.3 Horizontal profiles of different group of microzooplankton in northern of Beibu Gulf

2.3 稀释实验结果

现场稀释实验中,利用培养前后总 Chl a 以及 Nano 级 Chl a 含量变化(表 3),回归分析得到稀释实验结果(图 4),其中 r^2 代表表观生长率(AGR)和稀释因子得到回归曲线的相关因子。调查期间,浮游植物平均生长率(μ)为(0.01 ± 1.46) d^{-1} ,调查海域之间具有一定差异性,最高值出现在钦州湾海域,其中北海和涠洲岛之间海域出现了生长率的负值;微型

浮游动物的平均摄食率(g)摄食率为(0.72 ± 0.46) d^{-1} ,最高值同样位于钦州湾海域,生长率出现负值的海区摄食率为最低。微型浮游动物摄食对浮游植物现存量的摄食压力为 28.1%—66.0%;对初级生产力的摄食压力为-7.4%—438.4%。此外本研究中铁山港以及雷州半岛西侧海域由于稀释实验 r^2 值比较小,可能由于实验中出现一些操作问题或者光照太强,因此讨论部分并不计入在内。

表 3 北部湾北部海域不同粒径浮游植物生长率和微型浮游动物摄食率

Table 3 Phytoplankton growth and microzooplankton grazing rate of different size fraction in northern of Beibu Gulf

站位 Station	粒径/ μm Size-fraction	μ / d^{-1}	g / d^{-1}	g/μ	$P_s/\%$	$P_p/\%$	r^2
HB17	<200	1.13	1.08	0.96	66.0	97.6	0.55
	2—20	0.4	0.95	2.38	61.3	186.7	0.61
HB19	<200	-1.57	0.33	-0.21	28.1	-7.4	0.68
	2—20	-1.15	0.75	-0.65	53.0	-24.5	0.66
HB21	<200	0.11	0.61	5.55	45.7	438.4	0.97
	2—20	0.36	1.57	4.36	79.2	264.8	0.88
HB30	<200	-0.85	0.14	-0.16	12.6	-9.4	0.02
	2—20	-0.52	0.52	-1.00	40.6	-59.9	0.84
HB32	<200	-0.06	0.14	-2.33	13.2	-212.7	0.01
	2—20	-0.3	1.87	-6.23	84.5	-248.9	0.64

μ 为浮游植物的生长率; g 为微型浮游动物摄食率; P_s 为微型浮游动物对浮游植物现存量的摄食压力; P_p 为微型浮游动物对浮游植物初级生产力的摄食压力; r^2 为相关性系数

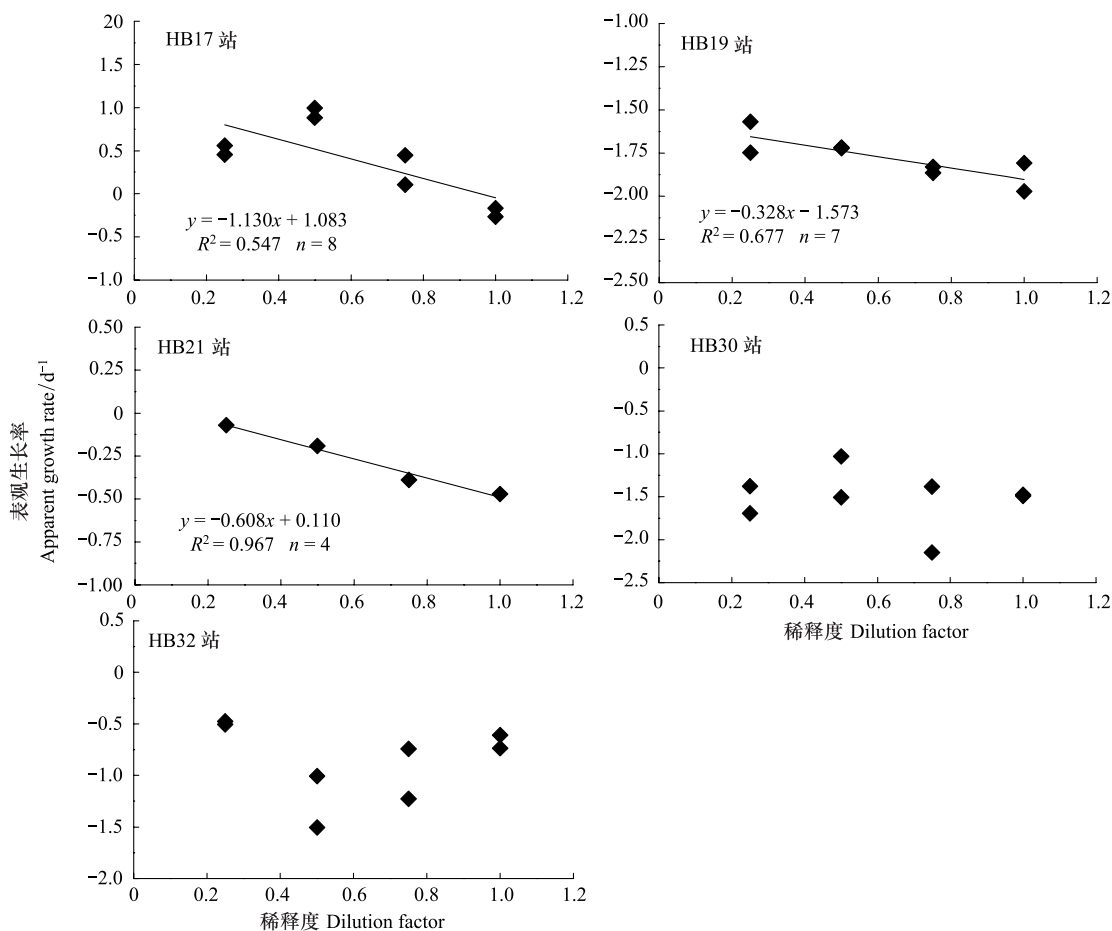


图 4 北部湾北部海域稀释实验回归分析

Fig.4 Regression of dilution experiments onboard in northern of Beibu Gulf based on total chlorophyll a

3 讨论

3.1 微型浮游动物分布与温度、叶绿素 a 的关系

北部湾北部微型浮游动物主要以纤毛虫为主, 一般认为温度和饵料浓度是影响纤毛虫的主要因

素^[12-14]。首先, 温度升高促进纤毛虫的生长, 进而影响水平分布。Nielsen 等^[12]对 4 个纤毛虫类群的生长率计算发现, 其生长率与表层水温具有相同的季节变化趋势。此外, 也有研究^[15]发现甲藻在温度较低的环境中生长率较低, 这种温度限制生长的现象

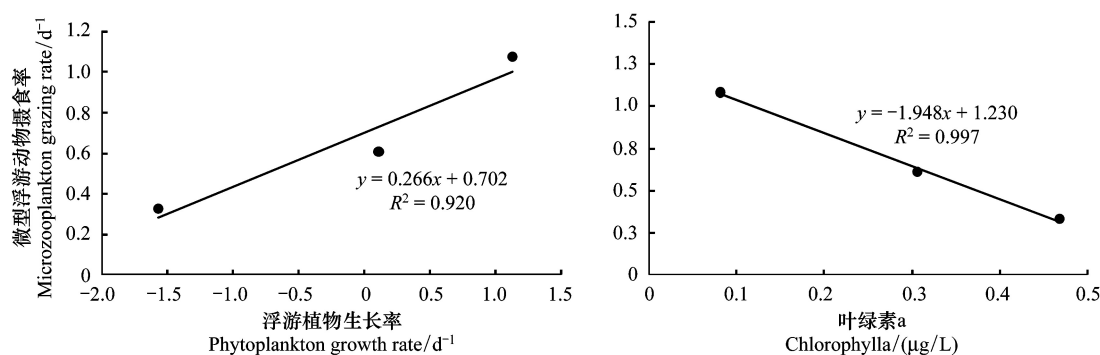


图5 微型浮游动物摄食率与现存量和浮游植物生长率的关系

Fig.5 Relationship between phytoplankton standing stock, growth rate with grazing rate

可能也适用与其他微型浮游动物类群,例如纤毛虫^[16]。本调查相关性结果显示温度与微型浮游动物丰度存在正相关($r^2 = 0.4568$, $P < 0.01$)。其次,饵料丰富促进纤毛虫摄食,也会影响其分布。Gómez^[17]等指出砂壳纤毛虫数量主要受到饵料限制,因而分布在 Chl a 最高值的水层。Setälä 等^[18]1991 年对波罗的海纤毛虫调查结果显示其丰度与 Chl a 具有显著的相关性。但本调查海域结果并未显示微型浮游动物丰度与 Chl a 含量有显著相关性,这与 2007 年对南海北部浮游纤毛虫调查结果相同^[19],这可能是由于纤毛虫这种小型浮游动物遵循复杂的分布模式,除了 Chl a 或者初级生产力变化对其分布有影响外^[20],捕食作用在控制种群分布上可能还起着非常重要的作用^[12]。

3.2 微型浮游动物摄食与浮游植物生长相互作用

Calbet^[1]基于开阔大洋以及近岸海洋系统中,对于微型浮游动物摄食率以及浮游植物生长率综合分析结果显示浮游植物生长和微型浮游动物摄食存在显著正相关($P < 0.001$, $r^2 = 0.37$)。本研究中微型浮游动物摄食率与浮游植物生长率之间也存在相同关系(图 5)。微型浮游动物摄食是被动的或者资源分配型^[22],总是优先摄食生长快速的物种,获得长期稳定的食物来源,维持其自身生长,微型浮游动物摄食率与浮游植物生长率的高度耦合也促进生态系统的稳定性。

微型浮游动物对不同粒径浮游植物的选择性摄食在前人的研究中都有提到^[23-25],类似的结果在本研究也有发现:微型浮游动物对 Nano 级浮游植物的摄食率($(0.94 \pm 0.57) \text{ d}^{-1}$)高于对总浮游植物的摄食率($(0.72 \pm 0.46) \text{ d}^{-1}$)。急游虫属(*Strombidium* sp.)

主要为小于 30 μm 的种类,这类纤毛虫则优先摄食 3—7 μm 颗粒的浮游植物^[26-27]。拟铃虫属(*Tintinnopsis* sp.)由于其口径较小(平均口径为 38.5 μm)只能摄食 Pico 以及 Nano 级浮游植物^[29]。本研究海域微型浮游动物优势类群为急游虫属(*Strombidium* sp.),浮游植物则以 Nano 级为主,正好是纤毛虫等微型浮游动物的适宜饵料,因此也佐证了微型浮游动物摄食率与叶绿素 a 含量存在显著负相关的结果(图 5)。可见微型浮游动物摄食是该海域浮游植物现存量的主要控制因素,且对浮游植物的生长具有一定的抑制作用。

3.3 微型浮游动物摄食压力评价

实验期间,北部湾北部海域浮游植物生长率为 -1.57 — 1.13 d^{-1} ,微型浮游动物摄食率为 0.33 — 1.08 d^{-1} ,可见北部湾北部海域是高生长率、高周转率的海区,浮游植物类群以小于 20 μm 的微型藻类占绝大部分,摄食消耗 -8.1% — 438.4% 的初级生产力。参考 Calbet^[1]等对全世界微型浮游动物稀释法实验比较的结果,以及结合国内其他海区稀释法实验结果^[21,22-25],表明广西沿岸微型浮游动物摄食压力处于中等水平。

摄食比(g/μ)是衡量浮游植物生长以及微型浮游动物摄食是否平衡的重要指标,由表 3 结果显示,只有北海以南海域 $g/\mu > 1$,说明微型浮游动物摄食一定程度上可以控制浮游植物生长,其对浮游植物初级生产力的平均摄食压力可达 176.2%。涠洲岛以南海域摄食率虽然不及钦州湾海域高,但高于浮游植物生长率(0.11 d^{-1}),对初级生产力的摄食压力反而最高,可见当摄食率远高于生长率时,微型浮游动物摄食作用对能量的转换效率最高。此外捕食控

制对纤毛虫种群分布具有非常重要的作用,主要为桡足类,浮游桡足类不仅仅摄食大型纤毛虫,对中小型纤毛虫也具有较高的捕食压力;此外一些异养甲藻的摄食作用也会造成纤毛虫的死亡^[12]。因此在评价微型浮游动物摄食压力时,捕食作用是不可忽视。而北部湾北部海域是一个集红树林、珊瑚礁和海草床 3 种典型自然生态系统为一体的复合型生态系统,该生态系统生物资源丰富,具有较高的初级生产力,微型浮游动物摄食活跃,所固定的能量对微食物环内碳循环具有重要作用;但是要提高该生态系统整体碳循环效率,还需要大中型浮游动物的摄食作用。

References:

- [1] Calbet A, Landry M R. Phytoplankton growth, microzooplankton grazing, and carbon cycling in marine systems. *Limnology and Oceanography*, 2004, 49(1): 51-57.
- [2] Stelfox C E, Burkill P H, Edwards E S, Harris R P, Sleight M A. The structure of zooplankton communities, in the 2 to 2000 μm size range, in the Arabian Sea during and after the SW monsoon, 1994. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 1999, 46(3/4): 815-842.
- [3] Suzuki K, Tsuda A, Kiyosawa H, Takeda S, Nishioka J, Saino T, Takahashi M, Wong C S. Grazing impact of microzooplankton on a diatom bloom in a mesocosm as estimated by pigment-specific dilution technique. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 2002, 271(1): 99-120.
- [4] Ma R Y, Li J, Zheng E W, Huang S F. ENSO makes an impact on the storm tide of Guangxi coasting area around the Beibu Gulf. *Journal of Guangxi University: Natural Science Edition*, 2008, 33(4): 422-425.
- [5] Cheng Q Y, Li F H. The marine environmental protection condition and strategy in Guangxi's littoral. *Environmental Science and Management*, 2008, 33(9): 146-149.
- [6] Sun J, Song X X, Yin K D, Liu D Y. Preliminary study of microzooplankton herbivory in Hong Kong in summer. *Acta Ecologica Sinica*, 2003(23): 712-724.
- [7] Xu K D, Hong H S, Song W B, Ke L, Ma H G. Studies on tintinnine ciliates in the Taiwan strait (*Ciliophora: Tintinnina*). *Acta Zootaxonomica Sinica*, 2001, 26(4): 454-466.
- [8] Warren A. Free-living Ciliates in the Bohai and Yellow Seas, China//Song W B, Hu X K, Trans. Beijing: Science Press, 2009.
- [9] Xu D P, Song W B. Tintinnid ciliates from qingdao (*Protozoa, Ciliophora, Tintinnida*). *Acta Zootaxonomica Sinica*, 2005, 30(3): 501-508.
- [10] Landry M R, Hassett R P. Estimating the grazing impact of marine micro-zooplankton. *Marine Biology*, 1982, 67(3): 283-288.
- [11] Burkill P H, Head E, Fransz G. Grazing by microzooplankton//SCOR/JGOFS Report No. 6; Coremeasurement protocols. Reports of the Core Measurement Working Groups, 1990: 31-37.
- [12] Nielsen T G, Kjørboe T. Regulation of zooplankton biomass and production in a temperate coastal ecosystem. 2. Ciliate. *Limnology and Oceanography*, 1994, 39(3): 508-519.
- [13] Suzanne L S, Erin L M, Olson M B. Microzooplankton grazing in the coastal gulf of Alaska: variations in top-down control of phytoplankton. *Limnology and Oceanography*, 2007, 52(4): 1480-1494.
- [14] Zhang C X, Zhang W C, Zhao N, Xiao T. Distribution of planktonic ciliates in autumn and winter in the shelf areas of the East China Sea. *Acta Oceanologica Sinica*, 2011, 33(1): 127-137.
- [15] Archer S D, Leakey R J G, Burkill P H, Siegh M A. Microbial dynamics in coastal waters of east Antarctica: herbivory by heterotrophic dinoflagellates. *Marine Ecology Progress Series*, 1996, 139(1): 239-255.
- [16] Rose J M, Caron D A. Does low temperature constrain the growth rates of heterotrophic protists? Evidence and implications for algal blooms in cold waters. *Limnology and Oceanography*, 2007, 52(2): 886-895.
- [17] Gómez F. Trends on the distribution of ciliates in the open Pacific Ocean. *Acta Oceanologica*, 2007, 32(2): 188-202.
- [18] Setälä O, Kivi K. Planktonic ciliates in the Baltic Sea in summer: distribution, species association and estimated grazing impact. *Aquatic Microbial Ecology*, 2003, 32(3): 287-297.
- [19] Zhang C X, Zhang W C, Xiao T. Ciliate abundance and biomass in northern South China Sea in October 2007. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(4): 0867-0877.
- [20] Quevedo M, Viesca L, Andón R, Fernández E. The protistan microzooplankton community in the oligotrophic north-eastern Atlantic: large-and mesoscale patterns. *Journal of Plankton Research*, 2003, 25(5): 551-563.
- [21] Zeng X B, Huang B Q. Grazing impact of microzooplankton in Taiwan strait and its contribution to nutrient regeneration. *Journal of Xiamen University: Natural Science*, 2007, 3(2): 231-235.
- [22] Sun J, Feng Y Y, Zhang Y H, Hutchins D A. Fast microzooplankton grazing on fast-growing, low-biomass phytoplankton: A case study in spring in Chesapeake Bay, Delaware Inland Bays and Delaware Bay. *Hydrobiology*, 2007, 589(1): 127-139.
- [23] Zhang J T, Yin K D, Dong L H. Microzooplankton grazing rate of size-fractionated phytoplankton in spring in the Yellow Sea, China. *Marine Sciences*, 2011, 35(9): 1-7.
- [24] Sun J, Dawson J, Liu D Y. Microzooplankton grazing on phytoplankton in summer in the Jiaozhou Bay, China. *Chinese*

- Journal of Applied Ecology, 2004, 15(7): 1245-1252.
- [25] Huang B Q, Xiang W G, Zeng X B, Chiang K P, Tian H J, Hu J, Lan W L, Hong H S. Phytoplankton growth and microzooplankton grazing in a subtropical coastal upwelling system in the Taiwan Strait. *Continental Shelf Research*, 2011, 31(6): S38-S56.
- [26] Dupuy C, Talarmin A, Hartmann H J, Delmas D, Courties C, Marquis E. Community structure and grazing of the nano-microzooplankton on the continents shelf of the Bay of Biscay. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2011, 95(1): 1-13.
- [27] Ichinotsuka D, Ueno H, Nakano S. Relative importance of nanoflagellates and ciliates as consumers of bacteria in a coastal sea area dominated by oligotrichous *Strombidium* and *Stobilidium*. *Aquatic Microbial Ecology*, 2006, 42(2): 139-147.
- [28] Gifford D J. Impact of grazing by microzooplankton in the Northwest Arm of Harlifax Harbour, Nova Scotia. *Marine Ecology Progress Series*, 1988, 47: 679-694.
- [5] 陈群英, 李风华. 广西沿海地区海洋生态环境保护状况及对策建议. *环境科学与管理*, 2008, 33(9): 146-149.
- [6] 孙军, 宋秀贤, 殷克东, 刘东艳. 香港水域夏季微型浮游动物摄食研究. *生态学报*, 2003, 23(4): 712-724.
- [7] 徐奎栋, 洪华生, 宋微波, 柯林, 马洪钢. 台湾海峡的砂壳纤毛虫研究 (纤毛动物门: 砂壳亚目). *动物分类学报*, 2001, 26(4): 454-466.
- [8] Warren A. 中国黄渤海的自由生纤毛虫//宋微波, 胡晓钟, 译. 北京: 科学出版社, 2009.
- [9] 徐大鹏, 宋微波. 青岛沿海砂壳纤毛虫 (原生动物, 纤毛门, 砂纤目). *动物分类学报*, 2005, 30(3): 501-508.
- [14] 张翠霞, 张武昌, 赵楠, 肖天. 秋冬季东海陆架区浮游纤毛虫的生态分布特点. *海洋学报*, 2011, 33(1): 127-137.
- [19] 张翠霞, 张武昌, 肖天. 2007 年 10 月南海北部浮游纤毛虫的丰度和生物量. *生态学报*, 2010, 30(4): 867-877.
- [21] 曾祥波, 黄邦钦. 台湾海峡微型浮游动物的摄食压力及其对营养盐再生的贡献. *厦门大学学报: 自然科学版*, 2007, 3(2): 231-235.
- [23] 张江涛, 殷克东, 董丽华. 春季黄海微型浮游动物对不同粒径浮游植物的摄食速率研究. *海洋科学*, 2011, 35(9): 1-7.
- [24] 孙军, Dawson J, 刘东艳. 夏季胶州湾微型浮游动物摄食初步研究. *应用生态学报*, 2004, 15(7): 1245-1252.

参考文献:

- [4] 麻荣永, 李建, 郑二伟, 黄淑芳. ENSO 对北部湾广西沿海风暴潮的影响. *广西大学学报: 自然科学版*, 2008, 33(4): 422-425.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol.34, No.3 Feb., 2014 (Semimonthly)

CONTENTS

Frontiers and Comprehensive Review

- Research advances and prospects of post-disaster ecological restoration assessment
..... LIU Xiaofu, WANG Wenjie, LI Jing, et al (527)
- The sustainability analysis of small hydropower plants in China based on ecological energetic accounting
..... PANG Mingyue, ZHANG Lixiao, WANG Changbo (537)

Autecology & Fundamentals

- An ecological study on zooplankton in the northern Beibu Gulf V: the effects of microzooplankton grazing on phytoplankton in summer
..... MA Lu, CAO Wenqing, ZHANG Wenjing, et al (546)
- Sexual size dimorphism and female individual fecundity of *Silurus asotus* and *Clarias fuscus*
..... FAN Xiaoli, LIN Zhihua, DING Xianlong, et al (555)
- Effect of environmental temperature on thermogenesis and evaporative water loss in Chinese bulbuls (*Pycnonotus sinensis*)
..... LIN Lin, CAO Mengting, HU Yilin, et al (564)
- Effects of irrigation on plant growth and nitrogen use characteristics of *Calligonum caput-medusae* Schrenk seedlings
..... HUANG Caibian, ZENG Fanjiang, LEI Jiaqiang, et al (572)
- Enzymatic activity during phytoremediation of polycyclic aromatic hydrocarbon impacted soil
..... ZHU Fan, HONG Xiangqi, YAN Wende, et al (581)
- Assessment of karst groundwater vulnerability in Chongqing based on revised RISKE model
..... WEI Xingping, PU Junbing, ZHAO Chunyong (589)
- Monitoring salt and water dynamics in farmland and drainage ditch in a saline environment under reduced drainage intensity
..... PAN Yanxin, LUO Wan, JIA Zhonghua, et al (597)

Population, Community and Ecosystem

- Spatial distribution and spatial association of *Stellera chamaejasme* population in the different altitude in degraded alpine grassland
..... GAO Fuyuan, ZHAO Chengzhang, ZHUO MA Lancuo (605)
- Biotic stress of predators on population of alligator weed flea beetle, *Agasicles hygrophila* (Col.: Chrysomelidae)
..... LIU Yufang, LI Fei, GUI Fangyan, et al (613)
- Characteristics of phytoplankton community in the northern South China Sea in summer and winter
..... MA Wei, SUN Jun (621)
- The amount and dynamics of litterfall in the natural secondary forest in Mopan Mountain
..... FAN Chunnan, GUO Zhongling, ZHENG Jinping, et al (633)
- Effects of continuous drought on soil bacteria populations and community diversity in sweet cherry rhizosphere
..... LIU Fangchun, XING Shangjun, MA Hailin, et al (642)
- The basic principle of random forest and its applications in ecology: a case study of *Pinus yunnanensis*
..... ZHANG Lei, Wang Linlin, ZHANG Xudong, et al (650)
- Quantitative analysis of driving factors for wetland degradation based on hydrology balance
..... HOU Peng, SHEN Wenming, WANG Qiao, et al (660)
- Stomatal and environmental control on evapotranspiration in a plantation in the lower mountain areas of North China
..... HUANG Hui, MENG Ping, ZHANG Jinsong, et al (667)
- The fluxes of carbon dioxide, methane and nitrous oxide in alpine grassland of the Tianshan Mountains, Xinjiang
..... HE Guixiang, LI Kaihui, SONG Wei, et al (674)

Landscape, Regional and Global Ecology

- Analysis the relationship between ecological footprint (EF) of ningxia and influencing factors: Partial Least-Squares Regression (PLS) MA Mingde, MA Xuejuan, XIE Yingzhong, et al (682)
- Profile distribution patterns of soil organic carbon and the rate of carbon sequestration in Ningxia Irrigation Zone DONG Linlin, YANG Hao, YU Dongsheng, et al (690)
- Molecular mechanism on carbon dioxide assimilation of autotrophic microorganism and carbon translocation in agricultural soils WU Xiaohong, JIAN Yan, CHEN Xiaojuan, et al (701)

Resource and Industrial Ecology

- Ecological efficiency analysis of the circular economy system in mining area based on emergy analytic approach SUN Yufeng, GUO Quanying (710)
- Assessing synthetic carrying capacity based on AD-AS model: a case study in Coastal Zone, Zhoushan SU Panpan, YE Shufeng, GUO Zhongyang, et al (718)

Urban, Rural and Social Ecology

- Driving forces analysis of urban expansion based on boosted regression trees and Logistic regression LI Chunlin, LIU Miao, HU Yuanman, et al (727)

Research Notes

- Spatial-temporal variability of dry and wet deposition of atmospheric nitrogen in different ecological regions of Shaanxi LIANG Ting, TONG Yan'an, LIN Wen, et al (738)
- The effects of different mulching way on soil water thermal characteristics in pear orchard in the arid area LIU Xiaoyong, LI Hongxun, LI Jianming, et al (746)
- Structure and diversity of soil fauna communities in the tundra of the Changbai Mountains, China WANG Zhenhai, YIN Xiuqin, JIANG Yunfeng (755)
- Modeling the total allowable area for coastal reclamation: a case study of Xiamen, China LIN Chenchen, RAO Huanhuan, LIU Yan, et al (766)

《生态学报》2014 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,280 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 34 卷 第 3 期 (2014 年 2 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 34 No. 3 (February, 2014)

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@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

国内外公开发刊

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 90.00 元