

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

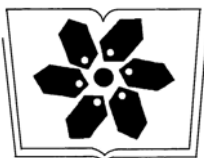
Acta Ecologica Sinica



第 33 卷 第 22 期 Vol.33 No.22 **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 22 期 2013 年 11 月 (半月刊)

目次

前沿理论与学科综述

- 利用分布有/无数据预测物种空间分布的研究方法综述 刘芳,李晟,李迪强 (7047)
- 景观服务研究进展 刘文平,宇振荣 (7058)
- 土壤呼吸组分分离技术研究进展 陈敏鹏,夏旭,李银坤,等 (7067)

个体与基础生态

- 平茬高度对四合木生长及生理特性的影响 王震,张利文,虞毅,等 (7078)
- 不同水分梯度下珍稀植物四数木的光合特性及对变化光强的响应 邓云,陈辉,杨小飞,等 (7088)
- 水稻主茎节位分蘖及生产力补偿能力 隗溟,李冬霞 (7098)
- 基于辐热积法模拟烤烟叶面积与烟叶干物质产量 张明达,李蒙,胡雪琼,等 (7108)
- 耕作方式和秸秆还田对华北地区农田土壤水稳性团聚体分布及稳定性的影响 田慎重,王瑜,李娜,等 (7116)
- 不同光照强度下兴安落叶松对舞毒蛾幼虫生长发育及防御酶的影响 鲁艺芳,严俊鑫,李霜雯,等 (7125)
- 南方小花蝽在不同空间及笼罩条件下对西花蓟马的控制作用 莫利锋,鄧军锐,田甜 (7132)
- 浮游植物对溶解态 AI 的清除作用实验研究 王召伟,任景玲,闫丽,等 (7140)
- 卧龙巴郎山川滇高山栎群落植物叶特性海拔梯度特征 刘兴良,何飞,樊华,等 (7148)
- 春夏季闽江口和兴化湾虾类数量特征 徐兆礼,孙岳 (7157)
- 啃食性端足类强壮藻钩虾对贫筲湖三种大型海藻的摄食选择性 郑新庆,黄凌风,李元超,等 (7166)

种群、群落和生态系统

- 4 种农业措施对三化螟种群动态的控制作用 张振飞,黄炳超,肖汉祥,等 (7173)
- 黄土高原沟壑区森林带不同植物群落土壤氮素含量及其转化 邢肖毅,黄懿梅,安韶山,等 (7181)
- 基于诊断学的生态系统健康评价 蔡霞,徐颂军,陈善浩,等 (7190)
- 稻田生态系统中植硅体的产生与积累——以嘉兴稻田为例 李自民,宋照亮,姜培坤 (7197)
- 自由搜索算法的投影寻踪模型在湿地芦苇调查中的应用 李新虎,赵成义 (7204)
- 贺兰山不同海拔典型植被带土壤微生物多样性 刘秉儒,张秀珍,胡天华,等 (7211)
- 内蒙古典型草原灌丛化对生物量和生物多样性的影响 彭海英,李小雁,童绍玉 (7221)
- 黄土丘陵沟壑区 80 种植物繁殖体形态特征及其物种分布 王东丽,张小彦,焦菊英,等 (7230)
- 基于 MAXENT 模型的贺兰山岩羊生境适宜性评价 刘振生,高惠,滕丽微,等 (7243)
- 太湖湖岸带浮游植物初级生产力特征及影响因素 蔡琳琳,朱广伟,李向阳 (7250)

景观、区域和全球生态

- 艾比湖地区土壤呼吸对季节性冻土厚度变化的响应…………… 秦 璐,吕光辉,何学敏,等 (7259)
- 田间条件下黑垆土基础呼吸的季节和年际变化特征…………… 张彦军,郭胜利,刘庆芳,等 (7270)

资源与产业生态

- 光核桃遗传资源的经济价值评估与保护 …………… 张丽荣,孟 锐,路国彬 (7277)
- 棉花节水灌溉气象等级指标…………… 肖晶晶,霍治国,姚益平,等 (7288)

研究简报

- 云南红豆杉人工林萌枝特性…………… 苏 磊,苏建荣,刘万德,等 (7300)
- 赣中亚热带森林转换对土壤氮素矿化及有效性的影响…………… 宋庆妮,杨清培,余定坤,等 (7309)

学术信息与动态

- 2013 年 European Geosciences Union 国际会议述评 …………… 钟莉娜,赵文武 (7319)

期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 276 * zh * P * ¥ 90.00 * 1510 * 30 * 2013-11



封面图说: 山坡岩羊图——岩羊属国家二级保护动物,因喜攀登岩峰而得名,又名石羊。贺兰山岩羊主要分布于海拔 1500—2300m 的山势陡峭地带,羊群多以 2—10 只小群为主。生境适宜区主要为贺兰山东坡(宁夏贺兰山国家级自然保护区)的西南部,而贺兰山西坡(内蒙古贺兰山国家级自然保护区)也有少量分布。贺兰山建立国家级自然保护区以来,随着保护区环境的不断改善,这里岩羊的数量也开始急剧增长,每平方公里的分布数量现居世界之首,岩羊的活动范围也相应扩大到低山 900 米处的河谷。贺兰山岩羊生境选择的主要影响因子为海拔、坡度及植被。

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/stxb201207251057

王召伟,任景玲,闫丽,谢芳,苏荣国.浮游植物对溶解态 Al 的清除作用实验研究.生态学报,2013,33(22):7140-7147.

Wang Z W, Ren J L, Yan L, Xie F, Su R G. Preliminary study on scavenging mechanism of dissolved aluminum by phytoplankton. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(22): 7140-7147.

浮游植物对溶解态 Al 的清除作用实验研究

王召伟,任景玲*,闫丽,谢芳,苏荣国

(中国海洋大学海洋化学理论与工程技术教育部重点实验室,青岛 266100)

摘要:近期黄、东海溶解态 Al 调查结果显示,赤潮爆发过程中溶解态 Al 的含量会明显降低,说明浮游植物生长对 Al 的生物地球化学循环有着重要的影响。在此背景下通过实验室培养,探讨了不同浓度 Al 加富条件下部分硅藻(新月菱形藻、中肋骨条藻、威氏海链藻)和甲藻(东海原甲藻)对溶解态 Al 的清除机制。结果表明:培养液中溶解态 Al 在硅藻的指数生长期会出现明显的下降,在衰亡期略有回升,而甲藻生长过程对水体中溶解态 Al 的这种清除相对于硅藻并不明显。采用痕量元素淋洗试剂对浮游植物进行淋洗,以区分细胞内结合态 Al 和细胞外吸附态 Al 的含量。淋洗实验结果表明:指数生长期硅藻细胞内结合态 Al 占浮游植物细胞内总 Al 含量的比例约为 20%—80%,且稳定期的硅藻细胞内结合态 Al 的比例较指数生长期有不同程度的增加,说明硅藻在生长过程中会主动吸收溶液中的溶解态 Al,实验结果对深入认识 Al 的海洋生物地球化学循环提供了重要的证据。

关键词:溶解态铝;细胞内结合态铝;清除机制;硅藻;甲藻

Preliminary study on scavenging mechanism of dissolved aluminum by phytoplankton

WANG Zhaowei, REN Jingling*, YAN Li, XIE Fang, SU Rongguo

Key Laboratory of Marine Chemistry Theory and Technology, Ministry of Education, Ocean University of China, Qingdao 266100, China

Abstract: Aluminum (Al) is one of the key parameters of GEOTRACES, which can be used as the tracer of terrestrial input from river and/or atmospheric deposition. Recent results in the central Yellow Sea have shown that dissolved Al was scavenged significantly during the phytoplankton bloom and had similar vertical profiles with silicate, which indicate the biological regulation of dissolved Al. However, detailed scavenging mechanism of dissolved Al by phytoplankton remains unclear. In the present study, the scavenging mechanism of dissolved Al by diatoms (*Nitzschia closterium*, *Skeletonema coasatum*, *Thalassiosira weissflogii*) and dinoflagellate (*Prorocentrum donghaiense*) were investigated under different Al additions incubation conditions. The algae chosen here were typical phytoplankton species in the marginal seas of China. The cell were grown in filtered and sterilized seawater enriched with f/2 medium under 2000 lx (12:12 LD circle) at 20 °C. The algae were cultivated triplicate in 2 L polycarbonate (PC) bottle under different Al enrichment conditions, including control group with no Al enrichment, 300 nmol/L and 600 nmol/L Al enrichment groups. Al was added as form of Al-EDTA complex in order to prevent the hydrolysis of free Al³⁺ ion. Dissolved Al concentrations as well as other relevant parameters (e.g., cell density, chlorophyll-a and silicate etc.) were analyzed during the incubation experiments.

The results showed that the growth rates of cultivated diatoms and dinoflagellate under 300 nmol/L and 600 nmol/L Al enrichment groups decreased about 3%~23% compared to the control group, indicating that the enrichment of dissolved Al

基金项目:国家自然科学基金资助项目(41176096);国家基础研究发展规划项目(2011CB409801);科技部国际合作项目(2010DFA24590)

收稿日期:2012-07-25; **修订日期:**2013-01-11

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: renjingl@ouc.edu.cn

didn't inhibit the growth of algae but delay the exponential growth period slightly. Dissolved Al concentrations decreased dramatically within two days for all incubation groups of diatoms, and then the decline slowed down until exponential growth period when Al was scavenged to nearly 20 nmol/L. The concentrations of dissolved Al increased slightly after the degradation of phytoplankton due to the release of dead cells. In contrast with diatom, the decreasing of dissolved Al concentration was not obvious during the incubation of dinoflagellate. Intra- and surface adsorbed Al pools in the cultivated algae was differentiated using oxalate reagent (Oxalate-EDTA-Citrate) to remove surface adsorbed Al from phytoplankton cells. The results showed that dissolved Al was scavenged onto the surface of cells during initial incubation period, and then part of surface adsorbed Al was converted into intra-cellular Al pool with the growth of phytoplankton. The percentage of intra-cellular Al in phytoplankton was approximately 20%—80% during the exponential growth period, and increased slightly during stable growth period. This indicates that the biogeochemical cycle of Al in the ocean is affected by diatoms. Using dissolved Al as tracer of terrestrial material input should appropriate correct the impact from biological activity, especially at the marginal seas influenced significantly by the phytoplankton bloom.

Key Words: dissolved aluminum; intra-cellular Al; scavenging mechanism; diatom; dinoflagellate

铝(Al)作为地壳中含量第三的元素^[1],其在海洋中的分布研究已相当充分,大部分海区调查结果表明溶解态 Al 是非营养型分布的痕量元素^[2-3],生物摄取过程并不是 Al 自水体清除的主要过程,其可作为示踪剂指示陆源物质向海洋的输送过程^[4-6]。但在部分海域(例如:地中海,黄海,长江口)也发现溶解态 Al 呈现营养盐型分布,且浮游植物水华后海水中溶解态 Al 含量大幅度降低^[7-11],平均降幅在 30%—40%左右^[12-13],这说明浮游植物活动对溶解态 Al 的生物地球化学循环起着重要的作用。

目前研究较多的是关于溶解态铁(Fe)、锰(Mn)等痕量金属元素对浮游植物生长的促进/抑制作用及其机理^[14-15],而关于浮游植物生长对海洋中溶解态 Al 的生物地球化学循环影响的研究相对较少。硅藻能够清除水体中部分 Al 已被许多科学工作者证实^[16-18]。有学者认为,Al 自水体中迁出的生物摄取过程是由硅藻吸收海水中的溶解态 Al 形成硅质外壳引起的^[19-20],但是也有学者认为,虽然部分海区溶解态 Al 含量随着生物量的增加而减小,这主要是由于浮游植物的生长使水体中生源颗粒物增加,从而使其表面吸附的 Al 的含量增加,水体中溶解态 Al 的浓度减少^[4, 21]。为了有效地研究浮游植物对金属离子的清除机制,Hudson 和 Morel 于 1989 年^[22]提出利用 Ti(Ⅲ)-EDTA-柠檬酸盐作为淋洗试剂洗脱“细胞外吸附”的金属离子以区分“细胞内结合态”和“细胞外吸附态”的金属离子含量的方法,Tovar-Sanchez 等人于 2003 年^[23]对其进行了改进,用草酸盐代替 Ti(Ⅲ)对细胞外吸附态的痕量金属铁进行淋洗,提高了淋洗效率。

本文旨在对中国近海常见赤潮藻种进行 Al 加富培养,以期证明浮游植物生长对 Al 的清除作用,利用草酸盐淋洗试剂区分不同藻种及不同生长阶段“细胞内结合态 Al”和“细胞外吸附态 Al”的比例,初步探索其清除机制,前期以海水中的溶解态 Al 为示踪因子估算陆源物质输送、水团混合、以及通过大气沙尘向开阔大洋的 Fe 输送通量的结果应该加以适当修正,特别是在受浮游植物水华影响显著的陆架边缘海海区。

1 材料与方法

1.1 实验藻种培养

实验所用新月菱形藻(*Nitzschia closterium*)、中肋骨条藻(*Skeletonema coasatum*)、威氏海链藻(*Thalassiosira weissflogii*)、东海原甲藻(*Prorocentrum donghaiense*)由中国海洋大学藻种室提供,藻体的形态特征及细胞大小见表 1,采用 f/2 培养。

实验室培养分为 3 组,分别为对照组,300 nmol/L Al 加富组,600 nmol/L Al 加富组,分别指在培养液中添加 Al 的量为 0、300、600 nmol/L。培养用的海水为青岛麦岛近岸海水,背景海水中 Al 的平均值约为 200 nmol/L。培养海水在使用前,先用 0.45 μm 的醋酸纤维膜过滤,除去颗粒物,然后用高压灭菌锅灭菌,冷却后接种培养。所有培养实验均在 2 L Nalgene 聚碳酸酯(PC)瓶中进行。PC 瓶用酸浸泡 7d 后,用去离子水和

Milli-Q 水冲洗 3 遍至中性。开始培养时,在 PC 瓶中先加 900 mL 过滤灭菌海水,然后加入 Al-EDTA 络合物 ($\text{KAl}(\text{SO}_4)_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$, Al:EDTA=1:2),再加入 f/2 营养液 (Al<30 nmol/L),最后加入 100 mL 藻液,每组分别培养 2—3 个平行样。培养实验在光照培养箱中进行,培养的光照强度为(2000±100) lx,温度设定在 20℃,明暗周期为 12h:12h。培养体系每天都要定点摇 2—3 次,并随机更换培养瓶位置。每隔 1—2d 取样观测相关参数的变化。

表 1 培养藻种简介
Table 1 Brief introduction of the culture algae

类 Species	藻种 Algae	形态特征 Micromorphological character	直径/μm Diameter
硅藻 Diatom	新月菱形藻 <i>Nitzschia closterium</i>	硅质细胞壁,细胞呈纺锤形,中央膨大,两端细长,并朝同一方向弯曲似月牙型	12—23
	中肋骨条藻 <i>Skeletonema coasatum</i>	硅质细胞壁,细胞呈透镜形或圆柱形,细胞间隙长短不同,往往长于细胞本身长度	6—22
	威氏海链藻 <i>Thalassiosira weissflogii</i>	硅质细胞壁,细胞为短的圆柱形,壳环面有紧密排列的细圆刺和不规则的细孔纹	13—18
甲藻 Dinoflagellate	东海原甲藻 <i>Prorocentrum donghaiense</i>	细胞壁多为纤维素,细胞呈不对称梨形,是原甲藻属中唯一已知能形成细胞短链的种类	15—22

1.2 测定方法

(1) 藻体培养液中溶解态 Al 培养液经针头滤器(德国,MEMBRANA 公司,0.45μm)过滤后,溶解态 Al 的分析方法采用张经^[24]等于 2000 年改进的铝-荧光镓(Al-LMG)荧光光度法,其检出限是 0.25 nmol/L,在 40 nmol/L 和 1.0 nmol/L 时检测精密度分别为 5%和 6.7%。

(2) 藻细胞密度 血球计数板显微镜目视计数,在计数板上滴上 2 滴藻液,盖上盖玻片,用吸水纸将多余藻液吸走,然后在显微镜下数计数板上的藻细胞个数,最后换算成藻密度(个/mL)。藻体叶绿素 a(Chl-a):藻体经醋酸纤维滤膜(0.45μm)过滤分离后,用 90%丙酮萃取,分光光度法测定,最后按 Jeffrey-Humphrey 方程式计算叶绿素 a 的浓度。本实验判断生长周期的方式分别是新月菱形藻通过检测培养液中 Chl-a 的含量变化,中肋骨条藻、威氏海链藻和东海原甲藻则通过显微镜观察培养液中藻细胞的数量确定。

(3) 藻体培养液中溶解态硅酸盐 采用硅钼蓝法^[25]。

(4) 浮游植物细胞不同结合态 Al 的测定方法 每组取 4 份平行的培养液样品过滤(<3KPa),其中两份用草酸盐淋洗试剂将“细胞外吸附态 Al”淋洗下来,测定淋洗后浮游植物细胞中“细胞内结合态 Al”的含量,另两份不加淋洗试剂,直接测定细胞中总 Al 的含量,二者之差即为“细胞外吸附态 Al”。滤膜烘干称重后在聚四氟乙烯消化罐中用浓 HNO₃-HClO₄体积分数为(10:2)消解 36h,采用上述方法测定消解液中 Al 的含量。实验对浒苔消解的精密度为 5.2%(n=7),对威氏海链藻进行淋洗实验,非淋洗的精密度为 3.8%,淋洗的精密度为 19.3%(n=5)。

2 结果与讨论

2.1 硅藻对溶解态 Al 的清除

同样接种密度,不同 Al 加富培养条件下,经新月菱形藻(12d)、中肋骨条藻(15d)、威氏海链藻(36d)的培养,由于添加的藻种量大且生长环境适宜,整个实验周期未出现明显的潜伏期(图 1)。相同的实验条件下,通过对指数增长期比生长率的计算(表 2),结果表明,3 个培养组硅藻的生长状况良好,当添加的 Al 达到 600 nmol/L 时也未表现出明显的生长抑制^[26]。

溶解态 Al 含量的整体变化规律比较相似(图 1),在指数增长期迅速下降,并降至大约 15—20 nmol/L 左右,而后在稳定期趋于平稳,最后会在衰亡期略有回升。这是由于伴随着藻体的迅速增加对溶解态 Al 的大量清除造成的,在衰亡期藻体死亡后变成生源颗粒,生源颗粒降解可能释放少量 Al。生源颗粒可能是溶解态 Al 的汇^[27],也可能是溶解态 Al 的源,故在衰亡期溶解态 Al 的浓度会有较大波动(图 1)。

表 2 3 个培养组的比生长率

Table 2 Growth rate during exponential growth of the three culture group

藻种 Diatom species	对照组 Control group	300 nmol/L Al 加富组 300 nmol/L Al enrichment group	600 nmol/L Al 加富组 600 nmol/L Al enrichment group
新月菱形藻 <i>Nitzschia closterium</i> /d ⁻¹	0.529	0.598	0.409
中肋骨条藻 <i>Skeletonema coasatum</i> /d ⁻¹	0.625	0.538	0.514
威氏海链藻 <i>Thalassiosira weissflogii</i> /d ⁻¹	0.154	0.150	0.136

培养初始 2d 清除 Al 的速率是最快的,可能是由于藻体表面的物理吸附占据主导地位,藻类的细胞壁具有粘性并带有负电荷,且结构组成中含有羟基、氨基、羧基、硫代基等生物配位基,使 Al 离子能够分别通过物理吸附和化学反应沉积到藻体细胞的表面或细胞内部^[28]。图 1 中 3 个培养组溶解态 Al 的初始浓度与初始添加的 0、300、600 nmol/L Al 有很大的差别,主要原因首先是培养海水为青岛麦岛近岸海水,含有较高的 Al 的背景值(约 200 nmol/L);其次 3 组培养实验的零时刻是指在过滤灭菌处理过的海水中添加 Al,再加 f/2 营养液,最后加藻液平衡后取样过滤测得的,部分溶解态 Al 发生了型体的转换或被藻细胞表面吸附而测不出

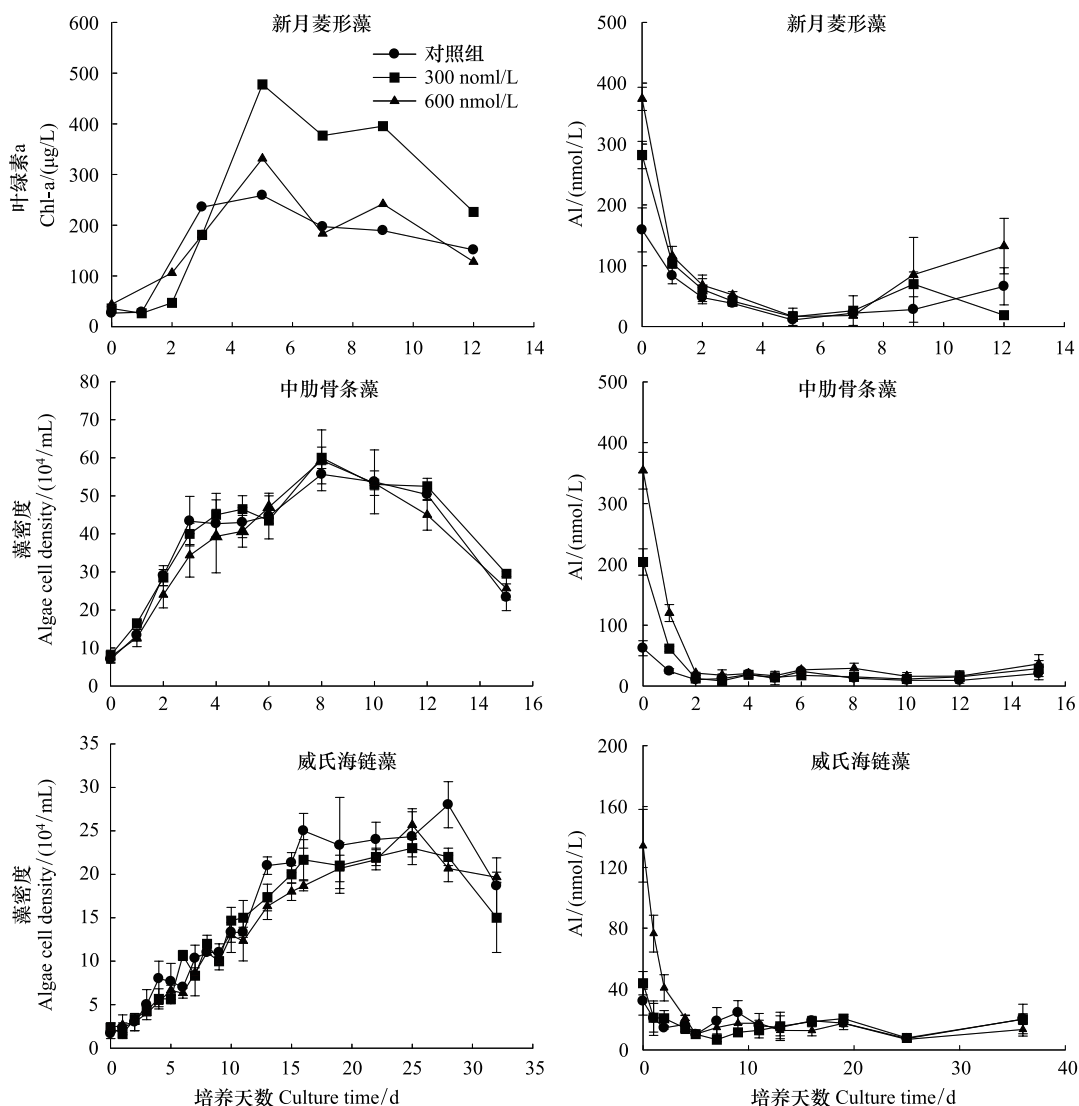


图 1 新月菱形藻,中肋骨条藻,威氏海链藻在培养过程中藻密度(或叶绿素 a)及溶解态 Al 的变化

Fig.1 Growth curve and variation of dissolved Al for the incubation experiments of *Nitzschia closterium*, *Skeletonema coasatum* and *Thalassiosira weissflogii*

(见 2.3 节讨论)。

2.2 东海原甲藻对溶解态 Al 的清除

由图 2 可见,东海原甲藻生长周期明显,分别为指数增长期(0—8d)、稳定期(9—16d)和衰亡期(17d 以后)。东海原甲藻培养过程中溶解态 Al 的变化与硅藻有明显差别,整个培养过程溶解态 Al 的浓度降幅不大,初始时刻溶解态 Al 也未表现出明显的下降,说明与硅藻相比,东海原甲藻的生长对溶解态 Al 并没有明显的主动吸收清除作用。这可能与细胞表面结构组成有关,东海原甲藻的细胞壁外壳比较坚硬且较为光滑,藻细胞表面的多不饱和脂肪酸含量较低^[29],不利于细胞对 Al 的吸附或吸收。而在培养后期溶解态 Al 略有下降可能是由于培养液中出现较多的生源颗粒物,其对 Al 的吸附清除造成^[4]。

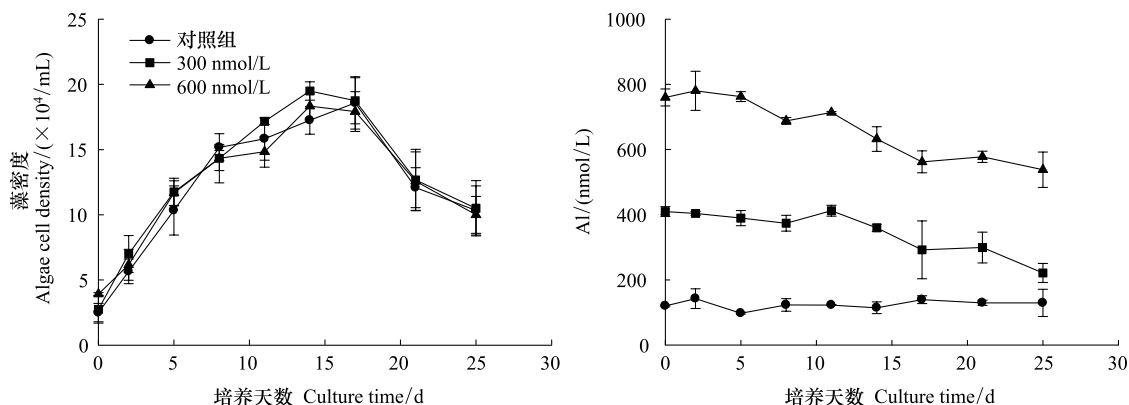


图 2 东海原甲藻培养过程中藻密度和溶解态 Al 的变化

Fig.2 Growth curve and variation of dissolved Al for the incubation experiments of *Prorocentrum donghaiense*

2.3 硅藻对溶解态 Al 的清除机制

本文通过实验室 Al 加富培养部分硅藻,以此来探讨海洋中浮游植物生长对 Al 的清除机制,实验室培养结果与前期研究结果相一致,硅藻生长过程水体中溶解态 Al 会出现明显的降低趋势^[16-18]。这一过程具体的清除机理还不太清楚,以新月菱形藻为例,指数增长期培养液中溶解态 Al 与硅酸盐含量之间呈指数关系(图 3, $r^2 = 0.92$),这揭示了指增长期硅藻对溶解态 Al 的清除和硅酸盐具有相类似的行为^[7, 10]。硅藻细胞在生长过程中会同时吸收 Al 和硅酸盐形成硅质外壳^[18, 21, 30]。

当环境中存在大量 Al 时,硅藻会对 Al 产生快速清除的响应,并能将其清除至较低的水平,这也是部分科研工作者认为大洋中溶解态 Al 在真光层浓度较低的原因^[16, 31]。为了验证这一过程,本实验利用草酸盐淋洗

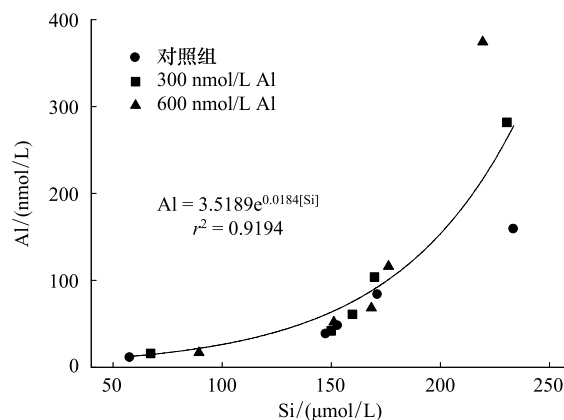


图 3 新月菱形藻培养过程中指数增长期 Al 与硅酸盐变化

Fig.3 Variations of dissolved Al vs. dissolved silicate (Si) during exponential growth of the *Nitzschia closterium*

试剂对处于不同生长阶段的硅藻进行分级,以区分细胞内结合态和细胞外吸附态的 Al。3 种藻实验结果比较一致(图 4),培养零时刻细胞内结合态 Al 在不同加富组含量相当,细胞中总 Al 或细胞外吸附态 Al 随加富浓度的增加而增加,说明加富的 Al 在初始时刻大量被吸附到细胞表面,还没有充足的时间进入细胞内部。这种吸附过程是迅速的,不需要任何能量,只是简单地被结合到藻细胞表面上^[32-33]。随着生长过程的进行,细胞中不同形态 Al 所占的比例发生变化,在指数增长期和稳定期 3 种藻细胞内结合态 Al 含量均表现出不同程度的增加,说明这一过程是藻细胞对 Al 的主动吸收转化过程,藻细胞将细胞外吸附态 Al 转化为细胞内结合态,而且这一过程是比较缓慢的^[34-35]。

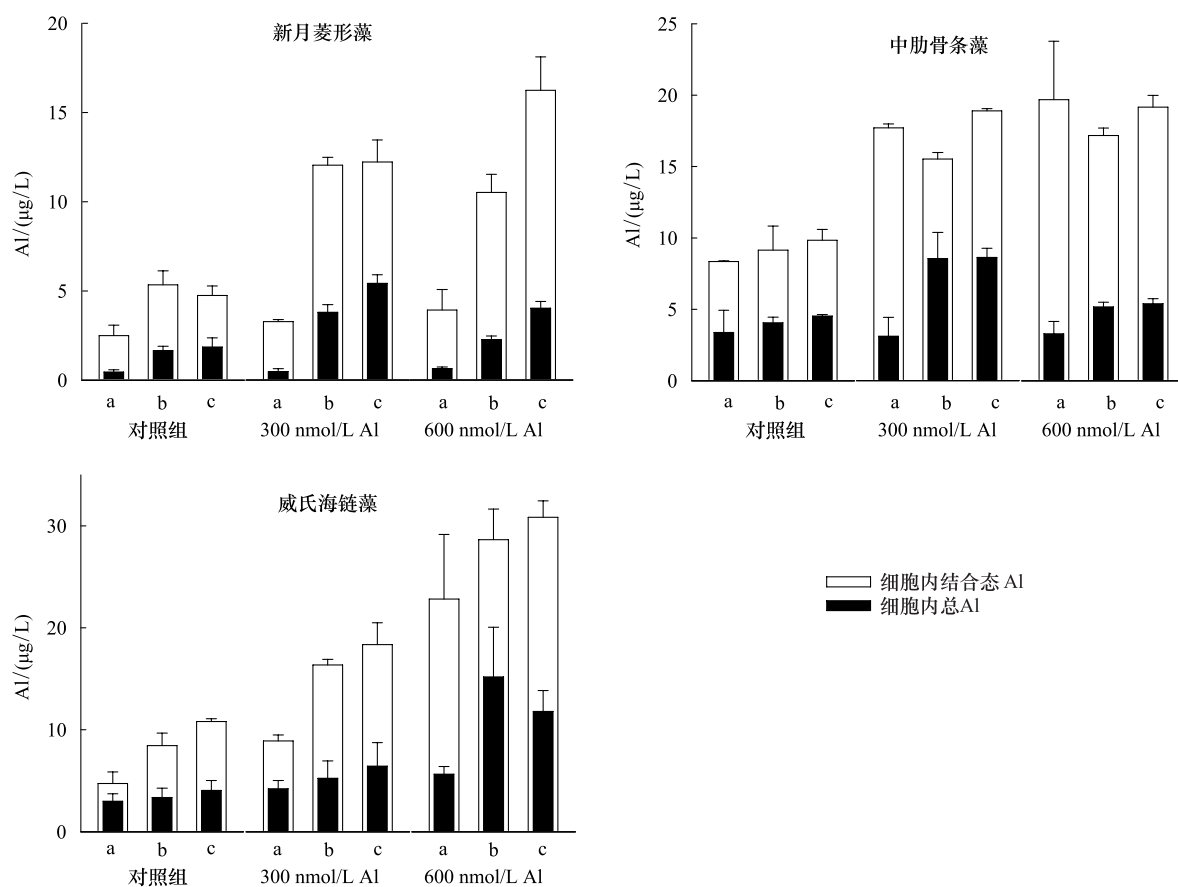


图4 新月菱形藻,中肋骨条藻,威氏海链藻在不同 Al 加富培养过程藻细胞中 Al 的含量变化(a:零时刻,b:指数增长期,c:稳定期)

Fig.4 Variations of Al in the cell of *Nitzschia closterium*, *Skeletonema coasatum* and *Thalassiosira weissflogii* during the incubation experiments with different Al enrichment (a: Primary time, b: Exponential growth, c: Stable growth)

3 结论

通过对部分中国近海常见水华藻种进行实验室培养,测定培养藻体在不同生长周期培养液中溶解态 Al 含量的变化,得到的主要结论如下:

(1)实验室 Al 加富培养证明,硅藻会清除水体中的溶解态 Al,指数增长期清除最快且能清除到一个较低的水平(15—20 nmol/L),衰亡期溶解态 Al 会略有回升,东海原甲藻则未观察到相类似的现象。

(2)痕量金属淋洗实验结果证明,硅藻对溶解态 Al 的清除过程是先将之以吸附态的形式存在于细胞硅壳里,随着藻的生长部分细胞外吸附态 Al 被转化为细胞内结合态 Al,研究结果对深入认识海洋中 Al 生物地球化学循环提供了基础数据。

致谢:实验室培养得到了中国海洋大学海洋生物地球化学实验室的老师 and 同学的帮助,特此致谢。

References:

- [1] Taylor S R. Abundance of chemical elements in the continental crust: a new table. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1964, 28(8): 1273-1285.
- [2] Hydes D J. Aluminum in seawater: control by inorganic processes. *Science*, 1979, 205(4412): 1260-1262.
- [3] Orians K J, Bruland K W. The biogeochemistry of aluminum in the Pacific Ocean. *Earth and Planetary Science Letters*, 1986, 78(4): 397-410.
- [4] Orians K J, Bruland K W. Dissolved aluminum in the central North Pacific. *Nature*, 1985, 316(August 1): 427-429.
- [5] Measures C I, Edmond J M. Aluminum as a tracer of the deep outflow from the Mediterranean. *Journal of Geophysical Research*, 1988, 93(C1): 591-595.
- [6] Ren J L, Zhang J, Li J B, Yu X Y, Liu S M, Zhang E R. Dissolved aluminum in the Yellow Sea and East China Sea-Al as a tracer of Changjiang

- (Yangtze River) discharge and Kuroshio incursion. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2006, 68(1/2): 165-174.
- [7] MacKenzie F T, Stoffyn M, Wollast R. Aluminum in seawater: control by biological activity. *Science*, 1978, 199(4329): 680-682.
- [8] Moran S B, Moore R M. Evidence from mesocosm studies for biological removal of dissolved aluminum from sea water. *Nature*, 1988a, 335(20 October): 706-708.
- [9] Moran S B, Moore R M. Temporal variations in dissolved and particulate aluminum during a spring bloom. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 1988b, 27(2): 205-215.
- [10] Middag R, de Baara H J W, Laan P, Bakker K. Dissolved aluminum and the silicon cycle in the Arctic Ocean. *Marine Chemistry*, 2009, 115(3/4): 176-195.
- [11] Ren J L, Zhang G L, Zhang J, Shi J H, Liu S M, Li F M, Jin J, Liu C G. Distribution of dissolved aluminum in the Southern Yellow Sea: Influences of a dust storm and the spring bloom. *Marine Chemistry*, 2011, 125(1/4): 69-81.
- [12] Ren J L, Liu S M, Zhang J, Xie L, Li D D, Cheng Y, Zhu D D. Effects of terrestrial input on the harmful algal bloom area-with aluminum as an example. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2003, 14(7): 1117-1121.
- [13] Han Q, Moore J K, Zender C, Measure C, Hydes D. Constraining oceanic dust deposition using surface ocean dissolved Al. *Global Biogeochemical Cycles*, 2008, 22(2): 1-14.
- [14] Guo J Y, Yang X L. Regulation of growth and material accumulation in alga *dunaliella salina* by Mn ions. *Fishers Science*, 2008, 27(3): 148-150.
- [15] Nakayama Y, Kuma K, Fujita S, Sugie K, Ikeda T. Temporal variability and bioavailability of iron and other nutrients during the spring phytoplankton bloom in the Oyashio region. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 2010, 57(17): 1618-1629.
- [16] Stoffyn M. Biological control of dissolved aluminum in seawater: experimental evidence. *Science*, 1979, 203(4381): 651-653.
- [17] Moran S B, Moore R M. Kinetics of the removal of dissolved aluminum by diatoms in seawater: A comparison with thorium. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1992, 56(9): 3365-3374.
- [18] Koning E, Gehlen M, Flank A M, Calas G, Epping E. Rapid post-mortem incorporation of aluminum in diatom frustules: Evidence from chemical and structural analyses. *Marine Chemistry*, 2007, 106(1/2): 208-222.
- [19] Beck L, Gehlen M, Flank A M, Van Bennekom A J, Van Beusekom J E E. The relationship between Al and Si in biogenic silica as determined by PIXE and XAS. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 2002, 189(1): 180-184.
- [20] Houston J R, Herberg J L, Maxwell R S, Carroll S A. Association of dissolved aluminum with silica: Connecting molecular structure to surface reactivity using NMR. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2008, 72(14): 3326-3337.
- [21] Gehlen M, Beck L, Calas G, Flank A M, Van Bennekom A J, Van Beusekom J E E. Unraveling the atomic structure of biogenic silica: evidence of the structural association of Al and Si in diatom frustules. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2002, 66(9): 1601-1609.
- [22] Hudson R J M, Morel F M M. Distinguishing between extra- and intracellular iron in marine phytoplankton. *Limnology and Oceanography*, 1989, 34(6): 1113-1120.
- [23] Tovar-Sanchez A, Sanudo-Wilhelmy S A, Garcia-Vargas M, Weaver R S, Popels L C, Hutchins D A. A trace metal clean reagent to remove surface-bound iron from marine phytoplankton. *Marine Chemistry*, 2003, 82(1/2): 91-99.
- [24] Zhang J, Xu H, Ren J L. Fluorimetric determination of dissolved aluminum in natural waters after liquid-liquid extraction into n-hexanol. *Analytica Chimica Acta*, 2000, 405(1/2): 31-42.
- [25] Grasshoff K, Kremling K, Ehrhardt M. *Methods of seawater analysis*. 3th ed. Germany: Wiley-VCH, Weinheim, 1999: 600.
- [26] Vrieling E, Poort L, Beelen T, Gieskes W. Growth and silica content of the diatoms *Thalassiosira weissflogii* and *Navicula salinarum* at different salinities and enrichments with aluminum. *European Journal of Phycology*, 1999, 34(3): 307-316.
- [27] Measures C I, Vink S. On the use of dissolved aluminum in Surface Waters to Estimate Dust Deposition to the Ocean. *Global Biogeochemical Cycles*, 2000, 14(1): 317-327.
- [28] Yan H, Pan G, Huo R L. Oxidic effects of copper, zinc and manganese on the inhibition of the growth of *closterium lunula*. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2001, 21(003): 328-332.
- [29] Gong Y L, Li Y B, Wang X L, Liang S K, Zhu C J, Han X R. The influence of biosurfactant on the growth of *Prorocentrum donghaiense*. *China Environmental Science*, 2004, 24(006): 692-696.
- [30] Van Beusekom J E E, Weber A. Decreasing diatom abundance in the North Sea: the possible significance of aluminum//Colombo G, et al. eds.

Marine Eutrophication and Population Dynamics. Olsen and Olsen, Fredensborg, Denmark, 1992: 121-127.

- [31] Kramer J, Laan P, Sarthou G, Timmermans K R, de Baar H J W. Distribution of dissolved aluminum in the high atmospheric input region of the subtropical waters of the North Atlantic Ocean. *Marine Chemistry*, 2004, 88(3): 85-101.
- [32] Deng L P, Su Y Y, Su H, Wang X T, Zhu X B. Sorption and desorption of lead (II) from wastewater by green algae *Cladophora fascicularis*. *Journal of Hazardous Materials*, 2007, 143(1/2): 220-225.
- [33] Chen Y S, Sun Q J, Chen J, Zhuang Y L, Dai S G. Research on technology of biosorption of heavy metals. *Advances in Environmental Science*, 1997, 5(006): 34-43.
- [34] Zhu X Q, Han B P. Advance in adsorption of heavy metals. *China Environmental Protection Industry*, 2004, 5(Special topic): 19-21.
- [35] Li T, Shi Z L, Li J, Zhang J L. Effects of nutrients on some biochemical constituents and properties of *Skeletonema coasatum* and *Nitzschia closterium*. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 2000, 31(1): 46-52.

参考文献:

- [12] 任景玲, 刘素美, 张经, 谢亮, 李丹丹, 程岩, 朱德弟. 陆源物质输送对赤潮高发区的影响——以铝为例. *应用生态学报*, 2003, 14(7): 1117-1121.
- [14] 郭金耀, 杨晓玲. 锰对盐藻生长与物质积累的调控作用. *水产科学*, 2008, 27(3): 148-150.
- [28] 阎海, 潘纲, 霍润兰. 铜、锌和锰抑制月形藻生长的毒性效应. *环境科学学报*, 2001, 21(003): 328-332.
- [29] 龚良玉, 李雁宾, 王修林, 梁生康, 祝陈坚, 韩秀荣. 生物表面活性剂对东海原甲藻生长的影响. *中国环境科学*, 2004, 24(006): 692-696.
- [33] 陈勇生, 孙启俊, 陈钧, 庄源益, 戴树桂. 重金属的生物吸附技术研究. *环境科学进展*, 1997, 5(006): 34-43.
- [34] 朱雪强, 韩宝平. 重金属生物吸附研究进展. *中国环保产业*, 2004, 5: 19-21.
- [35] 李铁, 史致丽, 李俊, 张金良. 营养盐对中肋骨条藻和新月菱形藻部分生化组成和性质的影响. *海洋与湖沼*, 2000, 31(1): 46-52.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol.33, No.22 Nov., 2013 (Semimonthly)

CONTENTS

Frontiers and Comprehensive Review

- The review of methods for mapping species spatial distribution using presence/absence data LIU Fang, LI Sheng, LI Diqiang (7047)
- A research review of landscape service LIU Wenping, YU Zhenrong (7058)
- Progress on techniques for partitioning soil respiration components and their application in cropland ecosystem CHEN Minpeng, XIA Xu, LI Yinkun, MEI Xurong (7067)

Autecology & Fundamentals

- Effect of different stubble height treatments on the annual growth index and physiological characteristics of *Tetraena mongolica* in two growing seasons WANG Zhen, ZHANG Liwen, YU Yi, et al (7078)
- Photosynthetic characteristics of an endangered species *Tetrameles nudiflora* under different light and water conditions DENG Yun, CHEN Hui, YANG Xiaofei, et al (7088)
- The compensation capacity of tillering and production of main stem nodes in rice WEI Ming, LI Dongxia (7098)
- Simulation of leaf area and dry matter production of tobacco leaves based on product of thermal effectiveness and photosynthetically active radiation ZHANG Mingda, LI Meng, HU Xueqiong, et al (7108)
- Effects of different tillage and straw systems on soil water-stable aggregate distribution and stability in the North China Plain TIAN Shenzhong, WANG Yu, LI Na, et al (7116)
- Effects of the *Larix gmelinii* grown under different light intensities on the development and defensive enzyme activities of *Lymantria dispar* larvae LU Yifang, YAN Junxin, LI Shuangwen, et al (7125)
- Biological control efficiency of *Orius similis* Zheng (Hemiptera: Anthocoridae) on *Frankliniella occidentalis* (Pergande) under different spatial and caged conditions MO Lifeng, ZHI Junrui, TIAN Tian (7132)
- Preliminary study on scavenging mechanism of dissolved aluminum by phytoplankton WANG Zhaowei, REN Jingling, YAN Li, et al (7140)
- Leaf-form characteristics of plants in *Quercus aquifolioides* community along an elevational gradient on the Balang Mountain in Wolong Nature Reserve, Sichuan, China LIU Xingliang, HE Fei, FAN Hua, et al (7148)
- Comparison of shrimp density between the Minjiang estuary and Xinhua bay during spring and summer XU Zhaoli, SUN Yue (7157)
- The feeding selectivity of an herbivorous amphipod *Ampithoe valida* on three dominant macroalgal species of Yundang Lagoon ZHENG Xinqing, HUANG Lingfeng, LI Yuanchao, et al (7166)

Population, Community and Ecosystem

- Effects of four different agricultural prevention and control measures on rice yellow stem borer *Tryporyza incertulas* (Walker) (Lepidoptera: Pyralidae) ZHANG Zhenfei, HUANG Bingchao, XIAO Hanxiang, et al (7173)
- Soil nitrogen concentrations and transformations under different vegetation types in forested zones of the Loess Gully Region XING Xiaoyi, HUANG Yimei, AN Shaoshan, et al (7181)
- Ecosystem health assessment based on diagnosis CAI Xia, XU Songjun, CHEN Shanhao, et al (7190)
- The production and accumulation of phytoliths in rice ecosystems: a case study to Jiaxing Paddy Field LI Zimin, SONG Zhaoliang, JIANG Peikun (7197)
- Application of a free search-based projection pursuit model in investigating reed in wetlands LI Xinhua, ZHAO Chengyi (7204)

- Soil microbial diversity under typical vegetation zones along an elevation gradient in Helan Mountains
 LIU Bingru, ZHANG Xiuzhen, HU Tianhua, et al (7211)
- Effects of shrub encroachment on biomass and biodiversity in the typical steppe of Inner Mongolia
 PENG Haiying, LI Xiaoyan, TONG Shaoyu (7221)
- Research on diaspore morphology and species distribution of 80 plants in the hill-gully Loess Plateau
 WANG Dongli, ZHANG Xiaoyan, JIAO Juying, et al (7230)
- Habitat suitability assessment of blue sheep in Helan Mountain based on MAXENT modeling
 LIU Zhensheng, GAO Hui, TENG Liwei, et al (7243)
- Characteristic of phytoplankton primary productivity and influencing factors in littoral zone of Lake Taihu
 CAI Linlin, ZHU Guangwei, LI Xiangyang (7250)
- Landscape, Regional and Global Ecology**
- Responses of soil respiration to changes in depth of seasonal frozen soil in Ebinur Lake area, arid area of Northwest China
 QIN Lu, LV Guanghui, HE Xuemin, et al (7259)
- Seasonal and annual variation characteristic in basal soil respiration of black loam under the condition of farmland field
 ZHANG Yanjun, GUO Shengli, LIU Qingfang, et al (7270)
- Resource and Industrial Ecology**
- Economic evaluation and protection of *Amygdalus mira* genetic resource ZHANG Lirong, MENG Rui, LU Guobin (7277)
- Meteorological grading indexes of water-saving irrigation for cotton XIAO Jingjing, HUO Zhiguo, YAO Yiping, et al (7288)
- Research Notes**
- Sprouts characteristic structure of *Taxus yunnanensis* plantation SU Lei, SU Jianrong, LIU Wande, et al (7300)
- The effects of forest conversion on soil N mineralization and its availability in central jiangxi subtropical region
 SONG Qingni, YANG Qingpei, YU Dingkun, et al (7309)

《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

本期责任副主编 杨志峰

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 22 期 (2013 年 11 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 33 No. 22 (November, 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@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