- 5 Schreiber U, Endo T, Mi H, et al. Quenching analysis of chlorophyll fluorescence by the saturation pulse method: particular aspects relating to the study of eukaryotic algae and cyanobacteria. *Plant Cell Physiol*, 1995, 36: 873~882
- 6 Mackinney G. Absorption of light by chlorophyll solutions. *J Biol Chem*, 1941, 140: 315~322
- 7 Allen J F, Sander C E, Holmes N G. Correlation of membrane protein phosphorylation with exciton in the cyanobacterium *Synechococcus* 6301. *FEBS Lett*, 1985, 193: 271~275
- 8 Biggins J, Bruce D. The relationship between protein kinase activity and chlorophyll a fluorescence changes in thylakoid from the cyanobacterium *Synechococcus* 6301. In: Biggins J ed. *Progress in Photosynthesis Research*, Vol 2. Dordrecht: Martinus Nijhoff, 1987, 773~776
- 9 Mullineaux C W. Excitation energy transfer from phycobilisome to photosystem I in a cyanobacteria mutant lacking photosystem II. *Biochim Biophys Acta*, 1994, 1184: 71~77
- 10 Dominy P J, Williams W P. The role of respiratory electron flow in the control of excitation energy distribution in blue-green algae. *Biochim Biophys Acta*, 1987, 892: 264~274
- 11 Mullineaux C, Allen J F. The state 2 transition in the cyanobacterium *Synechococcus* 6301 can be driven by respiratory electron flow into the plastoquinone pool. *FEBS Lett*, 1986, 205(1): 155~160
- 12 Mi H, Endo T, Schreiber U, et al. Electron donation from cyclic and respiratory flows to the photosynthetic intersystem chain is mediated by pyridine nucleotide dehydrogenase in the cyanobacterium *Synechocystis* PCC 6803. *Plant Cell Physiol*, 1992, 33: 1233~1237

(1998-03-05 收稿, 1998-06-05 收修改稿)

锆对尖刺拟菱形藻多列型生长 和藻毒素产生的影响

俞志明^① D. V. Subba Rao^②(①中国科学院海洋研究所, 青岛 266071; ②Bedford Institute of Oceanography,
P. O. Box 1006, Dartmouth, N. S., Canada B2Y 4A2)

摘要 研究了锆酸 $\text{Ge}(\text{OH})_4$ 对尖刺拟菱形藻多列型生长和软骨藻酸 (Domoic acid) 藻毒素生成的影响。结果表明, 在一定浓度范围内锆酸可以抑制尖刺拟菱形藻的生长, 其抑制效应随锆酸浓度的增大而增强。锆酸还可以抑制该藻细胞分泌软骨藻酸藻毒素。当 Ge/Si 为 35 时, 抑制效率可达 100%。在此结果基础上, 就其作用机制进行了探讨。

关键词 锆 赤潮生物 软骨藻酸 抑制

尖刺拟菱形藻是一种常见的海洋硅藻, 也是形成有害赤潮的主要藻种之一。最近研究发现, 在某些海域分布的该藻多列型可分泌软骨藻酸藻毒素, 污染其他海洋生物, 威胁人类的生存环境, 甚至生命和健康^[1]。所以如何抑制该藻生长和藻毒素的产生引起了人们的关注。文献[2]曾基于粘土矿物治理赤潮的方法, 研究了粘土矿物对尖刺拟菱形藻生长和软骨藻酸藻毒素产生的影响。发现粘土矿物能够降低该藻毒素的产生, 但难以完全抑制。锆在化学性质上与硅藻的主要营养元素——硅极为相似, 曾被应用于抑制某些硅藻生长、测定硅藻对海洋初级生产力的贡献^[3]。另有研究表明, 锆还对某些陆地植物中氨基酸、糖等化合物的渗出也有一

定影响^[4]. 在此基础上, 本文考察了锗离子对尖刺拟菱形藻多列型生长和软骨藻酸毒素产生的影响, 针对其抑制作用和机制做了进一步的研究和探讨.

1 实验

锗酸 $\text{Ge}(\text{OH})_4$ 是由美国 Matheson Coleman & Bell Norwood 公司生产的 GeO_2 (99.999%) 经加热溶解在酸性去离子水中制得. 尖刺拟菱形藻多列型 (*Psuedonitzschia pungens f. multiseries*) 取自于加拿大爱德华王子岛 (Prince Edward Island), 经加拿大 Bedford 海洋研究所纯化、分离, 在 10°C , $615\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 白色荧光灯连续光照下, f/2 培养液中培养. 接种后 2 d, 在其培养液中分别加入一定量的锗酸母液, 使其锗离子浓度分别达到 0, 54, 270, 540, 1 080, 1 890 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$, 其 Ge/Si 分别为 0, 1, 5, 10, 20, 35. 定期检测细胞浓度、叶绿素 a、细胞中的软骨藻酸、氨基酸等变化. 其中叶绿素 a 的测定用荧光方法^[5], 细胞中软骨藻酸和氨基酸的检测分别使用 FMOC/HPLC-FD 方法^[6]和由 John 改进的荧光胺法^[7].

2 结果与讨论

2.1 $\text{Ge}(\text{OH})_4$ 对尖刺拟菱形藻多列型生长的影响

锗是在化学性质上与硅极为相似的一种元素, 研究发现它能够干扰该藻的硅化作用, 影响藻细胞的正常生长, 如图 1 所示. 在无锗体系中, 该藻很快进入指数增长期, 在第 8 天达到最高值 $48.8\ \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$; 当体系加入 $\text{Ge}(\text{OH})_4$ 后, 该藻的生长受到明显的阻抑: 体系中最高叶绿素 a 浓度分别降低了 30%~50%, 其达到最高浓度的时间由无锗时的第 8 天, 提前至第 4 天, 体系叶绿素 a 达到最高浓度后, 迅速下降至零. 其达到零叶绿素 a 的时间随锗离子浓度的增加而缩短: 由 Ge/Si 比为 1 时的 16 d 缩短至 Ge/Si 比为 35 时的 8 d. 表明该阻抑效应随锗离子浓度增大而逐渐增强.

图 1 锗酸对尖刺拟菱形藻多列型生长的影响
锗离子浓度 ($\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$): ● 为 0, ○ 为 54, ■ 为 270, □ 为 540, ◆ 为 1 080, ◇ 为 1 890

根据文献[2]所提出的该藻生长速率模型, 计算求得该藻在上述各实验条件下的最大生长速率于表 1. 结果表明在 Ge/Si 等于 1 时的最大生长速率较对比实验略有提高. 比较图 1 不难发现这是由于第 4 天时其生物量较高造成的. 已知锗离子可以参与硅藻细胞壁的形成, 所以体系中少量的锗离子可以刺激藻细胞的生长; 但细胞中游离的锗离子将会影响其正常的细胞分裂和光合作用, 抑制细胞的生长^[8]. 如 Ge/Si = 1 时所示, 在开始的一段时间里, 进入细胞

中的锗离子大都参与细胞壁的合成,游离锗离子较少,所以开始阶段对细胞的生长有促进作用;随着时间的增长,细胞中游离的锗离子浓度增大,阻抑作用增强,导致生物量迅速下降;其达到生物量最高值的时间由对比实验的第8天提前至第4天.随着体系中 Ge/Si 的增大,细胞中游离锗离子浓度明显增大,阻抑作用显著增强.所以其最大生长速率逐渐降低,叶绿素 a 浓度降至零的时间逐渐缩短.

表1 不同锗离子浓度下尖刺拟菱形藻多列型最大生长速率

$\text{Ge}/\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$	0	54	270	540	1 080	1 890
$V_{\max}/\text{d}^{-1}$	0.33	0.37	0.32	0.28	0.27	0.24

2.2 $\text{Ge}(\text{OH})_4$ 对软骨藻酸藻毒素产生的影响

本研究首次发现锗离子对软骨藻酸藻毒素的产生具有阻抑效应(图2所示).当体系中加入 $\text{Ge}(\text{OH})_4$ 后,对细胞内软骨藻酸藻毒素产生明显阻抑,曲线呈峰型.除 Ge/Si 等于5时的峰值高于 Ge/Si 等于1时的峰值外,软骨藻酸藻毒素峰值的浓度随着锗离子浓度的增加而降低,呈反比关系.当 Ge/Si 增至35时,该峰已完全消失,表明此时锗离子已完全抑制了该藻毒素的产生.另外,与对比实验不同,所有加锗体系细胞内的软骨藻酸藻毒素浓度达到峰值后,迅速下降至零.

图2 锗酸对尖刺拟菱形藻分泌软骨藻酸藻毒素的影响

图示同图1

软骨藻酸是一种含有氨基的化合物,环境中的氮源、光照或其他刺激对其产生都有特殊的影响.如,在无光条件下,该藻细胞不分泌软骨藻酸;而某些化合物(如 NH_4^+ 离子)的存在则能刺激其大量产生^[9].根据细胞内氨基酸浓度与软骨藻酸产生的关系(图3)以及该藻毒素主要产生在指数增长期以后的实验结果,我们认为软骨藻酸可能是由藻细胞体内蛋白质降解转化而产生的一种藻毒素,这种转化大都在细胞停止分裂后进行.根据文献[9]有关某些环境刺激有利于软骨藻酸产生的实验结果推断,体系中加入 $\text{Ge}(\text{OH})_4$ 后应刺激软骨藻酸的产生.

但我们实验结果却表明 $\text{Ge}(\text{OH})_4$ 抑制了软骨藻酸的产生,甚至可使其降至为零.这主要是由于细胞内游离的锗离子破坏甚至中断了细胞内正常的硅化作用.因为硅是硅藻生长所必须的营养元素,它不仅是硅藻细胞壁的主要成分,而且参与硅藻的其他代谢过程.对硅藻的呼吸作用、DNA和蛋白质的合成、碳的吸收等等均有影响^[10, 11].当细胞中存在游离的锗离子时,由于锗离子的化学反应活性高于硅,锗离子极易替代硅参与上述代谢过程,破坏并中断细胞内正常的硅化过程,导致蛋白质等化合物合成过程的破坏,从而也阻止了软骨藻酸的产生.所以我们实验结果表明随着体系中 $\text{Ge}(\text{OH})_4$ 浓度的增大,细胞内软骨藻酸浓度大都减少.但其中出现了 Ge/Si 等于5时的软骨藻酸峰值高于 Ge/Si 等于1时峰值的反常顺序,这主要是由于在 Ge/Si 等于1时的开始阶段(第8天,图1), $\text{Ge}(\text{OH})_4$ 尚能刺激硅藻细胞的分裂,导致其软骨藻酸的浓度较低的缘故.

图3 藻细胞内氨基酸浓度与软骨藻酸浓度间的正相关关系

过程,导致蛋白质等化合物合成过程的破坏,从而也阻止了软骨藻酸的产生.所以我们实验结果表明随着体系中 $\text{Ge}(\text{OH})_4$ 浓度的增大,细胞内软骨藻酸浓度大都减少.但其中出现了 Ge/Si 等于5时的软骨藻酸峰值高于 Ge/Si 等于1时峰值的反常顺序,这主要是由于在 Ge/Si 等于1时的开始阶段(第8天,图1), $\text{Ge}(\text{OH})_4$ 尚能刺激硅藻细胞的分裂,导致其软骨藻酸的浓度较低的缘故.

致谢 本工作为国家自然科学基金(批准号:49406072)和国家自然科学基金重大项目基金(批准号:39790110)资助项目.

参 考 文 献

- 1 Perl T M, Bedard L, Kosatsky J, et al. An outbreak of toxic encephalopathy caused by eating mussels contaminated with domoic acid. *N Engl J Med*, 1990, 322: 1775~1780
- 2 俞志明, Subba R D V. 粘土矿物对尖刺拟菱形藻多列型生长和藻毒素产生的影响. *海洋与湖沼*, 1998, 29(1): 47~52
- 3 Subba R D V. Measurement of primary production in phytoplankton groups by size-fractionation and by germanic acid inhibition. *Oceanologia Acta*, 1993, 3: 31~42
- 4 Cakmak I, Kurz H, Marschner H. Short-time effects of boron, germanium and high light intensity on membrane permeability in boron deficient leaves of sunflower. *Physiologia Plantarum*, 1995, 95(1): 11~18
- 5 Subba R D V, Pan Y L, Zitko V, et al. Diarrhetic shellfish poisoning (DSP) associated with a subsurface bloom of *Dinophysis norvegica* in Bedford Basin, eastern Canada. *Mar Ecol Prog Ser*, 1993, 97: 117~126
- 6 Subba R, Quillian M A, Pocklington R. Domoic acid—a neurotoxic amino acid produced by the marine diatom *Nitzschia pungens* in culture. *Can J Fish Aquat Sci*, 1988, 45(12): 2076~2079
- 7 John R C, Jr Dortch Q, Thoresen S S, et al. Evaluation of methods for the separation and analysis of proteins and free amino acids in phytoplankton samples. *J of Plankton Research*, 1988, 10(3): 341~358
- 8 Azam F, Hemmingsen B B, Volcani B E. Germanium incorporation into the silica of diatom cell walls. *Arch Mikrobiol*, 1973, 92: 11~20
- 9 Bates S S, Worms J, Smith J C. Effect of ammonium and nitrate on growth and domoic acid production by *Nitzschia pungens*

- in batch culture. Can J Fish Aquat Sci, 1993, 50: 1 248~1 254
- 10 Sullivan C W, Volcani B E. Role of silicon in diatom metabolism. Ⅲ. The effect of silicic acid on DNA polymerase, TMP kinase and DNA synthesis in *Cylindrotheca fusiformis*. Biochim Biophys Acta, 1973, 308: 212~229
- 11 Coombs J, Spanis C, Volcani B E. Studies on the biochemistry and fine structure of silica shell formation in diatoms. Photosynthesis and respiration in silicon-starvation synchrony of *Navicula pelliculosa*. Plant Physiol (Lancaster), 1967, 42: 1 607~1 611

(1998-03-12 收稿, 1998-06-05 收修改稿)

论盐沼-潮沟系统的地貌动力响应

汪亚平^① 张忍顺^② 高抒^①

(①中国科学院海洋研究所, 青岛 266071; ②南京师范大学地理系, 南京 210097)

摘要 盐沼-潮沟系统是海岸带重要的自然资源和海岸地貌系统。中国东部江苏海岸盐沼的研究表明, 潮沟中水流的流速变化受盐沼表面和潮沟床底的坡度、高程及外海潮波性质的控制, 而水流造成的泥沙输运引起盐沼、潮沟的淤积或侵蚀, 改变着盐沼-潮沟系统的地貌特征。盐沼、潮沟的地貌变化还与风暴潮及太阳黑子活动周期有关。盐沼-潮沟系统通过垂向淤积来响应海平面的上升。向盐沼面输送水、沙是潮沟的重要功能; 盐沼-潮沟系统能够消减潮流、波浪能量, 具有海岸保护的潜在价值。

关键词 盐沼 潮沟 地貌特征 水动力 中国海岸

盐沼常发育于温带地区的河口或受宽广潮间带、沙洲、堡岛保护而免遭巨浪侵袭的淤泥质海岸; 盐生草本植物生长于盐沼面上并受海水的周期性淹没。盐沼面上的潮沟(Tidal creeks)网系具有输送水沙物质及能量(潮流、波浪等)的功能。盐沼蕴藏着丰富的动、植物资源, 又是宝贵的土地资源。在许多国家, 由于人类活动及自然因素的影响, 盐沼面积呈大幅度减少趋势^[1]。我国在过去 45 a 里, 围垦的盐沼达 1.1×10^7 亩^[2] (1 亩 = 667 m²)。据预测, 到 2100 年海平面将上升 0.49~1 m^[3~5], 风暴潮作用将随之加剧, 使现有海堤及沿海城市处于更大的压力之下。而盐沼-潮沟系统却是海岸带削减能量和具缓冲作用的重要地貌系统, 具有保护海岸及抵御风暴潮的潜在价值, 日益引起地貌学、海岸工程及海岸规划等方面的广泛重视^[6]。在侵蚀型海岸上, 可以通过恢复或人工建立盐沼等“软工程”来保护海岸。

本文将根据实测和历史资料, 探讨盐沼-潮沟系统对外界环境的反应, 讨论的重点是地貌与水动力的相互作用和反馈关系。本文的研究区域江苏琼港盐沼地处中国东部淤进型淤泥质强潮海岸, 潮沟广泛发育, 盐沼宽度达 3 km 以上(图 1)^[1]。在琼港盐沼区的风车河、北支川、甜水港及死生港进行了 7 个潮周期的水文测量、地貌调查及沉积物采样, 并搜集了相关的航空和卫星像片。

1) Wang Ya Ping, Zhang Renshun, Gao Shu. Velocity variations in salt marsh creeks, Jiangsu, China. Journal of Coastal Research (in press)