

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第33卷 第8期

Vol.33 No.8

2012

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

南海北部大气气相多溴联苯醚的含量及来源 李琦路, 李军, 刘向, 徐维海, 张干 (2533)

河北张家口市大气污染观测研究 邵平, 王莉莉, 安俊琳, 周彦丽, 王跃思 (2538)

大气中丙烷光氧化臭氧生成活性的烟雾箱模拟 黄丽华, 莫创荣, 徐永福, 贾龙 (2551)

膜生物反应器处理甲苯性能及机制 叶杞宏, 魏在山, 肖盼, 李华琴, 张再利, 樊青娟 (2558)

厨余垃圾堆肥过程中恶臭物质分析 张红玉, 邹克华, 杨金兵, 李国学, 杨青原, 张锋 (2563)

北京城市生态系统地表水硝酸盐污染空间变化及其来源研究 徐志伟, 张心昱, 任玉芬, 孙晓敏, 王效科, 王升忠 (2569)

枯、平、丰水期长江3条支流表层水中多氯联苯的分布特征及风险评价 李昆, 赵高峰, 周怀东, 曾敏, 廖柏寒, 吴正勇, 张盼伟, 柳敏 (2574)

三峡库区丰水期表层水中酚类的分布特征及潜在风险 吴正勇, 赵高峰, 周怀东, 李科林, 李昆, 张盼伟 (2580)

东湖表层水体中全氟辛酸和全氟辛磺酸空间分布特征 陈静, 王琳玲, 朱湖地, 王贝贝, 刘黄诚, 曹梦华, 苗竹, 胡丽, 陆晓华, 刘光虹 (2586)

三峡库区大宁河与磨刀溪重金属污染特征 安立会, 张艳强, 郑丙辉, 刘玥, 宋双双, 李子成, 陈浩, 赵兴茹, 林进 (2592)

长江水系表层沉积物重金属污染特征及生态风险性评价 王岚, 王亚平, 许春雪, 安子怡 (2599)

江苏如东滩涂贝类养殖区表层沉积物中重金属来源分析及其潜在生物毒性 李磊, 王云龙, 蒋玫, 袁骥, 沈新强 (2607)

扰动强度对太湖沉积物中磷释放及其形态转化的影响 李大鹏, 黄勇 (2614)

干流倒灌异重流对香溪河库湾营养盐的补给作用 张宇, 刘德富, 纪道斌, 杨正健, 陈媛媛 (2621)

常年淹水和干旱对三峡库区消落带菖蒲生长恢复的影响 李强, 高祥, 丁武泉, 朱启红, 欧媛, 刘瑜 (2628)

温州城市降雨径流磷的负荷及其初始冲刷效应 周栋, 陈振楼, 毕春娟 (2634)

沂蒙山区典型小流域降雨径流的磷素输出特征 于兴修, 李振炜, 刘前进, 井光花 (2644)

城郊农业区小流域土地利用结构对氮素输出的影响 杨峰, 王鹏举, 杨珊珊, 吴金水, 胡荣桂 (2652)

基于 AnnAGNPS 模型四岭水库小流域氮磷流失特征的模拟研究 边金云, 王飞儿, 杨佳, 俞洁, 楼莉萍, 俞丹萍 (2659)

基于 GIS 和 L-THIA 模型的深圳市观澜河流域非点源污染负荷变化分析 白凤姣, 李天宏 (2667)

黄土丘陵区坡面水蚀对降雨和下垫面微观格局的响应 卫伟, 贾福岩, 陈利顶, 吴东平, 陈瑾 (2674)

强化混凝对腐殖酸和富里酸去除对比研究 周玲玲, 张永吉, 叶河秀, 张一清 (2680)

九龙江下游水源水中新发病原微生物和抗生素抗性基因的定量 PCR 检测 王青, 林惠荣, 张舒婷, 于鑫 (2685)

布吉河丰水期总细菌和氨氧化细菌的定性和定量研究 孙海美, 白姣姣, 孙卫玲, 邵军 (2691)

曝气生物滤池工艺脱氮性能及反硝化细菌群落结构特征研究 彭晓兰, 刘聪, 陈吕军 (2701)

城市污水处理厂氧化沟工艺微生物种群分析 郭云, 杨殿海, 卢文健 (2709)

IC 反应器处理啤酒废水的效能及其微生物群落动态分析 朱文秀, 黄振兴, 任洪艳, 阮文权 (2715)

原子力显微镜液池成像技术应用于微絮凝过滤工艺过程中的实验条件优化 郑蓓, 葛小鹏, 于志勇, 原盛广, 张文婧, 孙景芳 (2723)

UV/H₂O₂ 法对印染废水生化出水中不同种类有机物的去除效果 李新, 刘勇弟, 孙贤波, 徐宏勇, 钱飞跃, 李欣珏, 李暮 (2728)

蛋白核小球藻 *Chlorella pyrenoidosa*-15 的异养培养条件优化及污水养殖 王秀锦, 李兆胜, 邢冠岚, 李卓凝, 袁红莉, 杨金水 (2735)

“Fe⁰/优势脱氮菌”体系降解 2,4,6-TCP 特性及机制研究 戴友芝, 郭丽丽, 史雷, 刘智勇, 高宝钗 (2741)

树脂 D201 上粗漆酶的固定化及对孔雀石绿的脱色 戚绪亮, 刘翔, 刘波, 王林, 王小春, 方超 (2747)

TiO₂/PS/Fe₃O₄ 光催化剂的低温制备及其光催化和磁回收性能 王雪姣, 任学昌, 念娟妮, 肖举强, 王刚, 常青 (2752)

微波加热下苯的催化氧化性能研究 张钰彩, 卜龙利, 王晓晖, 刘海楠, 张浩 (2759)

纳米磁粉协同解偶联剂作用下活性污泥性能的研究 高丽英, 汤兵, 梁玲燕, 黄绍松, 付丰连, 罗建中 (2766)

好氧颗粒污泥沉降选择实验研究与定量描述 苏德足, 邓绣坤, 郑丽, 王畅, 金旺红, 沈俊 (2773)

超声波促进好氧/缺氧污泥消化过程中水解酶活性变化研究 叶运弟, 孙水裕, 郑莉, 刘宝建, 许燕滨, 占星星, 刘敬勇 (2780)

微生物营养剂浓度对生物沥浸法促进城市污泥脱水性能的影响 宋永伟, 刘奋武, 周立祥 (2786)

实验室条件下蓝藻结皮对低温光照胁迫的响应与微结构变化 饶本强, 李华, 熊瑛, 兰书斌, 李敦海, 刘永定 (2793)

西南地区紫色水稻土活性碳库的季节动态 吴艳, 江长胜, 郝庆菊 (2804)

典型设施菜地土壤抗生素污染特征与积累规律研究 尹春艳, 骆永明, 滕应, 章海波, 陈永山, 赵永刚 (2810)

土壤铜硒复合污染中金属形态转化及其对生物有效性的影响 胡斌, 梁东丽, 赵文龙, 缪树寅 (2817)

土壤微生物群落对多环芳烃污染土壤生物修复过程的响应 张晶, 林先贵, 刘魏魏, 尹睿 (2825)

可可毛色二孢菌对焦化厂土壤多环芳烃污染修复 张志远, 王翠苹, 刘海滨, 孙红文 (2832)

广西茶山梯矿尾砂中微量元素的淋滤实验研究 蔡永兵, 李玲, 魏晓飞, 张国平, 李海霞, 付志平 (2840)

北京市近郊区土壤砷累积特征 戚浩, 王美娥, 汪自强, 欧阳志云 (2849)

抗氧化酶基因作为多环麝香污染分子标志物研究 陈春, 周启星, 刘潇威 (2855)

臭氧污染对不同品种小麦干物质与生物量碳积累与分配的影响 寇太记, 于伟伟, 朱建国, 朱新开 (2862)

尿素分解共沉淀法中反应时间对 ZnAl 类水滑石结构和磷吸附性能的影响 陆英, 程翔, 邢波, 孙中恩, 孙德智 (2868)

铅和铜离子在纳米羟基磷灰石上的竞争吸附动力学研究 胡田田, 仓龙, 王玉军, 司友斌, 周东美 (2875)

pH 和 Ni²⁺ 对人工纳米氧化硅吸附菲的影响 罗沛, 孙红文, 张鹏 (2882)

铀在凹凸棒石上的吸附特性与机制研究 刘娟, 陈迪云, 张静, 宋刚, 罗定贵 (2889)

环丙沙星在潮土中的吸附特性 崔皓, 王淑平 (2895)

中高温区水合肼 SNCR 脱硝反应机制和特性研究 洪塗, 陈德珍, 王渡, 黄慷 (2901)

H₂S 选择性催化氧化工艺及催化剂研究现状 郝郑平, 姜广玉, 张鑫, 曲思秋 (2909)

《环境科学》征稿简则 (2550) 《环境科学》征订启事 (2568) 信息 (2684, 2714, 2848, 2916)

实验室条件下蓝藻结皮对低温光照胁迫的响应与微结构变化

饶本强^{1,2}, 李华^{1,3}, 熊瑛⁴, 兰书斌¹, 李敦海¹, 刘永定^{1*}

(1. 中国科学院水生生物研究所淡水生态与生物技术国家重点实验室, 武汉 430072; 2. 信阳师范学院生命科学学院, 信阳 464000; 3. 中国科学院研究生院, 北京 100049; 4. AECOM 易道公司, 北京 100025)

摘要: 低温光照是荒漠化地区蓝藻结皮经常面临的环境条件之一。报道了实验室条件下低温光照处理对蓝藻结皮形态、生理特性和超微结构的影响。本研究中, 首先通过接种具鞘微鞘藻和爪哇伪枝藻形成人工蓝藻结皮, 接着以人工蓝藻结皮为材料进行低温光照处理: 28°C + 60 $\mu\text{E}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$ (对照)、10°C + 60 $\mu\text{E}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$ 、2°C + 60 $\mu\text{E}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$ 和 2°C + 黑暗。在不同低温光照处理的第 0、5 和 12 d 分别测定蓝藻结皮光合活性 (F_v/F_m)、叶绿素 a、胞外多糖、伪枝藻素、类胡萝卜素和藻蓝蛋白的含量及藻蓝蛋白/叶绿素比值, 同时采用扫描电镜观察低温光照处理下蓝藻结皮的微结构变化。此外, 对结皮的表观形态特征如结皮颜色、厚度和干重等进行了测定。与对照结皮相比, 低温光照下结皮的表观形态受到不利影响, 所测定的结皮各项生理指标均呈现显著下降 ($P < 0.05$)。在 2°C + 60 $\mu\text{E}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$ 处理 12 d 时, 结皮生物量、光合活性、胞外多糖含量、伪枝藻素含量、类胡萝卜素含量和藻蓝蛋白含量分别比同期对照结皮下降了 61.48%、94.89%、66.37%、31.01%、59.38% 和 65.91%。电镜观察表明, 低温光照导致蓝藻结皮的超微结构受到明显破坏, 表现为结皮层出现大量蜂窝状空隙, 藻丝体数量减少, 呈网格状分布, 对沙粒的束缚能力减弱等。研究表明低温光照对蓝藻结皮的形态和生理活性具有明显的抑制效应, 而低温黑暗能较好地促进蓝藻结皮生理活性和结皮表观形态的恢复。本研究初步探索了蓝藻结皮对低温光照胁迫的耐受性, 同时对于了解蓝藻结皮在野外极端环境条件下的生存状况具有一定的理论意义。

关键词: 荒漠化; 人工蓝藻结皮; 低温-光照; 生理特性; 超微结构

中图分类号: X171 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2012)08-2793-11

Response of the Artificial Cyanobacterial Crusts to Low Temperature and Light Stress and the Micro-structure Changes Under Laboratory Conditions

RAO Ben-qiang^{1,2}, LI Hua^{1,3}, XIONG Ying⁴, LAN Shu-bin¹, LI Dun-hai¹, LIU Yong-ding¹

(1. State Key Laboratory of Freshwater Ecology and Biotechnology, Institute of Hydrobiology, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430072, China; 2. College of Life Sciences, Xinyang Normal University, Xinyang 464000, China; 3. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 4. AECOM EDAW Consultancy Co. Ltd., Beijing 100025, China)

Abstract: Low temperature and light are noticeable environmental conditions commonly experienced by cyanobacterial crusts growing in desert areas. Here we reported the effects of low temperature and light on the morphology, physiological characteristics and ultrastructural changes of artificial cyanobacterial crust. Firstly artificial cyanobacterial crusts were formed by inoculating *Microcoleus vaginatus* Gom. and *Scytonema javanicum* (Kütz.) Born et Flah onto shifting sand in Petri dishes. Then, the artificial cyanobacterial crusts were selected as the experimental materials and subjected to the following treatments: 28°C + 60 $\mu\text{E}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$ (control), 10°C + 60 $\mu\text{E}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$, 2°C + 60 $\mu\text{E}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$ and 2°C + dark. On the 0th, 5th and 12th days during the experimental period, biomass (expressed as Chl-a), photosynthetic activities (optimal quantum yield, F_v/F_m), exopolysaccharide (EPS), scytonemin, carotenoid and C-phycoyanin contents of the crusts in different treatments were determined. We also observed the ultrastructural changes of the cyanobacterial crusts in the control and 2°C treatments by means of scan electron microscope (SEM). Moreover, the morphological properties such as crust color, crust thickness and crust dry weight etc. were also examined. The results indicated that the morphology of the treated crusts suffered unfavorable effect under light and low temperature stress, and Chl-a, F_v/F_m , EPS, scytonemin and carotenoid contents as well as C-phycoyanin content of the treated crusts were all significantly lower than those of the crusts under control conditions ($P < 0.05$). When the cyanobacterial crusts were treated for 12 days under 2°C + 60 $\mu\text{E}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$, Chl-a, F_v/F_m , EPS, scytonemin and carotenoid contents as well as C-phycoyanin content within the crusts decreased by 61.48%, 94.89%, 66.37%, 31.01%, 59.38% and 65.91%, respectively. Obvious destruction in ultrastructure was observed in the

收稿日期: 2011-10-20; 修订日期: 2011-12-08

基金项目: 中国博士后科学基金项目(20100480920); 国家科技支撑计划项目(2009BAD2B04); 武汉市科技局与内蒙古自治区发改委重大科技产业化专项(200720112031); 河南省高等学校青年骨干教师资助计划项目(2010GGJS-106); 淡水生态与生物技术国家重点实验室项目(2008FBZ21)

作者简介: 饶本强(1974~), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为藻类环境生物学, E-mail: rbqx@163.com

* 通讯联系人, E-mail: liuyd@ihb.ac.cn

cyanobacterial crust under cold stress, such as the presence of numerous honeycombs within the crusts and the sparse and loose appearance of the algal filaments, etc. The research verified that the acquired treatments had negative effects on the morphology, growth and microstructures of the cyanobacterial crusts, and the cooperation of low temperature and dark could provide effective protection for the morphological, physiological and microstructural features of the crust subjected to cold and light stress. The aim of this study was to primarily discuss the responses of cyanobacterial crusts to low temperature and light stress, and to offer a basic understanding of cyanobacterial crusts against extreme environments in fields, which may have certain academic significance for researches interested in cyanobacterial crusts.

Key words: desertification; artificial cyanobacterial crusts; low temperature and light; physiological characteristics; ultrastructures

生物结皮遍布于荒漠和半荒漠地区,主要由荒漠藻类、细菌、放线菌、真菌、苔藓和地衣等组成的土壤生物聚合体。早期形成的生物结皮主要由荒漠蓝藻组成,称之为蓝藻结皮。蓝藻结皮是生物结皮形成的早期阶段,在生物结皮的发育演替中具有重要作用,已成为生物结皮研究的热点内容之一^[1]。荒漠化是当今国际社会普遍关注的生态环境问题,我国是受荒漠化危害最为严重的国家之一。伴随着荒漠化威胁的日益加重,生物结皮在防风固沙、防止土壤侵蚀、改善土壤养分和表层水分分布状况以及在荒漠化生态修复中的先锋拓殖作用引起了广泛重视,并成为荒漠地区生态研究的热点^[2]。当前国内外对生物结皮的研究主要集中在结皮的形成机制、发育演替机制^[3,4],结皮物质转化^[5]和结皮的干扰修复等方面^[6]。研究表明,蓝藻结皮的形成是由具外鞘的且分泌胞外多糖的丝状蓝藻所驱动,荒漠蓝藻能在荒漠地表形成固定流沙的蓝藻结皮^[7]。作为荒漠拓殖生物,荒漠蓝藻能够在条件恶劣的环境下(如干旱、强紫外辐射、高盐碱、营养贫瘠等)生长、繁殖,并通过自身的活动,影响并改变着环境。近年来本课题组开展了荒漠蓝藻及其结皮的基础与应用研究,并在内蒙古库布齐沙漠等地区采用人工藻结皮用于荒漠化治理,取得了一些研究成果^[8-10]。

在干旱、半干旱地区,较大的昼夜温差和温度波动是影响蓝藻结皮生存的重要环境因子。特别是蓝藻结皮经常承受长期的低温光照环境,甚至在冰冻的土壤中生存。在野外自然条件下,蓝藻结皮的形成和发育过程不可避免会遭遇不同程度的寒冷和光照胁迫,二者也是影响人工藻结皮生长发育的重要环境因子。目前,很多研究热点集中于低温对高等植物和水体藻类的影响^[11-14],但关于低温光照对蓝藻结皮的影响研究十分匮乏,国内外文献鲜见报道。在荒漠地区,低温光照条件将对蓝藻结皮造成怎样的危害?其对蓝藻结皮的生理特性和形态结构带来哪些影响?为此,本研究在实验室条件下以人工蓝藻结皮为材料,通过模拟低温光照条件对结皮进行处

理,探讨蓝藻结皮对低温光照胁迫的耐受性。这对于深入理解野外条件下蓝藻结皮对荒漠极端环境的适应性以及应用蓝藻结皮防治荒漠化,具有重要的理论意义和实际指导作用。

1 材料与方法

1.1 材料培养

1.1.1 藻种培养

试验中所采用的具鞘微鞘藻(*M. vaginatus*)和爪哇伪枝藻(*S. javanicum*)是生物结皮中2种广泛存在且重要的优势种(丝状蓝藻),也是形成蓝藻结皮的主要藻类,由本学科组科研人员从荒漠生物结皮中分离纯化所得。将*M. vaginatus*和*S. javanicum*分别采用BG-11培养基和BG-11₀培养基,于(25 ± 1)℃、白炽灯40 μE·(m²·s)⁻¹光照条件下通气培养15~18 d后收集藻培养物,备用。

1.1.2 人工蓝藻结皮形成

取直径12 cm的培养皿和流沙(来自库布齐沙漠的野外流沙)分别进行灭菌处理,将适量流沙装填入培养皿中作为培养基质。在无菌条件下将*M. vaginatus*和*S. javanicum*的藻培养物以体积比4:1充分混匀,起始接种量(以Chl-a计)为2.95 μg·cm⁻²,以无菌操作方式将混合藻培养物均匀地接种在培养皿中的流沙表面。接种藻体后的流沙培养皿置于28℃的光照培养箱(PGX智能型可编程光照培养箱,宁波市机电工业研究设计院),在30 μE·(m²·s)⁻¹光照条件下进行结皮培养。培养期间每天喷洒无菌蒸馏水以促进结皮形成(25 mL·培养皿⁻¹),至第8 d时人工蓝藻结皮已基本形成。

1.2 低温光照处理

试验处理时,分别将上述培养第8 d的初始人工蓝藻结皮停水2 d后,于第3 d(作为试验处理的起始0 d)分别转入28℃ + 60 μE·(m²·s)⁻¹(对照)、10℃ + 60 μE·(m²·s)⁻¹、2℃ + 60 μE·(m²·s)⁻¹和2℃ + 黑暗进行低温光照处理,于处理第0、5和12 d测定相关指标。每种处理设置3

~4 个平行, 所测数据均重复 3 次以上, 取平均值。

1.3 结皮采样

于低温处理的第 0、5 和 12 d 用圆形的小采样器(面积为 0.485 cm^2)采集结皮小块并小心去掉结皮底层过多的沙粒, 然后进行相关指标测定。

1.4 试验指标测定

1.4.1 蓝藻结皮生物量测定

蓝藻结皮的生物量用叶绿素 a 含量表示。用采样器定期采集单位面积的蓝藻结皮样品, 将结皮样品加入 5 mL 80% 丙酮充分研磨后, 然后在冰箱 4°C 下黑暗静置抽提 24 h, $8000 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 离心 15 min 后取上清, 于分光光度计 (Ultrospec 3000, Pharmacia Biotech, Britain.) 663 nm 和 646 nm 测定光密度值, 以公式 (1) $c_a = 12.21D_{663} - 2.81D_{646}$ [15] 计算每 cm^2 的结皮样品所含叶绿素 a 的含量, 表示为 $\mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$ 结皮。

1.4.2 蓝藻结皮最大光化学效率 F_v/F_m 测定

采集各种处理下的蓝藻结皮样品, 放入培养皿中。每皿放置 3~6 个结皮核, 于室温下采用 PAM-2100 型 (Walz, Effertlich, Germany) 脉冲调制式荧光仪测定结皮叶绿素 a 荧光参数: 最大荧光 (F_m) 和固定荧光 (F_o), 以公式 (2) $F_v/F_m = (F_m - F_o)/F_m$ [16] 计算藻体 PS II 最大光化学效率 F_v/F_m 。 F_v/F_m 为可变荧光与最大荧光之比, 可以反映结皮的光合活性。

1.4.3 蓝藻结皮胞外多糖测定

取不同处理下的蓝藻结皮样品, 胞外多糖含量测定采用蒽酮-硫酸比色法 [17] 并作适当修改。测定时, 结皮多糖用 H_2SO_4 ($6 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$) 和适量蒸馏水抽提 20 min, 将抽提液用 Whatman No. 5 滤纸过滤得到多糖粗提物, 然后比色测定并根据标准曲线计算多糖含量, 表示为 $\mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$ 结皮。

1.4.4 蓝藻结皮伪枝藻素和类胡萝卜素测定

取 $1 \text{ cm}\times 1 \text{ cm}$ 的风干后的结皮小块, 充分研磨后加入丙酮用研钵捣碎, 4°C 过夜后, 用 Whatman No. 5 滤纸过滤。用分光光度计测定 384、490 和 663 nm 处的光吸收值。按公式 (3): $A_{384}(\text{Scyt.}) = 1.04A_{384} - 0.79A_{663} - 0.27A_{490}$ 和公式 (4): $A_{490}(\text{Car}) = 1.02A_{490} - 0.08A_{384} - 0.026A_{663}$ 分别计算伪枝藻素含量和类胡萝卜素含量 [17], 表示为 $A\cdot\text{cm}^{-2}$ 结皮。

1.4.5 蓝藻结皮藻蓝蛋白测定

用小采样器定期采集单位面积的蓝藻结皮样品, 将结皮样品充分研磨后悬浮于 5 mL pH 7.8 的磷酸缓冲液, 冰水浴下超声波破碎, 离心 (8000

$\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$, 10 min), 用分光光度计测定上清液在波长 615 nm 和 652 nm 处的光密度值。按公式 (5): 藻蓝蛋白 (C-phycoerythrin, PC) = $(D_{615} - 0.474D_{652})/5.34$ [18] 计算结皮提取液的藻蓝蛋白含量, 单位为 $\text{mg}\cdot\text{mL}^{-1}$, 最后换算成单位结皮面积的含量 ($\mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$ 结皮)。

1.4.6 蓝藻结皮藻蓝蛋白/叶绿素比值测定

取不同低温处理第 0 和 12 d 的结皮样品适量, 用 80% 丙酮抽提叶绿素。上清液于 663 nm 和 646 nm 波长下比色, 所得光密度值 (D) 代入上述公式 (1) 以及公式 (6): $c_b = 20.13D_{646} - 5.03D_{663}$ 分别计算结皮叶绿素 a 和叶绿素 b 含量, 并按照公式 (7): $R = \text{PC}/(c_a + c_b)$ 计算藻蓝蛋白/叶绿素比值。

1.4.7 蓝藻结皮生长发育特性测定

目测法观察蓝藻结皮的表面形态和结皮颜色。游标卡尺测定结皮厚度。pH 值采用电极法测定 (水土比 = 5:1), 结皮干重采用烘干法 (105°C 、48 h) 测定 [19]。

1.5 蓝藻结皮超微结构观察

分别取 28°C (CK) 和 2°C 低温处理下的蓝藻结皮样品, 将结皮样品用毛刷小心地刷去结皮底部多余的沙粒, 并切成 $0.3 \text{ cm}\times 0.5 \text{ cm}$ 的小块, 黏贴于电子显微镜样品台上, 喷金镀膜后用 JSM-5610LV (JEOL, Japan) 型扫描电子显微镜进行超微结构观察, 照相。

1.6 数据统计分析

采用统计分析软件 SPSS 13.0 对试验数据进行单因素方差分析 (one-way ANOVA)。多重比较采用 Duncan 法进行, 采用小写字母表示不同处理之间的差异显著性水平 ($P < 0.05$)。文中所有数据均重复 3 次以上, 表示为平均值 \pm 标准差 (用误差线显示)。

2 结果与分析

2.1 实验室低温条件下人工蓝藻结皮早期发育特征

在表 1 中可以看出, 实验室条件下形成的人工蓝藻结皮经过 45 d 的生长发育, 已经具有非常好的结皮表观形态特征。同时可见, 低温光照抑制了蓝藻结皮的生长, 表现为结皮颜色呈灰绿色, 厚度变薄、干重降低, 其厚度和干重与对照结皮之间存在明显差异。低温黑暗处理时, 结皮形态则获得了一定程度的修复。

2.2 实验室条件下人工蓝藻结皮形成过程生长曲线

如图 1 所示, 在实验室条件下将蓝藻培养物接入沙物质表面后喷洒适量的水分, 藻类先经历前 4 d

表 1 实验室条件下蓝藻结皮发育特征(45 d 培养)

Table 1 Developmental characteristics of artificial cyanobacterial crusts under laboratory conditions (culture for 45 days)

处理	结皮颜色	结皮形状	pH	结皮厚度/mm	结皮干重/ $\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$
28°C + 光照(CK)	蓝绿色	光滑平坦型	7.76	0.79 ± 0.047	0.092 ± 0.005
10°C + 光照	黄绿色	光滑平坦型	7.84	0.64 ± 0.052	0.067 ± 0.008
2°C + 光照	灰绿色	光滑平坦型	7.93	0.45 ± 0.034	0.039 ± 0.007
2°C + Dark	浅绿色	光滑平坦型	7.89	0.53 ± 0.029	0.051 ± 0.004

的短期适应(缓慢生长),第 5 d 后即在沙面迅速生长,藻类生物量开始出现大幅度增加,至第 8 d 时沙表面的生物量达到 $11.28 \mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$,为起始接种量的 3.82 倍.此时还可肉眼观察到蓝藻的藻丝体与沙粒之间相互缠绕、胶结,呈现藻类-沙粒结构形态,表明人工蓝藻结皮已经形成.

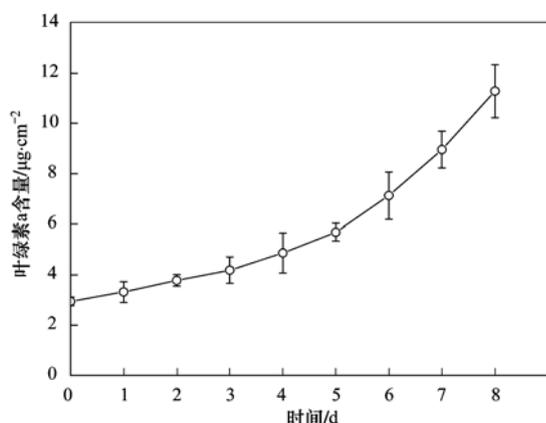


图 1 人工蓝藻结皮形成过程生长曲线

Fig. 1 Growth curve of artificial cyanobacterial crust during the initial formation process

2.3 低温光照对人工蓝藻结皮生物量的影响

由图 2 可知,低温光照处理下蓝藻结皮的生物量与对照结皮生物量相比显著降低 ($P < 0.05$).对照条件下蓝藻结皮生物量在第 5 d 和第 12 d 一直处于上升阶段,而低温光照处理下蓝藻结皮第 5 d 和第 12 d 生物量逐渐降低.在 $2^\circ\text{C} + 60 \mu\text{E}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$ 处理第 12 d 时,结皮生物量比同期对照结皮生物量下降 61.48%,比起始结皮(第 0 d 结皮,下同)生物量降低了 34.12%.2 种低温光照处理下的结皮生物量也存在显著差异 ($P < 0.05$).在 2°C 低温黑暗处理下,蓝藻结皮生物量与起始结皮生物量相比显著升高,也显著高于 10°C 和 2°C 下的结皮生物量 ($P < 0.05$).以上结果表明低温光照胁迫对蓝藻结皮生物量具有明显的抑制作用,而低温黑暗则在一定程度上有利于结皮生物量的恢复.

2.4 低温光照对人工蓝藻结皮光合活性的影响

图 3 表明,与对照相比,低温光照处理下蓝藻结

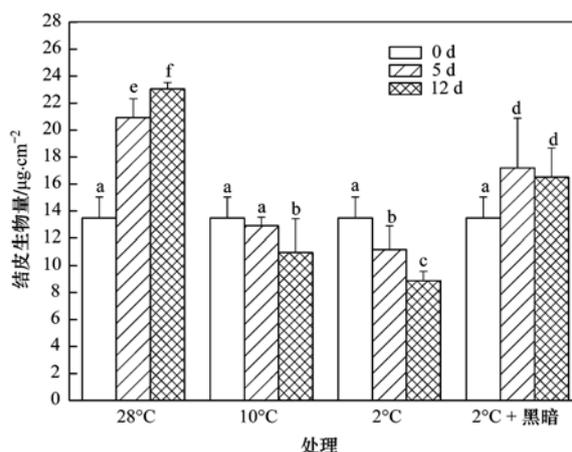


图 2 不同处理人工蓝藻结皮生物量变化

Fig. 2 Biomass changes of artificial cyanobacterial crust in different treatments

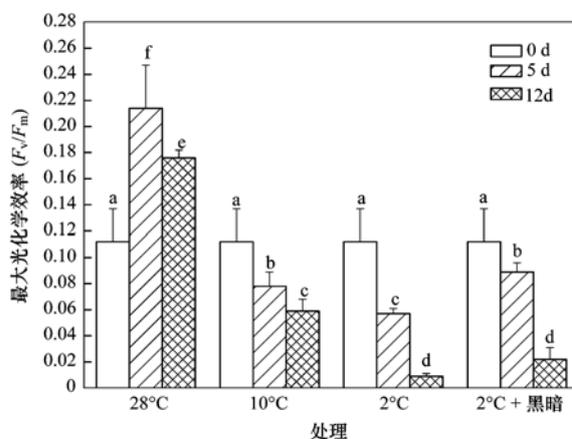


图 3 不同处理人工蓝藻结皮光合活性变化

Fig. 3 Variations in photosynthetic activities of artificial cyanobacterial crust in different treatments

皮光合活性 F_v/F_m 均出现显著性下降 ($P < 0.05$).在 $2^\circ\text{C} + 60 \mu\text{E}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$ 处理第 12 d 时,结皮 F_v/F_m 比同期对照结皮 F_v/F_m 下降了 94.89%,比起始结皮 F_v/F_m 降低了 91.96%. 10°C 和 2°C 在第 5 d 和第 12 d 时 F_v/F_m 之间存在显著性差异 ($P < 0.05$).在 2°C 低温黑暗第 5 d 时,结皮光合活性出现很大程度的升高;处理第 12 d 时,结皮光合活性比起始结皮光合活性下降了 80.36%.由此可见,低温光照胁迫对蓝藻结皮的光合活性具有显著的抑制作

用,低温对结皮的光合系统可能造成了严重的损害,而低温黑暗对结皮光合系统具有较好的保护作用.

2.5 低温光照对人工蓝藻结皮胞外多糖含量的影响

从图 4 中可以看出,低温光照处理第 5 d 时蓝藻结皮 EPS 均出现显著下降,随后在第 12 d 又都呈现显著性增加 ($P < 0.05$). 在第 12 d 时, $2^{\circ}\text{C} + 60 \mu\text{E} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$ 处理下蓝藻结皮 EPS 比同期对照结皮 EPS 降低了 66.37%, 比起始结皮 EPS 下降了 46.57%. 第 5 d 时 $2^{\circ}\text{C} +$ 黑暗处理下结皮多糖含量与同期 2°C 光照条件下无显著性差异 ($P > 0.05$), 第 12 d 时 $2^{\circ}\text{C} +$ 黑暗下多糖含量出现明显增加, 且与同期 2°C 光照下结皮多糖含量存在显著性差异 ($P < 0.05$). 此结果说明低温光照胁迫对蓝藻结皮 EPS 的合成造成了明显抑制, 而低温黑暗则促进了结皮 EPS 的分泌.

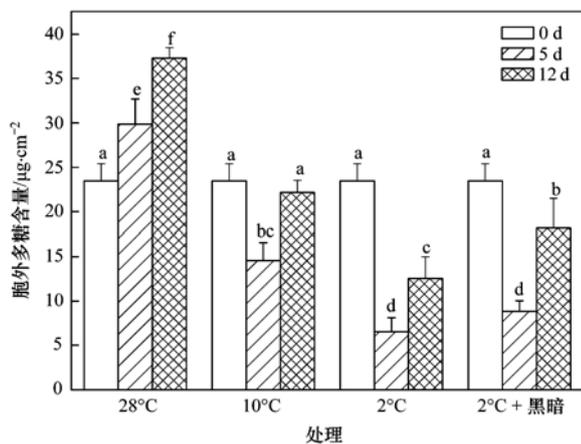


图 4 不同处理人工蓝藻结皮胞外多糖含量的变化

Fig. 4 Variations in exopolysaccharide content of artificial cyanobacterial crust in different treatments

2.6 低温光照处理下人工蓝藻结皮伪枝藻素和类胡萝卜素含量的变化

图 5(a) 显示,与对照比,第 12 d 时低温光照胁迫导致蓝藻结皮伪枝藻素含量的显著下降 ($P < 0.05$), 2°C 低温光照处理使蓝藻结皮伪枝藻素含量比同期对照结皮伪枝藻素含量降低了 31.01%. 10°C 和 2°C 低温处理时蓝藻结皮的伪枝藻素含量与起始含量相比均变化不大. 在 2°C 黑暗条件下伪枝藻素含量显著低于 10°C 和 2°C 处理 ($P < 0.05$), 也显著低于起始的伪枝藻素含量 ($P < 0.05$). 在图 5(b) 中,在第 12 d 时,2 种低温光照处理下类胡萝卜素含量均显著低于对照值 ($P < 0.05$), 比同期对照结皮类胡萝卜素含量降低了 59.38%, 且 10°C 和 2°C 处理之间也存在显著性差异 ($P < 0.05$). 第 12 d

时,与起始类胡萝卜素含量比, 10°C 处理无显著性变化 ($P > 0.05$), 2°C 则出现显著性下降 ($P < 0.05$). 第 12 d 时, 2°C 黑暗下类胡萝卜素含量与 2°C 下无显著差异,与起始类胡萝卜素含量也不存在显著差异 ($P > 0.05$). 从以上结果可以看出,低温光照对结皮伪枝藻素的合成抑制程度并不大,但低温黑暗明显抑制了结皮伪枝藻素的合成. 低温光照对结皮类胡萝卜素的合成抑制程度较大,而低温黑暗对结皮类胡萝卜素的含量影响不大.

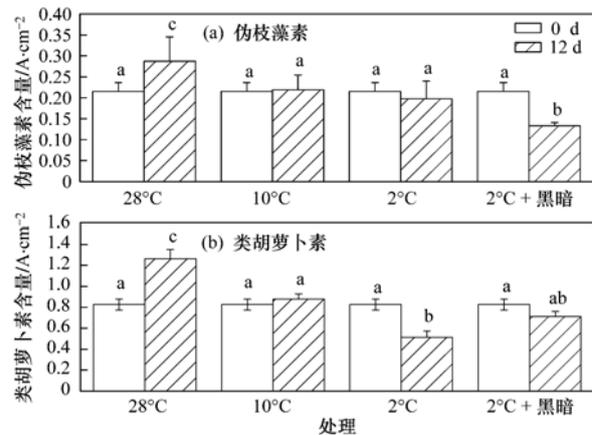


图 5 不同处理人工蓝藻结皮伪枝藻素和类胡萝卜素含量的变化

Fig. 5 Variations in scytonemin and carotenoid contents of artificial cyanobacterial crust in different treatments

2.7 低温光照处理下人工蓝藻结皮藻蓝蛋白含量及藻蓝蛋白/叶绿素比值变化

由图 6 可见,12 d 时低温光照处理导致蓝藻结皮藻蓝蛋白含量显著低于对照处理 ($P < 0.05$, ANOVA), $2^{\circ}\text{C} + 60 \mu\text{E} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$ 处理时结皮藻蓝蛋白含量比同期对照结皮藻蓝蛋白含量降低了 65.91%, 且 10°C 和 2°C 处理之间藻蓝蛋白含量存在

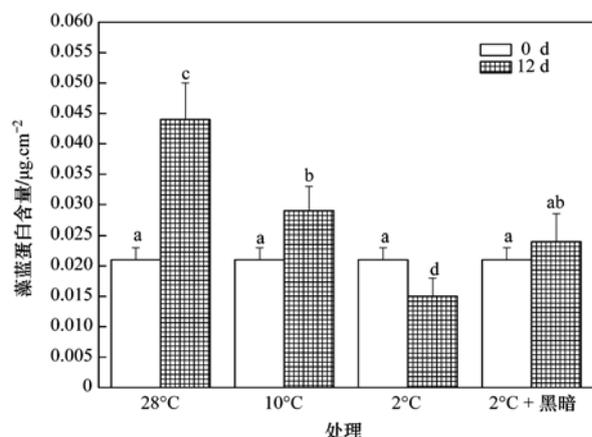


图 6 不同处理人工蓝藻结皮藻蓝蛋白含量的变化

Fig. 6 C-phycoerythrin contents of artificial cyanobacterial crust in different treatments

显著差异($P < 0.05$). 12 d 时 10℃ 下蓝藻结皮藻蓝蛋白含量显著高于起始含量($P < 0.05$), 而 2℃ 下显著低于起始含量($P < 0.05$). 2℃、黑暗下结皮藻蓝蛋白含量与起始含量无明显变化($P > 0.05$), 但显著高于 2℃ 处理($P < 0.05$). 图 7 表明, 对照处理下第 12 d 时单位面积结皮藻蓝蛋白/叶绿素比值显著高于起始值($P < 0.05$), 10℃ 处理下单位面积结皮藻蓝蛋白/叶绿素的比值显著高于起始值、对照值和其它处理值($P < 0.05$). 2℃、黑暗时藻蓝蛋白含量与 2℃ 处理和起始值均无显著差异($P > 0.05$). 结果说明 10℃ 低温光照条件并未降低蓝藻结皮的藻蓝蛋白含量, 而 2℃ 低温光照对结皮藻蓝蛋白含量有明显抑制作用, 2℃ 低温黑暗则对结皮藻蓝蛋白合成有轻微促进作用.

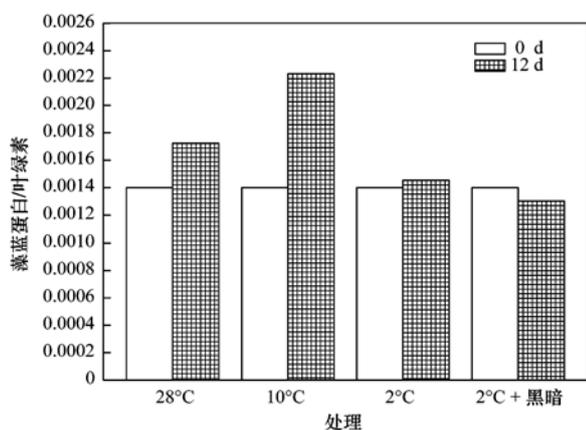


图 7 不同处理人工蓝藻结皮藻蓝蛋白/叶绿素比值变化

Fig. 7 C-phycoerythrin/chlorophyll ratios of artificial cyanobacterial crust in different treatments

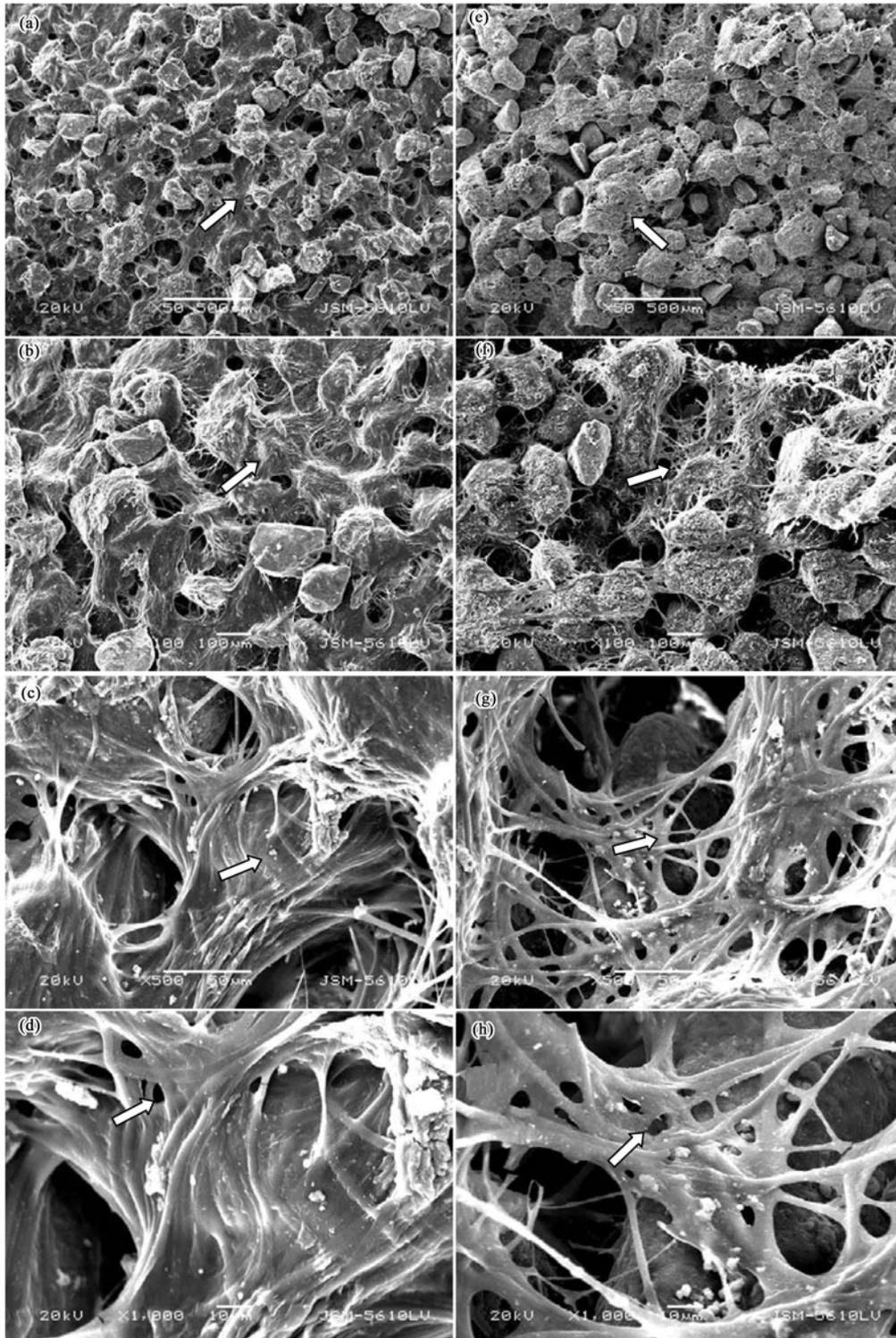
2.8 低温光照对人工蓝藻结皮超微结构的影响

从 TEM 试验中可以看出(图 8~10), 实验室条件下将荒漠蓝藻接入流沙, 形成的人工蓝藻结皮能够在较短的时间内形成, 可以观察到结皮的表层和底层长满丰富的藻丝体, 并且藻丝体分泌的丰富的黏性胞外多糖将沙粒紧紧缠绕在一起, 形成一种胶结现象. 对照处理时(28℃), 发现大量的藻丝体密集成束分布结皮的表层, 且藻丝体排列有序, 密集的藻丝体交错分布形成致密的孔隙; 在蓝藻结皮的底层, 丰富的藻丝体对沙粒进行“捆绑”和包裹. 在低温胁迫处理下, 结皮表层稀薄的藻丝体敷在沙粒表面并形成蜂窝孔状, 藻丝体数量减少且松散分布, 藻丝体杂乱分布形成宽大的空隙, 结皮底层则出现大量的未被藻丝缠绕的裸露沙粒, 仅有稀疏的藻丝体对沙粒进行缠绕.

3 讨论

荒漠生物结皮在野外条件下不可避免遭受受低温光照环境的胁迫. 笔者在内蒙古库布齐沙漠地区测得 28 a 的月平均气温和月最低气温发现, 该区 7 月最高平均气温仅为 23℃, 最低气温在 11.9℃ 以下(图 11), 表明生长在此地的自然结皮和人工结皮经常遭受低温胁迫. 温度和光照是决定生物分布与生物量的重要环境因子之一. 低温胁迫包括冷胁迫(0℃ 以上)和冻胁迫(0℃ 以下). 低温对植物细胞造成伤害的主要部位是膜系统, 生物膜的变化对植物耐受低温起重要作用, 此外低温对植物的光合作用也产生抑制作用, 是植物遭受冷害(0℃ 以上低温)的一个重要表现. 本研究中, 低温光照处理导致蓝藻结皮生物量(叶绿素 a)显著降低, 生长活性和发育特性受到抑制. 原因可能是低温破坏叶绿素结构, 导致叶绿素分解的结果. 研究表明, 低温光照培养条件下, 蓝藻结皮光合活性 F_v/F_m 显著受到抑制, 出现低温光抑制现象, 这意味着低温光照胁迫对结皮的光系统带来了直接的损害. 研究表明, 植物在低温黑暗条件下几乎看不到光抑制损伤, 但在低温光照条件下, 光合系统 II (PS II) 则受到抑制, 低温光照对光合系统损伤比低温黑暗更严重^[20]. Zak 等^[21] 在集胞藻 PCC6803 中发现在低温和弱光条件下 PS I 可能是光抑制损伤的主要部位, PS I 反应中心蛋白 PsaA 和 PsaB 降解, 而 PS II 的活性及完整性并不受影响. 低温光照引起细胞伤害的一个重要原因是降低清除活性氧(ROS)的抗氧化酶活性, 阻碍抗氧化剂及其它保护物质生成, 导致 ROS 在体内积累^[22]. 冷胁迫诱导了叶绿素和类胡萝卜素的非酶化加氧作用, 使细胞内产生了氧自由基, 发生了脂质过氧化以及 DNA 损伤, 这也造成藻类光合活性的下降^[23].

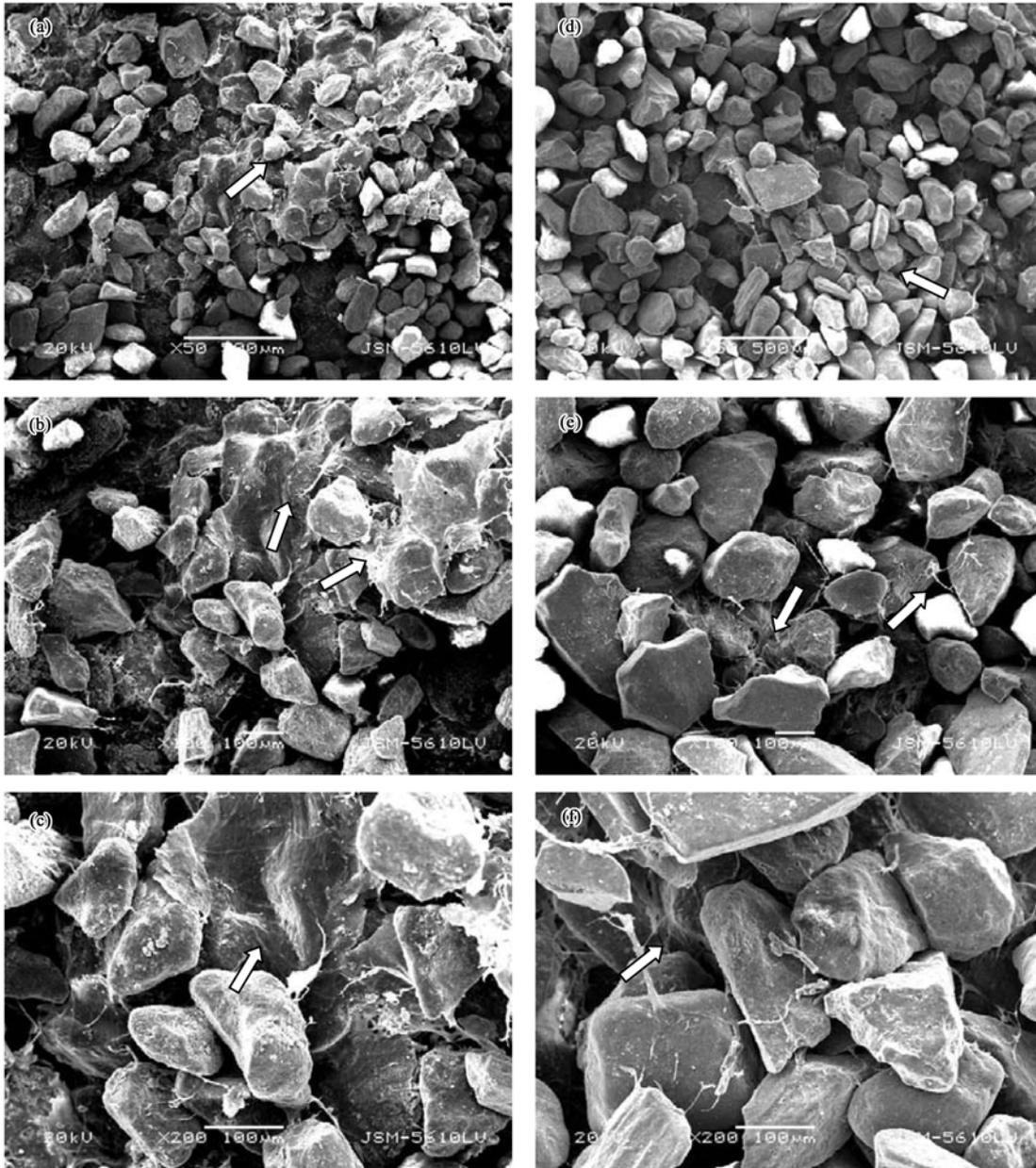
很多丝状蓝藻能够分泌大量的胞外多糖(EPS)进入周围的环境. 蓝藻 EPS 通过增加土壤稳定性, 土壤肥力和提高干旱耐受性而在结皮的生存和发育中扮演重要角色^[24]. 研究还表明, EPS 是蓝藻对抗各种环境胁迫的一种有效的保护剂^[25]. 本研究发现, 冷胁迫导致结皮 EPS 含量的显著下降, 这可能代表了结皮对冷胁迫的一种极为不利的响应, 因为结皮分泌的 EPS 可能对其提高低温或冷胁迫的耐受性起作用. 本研究还表明, 低温对蓝藻结皮伪枝藻素的合成影响不大, 但低温黑暗时伪枝藻素含量降低, 且低温对类胡萝卜素的合成造成了不利影响. 生存在荒漠地区的蓝藻必须耐受荒漠生境中强烈的紫



(a) 28℃ (对照)处理时结皮的上表层 (比例尺为 500 μm), 箭头示结皮呈深色, 浓密的藻丝体紧密地与沙粒缠绕并形成很多致密的孔隙; (b) 28℃ (对照)处理时结皮的上表层 (比例尺为 100 μm), 箭头示致密的藻丝体成束分布; (c) 28℃ (对照)处理时结皮的上表层 (比例尺为 50 μm), 箭头示丰富的藻丝体成片有序排列; (d) 28℃ (对照)处理时结皮的上表层 (比例尺为 10 μm), 箭头示大量的藻丝体胶结在一起; (e) 2℃处理时结皮的上表层 (比例尺为 500 μm), 箭头示结皮呈灰白色, 稀薄的藻丝体敷在沙粒表面并形成蜂窝孔状; (f) 2℃处理时结皮的上表层 (比例尺为 100 μm), 箭头示杂乱的藻丝体松散分布; (g) 2℃处理时结皮的上表层 (比例尺为 50 μm), 箭头示稀疏的藻丝体呈网状无序排列; (h) 2℃处理时结皮的上表层 (比例尺为 10 μm), 箭头表示少量的藻丝体交错形成大的空隙

图 8 低温光照处理下蓝藻结皮上表层微结构特征

Fig. 8 Ultrastructural characteristics of the upper surface of cyanobacterial crusts in treatments with low temperature and light



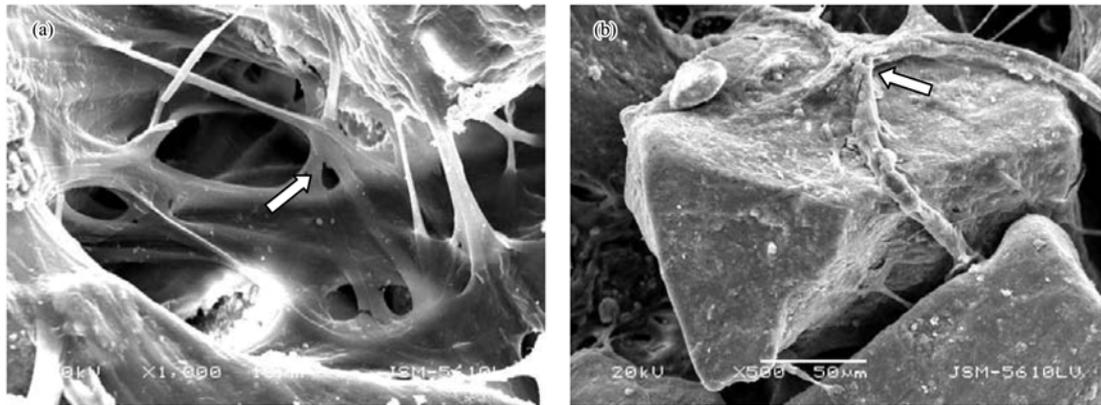
(a) 28℃ (对照)处理时结皮的下表层 (比例尺为 500 μm), 箭头示沙粒被密集的藻丝体缠绕; (b) 28℃ (对照)处理时结皮的下表层 (比例尺为 100 μm), 箭头示丰富的藻丝体成簇分布; (c) 28℃ (对照)处理时结皮的下表层 (比例尺为 100 μm), 箭头示成片的藻丝体包裹沙粒; (d) 2℃处理时结皮的下表层 (比例尺为 500 μm), 箭头示大量未被藻丝体缠绕的裸露沙粒; (e) 2℃处理时结皮的下表层 (比例尺为 100 μm), 箭头表示少量的藻丝体零散分布; (g) 2℃处理时蓝藻结皮的下表层 (比例尺为 100 μm), 箭头表示稀疏的藻丝体对沙粒的附着

图 9 低温光照处理下蓝藻结皮下表层微结构特征

Fig. 9 Ultrastructural characteristics of the undersurface of cyanobacterial crusts in treatments with low temperature and light

外辐射. 蓝藻在长期的进化过程中, 对紫外辐射形成了一定的保护性适应机制, 这些机制主要包括: 趋避迁移、产生保护色素、DNA 修复系统和抗氧化系统的高效诱导反应等^[26]. 例如, 蓝藻外鞘中含有紫外保护色素, 如伪枝藻素、MAAs 和类胡萝卜素等^[27]. 其中, 伪枝藻素是一种由蓝藻产生的用于保护其对抗紫外辐射胁迫的重要紫外吸收物质, 蓝藻结皮中丰富的伪枝藻素含量有利于结皮在辐射胁迫

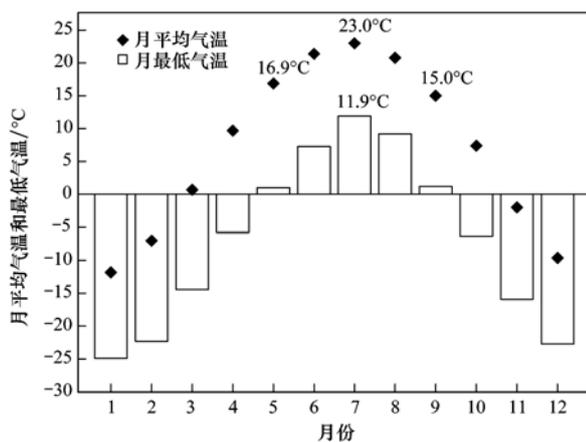
下的正常生长发育^[28]. 研究表明, 大量的伪枝藻素合成和积累通常发生在蓝藻藻丝体暴露于光辐射下, 并且其合成量随辐射强度的增强而增加^[17]. Sakamoto 等^[29]研究发现, 在液体培养条件下低温会导致藻类藻蓝蛋白/叶绿素比值降低, 积累糖原, 生长减慢. 在本研究中, 发现低温对单位面积结皮的藻蓝蛋白/叶绿素比值影响不大, 甚至在 10℃ 时出现升高的现象, 这可能是低温下蓝藻结皮不同于低温



(a) 蓝藻结皮中藻丝体的形态, 箭头示分泌大量黏性多糖的藻丝体如麦芽糖状 (比例尺为 100 μm);
(b) 蓝藻结皮中藻丝体与沙粒之间的束缚作用, 箭头示藻丝体对大沙粒的“捆绑” (比例尺为 50 μm)

图 10 蓝藻结皮的藻丝体形态及其对沙粒的束缚作用

Fig. 10 Morphology of algal filaments in cyanobacterial crusts and the cementation between filaments and sand particles



气温数据由内蒙古自治区气象局提供

图 11 库布齐沙漠地区 28 a (1978 ~ 2005 年) 月平均气温和月最低气温

Fig. 11 Monthly average temperatures and monthly minimum in Hopq Desert based on the records of 28 years (1978-2005)

液体培养的蓝藻的一种生理反应。

本研究表明, 低温黑暗能够明显改善冷胁迫对蓝藻结皮带来的不利影响, 对结皮的光合活性、叶绿素 a 含量、胞外多糖和藻蓝蛋白合成等都具有一定的恢复或促进功能。蓝藻结皮经过低温黑暗后, 其对冷胁迫的耐受性有所提高, 无论在结皮生长、生理活性等方面都起到积极的作用。Allakhverdiev 等^[30]也认为, 低温黑暗对藻类而言可能具有重要的修复功能以使其更好地适应低温环境或者促进其抗寒性的初步发育。笔者推测, 冷胁迫对蓝藻结皮造成的损害可能通过黑暗进行短期修复。这预示着在荒漠地区, 自然条件下的黑暗调节可能对于生物结皮具有重要的生态学意义。无论对于白天的高温、强

光损伤或是低温光抑制, 夜间的黑暗将起到很好的损伤修复作用, 并增强了蓝藻结皮对低温光照的耐受性。此外, 研究表明低温预处理 (或称低温驯化、低温锻炼) 对于提高荒漠蓝藻的冷胁迫耐受性具有重要调节作用^[31]。在自然条件下, 荒漠区的蓝藻可能通过秋末冬初低温条件的诱导, 形成对冬季寒冷光照胁迫的耐受性。有研究指出, 不经过低温预处理, 寒冷 (5°C) 和光照的双重胁迫可导致蓝藻死亡; 而在 15°C 处理 2 d 以上时, 蓝藻则较好地获得了耐寒光照的耐受性, 并可在适宜条件下复苏生长^[32]。低温预处理可能在分子水平和生化水平上引起变化而提高蓝藻对寒冷光照胁迫的耐受性。最新研究揭示, 在蓝藻细胞中存在着不同的 RNA 结合蛋白, 其中一种 RNA 结合蛋白 (Rbp1) 在低温预处理过程中的积累可导致蓝藻形成寒冷光照耐受性^[33]。研究还发现, 蓝藻对于细胞壁中降解的肽聚糖层进行再利用有利于低温弱光下的复苏生长^[34]。

本研究还发现, 冷胁迫对蓝藻结皮的表观形态和微结构均造成了一定程度的破坏 (表 1、图 8、图 9)。特别是结皮的微结构方面出现明显的改变, 如结皮呈蜂窝孔隙状, 藻丝体数量减少, 结皮层中藻丝体松散分布, 对沙粒的胶结能力减弱等。低温对蓝藻结皮形态和微结构的破坏原因可能是藻丝体生长受到抑制, 藻丝体运动性减弱和藻丝体分布特征的改变以及藻丝体胞外多糖分泌的减少。本研究也同时表明了室内培养人工蓝藻结皮, 能够在短期内发育很好, 主要在于人工接种的大量丝状蓝藻能够进行快速地生长和分泌大量的胞外多糖, 并在较短的时间内完成对沙粒的机械束缚和胶结过程, 从而形

成藻类-沙粒结皮(图 10).然而,野外条件下自然蓝藻结皮的形成则需要更适宜的条件和更长的时间^[35].

总之,荒漠蓝藻及其结皮如何越冬是它们在荒漠极端环境条件下所面临的一个重要生态环境问题,其越冬的分子机制则是今后进行蓝藻结皮生物学研究的关键和难点之一.

4 结论

(1)通过在实验室条件下接种丝状蓝藻能够快速形成人工蓝藻结皮,室内人工蓝藻结皮经过短期的生长发育,能够形成一定的结皮表观形态特征和微结构特征.

(2)实验室条件下模拟低温光照胁迫处理蓝藻结皮,表明低温光照条件对蓝藻结皮的生长、光合活性、叶绿素 a 含量、胞外多糖含量和藻蓝蛋白含量等都造成了明显不利的影响.同时对蓝藻结皮的表观形态特征和微结构均造成显著性破坏.

(3)低温黑暗能够有效恢复或促进低温光照胁迫下蓝藻结皮的生长和生理活性,有利于结皮表观形态的恢复.蓝藻结皮通过黑暗修复,可能对于其提高对低温光照的耐受性具有重要的生态学意义.

参考文献:

- [1] Garcia-Pichel F, Belnap J. Microenvironments and microscale productivity of cyanobacterial desert crusts [J]. *Journal of Phycology*, 1996, **32**(5): 774-782.
- [2] 杨晓辉, 张克斌, 赵云杰. 生物土壤结皮——荒漠化地区研究的热点问题[J]. *生态学报*, 2001, **21**(3): 474-480.
- [3] Zhang Y M. The microstructure and formation of biological soil crusts in their early developmental stage [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2005, **50**(2): 117-121.
- [4] Rao B Q, Liu Y D, Wang W B, *et al.* Influence of dew on biomass and photosystem II activity of cyanobacterial crusts in the Hopq Desert, northwest China [J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2009, **41**(12): 2387-2393.
- [5] Housman D C, Powers H H, Collins A D, *et al.* Carbon and nitrogen fixation differ between successional stages of biological soil crusts in the Colorado Plateau and Chihuahuan Desert [J]. *Journal of Arid Environments*, 2006, **66**(4): 620-634.
- [6] Bowker M A, Belnap J, Rosentreter R, *et al.* Wildfire-resistant biological soil crusts and fire-induced loss of soil stability in Palouse prairies, USA [J]. *Applied Soil Ecology*, 2004, **26**(1): 41-52.
- [7] Mazor G, Kidron G J, Vonshak A, *et al.* The role of cyanobacterial exopolysaccharides in structuring desert microbial crusts [J]. *FEMS Microbiology Ecology*, 1996, **21**(2): 121-130.
- [8] Hu C X, Liu Y D, Zhang D L, *et al.* Cementing mechanism of algal crusts from desert area [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2002, **47**(16): 1361-1368.
- [9] Chen L Z, Xie Z M, Hu C X, *et al.* Man-made desert algal crusts as affected by environmental factors in Inner Mongolia, China [J]. *Journal of Arid Environments*, 2006, **67**(3): 521-527.
- [10] Wang W B, Liu Y D, Li D H, *et al.* Feasibility of cyanobacterial inoculation for biological soil crusts formation in desert area [J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2009, **41**(5): 926-929.
- [11] Ma Y Y, Zhang Y L, Lu J, *et al.* Roles of plant soluble sugars and their responses to plant cold stress [J]. *African Journal of Biotechnology*, 2009, **8**(10): 2004-2010.
- [12] Sederias J, Colman B. The interaction of light and low temperature on breaking the dormancy of *Chara vulgaris* oospores [J]. *Aquatic Botany*, 2007, **87**(3): 229-234.
- [13] Wu Z X, Song L R, Li R H. Different tolerances and responses to low temperature and darkness between waterbloom forming cyanobacterium *Microcystis* and a green alga *Scenedesmus* [J]. *Hydrobiologia*, 2008, **596**(1): 47-55.
- [14] 汤俊, 宋立荣, 孙松松, 等. 低光低温联合作用对铜绿微囊藻复苏能力的影响 [J]. *环境科学*, 2010, **31**(12): 2932-2937.
- [15] 李合生, 孙群, 赵世杰, 等. 植物生理生化实验原理和技术 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2000.
- [16] 张守仁. 叶绿素荧光动力学参数的意义及讨论 [J]. *植物学通报*, 1999, **16**(4): 444-448.
- [17] Garcia-Pichel F, Castenholz R W. Characterization and biological implications of scytonemin, a cyanobacterial sheath pigment [J]. *Journal of Phycology*, 1991, **27**(3): 395-409.
- [18] Siegelman H W, Kycia J H. Algal biliproteins [A]. In: Hellebust J A, Graigie J S (Eds.). *Handbook of phycological methods* [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1978. 71-79.
- [19] 中国土壤学会土壤化学分析专业委员会. 土壤常规分析方法 [M]. 北京: 科学出版社, 1965.
- [20] Flexas J, Badger M, Chow W S, *et al.* Analysis of the relative increase in photosynthetic O₂ uptake when photosynthesis in grapevine leaves is inhibited following low night temperatures and/or water stress [J]. *Plant Physiology*, 1999, **121**(2): 675-684.
- [21] Zak E, Pakrasi H B. The BtpA protein stabilizes the reaction center proteins of photosystem I in the cyanobacterium *Synechocystis* sp. PCC6803 at low temperature [J]. *Plant Physiology*, 2000, **123**(1): 215-222.
- [22] Lukatkin A S. Contribution of oxidative stress to the development of cold-induced damage to leaves of chilling-sensitive plants: 1. Reactive oxygen species formation during plant chilling [J]. *Russian Journal of Plant Physiology*, 2002, **49**(5): 622-627.
- [23] Lukatkin A S. Contribution of oxidative stress to the development of cold-induced damage to leaves of chilling-sensitive plants: 2.

- The activity of antioxidant enzymes during plant chilling [J]. Russian Journal of Plant Physiology, 2002, **49**(6): 782-788.
- [24] Hu C X, Liu Y D, Paulsen B S, *et al.* Extracellular carbohydrate polymers from five desert soil algae with different cohesion in the stabilization of fine sand grain[J]. Carbohydrate Polymers, 2003, **54**(1): 33-42.
- [25] Qi H M, Zhao T T, Zhang Q B, *et al.* Antioxidant activity of different molecular weight sulfated polysaccharides from *Ulva pertusa* Kjellm (Chlorophyta) [J]. Journal of Applied Phycology, 2005, **17**(6): 527-534.
- [26] Holzinger A, Lütz C. Algae and UV irradiation: effects on ultrastructure and related metabolic functions [J]. Micron, 2006, **37**(3): 190-207.
- [27] Dillon J G, Castenholz R W. The synthesis of the UV-screening pigment, scytonemin, and photosynthetic performance in isolates from closely related natural populations of cyanobacteria (*Calothrix* sp.) [J]. Environmental Microbiology, 2003, **5**(6): 484-491.
- [28] Squier A H, Hodgson D A, Keely B J. A critical assessment of the analysis and distributions of scytonemin and related UV screening pigments in sediments [J]. Organic Geochemistry, 2004, **35**(11-12): 1221-1228.
- [29] Sakamoto T, Bryant D A. Growth at low temperature causes nitrogen limitation in the cyanobacterium *Synechococcus* sp. PCC 7002 [J]. Archives of Microbiology, 1998, **169**(1): 10-19.
- [30] Allakhverdiev S I, Mohanty P, Murata N. Dissection of photodamage at low temperature and repair in darkness suggests the existence of an intermediate form of photodamaged photosystem II [J]. Biochemistry, 2003, **42**(48): 14277-14283.
- [31] 饶本强, 吴沛沛, 李敦海, 等. 低温驯化和外源糖对爪哇伪枝藻冷胁迫的影响 [J]. 生态科学, 2010, **29**(2): 128-134.
- [32] Yang Y, Yin C T, T, Li W Z, *et al.* α -Tocopherol is essential for acquired chill-light tolerance (ACLT) in the cyanobacterium *Synechocystis* sp. strain PCC 6803 [J]. Journal of Bacteriology, 2008, **190**(5): 1554-1560.
- [33] Tan X M, Zhu T, Shen S, *et al.* Role of Rbp1 in the acquired chill-light tolerance of cyanobacteria [J]. Journal of Bacteriology, 2011, **193**(11): 2675-2683.
- [34] Jiang H B, Kong R Q, Xu X D. The *N*-acetylmuramic acid 6-phosphate etherase gene promotes growth and cell differentiation of cyanobacteria under light-limiting conditions [J]. Journal of Bacteriology, 2010, **192**(8): 2239-2245.
- [35] 饶本强, 王伟波, 兰书斌, 等. 库布齐沙地三年生人工藻结皮发育特征及微生物分布 [J]. 水生生物学报, 2009, **33**(5): 937-944.

CONTENTS

Levels and Sources of Gaseous Polybrominated Diphenyl Ethers in Air over the Northern South China Sea	LI Qi-lu, LI Jun, LIU Xiang, <i>et al.</i> (2533)
Observation and Analysis of Air Pollution in Zhangjiakou, Hebei	SHAO Ping, WANG Li-li, AN Jun-lin, <i>et al.</i> (2538)
Smog Chamber Simulation of Ozone Formation from Atmospheric Photooxidation of Propane	HUANG Li-hua, MO Chuang-rong, XU Yong-fu, <i>et al.</i> (2551)
Mechanism and Performance of a Membrane Bioreactor for Treatment of Toluene Vapors	YE Qi-hong, WEI Zai-shan, XIAO Pan, <i>et al.</i> (2558)
Analysis of Odor Pollutants in Kitchen Waste Composting	ZHANG Hong-yu, ZOU Ke-hua, YANG Jin-bing, <i>et al.</i> (2563)
Spatial Changes and Sources of Nitrate in Beijing Urban Ecosystem Surface Water	XU Zhi-wei, ZHANG Xin-yu, REN Yu-fen, <i>et al.</i> (2569)
Distribution Characteristics and Potential Risk of PCBs in Surface Water from Three Tributaries of Yangtze River in Different Periods	LI Kun, ZHAO Gao-feng, ZHOU Huai-dong, <i>et al.</i> (2574)
Distribution Characteristics and Potential Risks of Phenols in the Rainy Season Surface Water from Three Gorges Reservoir	WU Zheng-yong, ZHAO Gao-feng, ZHOU Huai-dong, <i>et al.</i> (2580)
Spatial Distribution of Perfluorooctanoic Acids and Perfluorinate Sulphonates in Surface Water of East Lake	CHEN Jing, WANG Lin-ling, ZHU Hu-di, <i>et al.</i> (2586)
Characteristics of Heavy Metal Pollution in Daninghe River and Modaoxi River of Three Gorges Reservoir Areas	AN Li-hui, ZHANG Yan-qiang, ZHENG Bing-hui, <i>et al.</i> (2592)
Pollution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in the Surface Sediments of the Yangtze River	WANG Lan, WANG Ya-ping, XU Chun-xue, <i>et al.</i> (2599)
Analysis of the Source, Potential Biological Toxicity of Heavy Metals in the Surface Sediments from Shellfish Culture Mudflats of Rudong Country, Jiangsu Province	LI Lei, WANG Yun-long, JIANG Mei, <i>et al.</i> (2607)
Effect of Disturbance Intensity on Phosphorus Release and Its Transformation in the Sediment from Taihu Lake	LI Da-peng, HUANG Yong (2614)
Effects of Intrusions from Three Gorges Reservoir on Nutrient Supply to Xiangxi Bay	ZHANG Yu, LIU De-fu, JI Dao-bin, <i>et al.</i> (2621)
Influence of Perennial Flooding and Drought on Growth Restoration of <i>Acorus calamus</i> in Water-level-fluctuation Zone of the Three Gorges Reservoir	LI Qiang, GAO Xiang, DING Wu-quan, <i>et al.</i> (2628)
Pollution Load and the First Flush Effect of Phosphorus in Urban Runoff of Wenzhou City	ZHOU Dong, CHEN Zhen-lou, BI Chun-juan (2634)
Output Characteristics of Rainfall Runoff Phosphorus Pollution from a Typical Small Watershed in Yimeng Mountainous Area	YU Xing-xiu, LI Zhen-wei, LIU Qian-jin, <i>et al.</i> (2644)
Influence of Land Use Structure on Nitrogen Output in the Watershed of Suburban Agriculture Regions	YANG Feng, WANG Peng-ju, YANG Shan-shan, <i>et al.</i> (2652)
Simulation of Nitrogen and Phosphorus Loss in Siling Reservoir Watershed with AnnAGNPS	BIAN Jin-yun, WANG Fei-er, YANG Jia, <i>et al.</i> (2659)
GIS and L-THIA Based Analysis on Variations of Non-point Pollution in the Guanlan River Watershed, Shenzhen	BAI Feng-jiao, LI Tian-hong (2667)
Response of Sloping Water Erosion to Rainfall and Micro-earth Pattern in the Loess Hilly Area	WEI Wei, JIA Fu-yan, CHEN Li-ding, <i>et al.</i> (2674)
Comparison Study of Enhanced Coagulation on Humic Acid and Fulvic Acid Removal	ZHOU Ling-ling, ZHANG Yong-ji, YE He-xiu, <i>et al.</i> (2680)
Real-time PCR Detection and Quantification of Emerging Waterborne Pathogens (EWPs) and Antibiotic Resistance Genes (ARGs) in the Downstream Area of Jiulong River	WANG Qing, LIN Hui-rong, ZHANG Shu-ting, <i>et al.</i> (2685)
Quantitative and Qualitative Analysis of Total Bacteria and Ammonia-oxidizing Bacteria in Buji River in Wet Season	SUN Hai-mei, BAI Jiao-jiao, SUN Wei-ling, <i>et al.</i> (2691)
Study on the Nitrogen Removal Performance and the Characteristics of Denitrification Bacterial Community Structure of Biological Aerated Filter	PENG Xiao-lan, LIU Cong, CHEN Li-jun (2701)
Analysis of Microbial Community Structure at Full-scale Wastewater Treatment Plants by Oxidation Ditch	GUO Yun, YANG Dian-hai, LU Wen-jian (2709)
Performance and Microbial Community Dynamic Characteristics of an Internal Circulation Reactor Treating Brewery Wastewater	ZHU Wen-xiu, HUANG Zhen-xing, REN Hong-yan, <i>et al.</i> (2715)
Coupling AFM Fluid Imaging with Micro-Flocculation Filtration Process for the Technological Optimization	ZHENG Bei, GE Xiao-peng, YU Zhi-yong, <i>et al.</i> (2723)
Study on Removal Effect of Different Organic Fractions from Bio-treated Effluent of Dye Wastewater by UV/H ₂ O ₂ Process	LI Xin, LIU Yong-di, SUN Xian-bo, <i>et al.</i> (2728)
Optimization of <i>Chlorella pyrenoidosa</i> -15 Photoheterotrophic Culture and Its Use in Wastewater Treatment	WANG Xiu-jin, LI Zhao-sheng, XING Guan-lan, <i>et al.</i> (2735)
Characteristics and Mechanism of 2,4,6-TCP Degradation by the "Fe ⁰ /Enriched-Bacteria" System	DAI You-zhi, GUO Li-li, SHI Lei, <i>et al.</i> (2741)
Immobilization of Crude Laccase onto Anion Exchange Resin and Its Application in Decoloration of Malachite Green	QI Xu-liang, LIU Xiang, LIU Bo, <i>et al.</i> (2747)
Low-Temperature Preparation of TiO ₂ /PS/Fe ₃ O ₄ and Its Photocatalytic Activity and Magnetic Recovery	WANG Xue-jiao, REN Xue-chang, NIAN Juan-ni, <i>et al.</i> (2752)
Study on Catalytic Oxidation of Benzene by Microwave Heating	ZHANG Yu-cai, BO Long-li, WANG Xiao-hui, <i>et al.</i> (2759)
Synergistic Effects of Nano-sized Magnetic Particles and Uncoupler to the Characteristics of Activated Sludge	GAO Li-ying, TANG Bing, LIANG Ling-yan, <i>et al.</i> (2766)
Experimental and Modeling Research on the Settlement of Aerobic Granular Sludge	SU Kui-zu, DENG Xiu-kun, ZHENG Li, <i>et al.</i> (2773)
Analysis of Hydrolytic Enzyme Activities on Sludge Aerobic/Anoxic Digestion After Ultrasonic Pretreatment	YE Yun-di, SUN Shui-yu, ZHENG Li, <i>et al.</i> (2780)
Effect of Microbial Nutrient Concentration on Improvement of Municipal Sewage Sludge Dewaterability Through Bioleaching	SONG Yong-wei, LIU Fen-wu, ZHOU Li-xiang (2786)
Response of the Artificial Cyanobacterial Crusts to Low Temperature and Light Stress and the Micro-structure Changes Under Laboratory Conditions	RAO Ben-jiang, LI Hua, XIONG Ying, <i>et al.</i> (2793)
Seasonal Dynamics of Soil Active Carbon Pool in a Purple Paddy Soil in Southwest China	WU Yan, JIANG Chang-sheng, HAO Qing-ju (2804)
Pollution Characteristics and Accumulation of Antibiotics in Typical Protected Vegetable Soils	YIN Chun-yan, LUO Yong-ming, TENG Ying, <i>et al.</i> (2810)
Transformation and Influences of Copper and Selenium Fractions on Heavy Metals Bioavailability in Co-contaminated Soil	HU Bin, LIANG Dong-li, ZHAO Wen-long, <i>et al.</i> (2817)
Response of Soil Microbial Community to the Bioremediation of Soil Contaminated with PAHs	ZHANG, Jing, LIN Xian-gui, LIU Wei-wei, <i>et al.</i> (2825)
Bioremediation of PAHs Contaminated Soil from Beijing Coking Plant by <i>Lasiodiplodia theobromae</i>	ZHANG Zhi-yuan, WANG Cui-ping, LIU Hai-bin, <i>et al.</i> (2832)
Leaching Experiments on the Release of Trace Elements from Tailings of Chashan Antimony Mine, Guangxi, China	CAI Yong-bing, LI Ling, WEI Xiao-fei, <i>et al.</i> (2840)
Accumulation Characteristics of Arsenic in Suburban Soils of Beijing	QI Jie, WANG Mei-e, WANG Zi-qiang, <i>et al.</i> (2849)
Antioxidant Enzyme Gene Expression as Molecular Biomarkers of Exposure to Polycyclic Musks	CHEN Chun, ZHOU Qi-xing, LIU Xiao-wei (2855)
Effects of Ozone Pollution on the Accumulation and Distribution of Dry Matter and Biomass Carbon of Different Varieties of Wheat	KOU Tai-ji, YU Wei-wei, ZHU Jian-guo, <i>et al.</i> (2862)
Influence of Reaction Time of Urea Hydrolysis-Based Co-precipitation on the Structure of ZnAl Layered Double Hydroxides and the Phosphate Adsorption	LU Ying, CHENG Xiang, XING Bo, <i>et al.</i> (2868)
Competitive Adsorption Kinetics of Aqueous Pb ²⁺ and Cu ²⁺ on Nano-HAP Surfaces	HU Tian-tian, CANG Long, WANG Yu-jun, <i>et al.</i> (2875)
Effects of pH and Ni ²⁺ on Sorption Behavior of Phenanthrene on Engineered Nano-Silica	LUO Pei, SUN Hong-wen, ZHANG Peng (2882)
Adsorption Characteristics and Mechanism of Uranium on Attapulgite	LIU Juan, CHEN Di-yun, ZHANG Jing, <i>et al.</i> (2889)
Adsorption Characteristics of Ciprofloxacin in Ustic Cambosols	CUI Hao, WANG Shu-ping (2895)
Kinetic Mechanism and Characteristics Researches for Hydrazine-based NO _x Removal at Moderate to High Temperatures	HONG Liu, CHEN De-zhen, WANG Du, <i>et al.</i> (2901)
Current Research Situation of H ₂ S Selective Catalytic Oxidation Technologies and Catalysts	HAO Zheng-ping, DOU Guang-yu, ZHANG Xin, <i>et al.</i> (2909)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 汤鸿霄 陈吉宁 孟 伟 周宗灿 林金明
欧阳自远 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2012年8月15日 33卷 第8期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 33 No. 8 Aug. 15, 2012

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	欧阳自远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 70.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行