

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第4期

Vol.35 No.4

2014

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

2008 ~2012 年上海黑碳浓度变化特征分析	王洪强, 贺千山, 陈勇航, 亢燕铭 (1215)
乌鲁木齐市东南郊一次降雪过程的化学组成及其悬浮态颗粒形态特征	陆辉, 魏文寿, 崔彩霞, 何清, 王瑶 (1223)
典型地区大气中多溴联苯醚和新型溴代阻燃剂的水平及组成分布	吴辉, 金军, 王英, 李明圆, 何松洁, 徐萌, 孙一鸣 (1230)
某焦化厂周边大气 PM ₁₀ 重金属来源及健康风险评价	董婷, 李天昕, 赵秀阁, 曹素珍, 王贝贝, 马瑾, 段小丽 (1238)
基于车流和大气污染物浓度同步增量的机动车平均排放因子估算方法	李润奎, 赵彤, 李志鹏, 丁文军, 崔晓勇, 许群, 宋现锋 (1245)
珠江三角洲地区硫和氮沉降临界负荷研究	孙成玲, 谢绍东 (1250)
低温等离子体-生物法处理硫化氢气体研究	李华琴, 何觉聪, 陈洲洋, 黎宝仁, 黄倩茹, 张再利, 魏在山 (1256)
太子河流域莠去津的空间分布及风险评价	郑磊, 张依章, 张远, 朱鲁生, 王志强 (1263)
一种大批量测定沉积物微量间隙水样品中溶解态磷和铁含量的方法	王燕, 朱春刚, 许笛, 丁士明 (1271)
外源营养盐输入后水体中营养盐浓度的时空变化	傅玲, 赵凯, 王国祥, 欧媛, 范嫻, 毛丽娜, 张佳, 韩睿明 (1278)
基于物理过程的矿区地下水污染风险评价	孙法圣, 程品, 张博 (1285)
重庆典型岩溶地下水系统水文地球化学特征研究	杨平恒, 卢丙清, 贺秋芳, 陈雪彬 (1290)
重庆老龙洞地下河流域氮、磷及微生物污染调查研究	蓝家程, 杨平恒, 任坤, 陈雪彬, 徐昕, 胡宁 (1297)
苦草 (<i>Vallisneria spiralis</i>) 根系对沉积物中各形态磷的影响	李振国, 王国祥, 张佳, 马久远, 魏宏农, 俞振飞 (1304)
循环廊道湿地中氮归趋过程模拟研究	彭剑峰, 宋永会, 袁鹏, 张雪妍, 胡小明 (1311)
不同环境因素下太湖中四环素的自然消减	段伦超, 王凤贺, 纪莹雪, 张帆, 赵斌, 王国祥 (1318)
再生水中 5 种抗生素抗性菌的紫外线灭活及复活特性研究	黄晶晶, 汤芳, 席劲璇, 庞宇辰, 胡洪营 (1326)
二级处理出水的 UV-TiO ₂ 消毒及大肠杆菌和粪肠球菌光复活试验	王西峰, 龚昕, 胡晓莲, 任伯帆 (1332)
水中 C ₆₀ 纳米颗粒的稳定性研究	方华, 沈冰冰, 荆洁, 陆继来, 王媛 (1337)
XDLVO 理论解析不同离子条件下海藻酸钠微滤膜污染	赵应许, 纵瑞强, 高欣玉, 谢慧君, 殷永泉, 梁爽 (1343)
纳米零价铁催化过氧化氢强化修复 4-氯硝基苯污染地下水的研究	付融冰 (1351)
共存氯苯类同系物对六氯苯厌氧降解活性的影响	王琪, 刘辉, 姜林, 唐军 (1358)
硫酸盐还原生物滤池对含镉废水去除效果试验研究	吴宣, 谭科艳, 胡希佳, 顾远, 杨宏 (1366)
基于氮平衡原理对南方污水处理厂中试脱氮工艺调控策略研究	姜应和, 刘佩炬, 王磊, 田中凯, 刘小英 (1372)
模拟电镀污泥阴离子浸出液对氧化亚铁硫杆菌活性的影响	陈燕, 黄芳, 谢鑫源 (1377)
电活性生物膜介导 Cu ²⁺ 生物还原的试验研究	刘毅, 周顺桂, 袁勇, 刘志 (1384)
模拟废旧线路板生物浸出液中铜的回收	程丹, 朱能武, 吴平霄, 邹定辉, 邢翊佳 (1391)
填埋垃圾浸提液与地下水污染物组成差异及成因	何小松, 余红, 席北斗, 崔东宇, 潘红卫, 李丹 (1399)
化学合成施氏矿物与 H ₂ O ₂ 共存体系下光化学处理垃圾渗滤液的研究	王鹤茹, 宋永伟, 徐峙辉, 崔春红, 周立祥 (1407)
处理 BPA 模拟废水的 SBR 工况参数对污泥有机毒性的影响研究	杨娜, 陈秀荣, 林逢凯, 黄华, 章斐, 赵骏, 丁毅 (1414)
剩余污泥厌氧消化甲烷生成势与产甲烷菌多样性的比较研究	董慧岭, 季民 (1421)
锰氧化菌 <i>Aminobacter</i> sp. H1 的分离鉴定及其锰氧化机制研究	晏平, 姜理英, 陈建孟, 何智敏, 肖少丹, 蒋铁锋 (1428)
1 株铁基自养反硝化菌的脱氮特性	王弘宇, 杨开, 张倩, 季斌, 陈丹, 孙宇翀, 田俊 (1437)
碘普罗胺降解菌 <i>Pseudomonas</i> sp. I-24 共代谢降解性能研究	徐冰洁, 高品, 薛翌, 何梦琦, 吴凡 (1443)
利用流式细胞术研究鞘氨醇单胞菌 GY2B 降解非过程中细菌表面特性的变化	张梦露, 党志, 伍凤姬, 梁旭军, 郭楚玲, 卢桂宁, 杨琛 (1449)
毒性有机物 BPA 与普通小球藻的相互影响特性研究	陈善佳, 陈秀荣, 闫龙, 赵建国, 章斐, 江子建 (1457)
缺镁胁迫对普通小球藻光合生理及油脂积累的影响	王珊, 赵树欣, 魏长龙, 于水燕, 史吉平, 张保国 (1462)
微囊藻毒素对水稻根系生长和抗氧化系统的影响	王妮敏, 邓琦, 邹华, 梁婢娟 (1468)
东北春大豆品种东生 1 号对臭氧胁迫的响应	张巍巍, 王光华, 王美玉, 刘晓冰, 冯兆忠 (1473)
生物结皮的发育演替与微生物生物量变化	吴丽, 张高科, 陈晓国, 兰书斌, 张德禄, 胡春香 (1479)
老化土壤中铅对赤子爱胜蚓生长及繁殖的影响	陈丽红, 刘征涛, 方征, 王晓南, 王婉华 (1486)
土壤重金属镉标准值差异比较研究与建议	赵晓军, 陆泗进, 许人骥, 李伯苓, 吴国平, 魏复盛 (1491)
藏北可可西里地区土壤元素背景值研究	柏建坤, 王建力, 李潮流, 康世昌, 陈鹏飞 (1498)
三峡库区香溪河消落带及库岸土壤重金属迁移特征及来源分析	胥焘, 王飞, 郭强, 聂小倩, 黄应平, 陈俊 (1502)
浙江海宁电镀工业园区周边土壤重金属污染特征及生态风险分析	厉炯慧, 翁珊, 方婧, 黄佳蕾, 陆芳华, 卢宇浩, 张洪铭 (1509)
西湖景区土壤典型重金属污染物的来源及空间分布特征	张海珍, 唐宇力, 陆骏, 周虹, 徐芸茜, 陈川, 赵赞, 王美娥 (1516)
生活垃圾焚烧厂周边土壤汞污染特征及评价	解惠婷, 张承中, 徐峰, 李海凤, 田振宇, 唐琛, 刘文彬 (1523)
上海滴水湖周边土壤和沉积物对磷的吸附特征	诸葛祥真, 毕春娟, 陈振楼, 张焕焕, 倪玮怡 (1531)
SDBS/Na ⁺ 对红壤胶体悬液稳定性的影响	唐颖, 李航, 朱华玲, 田锐, 高晓丹 (1540)
稳定化处理对矿渣中重金属迁移转化的影响研究	赵述华, 陈志良, 张太平, 潘伟斌, 彭晓春, 车融, 欧英娟, 雷国建, 周鼎 (1548)
藻类水体 Cd ²⁺ 毒性快速监测新方法研究	段静波, 刘文清, 张玉钧, 赵南京, 殷高方, 肖雪, 余晓娅, 方丽 (1555)
用于 1,3-二硝基苯快速检测的免疫传感器研究	龙峰, 施汉昌, 王洪臣, 盛建武 (1561)
Mg/Al 水滑石微波共沉淀法合成及其对 BrO ₃ ⁻ 吸附性能的研究	钟琼, 李欢 (1566)
污染场地修复决策支持系统的几个关键问题探讨	廖晓勇, 陶欢, 阎秀兰, 赵丹, 林龙勇, 李尤 (1576)
城市区域土壤铅含量空间变异的多尺度研究进展	杨孟, 李凤英, 刁一伟, 吴丹 (1586)
水中细菌内毒素污染特性及检测方法研究进展	张灿, 刘文君, 张明露, 田芳, 杨毅, 安代志 (1597)
六价铬细菌还原的分子机制研究进展	李斗, 赵由才, 宋立岩, 尹雅洁, 王洋清, 徐中慧 (1602)
农副食品加工工业高浓度废水的厌氧膜生物反应器技术	魏源送, 郁达伟, 曹磊 (1613)
《环境科学》征稿简则 (1427) 《环境科学》征订启事 (1497) 信息 (1383, 1390, 1398, 1560)	

缺镁胁迫对普通小球藻光合生理及油脂积累的影响

王珊^{1,2}, 赵树欣¹, 魏长龙^{1,2}, 于水燕², 史吉平², 张保国^{2*}

(1. 天津科技大学生物工程学院, 天津 300457; 2. 中国科学院上海高等研究院, 上海 201210)

摘要: 小球藻是一种重要的生物资源, 它在生产微藻燃料、提取生物活性物质以及水环境修复等方面具有广阔的应用, 因此研究小球藻的生理生化特性具有重要的意义. 镁离子在微藻的生长过程中起到了很重要的作用, 不仅是叶绿素结构的中心原子, 还是一些代谢途径中关键酶的辅因子. 采用批次培养的方法, 在对普通小球藻 (*Chlorella vulgaris*) 光合自养培养过程中, 研究了在缺镁胁迫条件下的普通小球藻的光合生理及油脂积累的变化. 结果表明, 在缺镁胁迫条件下, 普通小球藻的生物量、蛋白含量、叶绿素 a 含量、叶绿素 b 含量分别降低了 20%、43.96%、27.52%、28.07%, 而总油脂含量增加了 19.60%; 普通小球藻的最大光能转化效率 F_v/F_m 降低了 22.54%, 而非光化学淬灭 qN 显著高于正常培养条件. 本研究结果表明缺镁胁迫抑制了普通小球藻中叶绿素的合成, 从而影响了光合作用的进行, 导致普通小球藻生长受到抑制、蛋白质合成受阻, 从而使其碳同化进入油脂的合成代谢, 增加了普通小球藻油脂含量.

关键词: 镁缺乏; 胁迫; 普通小球藻; 光合生理; 油脂

中图分类号: X173 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)04-1462-06 DOI: 10.13227/j.hjks.2014.04.037

Effect of Magnesium Deficiency on Photosynthetic Physiology and Triacylglyceride (TAG) Accumulation of *Chlorella vulgaris*

WANG Shan^{1,2}, ZHAO Shu-xin¹, WEI Chang-long^{1,2}, YU Shui-yan², SHI Ji-ping², ZHANG Bao-guo²

(1. College of Biotechnology, Tianjin University of Science and Technology, Tianjin 300457, China; 2. Shanghai Advanced Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201210, China)

Abstract: As an excellent biological resource, *Chlorella* has wide applications for production of biofuel, bioactive substances and water environment restoration. Therefore, it is very important to understand the photosynthetic physiology characteristics of *Chlorella*. Magnesium ions play an important role in the growth of microalgae, not only the central atom of chlorophyll, but also the cofactor of some key enzyme in the metabolic pathway. A laboratory study was conducted to evaluate the effects of magnesium deficiency on several photosynthetic and physiological parameters and the triacylglyceride (TAG) accumulation of the green alga, *Chlorella vulgaris*, in the photoautotrophic culture process. *Chlorella vulgaris* biomass, protein, chlorophyll a and chlorophyll b contents decreased by 20%, 43.96%, 27.52% and 28.07% in response to magnesium deficiency, while the total oil content increased by 19.60%. Moreover, magnesium deficiency decreased the maximal photochemical efficiency F_v/F_m by 22.54%, but increased the non-photochemical quenching parameters qN. Our results indicated the decline of chlorophyll caused by magnesium, which affected the photosynthesis efficiency, lead to the growth inhibition of *Chlorella vulgaris* and affected the protein synthesis and increased the triacylglyceride (TAG) accumulation.

Key words: magnesium deficiency; stress; *Chlorella vulgaris*; photosynthetic physiology; triacylglyceride

小球藻 (*Chlorella*) 属于绿藻门小球藻属, 是一种单细胞淡水藻, 其所含氨基酸、维生素、多糖、糖蛋白, 使其成为一种很有价值的医药制品^[1~3]. 另外, 小球藻可以耐受高盐、高渗透压及高浓度抗生素, 这些特性使小球藻在污水处理领域也有很好的应用^[4,5]. 因此, 小球藻是极具应用价值的重要生物资源.

微藻因其光合效率高、生长速度快、油脂含量高^[6,7], 可以利用空气中的 CO₂ 降低温室效应等优势, 被认为是制备生物柴油的理想原料. 研究表明许多微藻在不同营养胁迫的条件下能积累更高含量的油脂. 如氮源缺乏可以提高普通小球藻 (*Chlorella vulgaris*) 和微拟球藻 (*Nannochloropsis*) 的油脂含

量^[8,9]; 磷限制会导致凯氏拟小球藻 (*Parachlorella kessleri*) 和微拟球藻的油脂含量增加^[10,11]; 缺硫条件下, 小球藻和莱茵衣藻 (*Chlamydomonas reinhardtii*) 细胞内总脂的含量将会增加^[12,13]. 王秀锦等^[14]通过对蛋白核小球藻进行光异养培养条件优化, 使其油脂产量达到了 121.3 mg·(L·d)⁻¹.

镁是微藻生长必需的营养元素之一, 对维持叶绿体结构和功能具有重要作用, 同时适宜的镁离子

收稿日期: 2013-08-29; 修订日期: 2013-11-14

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41106125); 赛诺菲·安万特-中国科学院上海生命科学研究院优秀青年人才奖励基金项目 (SA-SIBS 2010)

作者简介: 王珊 (1987~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为微藻生理及油脂代谢调控, E-mail: wangshan19870925@163.com

* 通讯联系人, E-mail: zhangbg@sari.ac.cn

浓度可以提高光系统活性和光能转化效率. Huang 等^[15]研究证实在小球藻异养过程中, 缺镁胁迫使油脂含量达到干重的 46.90%. 但小球藻在自养条件下, 缺镁胁迫是否会提高油脂含量还鲜见报道. 本研究主要是以普通小球藻 (*Chlorella vulgaris*) 为对象, 在光合自养培养过程中, 考察缺镁胁迫对普通小球藻光合生理和油脂含量的影响, 以期为进一步研究微藻油脂合成相关机制提供依据.

1 材料与方法

1.1 藻种

本实验所用藻种为普通小球藻 (*Chlorella vulgaris* FACHB-25), 购自中国科学院水生生物研究所淡水藻种库.

1.2 培养条件

普通小球藻光自养生长培养基分别为 TAP^[16] 和不含 Mg^{2+} 的 TAP (以下简称为 TAP-Mg). 首先将小球藻接种至含 TAP 的培养液中正常培养至对数生长期 D_{680} 为 0.8 ~ 0.9, 经离心弃上清后, 使用 TAP-Mg 培养液对藻细胞清洗两遍后, 分别接入含 300 mL TAP 的培养液中和含 300 mL TAP-Mg 的培养液中继续培养 6 d. 各设置 3 个平行样, 培养温度为 25℃, 光强为 $50 \mu mol \cdot (m^2 \cdot s)^{-1}$, 光暗比 14 h: 10 h, 每天定时摇动 3 次.

1.3 测定方法

1.3.1 生物量的测定

通过重量法测定生物量来监测细胞的生长. 先将 Whatman 滤纸 (GF/F, 0.7 μm , 47 mm) 在 105℃ 烘箱内烘干 12 h, 取 3 mL 藻液过膜抽滤后, 将带有藻体的滤纸放入 105℃ 烘箱内烘干至恒重. 利用公式计算出单位体积藻液的干重, W_1 为滤膜干重, W_2 为抽滤藻液后滤膜干重, W 为单位体积藻细胞干重 ($g \cdot L^{-1}$).

$$W(g \cdot L^{-1}) = 1000 \times (W_2 - W_1) / 3$$

1.3.2 蛋白含量的测定

使用 BCA 法测定普通小球藻中蛋白含量. 取 5 mL 藻液, 离心收集藻细胞, 依次加入 1 mL KH_2PO_4 (M/15) pH 4.5 和 2 mL 20% NaOH, 混匀后, 100℃ 沸水浴 5 min^[17]. 离心后, 取上清液, 使用美国 Pierce 公司生产的 BCA 蛋白分析试剂盒对所抽提出的蛋白进行浓度测定, 以牛血清白蛋白为标品, 制作标准曲线. 使用的检测仪器是美国 BioTek 公司生产的 Synergy H1 多功能微孔板检测仪, 设定吸收光波长为 560 nm.

1.3.3 中性脂的测定方法

微藻中的中性脂与尼罗红荧光染色溶液结合能发出荧光检测信号, 脂质的量与荧光强度呈正比. 因此, 可以快速、准确地比较活体微藻细胞内中性脂的相对含量^[18~20]. 取 1 mL 藻液, 加入 20 μL DMSO, 20 μL 尼罗红溶液 (0.5 $mg \cdot mL^{-1}$ 丙酮), 黑暗中放置 10 min, 然后使用美国 BioTek 公司生产的 Synergy H1 多功能微孔板检测仪检测激发波长 488 nm 和发射波长 554 nm 下的荧光值来比较不同样品中性脂的相对含量.

1.3.4 总脂的测定

总脂的测定按照文献[21]的方法进行. 取一定量冻干的藻粉, 加入 5 mL 氯仿/甲醇 (2:1), 置于 35℃ 水浴振荡 1 h 后, 离心, 取出上清保存, 继续向残存的藻体中加入 5 mL 氯仿/甲醇 (2:1), 置于 35℃ 水浴振荡 1 h 后, 离心, 取出上清. 将两次的上清液混合后, 加入 3 mL 蒸馏水, 离心后, 油脂留在下层液体中, 取出下层液体, 使用氮吹仪将有机溶剂吹干, 称重并计算油脂含量. 其中 W_0 为空瓶重, W_1 为冻干的藻粉质量, W_2 为装有油脂的瓶重.

$$\text{油脂} = (W_2 - W_0) / W_1 \times 100\%$$

1.3.5 色素的测定

叶绿素含量的测定采用的是分光光度法. 取 5 mL 藻液, 离心弃上清后, 加入 95% 丙酮至 10 mL 处, 振荡后放在暗处过夜. 离心取上清, 使用分光光度计测定其在 645 nm、663 nm 波长下的吸光值. 根据 Arnon 公式^[22]分别为:

$$c_a = 12.7A_{663} - 2.69A_{645}$$

$$c_b = 22.9A_{645} - 4.68A_{663}$$

计算出叶绿素 a、b 的浓度. 式中, c_a 为叶绿素 a 的浓度, c_b 为叶绿素 b 的浓度, 单位为: $mg \cdot L^{-1}$, 所使用的是德国 Beckman 公司生产的型号为 DU730 的分光光度计.

1.3.6 叶绿素荧光参数的测定

使用德国 Walz 公司生产的 Water-PAM 水样叶绿素荧光仪进行叶绿素荧光参数的测定. 向比色杯中依次加入 3 mL 蒸馏水、15 μL 藻液, 混匀后, 将样品暗适应 10 min. 叶绿素荧光参数 PS II 的最大光能转化效率 F_v/F_m 和非光化学淬灭 q_N 可在荧光仪上直接读出.

1.4 数据处理

采用 SPSS 19.0 软件对实验数据进行单因素方差分析.

2 结果与分析

2.1 缺镁胁迫条件下对普通小球藻生长的影响

正常培养 (TAP) 和缺镁胁迫条件下 (TAP-Mg) 普通小球藻的生长状况见图 1. 随着培养时间的延长, 正常培养条件下的小球藻的生物量呈不断上升趋势, 前 3 d 生物量增加较快, 生长快速, 细胞密度达到一定程度后, 依然进行缓慢的增长, 培养结束时的生物量为接种时的 2.37 倍, 达到 $2.13 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$. 而在缺镁胁迫后的前 3 d, 普通小球藻生长速度也较快, 其中前 2 d 与正常培养无显著差异 ($P > 0.05$), 而从第 3 d 开始生长显著低于正常培养条件 ($P < 0.05$), 缺镁胁迫后的第 3 d 开始, 普通小球藻的生物量基本不再增加, 生长近乎停滞, 至第 6 d 时生物量为 $1.61 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$, 相比于正常培养下降了 20%. 以上结果表明, 镁离子缺乏直接影响了普通小球藻的培养周期和生物量.

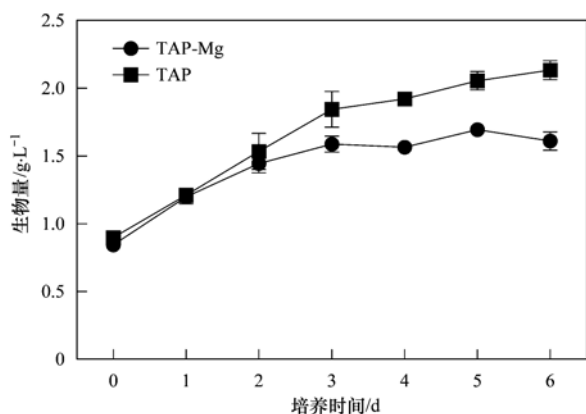


图 1 正常培养和缺镁胁迫条件下普通小球藻的生长状况
Fig. 1 Growth of *Chlorella vulgaris* under normal condition and magnesium deficiency stress

2.2 缺镁胁迫条件下对普通小球藻蛋白含量的影响

正常培养 (TAP) 和缺镁胁迫条件下 (TAP-Mg) 普通小球藻中蛋白含量的变化见图 2. 从中可知, 正常培养条件下普通小球藻的蛋白含量在接种至培养结束这段时间内无显著变化. 而缺镁胁迫条件下普通小球藻的蛋白含量从第 2 d 开始显著降低 ($P < 0.05$). 开始缺镁胁迫培养时其含量为 $78.74 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$, 而缺镁培养 2 d 后, 其蛋白质含量为 $53.04 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$, 仅为刚开始培养的 67.36%. 随着缺镁培养时间的延长, 蛋白质含量也在不断的降低, 培养结束时其蛋白含量为 $40.03 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$, 与正常培养相比其蛋白质含量降低了 43.96%.

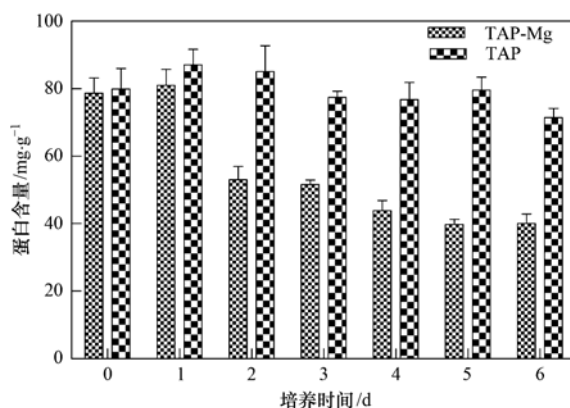


图 2 正常培养和缺镁胁迫条件下普通小球藻的蛋白含量变化
Fig. 2 Protein content of *Chlorella vulgaris* under normal condition and magnesium deficiency stress

2.3 缺镁胁迫条件下对普通小球藻总脂及中性脂含量的影响

本实验通过将处于对数生长后期的普通小球藻经 $6000 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 离心 7 min 后, 藻细胞重悬于 TAP 和缺镁的 TAP-Mg 培养基中, 分别培养至 6 d, 再分别用重量法和尼罗红染色法测定普通小球藻内总脂及中性脂含量的变化 (见图 3). 结果表明, 正常培养条件下, 普通小球藻的总脂含量为 26.89%, 而缺镁胁迫条件下, 普通小球藻的总脂含量为 32.16%, 相比于正常培养提高了 19.60%. 缺镁胁迫条件下, 普通小球藻尼罗红染色后检测到的中性脂荧光信号要显著高于正常培养条件下的普通小球藻.

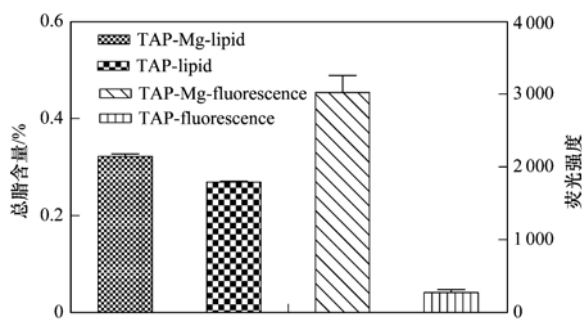


图 3 正常培养和缺镁胁迫条件下普通小球藻的总脂和中性脂含量
Fig. 3 Total lipid and neutral lipid of *Chlorella vulgaris* under normal condition and magnesium deficiency stress

2.4 缺镁胁迫对普通小球藻叶绿素含量的影响

镁是叶绿素的中心分子, 对维持叶绿体的结构、叶绿体的发育有很重要的作用^[14]. 正常培养 (TAP) 和缺镁胁迫条件下 (TAP-Mg) 普通小球藻的叶绿素含量如图 4 和图 5. 从中可知, 正常培养条件下普通小球藻的叶绿素 a 和叶绿素 b 含量呈螺旋上升趋

势,在培养第 5 d,叶绿素 a 和叶绿素 b 含量达到最高分别为 $18.21\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 和 $5.81\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$. 而在缺镁胁迫条件下,叶绿素 a 和叶绿素 b 含量在前 2 d 下降很快,随后几乎没有明显变化,至培养结束时,缺镁胁迫条件下,叶绿素 a 和叶绿素 b 含量分别为 $12.56\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 和 $3.69\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$,比正常培养条件下分别下降了约 27.52% 和 28.07%. 以上实验结果表明,缺镁胁迫条件下严重影响了普通小球藻色素的合成.

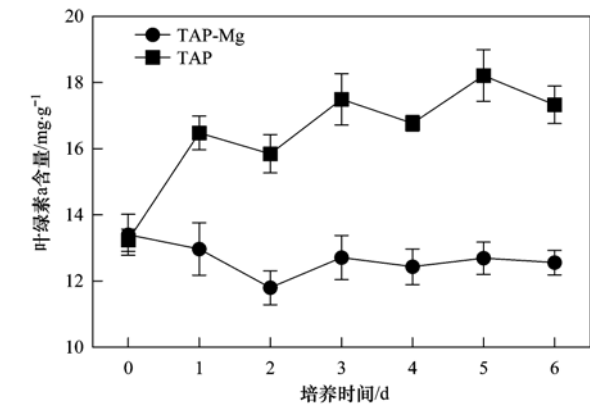


图 4 正常培养和缺镁胁迫条件下普通小球藻叶绿素 a 的含量变化

Fig. 4 Chlorophyll a content of *Chlorella vulgaris* under normal condition and magnesium deficiency stress

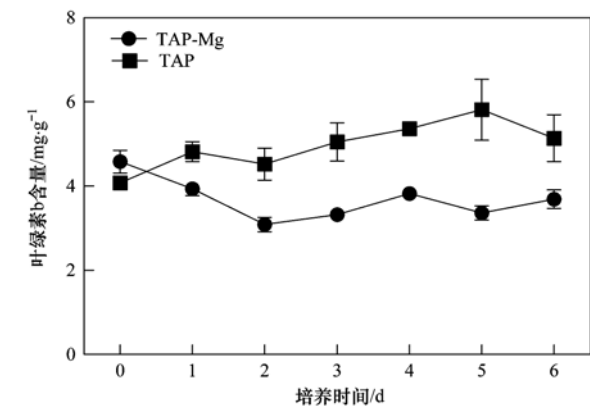


图 5 正常培养和缺镁胁迫条件下普通小球藻的叶绿素 b 的含量变化

Fig. 5 Chlorophyll b content of *Chlorella vulgaris* under normal condition and magnesium deficiency stress

2.5 缺镁对叶绿素荧光参数的影响

2.5.1 缺镁胁迫对 F_v/F_m 的影响

缺镁胁迫条件下和正常培养条件下普通小球藻的叶绿素荧光参数见图 6. F_v/F_m 代表了 PSII 的最大量子产量,它反映了绿色植物的潜在最大光合能力.与正常培养条件相比,缺镁胁迫下普通小球藻的 F_v/F_m 明显下降,并随着胁迫时间的延长,下降幅度逐步

增大,至培养结束时比接种时下降了 21.90%. 分析结果表明,缺镁胁迫使普通小球藻的 PSII 受到了损伤,光能转化率明显降低,光合作用受到了抑制.

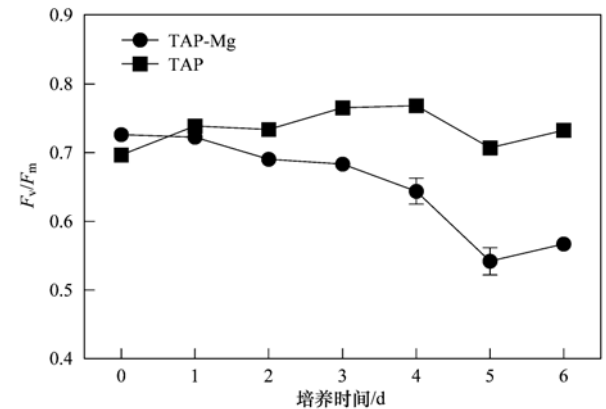


图 6 正常培养和缺镁胁迫条件下普通小球藻 F_v/F_m 的变化

Fig. 6 The F_v/F_m of *Chlorella vulgaris* under normal condition and magnesium deficiency stress

2.5.2 缺镁处理对 qN 的影响

qN 指非光化学淬灭,反映了绿色植物吸收的光能不能用于电子传递而以热等形式散耗掉的光能部分,是植物保护 PS II 的重要机制.接种后,即出现了缺镁胁迫条件下的普通小球藻的 qN 值显著高于正常培养(见图 7),可见普通小球藻对于缺镁胁迫非常敏感,即刻启动了非光化学保护.至培养的第 2 d 时,正常培养和缺镁胁迫条件下的普通小球藻的 qN 都已经降为 0,但随着培养时间的延长,呈现上升趋势,至第 4 d 达到最大值后就不再上升.并且从第 4 d 开始缺镁胁迫条件下的普通小球藻的 qN 值高出对照组 57.9% (见图 7).由以上结果可知,普通小球藻在培养期间受到的缺镁胁迫越来越严重,PS II 的热耗散能力增强,可以使其有效地避免或减轻因

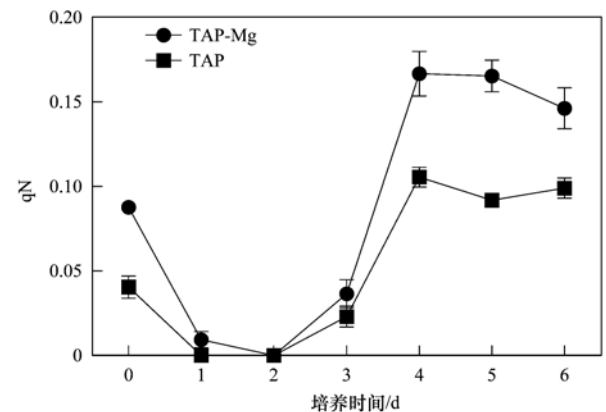


图 7 正常培养和缺镁胁迫条件下普通小球藻 qN 的变化

Fig. 7 The qN of *Chlorella vulgaris* under normal condition and magnesium deficiency stress

吸收过多的光能而造成的损伤。

3 讨论

本研究发现,当小球藻受到缺镁胁迫时,生长缓慢并受到抑制,总油脂含量提高,表明镁元素是小球藻生长的限制因子,小球藻在遭受缺镁胁迫时启动了抗逆生理反应,即通过积累油脂来度过不利环境。小球藻细胞开始积累油脂的同时,细胞内的总蛋白、叶绿素含量下降,这些现象的产生可能是蛋白质合成中氨基酸的活化过程需要镁的参加,镁又是叶绿素 a 结构的中心原子,缺镁会使小球藻细胞内蛋白质和叶绿素的合成受到影响,进而影响参与光合作用的重要蛋白和酶类,使藻细胞的光合作用受到抑制,因而碳代谢会更多地进入油脂合成的方向。

微藻油脂的生物合成是一个复杂的代谢网络,需要几十种相关酶的共同调控过程。而一些金属离子作为一些重要酶的辅因子,对于高等植物和藻类中调控基因表达起到了非常关键的作用^[23]。Huang 等^[15]通过无光照异养条件下金属离子 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 对小球藻的总脂肪酸含量的影响,发现在 Mg^{2+} 缺失、 $100\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 $CaCl_2\cdot 2H_2O$ 时都可得到很高的总脂肪酸含量。Wang 等^[24]研究表明, $20\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ Mg^{2+} 对小球藻胁迫,使其脂肪酸组成发生了变化,饱和脂肪酸减少了 14.5%,说明镁离子的存在对脂肪酸的合成有抑制作用。刘志媛等^[25]研究发现在高浓度的 Fe^{3+} 条件下培养海水小球藻,能够明显促进海水小球藻中油脂的积累,出现了两次油脂积累的高峰,并认为是由于己糖库的代谢途径由合成淀粉为主转变为合成油脂。本实验发现小球藻在缺镁胁迫下,油脂总量提高了 19.6%,TAG 的含量也显著提高了,说明了缺镁可以促进油脂的积累,与以上研究结果相一致。由以上结果,可以推测金属离子改变了藻体细胞油脂代谢网络,并可能影响到了一些关键酶基因的表达。

4 结论

(1)缺镁胁迫不仅直接影响了小球藻的生长周期,还抑制了蛋白质合成。从胁迫第 3 d 开始,小球藻的生长近乎停滞;蛋白含量随胁迫时间延长不断降低,最终仅为初始时的 43.96%。

(2)缺镁胁迫与正常培养条件相比,小球藻叶绿素 a 和 b 的含量下降 27.52%、28.21%, F/F_m 下降 22.54%,qN 上升 47.81%,表明缺镁使叶绿素的合成受到限制,光合作用受到了严重抑制,PS II

的热耗散能力增强。

(3)缺镁胁迫下,小球藻的油脂总量提高了 19.60%,中性脂也显著高于正常条件。这表明缺镁胁迫小球藻,伴随着生长抑制出现,蛋白质合成受阻,碳同化进入脂类合成代谢,促进了小球藻油脂含量的增加。

参考文献:

- [1] 杨鹭生,李国平,陈林水. 蛋白核小球藻粉的蛋白质、氨基酸含量及营养价值评价[J]. 亚热带植物科学, 2003, **32** (1): 36-38.
- [2] 王业勤,李勤生. 小球藻应用研究动态[J]. 微生物学通报, 1985, **12**(6): 275-277.
- [3] 陈晓清,苏育才. 小球藻的应用研究进展[J]. 生物学教学, 2012, **37**(1): 8-9.
- [4] Bhatnagar A, Bhatnagar M, Chinnasamy S, et al. *Chlorella minutissima*—A promising fuel alga for cultivation in municipal wastewaters [J]. Applied Biochemistry and Biotechnology, 2010, **161**(1-8): 523-536.
- [5] Aslan S, Kapdan I K. Batch kinetics of nitrogen and phosphorus removal from synthetic wastewater by algae [J]. Ecological Engineering, 2006, **28**(1): 64-70.
- [6] Li Q, Du W, Liu D H. Perspectives of microbial oils for biodiesel production [J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2008, **80**(5): 749-756.
- [7] Li P L, Miao X L, Li R X, et al. In situ biodiesel production from fast-growing and high oil content *Chlorella pyrenoidosa* in rice straw hydrolysate [J]. Journal of Biomedicine and Biotechnology, 2011, **2011**: 1-8.
- [8] Mujtaba G, Choi W, Lee C G, et al. Lipid production by *Chlorella vulgaris* after a shift from nutrient-rich to nitrogen starvation conditions[J]. Bioresource Technology, 2012, **123**: 279-283.
- [9] 王辉,陈来喜,肖爱凤,等. 氮和铁对小球藻和微拟球藻油脂积累的影响[J]. 海南师范大学学报, 2012, **25**(1): 86-89.
- [10] Li X L, Pribyl P, Bisova K, et al. The microalga *Parachlorella kessleri*—a novel highly efficient lipid producer[J]. Biotechnology and Bioengineering, 2013, **110**(1): 97-107.
- [11] Rodolfi L, Zittelli G C, Bassi N, et al. Microalgae for oil: Strain selection, induction of lipid synthesis and outdoor mass cultivation in a low-cost photobioreactor[J]. Biotechnology and Bioengineering, 2009, **102**(1): 100-112.
- [12] Mizuno Y, Sato A, Watanabe K, et al. Sequential accumulation of starch and lipid induced by sulfur deficiency in *Chlorella* and *Parachlorella* species[J]. Bioresource Technology, 2013, **129**: 150-155.
- [13] Cakmak T, Angun P, Demiray Y E, et al. Differential effects of nitrogen and sulfur deprivation on growth and biodiesel feedstock production of *Chlamydomonas reinhardtii*[J]. Biotechnology and Bioengineering, 2012, **109**(8): 1947-1957.
- [14] 王秀锦,李兆胜,刑冠岚,等. 蛋白核小球藻 *Chlorella*

- pyrenoidosa-15 的异养培养条件优化及污水养殖[J]. 环境科学, 2012, **33**(8): 2735-2740.
- [15] Huang G, Chen F. Effect of metal ions on biomass and total fatty acids content of *Chlorella vulgaris*[J]. Modern Food Science and Technology, 2009, **25**(5): 474-477.
- [16] Gorman D S, Levine R P. Cytochrome f and plastocyanin: their sequence in the photosynthetic electron transport chain of *Chlamydomonas reinhardtii* [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 1965, **54**(6): 1665-1669.
- [17] Bellou S, Aggelis G. Biochemical activities in *Chlorella* sp. and *Nannochloropsis salina* during lipid and sugar synthesis in a lab-scale open pond simulating reactor[J]. Journal of Biotechnology, 2012, **164**(2): 318-329.
- [18] Chen W, Sommerfeld M, Hu Q. Microwave-assisted Nile red method for *in vivo* quantification of neutral lipids in microalgae [J]. Bioresource Technology, 2011, **102**(1): 135-141.
- [19] Lee S J, Yoon B D, Oh H M. Rapid method for the determination of lipid from the green alga *Botryococcus braunii* [J]. Biotechnology Techniques, 1998, **12**(7): 553-556.
- [20] Liu Z Y, Wang G C, Zhou B C. Effect of iron on growth and lipid accumulation in *Chlorella vulgaris* [J]. Bioresource Technology, 2008, **99**(11): 4717-4722.
- [21] Folch J, Lees M, Sloane Stanley G H. A simple method for the isolation and purification of total lipides from animal tissues[J]. Journal of Biological Chemistry, 1957, **226**(1): 497-509.
- [22] 叶济宇. 关于叶绿素含量测定中的 Arnon 计算公式[J]. 植物生理学通讯, 1985, (6): 69.
- [23] Raman V, Ravi S. Effect of salicylic acid and methyl jasmonate on antioxidant systems of *Haematococcus pluvialis* [J]. Acta Physiologiae Plantarum, 2011, **33**(3): 1043-1049.
- [24] Wang Y, Liu Z Y, Qin S. Effects of iron on fatty acid and astaxanthin accumulation in mixotrophic *Chromochloris zofingiensis*[J]. Biotechnology Letters, 2013, **35**(3): 351-357.
- [25] 刘志媛, 王广策. 铁促进海水小球藻油脂积累的动态过程[J]. 海洋科学, 2008, **32**(11): 56-59.

CONTENTS

Analysis of Characteristics of Black Carbon Concentration in Shanghai from 2008 to 2012	WANG Hong-qiang, HE Qian-shan, CHEN Yong-hang, <i>et al.</i> (1215)
Chemical Characteristics and Insoluble Particulates' Surface Morphology of a Snowfall Process in the Southeastern Suburb of Urumqi	LU Hui, WEI Wen-shou, CUI Cai-xia, <i>et al.</i> (1223)
Comparative Study of the Level and Distribution of Polybrominated Diphenyl Ethers and New Brominated Flame Retardants in the Atmosphere of Typical Urban	WU Hui, JIN Jun, WANG Ying, <i>et al.</i> (1230)
Source and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Ambient Air PM ₁₀ from One Coking Plant	DONG Ting, LI Tian-xin, ZHAO Xiu-ge, <i>et al.</i> (1238)
Estimation of Average Traffic Emission Factor Based on Synchronized Incremental Traffic Flow and Air Pollutant Concentration	LI Run-kui, ZHAO Tong, LI Zhi-peng, <i>et al.</i> (1245)
Study on Critical Loads of Sulfur and Nitrogen in the Pearl River Delta	SUN Cheng-ling, XIE Shao-dong (1250)
Hydrogen Sulfide Removal by the Combination of Non-Thermal Plasma and Biological Process	LI Hua-qin, HE Jue-cong, CHEN Zhou-yang, <i>et al.</i> (1256)
Spatial Distribution and Risk Assessment of Atrazine in Taizi River Basin, China	ZHENG Lei, ZHANG Yi-zhang, ZHANG Yuan, <i>et al.</i> (1263)
Development of a Method for Measuring Dissolved Reactive Phosphorus (DRP) and Dissolved Ferrous Iron in Large Batch in Pore Water Samples of Sediments with Micro-volumes	WANG Yan, ZHU Chun-gang, XU Di, <i>et al.</i> (1271)
Temporal and Spatial Variation of Water Nutrient Level After Exogenous Nutrient Input	FU Ling, ZHAO Kai, WANG Guo-xiang, <i>et al.</i> (1278)
Physical Process Based Risk Assessment of Groundwater Pollution in the Mining Area	SUN Fa-sheng, CHENG Pin, ZHANG Bo (1285)
Hydrogeochemical Characteristics of a Typical Karst Groundwater System in Chongqing	YANG Ping-heng, LU Bing-qing, HE Qiu-fang, <i>et al.</i> (1290)
Investigation of Nitrogen, Phosphorus and Microbial Contamination in Laolongdong Underground River System of Chongqing	LAN Jia-cheng, YANG Ping-heng, REN Kun, <i>et al.</i> (1297)
Effects on Phosphorus Fraction Distribution in Sediment by Roots of <i>Vallisneria spiralis</i>	LI Zhen-guo, WANG Guo-xiang, ZHANG Jia, <i>et al.</i> (1304)
Modeling Nitrogen Transformation in a Novel Circular-Flow Corridor Wetland	PENG Jian-feng, SONG Yong-hui, YUAN Peng, <i>et al.</i> (1311)
Natural Attenuation of Tetracycline in the Water of Taihu Lake Under Different Environmental Conditions	DUAN Lun-chao, WANG Feng-he, JI Ying-xue, <i>et al.</i> (1318)
Inactivation and Reactivation of Antibiotic-Resistant Bacteria During and After UV Disinfection in Reclaimed Water	HUANG Jing-jing, TANG Fang, XI Jin-ying, <i>et al.</i> (1326)
Photoreactivation of <i>Escherichia coli</i> and <i>Enterococcus faecalis</i> in the Secondary Effluent Disinfected by UV-TiO ₂	WANG Xi-feng, GONG Xin, HU Xiao-lian, <i>et al.</i> (1332)
Stability of C ₆₀ Nanoparticles in Aquatic Systems	FANG Hua, SHEN Bing-bing, JING Jie, <i>et al.</i> (1337)
Fouling Behavior of Sodium Alginate During Microfiltration at Various Ionic Compositions; XDLVO Approach	ZHAO Ying-xu, ZONG Rui-qiang, GAO Xin-yu, <i>et al.</i> (1343)
Enhanced Remediation of 4-Chloronitrobenzene Contaminated Groundwater with Nanoscale Zero-valence Iron (nZVI) Catalyzed Hydrogen Peroxide (H ₂ O ₂)	FU Rong-bing (1351)
Effect of the Coexistence of Chlorobenzene Homologue on Anaerobic Degradation of Hexachlorobenzene	WANG Qi, LIU Hui, JIANG Lin, <i>et al.</i> (1358)
Research on Removal Efficiency of Cd(II)-bearing Wastewater by Sulfate-reducing Biological Filter	WU Xuan, TAN Ke-yan, HU Xi-jia, <i>et al.</i> (1366)
Control Strategies of Nitrogen Removal Process in a Pilot Test of the Southern WWTP Based on the Nitrogen Balance	JIANG Ying-he, LIU Pei-ju, WANG Lei, <i>et al.</i> (1372)
Effect of Simulated Inorganic Anion Leaching Solution of Electroplating Sludge on the Bioactivity of <i>Acidithiobacillus ferrooxidans</i>	CHEN Yan, HUANG Fang, XIE Xin-yuan (1377)
Microbial Reduction of Cu ²⁺ Mediated by Electroactive Biofilms	LIU Yi, ZHOU Shun-gui, YUAN Yong, <i>et al.</i> (1384)
Copper Recovery from Artificial Bioleaching Lixivium of Waste Printed Circuit Boards	CHENG Dan, ZHU Neng-wu, WU Ping-xiao, <i>et al.</i> (1391)
Difference of Contaminant Composition Between Landfill Leachates and Groundwater and Its Reasons	HE Xiao-song, YU Hong, XI Bei-dou, <i>et al.</i> (1399)
Photochemical Degradation of Landfill Leachate Facilitated by Combined Schwertmannite and H ₂ O ₂	WANG He-ru, SONG Yong-wei, XU Zhi-hui, <i>et al.</i> (1407)
Effects of Operating Parameters on Organic Toxicity of Sludge Treating Synthetic Bisphenol A Wastewater	YANG Na, CHEN Xiu-rong, LIN Feng-kai, <i>et al.</i> (1414)
Comparative Study on Biological Methane Potential and Methanogen Biodiversity in the Anaerobic Digestion of Excess Sludge	DONG Hui-yu, JI Min (1421)
Isolation and Identification of Mn Oxidizing Bacterium <i>Aminobacter</i> sp. H1 and Its Oxidation Mechanism	YAN Ping, JIANG Li-ying, CHEN Jian-meng, <i>et al.</i> (1428)
Nitrate Removal by a Strain of Nitrate-Dependent Fe(II)-Oxidizing Bacteria	WANG Hong-yu, YANG Kai, ZHANG Qian, <i>et al.</i> (1437)
Study on the Iopromide-Degrading Characteristics of Strain <i>Pseudomonas</i> sp. I-24 via Co-Metabolism	XU Bing-jie, GAO Pin, XUE Gang, <i>et al.</i> (1443)
Using Flow Cytometry to Explore the Changes of <i>Sphingomonas</i> sp. GY2B Bacterial Surface Characteristics in the Process of Degrading Phenanthrene	ZHANG Meng-lu, DANG Zhi, WU Feng-ji, <i>et al.</i> (1449)
Research on Characteristic of Interrelationship Between Toxic Organic Compound BPA and <i>Chlorella vulgaris</i>	CHEN Shan-jia, CHEN Xiu-rong, YAN Long, <i>et al.</i> (1457)
Effect of Magnesium Deficiency on Photosynthetic Physiology and Triacylglyceride (TAG) Accumulation of <i>Chlorella vulgaris</i>	WANG Shan, ZHAO Shu-xin, WEI Chang-long, <i>et al.</i> (1462)
Effects of Microcystins on Growth and Antioxidant System of Rice Roots	WANG Wei-min, DENG Yu, ZOU Hua, <i>et al.</i> (1468)
Responses of Soybean Cultivar Dongsheng-1 to Different O ₃ Concentrations in Northeast China	ZHANG Wei-wei, WANG Guang-hua, WANG Mei-yu, <i>et al.</i> (1473)
Development and Succession of Biological Soil Crusts and the Changes of Microbial Biomasses	WU Li, ZHANG Gao-ke, CHEN Xiao-guo, <i>et al.</i> (1479)
Effects of Lead on the Growth and Reproduction of <i>Eisenia fetida</i> with Aged Soils	CHEN Li-hong, LIU Zheng-tao, FANG Zheng, <i>et al.</i> (1486)
Soil Heavy Metal Cadmium Standard Limit and Range of Background Value Research	ZHAO Xiao-jun, LI Si-jin, XU Ren-ji, <i>et al.</i> (1491)
Study on Soil Element Background Values of the Hoh Xil Area in North Tibet	BAI Jian-kun, WANG Jian-li, LI Chao-liu, <i>et al.</i> (1498)
Transfer Characteristic and Source Identification of Soil Heavy Metals from Water-Level-Fluctuating Zone Along Xiangxi River, Three-Gorges Reservoir Area	XU Tao, WANG Fei, GUO Qiang, <i>et al.</i> (1502)
Heavy Metal Pollution Characteristics and Ecological Risk Analysis for Soil Around Haining Electroplating Industrial Park	LI Jiong-hui, WENG Shan, FANG Jing, <i>et al.</i> (1509)
Sources and Spatial Distribution of Typical Heavy Metal Pollutants in Soils in Xihu Scenic Area	ZHANG Hai-zhen, TANG Yu-li, LU Jun, <i>et al.</i> (1516)
Distribution and Assessment of Mercury in the Ambient Soil of a Municipal Solid Waste Incinerator	XIE Hui-ting, ZHANG Cheng-zhong, XU Feng, <i>et al.</i> (1523)
Phosphorus Adsorption Characteristics of Soils and Sediments Surrounding Dishui Lake in Shanghai	ZHUO Xiang-zhen, BI Chun-juan, CHEN Zhen-lou, <i>et al.</i> (1531)
Impact of SDBS/Na ⁺ on Red Soil Colloidal Stability	TANG Ying, LI Hang, ZHU Hua-ling, <i>et al.</i> (1540)
Effects of Stabilization Treatment on Migration and Transformation of Heavy Metals in Mineral Waste Residues	ZHAO Shu-hua, CHEN Zhi-liang, ZHANG Tai-ping, <i>et al.</i> (1548)
Study on a New Method of Fast Monitoring Toxicity of Cd ²⁺ by Algal in Water	DUAN Jing-bo, LIU Wen-qing, ZHANG Yu-jun, <i>et al.</i> (1555)
Immunosensor for Rapid Detection of 1,3-Dinitrobenzene	LONG Feng, SHI Han-chang, WANG Hong-chen, <i>et al.</i> (1561)
Mg/Al Layered Double Hydroxides Prepared by Microwave-Assisted Co-Precipitation Method for the Removal of Bromate	ZHONG Qiong, LI Huan (1566)
Discussion on Several Key Points of Decision Support System for Remediation of Contaminated Sites	LIAO Xiao-yong, TAO Huan, YAN Xiu-lan, <i>et al.</i> (1576)
A Review of Multi-Scale Studies on Spatial Variation of the Lead (Pb) Concentration in Urban Soils	YANG Meng, LI Feng-ying, DIAO Yi-wei, <i>et al.</i> (1586)
Review on Characteristics and Detecting Assay of Bacterial Endotoxin Contamination in Water Environment	ZHANG Can, LIU Wen-jun, ZHANG Ming-lu, <i>et al.</i> (1597)
Advances in Molecular Mechanism of Bacterial Reduction of Hexavalent Chromium	LI Dou, ZHAO You-cai, SONG Li-yan, <i>et al.</i> (1602)
Anaerobic Membrane Bioreactors for Treating Agricultural and Food Processing Wastewater at High Strength	WEI Yuan-song, YU Da-wei, CAO Lei (1613)

《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)

2014年4月15日 35卷 第4期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 4 Apr. 15, 2014

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: 90.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行