

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心
■ 出版 科学出版社



2020

Vol.41 No.7
第41卷 第7期

目次

中国钢铁行业大气环境影响	汤铃, 薛晓达, 伯鑫, 贾敏, 郭静, 田军, 黄满堂, 崔维庚, 王彤, 李时蓓, 敬红, 甄瑞卿, 孙露, 成国庆 (2981)
华北地区大气细颗粒物 (PM _{2.5}) 年际变化及其对土地利用/覆被变化的响应	杨伟, 姜晓丽 (2995)
郑州市民运会期间大气 PM _{2.5} 改善效果评估	王申博, 姜亚敏, 徐艺斐, 袁明浩, 苏方成, 张瑞芹 (3004)
成都夏冬季 PM _{2.5} 中水溶性无机离子污染特征	冯炎鹏, 张军科, 黄小娟, 刘琴, 张巍, 张建强 (3012)
川南自贡市大气颗粒物污染特征及传输路径与潜在源分析	雷雨, 张小玲, 康平, 王浩霖, 青泉, 欧奕含, 卢宁生, 邓中慈 (3021)
四川省典型行业挥发性有机物源成分谱	徐晨曦, 陈军辉, 韩丽, 王继钦, 王波 (3031)
成都市工业挥发性有机物排源成分谱	周子航, 邓也, 周小玲, 吴柯颖, 谭钦文, 尹代娟, 宋丹林, 陈秋宇, 曾文斌 (3042)
郑州市典型工业企业 VOCs 排放特征及风险评估	齐一谨, 倪经纬, 赵东旭, 杨艺, 韩丽岩, 李博伟 (3056)
阳泉市区夏季挥发性有机物污染特征、来源解析及其环境影响	牛月圆, 刘倬诚, 李如梅, 高千卓, 邓萌杰, 闫雨龙, 胡冬梅, 吴婧, 彭林 (3066)
典型光化学污染期间杭州大气挥发性有机物污染特征及反应活性	景盛翱, 叶旭红, 高雅琴, 彭亚荣, 李英杰, 王倩, 沈建东, 王红丽 (3076)
华北地区典型重工业城市夏季近地面 O ₃ 污染特征及敏感性	欧盛菊, 魏巍, 王晓琦, 姚森, 周志博, 关攀博, 段文娇, 姚诗音 (3085)
稳定同位素模型解析大气氨来源的参数敏感性	顾梦娜, 潘月鹏, 何月欣, 田世丽, 王彦君, 吕雪梅, 倪雪, 孙杰, 吴电明, 方运霞 (3095)
苏州市大气中汞的形态分布特征及来源分析	卢仁杰, 吴也正, 张晓婕, 沈莹, 吴福全, 薛媛媛, 邹强, 麻春艳 (3102)
轻型汽油车稳态工况下的尾气排放特征	谢岩, 廖松地, 朱曼妮, 王怡然, 王日超, 张立航, 余飞, 钟庄敏, 白莉, 黄江荣, 刘俊文, 郑君瑜 (3112)
非超低与超低排放煤电机组启动过程 NO _x 排放特征对比分析	李辉, 朱法华, 孙雪丽, 王宗爽, 王圣, 裴杰, 谭玉菲, 薛峰, 郭敏, 郑桂博 (3121)
邢台市区道路可悬浮灰尘重金属污染特征及来源识别	宋怡, 卢新卫, 周潇, 葛子赫 (3130)
叶片微观结构变化对其颗粒物滞纳能力的影响	魏文俊, 王兵, 牛香 (3136)
关中平原降水氢氧稳定同位素特征及其水汽来源	赵明华, 陆彦玮, Rachana Heng, 司炳成 (3148)
岩溶流域不同水体硝酸盐的来源解析	田永著, 韩志伟, 赵然, 李耕, 曾祥颖, 黄家琰 (3157)
木沥河流域氮素污染及其污染源解析	齐冉, 徐菲菲, 杨帆, 颜昌宙 (3165)
辽河口沉积物环境要素时空动态及影响因素分析	齐玥, 孙永光, 马恭博, 吴楠, 付元宾 (3175)
鄱阳湖多尺度流域磷源输送特征及其生态效应	王朔月, 高扬, 陆瑶, 贾琰杰, 李兆喜, 马明真, 温学发 (3186)
象山港流域入湾河流水体中重金属风险评价及其来源解析	王磊, 汪文东, 刘懂, 李刚, 于红梅, 黄沙, 徐耀阳 (3194)
乐安河河流水体典型全氟化合物的浓度及其前体物的污染贡献	张慧, 王世亮, 余杨 (3204)
连云港海州湾海域表层水体和沉积物中微塑料的分布特征	李征, 高春梅, 杨金龙, 吴立珍, 张硕, 刘艳华, 靳迪迪 (3212)
茅洲河流域民用井中耐药基因的分布特征与健康风险	吴黛灵, 邹海燕, 何璐茜, 高方舟, 应光国, 何良英 (3222)
金盆水库沉积物铁锰释放规律	路林超, 黄廷林, 李楠, 齐允之, 张晗, 王晨旭, 司凡 (3231)
城市湖泊沉积物微塑料污染特征	王璇, 牛司平, 宋小龙, 饶竹, 战楠 (3240)
西藏尼洋河沉积物中微生物群落结构特征分析	刘晓丹, 黄毅, 王永花, 汪贝贝, 吴兵, 陆光华 (3249)
海水中的红毒素与营养盐对微藻的复合影响	王娜, 赵卫红, 苗辉 (3257)
梯级电站作用下牡丹江底栖动物沿程变化规律	温佳琦, 王皓冉, 陈永灿, 刘昭伟 (3266)
宁波市典型城市下垫面雨水径流污染特征解析	徐宇婕, 龚玥敏, 毕军鹏, 王洋, 程军蕊, 王侃 (3275)
分层型水库藻类垂直演替的水质与细菌种群调控	闫苗苗, 陈胜男, 黄廷林, 贾克宇, 刘凯文, 苗雨甜, 宗容容 (3285)
长距离供水系统中消毒副产物分布特征及二次加氯的影响	毕薇薇, 叶胜, 于建全, 杨玉龙, 陈晨, 李青松, 马晓雁 (3297)
供水管网终端消毒副产物分布特征及预测模型	刘俊萍, 陈镜吉, 宋亚丽, 杨玉龙, 李青松, 马晓雁 (3307)
碱和磁复合改性小麦秸秆生物炭对水体中镉的吸附特性及机制	崔志文, 任艳芳, 王伟, 张黎明, 张陆云, 王曦玥, 何俊瑜 (3315)
弱磁场强化氧化石墨烯负载纳米零价铁 (GO-nFe ⁰ /WMF) 对水中Cr(VI) 的去除特性及机制	计盟, 鲍建国, 朱晓伟, 杜江坤, 郑汉 (3326)
一硫代肟在针铁矿上的吸附及影响因素	廖丹雪, 单慧娟, 张进贤, 彭三曦, 黄健, 陈辉, 赵超然, 曾春芽 (3337)
生物滤池快速启动 ANAMMOX 运行策略及菌群特征	王晓瞳, 杨宏, 苏杨, 刘旭妍 (3345)
低碳源条件下供氧模式对活性污泥系统脱氮性能的影响	张欣瑞, 池玉蕾, 王倩, 金鑫, 石炬, 金鹏康 (3356)
羟胺对厌氧氨氧化污泥群落的影响	邢崇阳, 范禹辰, 陈璇, 郭劲松, 申渝, 晏楠, 方芳, 陈猷鹏 (3365)
低温下丝状菌膨胀污泥的微生物多样性	高春娣, 张娜, 韩微, 任浩, 李悦, 侯春艳, 王传德, 彭永臻 (3373)
我国剩余污泥厌氧消化的主要影响因素及强化	董滨, 高君, 陈思思, 杨殿海, 戴晓虎 (3384)
城镇河流 CO ₂ 及 CH ₄ 排放与市政排水管网污水输入的关联影响	李磊, 陈浩, 朱奔, 王宇晖, 聂云汉, 赵昕, 贾其隆, 叶建峰 (3392)
控释尿素对黄河故道沙性潮土 N ₂ O 排放的影响	姜右锦, 袁俊吉, 丁维新, 刘阳, 张松林 (3402)
我国典型露地蔬菜生产中的温室气体排放	张芬, 程泰鸿, 陈新平, 王孝忠 (3410)
不同母质发育土壤 Cd 环境行为对水分管理模式的响应差异	黄敬, 李欣阳, 文沙, 蒋凯, 龙坚, 彭佩钦, 侯红波 (3418)
锰基改性生物炭对弱碱性 Cd 污染土壤团聚体结构以及 Cd 含量特征的影响	孙彤, 付宇童, 李可, 徐应明, 孙约兵 (3426)
钝化与叶面阻控对不同基因型红菜苔镉累积的影响	曹坤坤, 李成成, 胡学玉, 郭晓, 黄洋 (3434)
叶面喷施 2,3-二巯基丁二酸对水稻幼苗镉吸收转运及抗氧化系统的影响	杨晓荣, 黄永春, 刘仲齐, 黄益宗, 程六龙, 张长波 (3441)
《环境科学》征订启事 (3011) 《环境科学》征稿简则 (3084) 信息 (3174, 3185, 3391)	

海水中的红霉素与营养盐对微藻的复合影响

王娜^{1,2,3}, 赵卫红^{2,3,4*}, 苗辉⁴

(1. 中国科学院海洋研究所海洋生态和环境科学重点实验室, 青岛 266071; 2. 青岛海洋科学与技术试点国家实验室, 青岛 266237; 3. 中国科学院大学地球与行星科学学院, 北京 100049; 4. 中国科学院海洋研究所, 青岛 266071)

摘要: 大量的抗生素及其代谢产物最终会进入海洋, 其对海洋生态系统的潜在威胁值得关注. 研究了不同浓度的红霉素和营养盐对 2 种甲藻——米氏凯伦藻 (*Karenia mikimotoi*)、东海原甲藻 (*Prorocentrum donghaiense*) 和 1 种硅藻——中肋骨条藻 (*Skeletonema costatum*) 的生物量、光合色素含量、蛋白质含量、超氧化物歧化酶 (SOD) 活性和丙二醛 (MDA) 含量的影响, 以此来探究海水中红霉素与营养盐限制是否会对微藻产生复合影响, 评估不同的营养状态下红霉素对海洋生态的影响. 结果表明, 营养盐限制会降低米氏凯伦藻、东海原甲藻和中肋骨条藻对红霉素的耐受限度. 本实验范围内 ($0 \sim 1\,000\ \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$), 红霉素对米氏凯伦藻的生长无显著影响, 高浓度的红霉素 ($\geq 100\ \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$) 会显著抑制东海原甲藻和中肋骨条藻的生长, 这 3 种微藻中中肋骨条藻对红霉素敏感性最高.

关键词: 红霉素; 营养盐; 微藻; 生物量; 生理指标

中图分类号: X171.5 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2020)07-3257-09 DOI: 10.13227/j.hjks.201911242

Combined Effects of Erythromycin and Nutrients on Microalgae in Seawater

WANG Na^{1,2,3}, ZHAO Wei-hong^{2,3,4*}, MIAO Hui⁴

(1. Key Laboratory of Marine Ecology and Environmental Sciences, Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China; 2. Pilot National Laboratory for Marine Science and Technology (Qingdao), Qingdao 266237, China; 3. College of Earth and Planetary Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 4. Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China)

Abstract: A large number of antibiotics and their metabolites eventually enter the ocean, and their potential threat to marine ecosystems demands attention. In this study, *Karenia mikimotoi*, *Prorocentrum donghaiense*, and *Skeletonema costatum* were selected to investigate the effects of different concentrations of erythromycin and nutrients on microalgae biomass, photosynthetic pigment contents, protein contents, superoxide dismutase (SOD) activity, and malondialdehyde (MDA) content. The possibility of whether erythromycin and nutrient limitation can have combined effects on microalgae was explored, and under different nutritional conditions, the impact of erythromycin on marine ecology was evaluated. The study found that nutrient limitation reduces the tolerance of *Karenia mikimotoi*, *Prorocentrum donghaiense*, and *Skeletonema costatum* to erythromycin. Erythromycin in the experimental range ($0\sim1000\ \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$) had no significant effect on the growth of *Karenia mikimotoi*. However, high concentrations of erythromycin ($\geq 100\ \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$) significantly inhibited the growth of *Prorocentrum donghaiense* and *Skeletonema costatum*. The sensitivity of *Skeletonema costatum* was the most pronounced.

Key words: erythromycin; nutrients; microalgae; biomass; physiological index

抗生素的滥用会带来较强毒副作用, 如直接伤害身体, 造成潜在基因污染, 使细菌产生交叉耐药性或共同耐药性等, 其危害已经引起了人们的广泛关注^[1,2]. 大量的抗生素及其代谢产物最终会进入海洋, 其对海洋生态系统的潜在威胁值得研究. 海水中的抗生素浓度为 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$ 至 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, 其中红霉素在水体中存在形式较为稳定, 检出频率高, 残留量较大^[3,4].

海洋生态系统中, 微藻是重要的生产者, 对环境变化很敏感. 杨弯弯等^[5]的研究发现硫氰酸红霉素对铜绿微囊藻 (*Microcystis aeruginosa*) 的生长有抑制作用, 且 96h-EC50 为 $48.2\ \text{g}\cdot\text{L}^{-1}$. 刘滨扬^[6]的研究发现红霉素可以显著抑制羊角月牙藻 (*Selenastrum bibraianum*) 的叶绿素生物合成. Perales-Vela 等^[7]证明了链霉素能够降低小球藻 (*Chlorella vulgaris*) 的

生长速率和光合作用活性. Bashir 等^[8]的研究发现四环素通过调节蛋白质的合成来抑制微芒藻 (*Micractinium pusillum*) 的生长和光合作用. 王洪斌等^[9]的研究发现浓度低于 $200\ \mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$ 时, 链霉素对米氏凯伦藻 (*Karenia mikimotoi*) 有促进作用. 抗生素会影响微藻的生长. 目前研究多为抗生素对淡水微藻的影响, 抗生素对海洋微藻的影响研究相对较少.

在抗生素进入海洋的同时, 大量营养盐入海, 造成海水富营养化, 营养盐结构严重失衡. 近年研究发

收稿日期: 2019-11-26; 修订日期: 2020-02-16

基金项目: 国家自然科学基金委员会-山东省人民政府联合基金项目 (U1606404); 国家实验室开放基金项目 (QNL20160RP0410)

作者简介: 王娜 (1992~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为海洋污染化学, E-mail: wangna17@mails.ucas.edu.cn

* 通信作者, E-mail: whzhao@qdio.ac.cn

现,我国近海主要河口、海湾水体中 N/P 比值几乎都偏离 Redfield 比值^[10]. 海水中的氮磷比将影响海洋浮游植物的生长速率和细胞内物质合成. 那么红霉素与营养盐是否存在复合效应? 目前这方面的研究相对匮乏.

本文以米氏凯伦藻(*Karenia mikimotoi*)、东海原甲藻(*Prorocentrum donghaiense*)和中肋骨条藻(*Skeletonema costatum*)为研究对象. 在不同营养盐比例下,以红霉素为目标抗生素,以藻类生物量、光合色素含量、超氧化物歧化酶(SOD)活性、丙二醛(MDA)和可溶性蛋白质含量为评价指标,分析了红霉素与营养盐对微藻生理的复合影响,以期为评估抗生素对海洋生态的影响提供一定理论依据.

表 1 培养液中营养盐浓度/ $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$

Table 1 Nutrients concentrations in culture/ $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$

项目	空白	N 限制	P 限制	Si 限制
N	440	220	440	440
P	27.5	27.5	13.75	27.5
Si	440	440	440	220
N:P:Si	16:1:16	8:1:16	32:1:32	16:1:8

红霉素购于北京索莱宝科技有限公司. 设置红霉素的添加浓度系列为 0、0.5、1、10、100 和 1 000 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$. 设置营养比例添加系列分别为米氏凯伦藻和东海原甲藻为 N:P = 16:1、N:P = 8:1 和 N:P = 32:1; 中肋骨条藻为 N:P:Si = 16:1:16、N:P:Si = 8:1:16、N:P:Si = 32:1:32 和 N:P:Si = 16:1:8.

进行全因子实验,对抗生素浓度-营养状态组合中的每一种设置 3 个平行. 每天定时取样,在显微镜下用计数框计数,连续 13 d 测定微藻的生物量,并绘制生长曲线.

取培养结束后的藻液 5 mL 过滤,用 80% 丙酮萃取,测定波长为 663、645 和 470 nm 下的吸光值,计算其叶绿素 a、叶绿素 b 和类胡萝卜素含量($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$). 计算公式如下:

$$\text{叶绿素 a (Chl-a)} = 12.7D_{663} - 2.69D_{645}$$

$$\text{叶绿素 b (Chl-b)} = 22.9D_{645} - 4.68D_{663}$$

$$\text{类胡萝卜素 (Car)} = (1000D_{470} - 3.27\text{Chl-a} - 104\text{Chl-b})/229$$

采用南京建成公司相应的试剂盒测定 SOD ($\text{U}\cdot\text{个}^{-1}$)、MDA ($\text{nmol}\cdot\text{个}^{-1}$) 和可溶性蛋白质含量(每个细胞中可溶性蛋白质的质量,单位表示为 $\text{g}\cdot\text{个}^{-1}$).

以红霉素浓度为 0 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 N:P = 16:1 (或 N:P:Si = 16:1:16) 时的微藻的光合色素含量、SOD、MDA 和可溶性蛋白质含量为对照组,计算其他处理条件下(即实验组)相对对照组的微藻生理指标相

1 材料与方法

1.1 实验方法

米氏凯伦藻、东海原甲藻和中肋骨条藻均由中国科学院海洋研究所藻种库提供. 实验前取处于对数期的藻种过滤,饥饿培养 2 d 后待用. 将培养的藻种接种于 500 mL 的锥形瓶中,每个锥形瓶的培养体积为 400 mL,接种的初始密度为 5×10^2 个 $\cdot\text{mL}^{-1}$. 本实验采用的光照强度为 (2500 ± 100) lx,光暗周期比为 12 h:12 h,培养温度 $(21 \pm 1)^\circ\text{C}$. 培养液痕量元素及微生素按 f/2 配方配制,营养盐浓度按照表 1 浓度配制. 其中米氏凯伦藻和东海原甲藻培养液中不添加硅营养盐.

对变化量(R),计算公式为:

$$R = \frac{E - C}{C} \times 100\%$$

式中, R 表示微藻的生理指标相对变化量; E 表示实验组生理指标的平均值; C 表示对照组生理指标的平均值.

根据各生理指标相对变化量,绘制柱形图. R 为正值表示该实验处理对微藻的生理指标有促进作用, R 为负值表示有抑制作用.

1.2 数据处理分析

采用 SPSS 22.0 进行差异性分析和相关性分析,实验差异显著性水平为 $P < 0.05$.

2 结果与分析

2.1 红霉素和营养盐对微藻的生长的复合影响

当添加的红霉素浓度为 1 000 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,米氏凯伦藻的生长受到轻微抑制,但并不显著 ($P > 0.05$). 即在本实验范围内,红霉素对米氏凯伦藻的生长并无明显影响[图 1(a)]. 营养盐限制时,米氏凯伦藻的生长均受到了抑制. 同一红霉素浓度下,不同营养盐条件处理下的细胞密度: N:P = 16:1 > N:P = 32:1 > N:P = 8:1; 且同一红霉素浓度下,本实验范围内缺氮对米氏凯伦藻影响最明显 ($P < 0.05$); 缺磷虽会抑制米氏凯伦藻的生长,但并不显著 ($P > 0.05$).

虽然东海原甲藻和米氏凯伦藻都是甲藻,但红

霉素对东海原甲藻的生长的影响更明显 ($P < 0.05$). 如图 1(b) 所示, 当红霉素浓度为 $100 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $1000 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, 东海原甲藻的细胞密度显著减少 ($P < 0.05$). 在高浓度红霉素的胁迫下, 东海原甲藻的生长受到了显著抑制 ($P < 0.05$). 当红霉素浓度较低时, 红霉素对东海原甲藻的生长无明显影响 ($P > 0.05$). 氮限制 ($\text{N}:\text{P} = 8:1$) 和磷限制

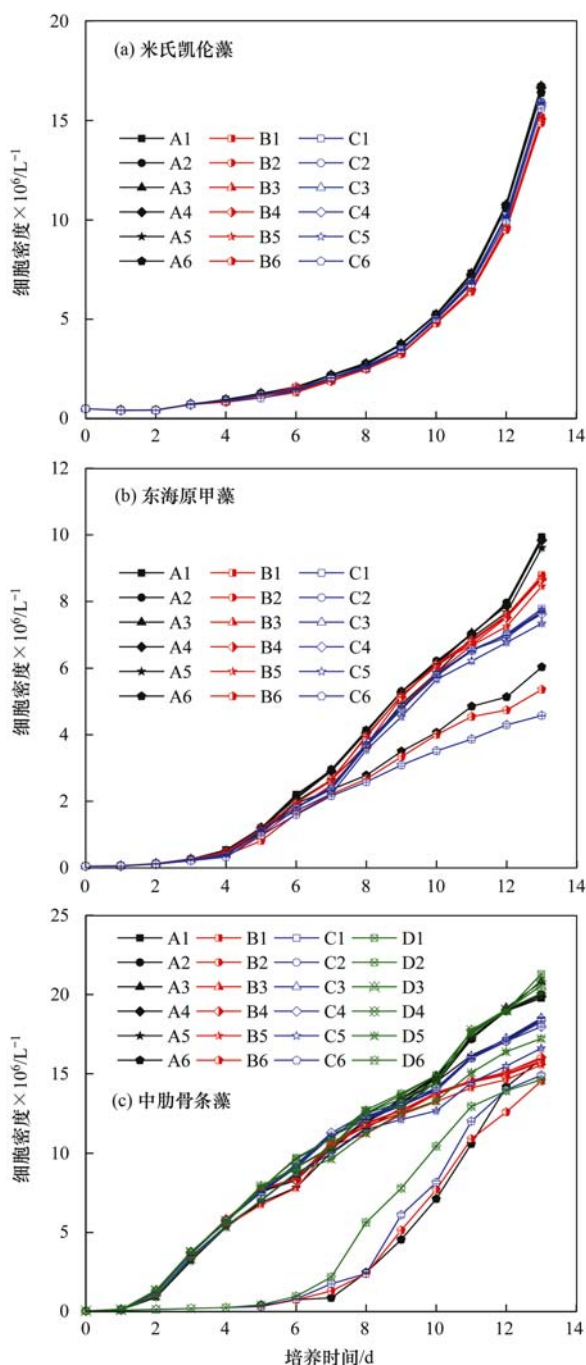
($\text{N}:\text{P} = 32:1$) 时, 东海原甲藻的细胞密度都比对照组 ($\text{N}:\text{P} = 16:1$) 低. 且磷限制时, 东海原甲藻的细胞密度最低. 磷限制 ($\text{N}:\text{P} = 32:1$) 对东海原甲藻的生长的影响最为显著 ($P < 0.05$). 红霉素浓度与营养盐限制对东海原甲藻的生物量的影响具有协同作用.

当红霉素浓度为 $100 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, 中肋骨条藻的细胞密度显著减少 ($P < 0.05$); 当红霉素浓度为 $1000 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, 其细胞密度的减少极显著 [$P < 0.01$, 图 1(c)]. 在高浓度红霉素的胁迫下, 中肋骨条藻的生长受到了显著抑制 ($P < 0.05$). 在这 3 种微藻中, 同一营养盐条件下红霉素对中肋骨条藻的胁迫最严重. 本实验中, 氮限制和磷限制时, 细胞密度较低. 本实验范围内, N 和 P 的限制对中肋骨条藻的影响更明显 ($P < 0.05$).

2.2 红霉素和营养盐对微藻的光合色素含量的复合影响

当 $\text{N}:\text{P} = 16:1$ 时, 米氏凯伦藻细胞中叶绿素 a 含量在红霉素浓度为 $0.5 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 时最高, 为 $1.17 \times 10^{-8} \text{mg}\cdot\text{个}^{-1}$, 增高了 23.7%, 之后随着处理浓度升高藻细胞中叶绿素 a 含量逐渐降低[图 2(a)]. 在氮限制组 ($\text{N}:\text{P} = 8:1$) 中, 除 B2 外红霉素各处理浓度中的米氏凯伦藻叶绿素 a 含量均显著低于 $0 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 时的叶绿素 a 含量 ($P < 0.05$). 在磷限制组 ($\text{N}:\text{P} = 32:1$) 中, 除红霉素浓度为 $10 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $100 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 时叶绿素 a 含量较 $0 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 时略有升高 (分别升高了 6.3% 和 10.5%), 在红霉素其他处理浓度中, 藻细胞中叶绿素 a 含量均显著降低 ($P < 0.05$). 因此, 高浓度红霉素会抑制米氏凯伦藻叶绿素 a 的合成. 当 $\text{N}:\text{P} = 16:1$ 时, 米氏凯伦藻细胞中叶绿素 a 含量在红霉素浓度为 $0.5 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 时最高; 但氮限制时, 米氏凯伦藻细胞中叶绿素 a 含量在红霉素浓度为 $0 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 时最高, 即氮限制时米氏凯伦藻的叶绿素 a 合成会对红霉素的浓度更敏感. 不同营养条件下, 米氏凯伦藻类胡萝卜素均呈现先升后降的趋势, 低浓度红霉素对米氏凯伦藻的类胡萝卜素有促进效果, 高浓度红霉素会抑制类胡萝卜素的合成.

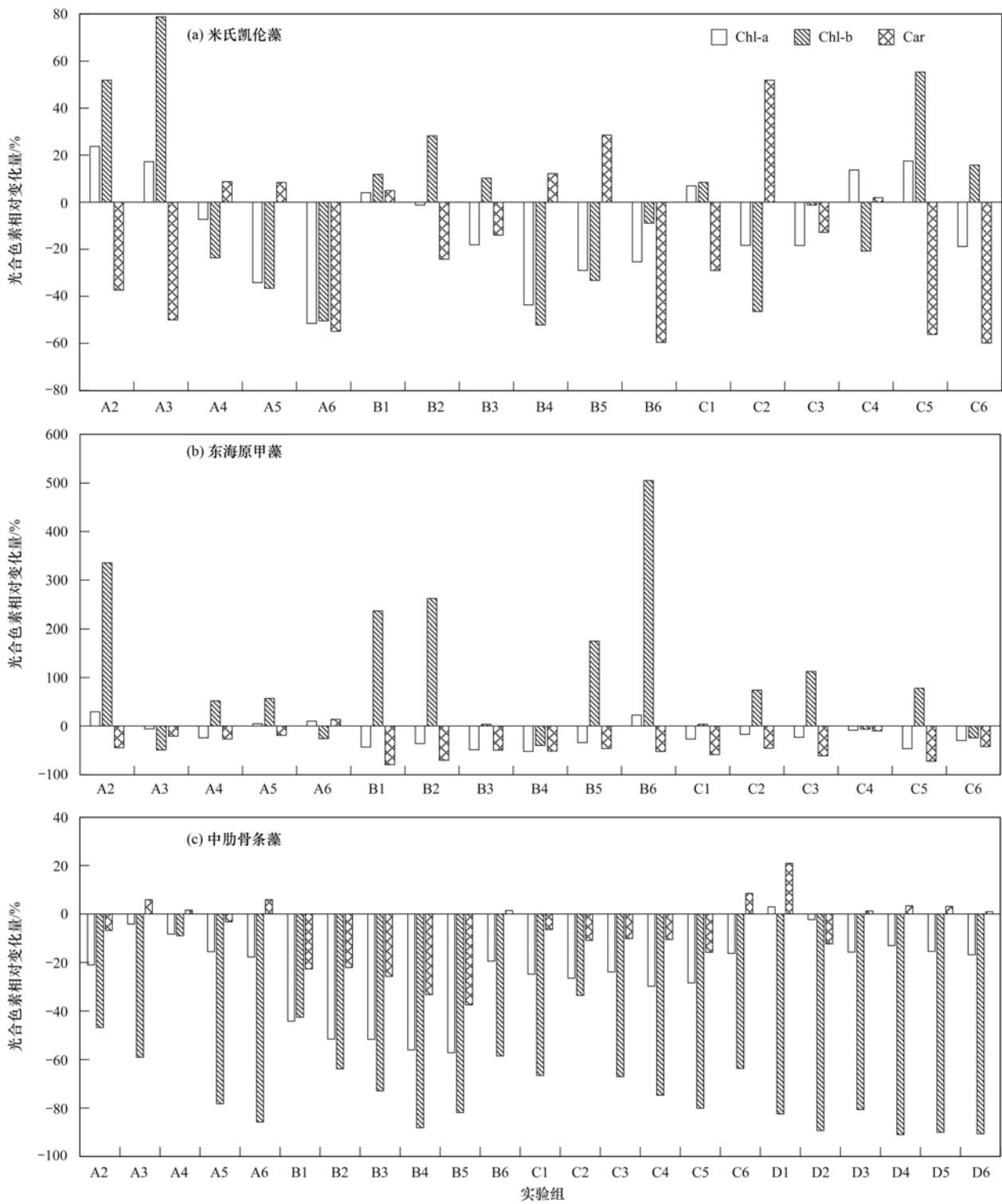
当 $\text{N}:\text{P} = 16:1$ 时, 不同于米氏凯伦藻, 东海原甲藻藻细胞中叶绿素 a 含量在红霉素浓度为 $0.5 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 时最高, 为 $3.80 \times 10^{-9} \text{mg}\cdot\text{个}^{-1}$, 之后随着处理浓度升高藻细胞中叶绿素 a 含量呈现先降后升的趋势. 当红霉素浓度为 $10 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, 藻细胞中叶绿素 a 含量最低, 为 $2.23 \times 10^{-9} \text{mg}\cdot\text{个}^{-1}$ [图 2(b)]. 在氮限制组 ($\text{N}:\text{P} = 8:1$) 中, 叶绿素 a 含量也显现出先降后升的趋势. 在磷限制组 ($\text{N}:\text{P} = 32:1$) 中, 叶绿素 a 含量随红霉素浓度的升高出现先升后



(a) 和 (b) 中 A 表示 $\text{N}:\text{P} = 16:1$, B 表示 $\text{N}:\text{P} = 8:1$, C 表示 $\text{N}:\text{P} = 32:1$; (c) 中 A 表示 $\text{N}:\text{P}:\text{Si} = 16:1:16$, B 表示 $\text{N}:\text{P}:\text{Si} = 8:1:16$, C 表示 $\text{N}:\text{P}:\text{Si} = 32:1:32$, D 表示 $\text{N}:\text{P}:\text{Si} = 16:1:8$; 1~6 表示红霉素的浓度分别为 $0, 0.5, 1, 10, 100$ 和 $1000 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, 下同

图 1 红霉素和营养盐对微藻的生长的复合影响

Fig. 1 Combined effects of erythromycin and nutrients on the growth of microalgae



(a) 和(b)中 A 表示 N:P=16:1, B 表示 N:P=8:1, C 表示 N:P=32:1; (c) 中 A 表示 N:P:Si=16:1:16, B 表示 N:P:Si=8:1:16, C 表示 N:P:Si=32:1:32, D 表示 N:P:Si=16:1:8; 1~6 表示红霉素的浓度分别为 0、0.5、1、10、100 和 1 000 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$

图 2 3 种微藻不同实验组的光合色素相对变化量

Fig. 2 Relative variation of photosynthetic pigments in different experimental groups of three microalgae

降的现象.此外,当 N:P=16:1 时,随着红霉素浓度升高,东海原甲藻类胡萝卜素含量逐渐增多.氮限制和磷限制时东海原甲藻细胞内类胡萝卜素含量先升高后降低.氮限制时,红霉素浓度为 100 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 时的类胡萝卜素含量最高,为 $1.20\times 10^{-9}\text{mg}\cdot\text{个}^{-1}$.磷限制时,红霉素浓度为 10 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 时的类胡萝卜素

含量最高,为 $2.02\times 10^{-9}\text{mg}\cdot\text{个}^{-1}$.

红霉素会抑制中肋骨条藻的叶绿素 a 的合成.由图 2(c) 可知, N:P=16:1 时,中肋骨条藻的叶绿素 a 含量随红霉素浓度升高逐渐降低.当 N:P:Si=8:1:16 和 N:P:Si=32:1:32 时,除红霉素浓度为 1 000 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 外,其他红霉素处理浓度下的中肋骨

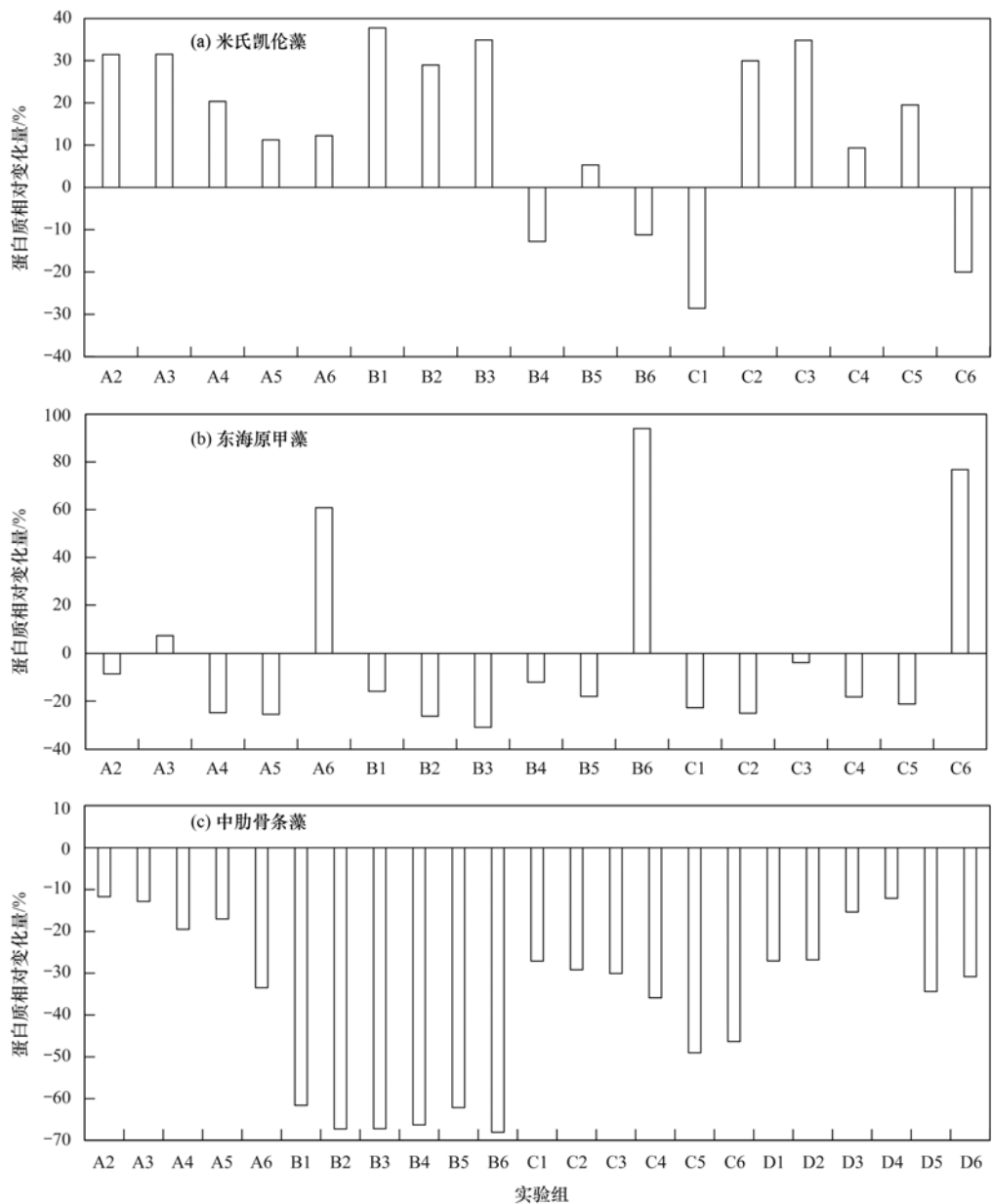
条藻叶绿素 a 含量均随红霉素浓度升高逐渐降低. 氮限制时, 叶绿素 a 含量明显低于其他营养条件 ($P < 0.05$). 缺氮会显著抑制中肋骨条藻叶绿素 a 的合成. 当 N:P:Si = 16:1:16 时, 中肋骨条藻类胡萝卜素无明显变化 ($P > 0.05$). 其他营养比例下, 中肋骨条藻类胡萝卜素含量随红霉素浓度升高逐渐降低, 即红霉素会抑制类胡萝卜素的合成.

2.3 红霉素和营养盐对微藻的可溶性蛋白质含量的复合影响

如图 3(a) 所示, 当 N:P = 16:1 时, 红霉素各处理浓度中的米氏凯伦藻细胞内的可溶性蛋白质含量均高于对照组 ($0 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$), 为先增高后下降的趋

势; 当红霉素浓度为 $1 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 时米氏凯伦藻细胞内的可溶性蛋白质含量最多, 为 $4.04 \times 10^{-10} \text{g}\cdot\text{个}^{-1}$, 较对照组增多了 31.5%. 当 N:P = 32:1 时, 米氏凯伦藻细胞内的可溶性蛋白质含量随红霉素浓度的增高先增高后下降, 在红霉素浓度为 $1 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 时可溶性蛋白质含量最多. 当 N:P = 8:1 时, 随着红霉素处理浓度的增高, 米氏凯伦藻细胞内的可溶性蛋白质含量逐渐降低. 当 N:P = 16:1 和 N:P = 32:1 时, 红霉素对米氏凯伦藻细胞内可溶性蛋白质存在低促高抑的现象. 当 N:P = 8:1 时, 红霉素会抑制米氏凯伦藻蛋白质的合成.

而对于东海原甲藻来说, 低浓度的红霉素对东



(a) 和 (b) 中 A 表示 N:P = 16:1, B 表示 N:P = 8:1, C 表示 N:P = 32:1; (c) 中 A 表示 N:P:Si = 16:1:16, B 表示 N:P:Si = 8:1:16, C 表示 N:P:Si = 32:1:32, D 表示 N:P:Si = 16:1:8; 1~6 表示红霉素的浓度分别为 0、0.5、1、10、100 和 1 000 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$

图 3 3 种微藻不同实验组的蛋白质相对变化量

Fig. 3 Relative variation of soluble proteins in different experimental groups of three microalgae

海原甲藻细胞内的蛋白质含量无明显影响 ($P > 0.05$). 当红霉素处理浓度为 $1\ 000\ \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, 东海原甲藻细胞内的蛋白质含量显著增多 ($P < 0.05$) [图 3(b)].

中肋骨条藻对红霉素的胁迫最敏感. 如图 3(c) 所示, 当 N:P:Si = 16:1:16 和 N:P:Si = 32:1:32 时, 中肋骨条藻的蛋白质含量随红霉素浓度升高逐渐降低; 当红霉素浓度为 $1\ 000\ \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, 其蛋白质含量较 $0\ \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 时分别降低了 33.5% 和 26.1%. 当 N:P:Si = 16:1:8 时, 细胞内蛋白质含量先增后减, 当红霉素浓度为 $10\ \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, 细胞内蛋白质含量最高, 为 $4.15 \times 10^{-11}\ \text{g}\cdot\text{个}^{-1}$, 增多了 20.3%. 氮限制时, 蛋白质含量明显低于其他营养条件 ($P < 0.05$). 此时氮为主要限制因子, 红霉素的影响不明显 ($P > 0.05$). 综上所述, 红霉素会抑制中肋骨条藻可溶性蛋白质的合成.

2.4 红霉素和营养盐对微藻的 SOD 和 MDA 的复合作用

当 N:P = 16:1 时, 米氏凯伦藻细胞内 SOD 活性随红霉素浓度增高逐渐升高, 当红霉素浓度为 $1\ 000\ \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, SOD 活性增高了 40.7% [图 4(a1)]; 红霉素处理后细胞内的 MDA 含量也要高于对照组 ($0\ \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$), 且 MDA 含量逐渐增多 [图 4(a2)]. 当 N:P = 8:1 时, 米氏凯伦藻细胞内的 SOD 活性随红霉素浓度增高而逐渐降低, MDA 则逐渐升高, 两者成显著负相关 ($P < 0.05$, $r = -0.863$). 当 N:P = 32:1 时, 细胞内的 SOD 呈现先降低后升高的趋势, MDA 含量在红霉素处理浓度为 $1\ 000\ \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 时显著增高 ($P < 0.01$), 增高了 138%. 当红霉素浓度为 $0\ \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, N 和 P 限制时细胞内的 MDA 含量显著增多 ($P < 0.05$), 分别增多了 276% 和 245%. 氮限制 MDA 含量更多, 氧化损伤更严重. 红霉素浓度升高, 细胞内 MDA 增多, 细胞氧化损伤加重. 氮限制时, 红霉素对米氏凯伦藻的胁迫会更严重.

当 N:P = 16:1 和氮限制 (N:P = 8:1) 时, 东海原甲藻细胞内的 SOD 和 MDA 均成显著正相关 ($P < 0.01$, $r = 0.838$ 和 $P < 0.01$, $r = 0.802$), 都随着红霉素处理浓度的增高而增高; 受到高浓度红霉素 ($\geq 100\ \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$) 的胁迫后, 细胞内的 SOD 和 MDA 显著增高 ($P < 0.05$) [图 4(b)]. 磷限制 (N:P = 32:1) 时, 当红霉素浓度 $\leq 100\ \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, 细胞内的 SOD 活性随红霉素浓度增高而逐渐降低. 磷限制 (N:P = 32:1) 时, 细胞内的 MDA 含量最多, 细胞氧化损伤最严重. 当氮磷比为 16:1 时, 东海原甲藻细胞的抗氧化能力随着红霉素浓度升高而逐渐增高; 当磷限制时, 其抗氧化能力随红霉素浓度升高而逐渐降低.

磷限制时, 红霉素对东海原甲藻的胁迫最严重.

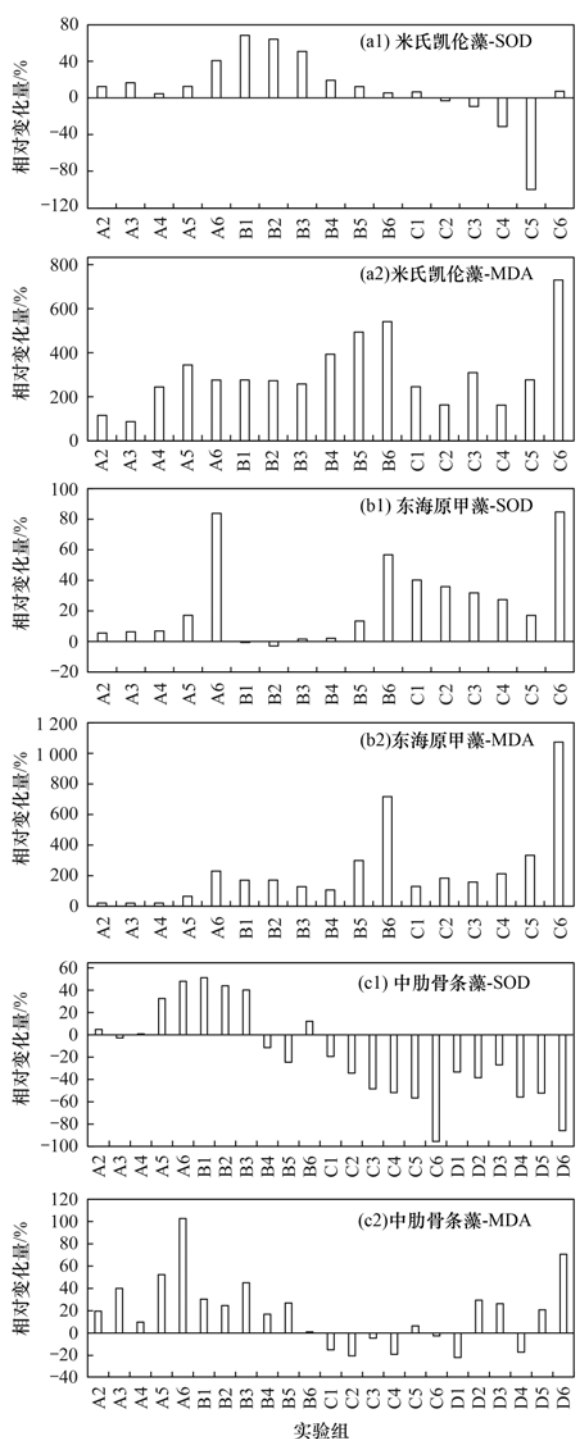
当 N:P:Si = 16:1:16 时, 中肋骨条藻的 SOD 活性随红霉素浓度升高逐渐增大; 其他营养状态时 SOD 活性随红霉素浓度升高逐渐减小 [图 4(c1)]. 磷限制和硅限制时, SOD 活性明显低于其他营养条件 ($P < 0.05$). 当 N:P:Si = 16:1:16 和 N:P:Si = 16:1:8 时, 中肋骨条藻的 MDA 含量随红霉素浓度升高逐渐增多. 当 N:P:Si = 16:1:16 时, 中肋骨条藻的 SOD 和 MDA 成显著正相关 ($P < 0.01$, $r = 0.735$). 当 N:P:Si = 16:1:16 时, 中肋骨条藻细胞的抗氧化能力随着红霉素浓度升高而逐渐增高, 在营养盐限制时其抗氧化能力会逐渐降低. 营养盐限制使得中肋骨条藻对红霉素的耐受性降低.

3 讨论

营养盐比例对于微藻的影响的研究一直是热点. 马龙等^[11]的研究认为米氏凯伦藻生长的最适氮磷比值为 24:4, 缺氮和缺磷都不利于米氏凯伦藻的生长. 沈益绿等^[12]的研究认为磷更能影响东海原甲藻的增殖. 刘东艳等^[13]的研究认为中肋骨条藻的最适氮磷比为 16:1, 氮磷比大于 16 时的生长速度要优于氮磷比小于 16 时的生长速度. 本实验中, 米氏凯伦藻、东海原甲藻和中肋骨条藻的最适营养盐比例为 N:P = 16:1. 缺氮对米氏凯伦藻影响最明显; 缺磷对东海原甲藻影响最明显; 对中肋骨条藻来说, N 和 P 的限制对其影响较硅更明显, 缺氮对中肋骨条藻影响最明显. 本次实验结果与上述结果相同.

目前研究发现, 红霉素抑制了淡水微藻莱茵衣藻 (*Chlamydomonas reinhardtii*)^[14] 和铜绿微囊藻^[3] 种群的生长, 对海洋硅藻三角褐指藻 (*Phaeodactylum tricornutum*)^[14] 的生长有抑制作用. 本研究发现, 实验范围内, 红霉素对米氏凯伦藻的生长并无明显影响, 高浓度红霉素 ($\geq 100\ \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$) 会显著抑制东海原甲藻和中肋骨条藻的生长.

光合色素是反映逆境胁迫状况的重要指标之一. 刘滨扬^[6]的研究发现红霉素可以显著抑制羊角月牙藻的叶绿素 a 生物合成. Bishop 等^[15, 16]的研究发现, 氯霉素可以显著抑制纤细裸藻 (*Euglena gracilis*) 的叶绿素生物合成. 张文慧等^[17]的研究也发现在土霉素胁迫作用下, 纤细裸藻叶绿素 a 合成受到抑制. 红霉素、氯霉素和土霉素同属于蛋白质合成抑制类抗生素, 应具有相似的效应. 本实验中, 红霉素浓度低于 $0.5\ \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 会促进米氏凯伦藻和东海原甲藻的叶绿素 a 的合成, 此时低浓度红霉素对米氏凯伦藻和东海原甲藻的生长有抑菌作用, 有利于米氏凯伦藻和东海原甲藻的生长. 红霉素是蛋白



(a1)、(a2)、(b1)和(b2)中 A 表示 N:P=16:1, B 表示 N:P=8:1, C 表示 N:P=32:1; (c1)和(c2)中 A 表示 N:P:Si=16:1:16, B 表示 N:P:Si=8:1:16, C 表示 N:P:Si=32:1:32, D 表示 N:P:Si=16:1:8; 1~6 表示红霉素的浓度分别为 0、0.5、1、10、100 和 1 000 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$

图 4 3 种微藻不同实验组的 SOD 和 MDA 相对变化量

Fig. 4 Relative variation of SOD and MDA in different experimental groups of three microalgae

质合成抑制类抗生素,其作用机制主要是与核糖核蛋白体的 50S 亚单位相结合,抑制肽酰基转移酶,抑制细菌蛋白质的合成^[18]。而叶绿体基因与原核生物基因相似,因此红霉素可能对叶绿体基因的表达有

抑制作用,对叶绿体蛋白质的合成有抑制作用,导致叶绿素含量降低^[19~21]。所以红霉素浓度高于 0.5 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 时会抑制米氏凯伦藻和东海原甲藻中叶绿素 a 的合成;红霉素会抑制中肋骨条藻叶绿素 a 的合成。在叶绿素 a 的合成方面,中肋骨条藻对红霉素的敏感性最高。低浓度红霉素对不同藻影响的差异机制还有待进一步研究。但本实验中,当红霉素浓度为 1 000 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 时的东海原甲藻细胞中叶绿素 a 含量较红霉素浓度为 100 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 时的含量高,这可能是由于红霉素 1 000 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 时东海原甲藻细胞密度较低,营养盐相对充足,高营养盐组的东海原甲藻叶绿素 a 浓度要高于营养盐缺乏组的浓度^[22]。

类胡萝卜素除了在光合作用中有一定作用外,还可以淬灭活性氧,防止膜脂过氧化,保护叶绿素和光合机能^[23]。因此非营养盐限制时,米氏凯伦藻、东海原甲藻和中肋骨条藻受红霉素胁迫,类胡萝卜素含量增多,细胞抗氧化能力增强,有利于保护细胞光合机能。但营养盐限制时,米氏凯伦藻和东海原甲藻受红霉素胁迫细胞中类胡萝卜素含量先增多后减少,高浓度红霉素胁迫下,细胞不能再维持产生和清除自由基的动态平衡,此时的红霉素浓度已经超过调节限度,细胞氧化损伤严重,光合作用受到抑制;营养盐限制时,中肋骨条藻受红霉素胁迫细胞中类胡萝卜素含量逐渐减少,即营养盐限制时,0.5 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 红霉素就已超过中肋骨条藻的调节限度,膜脂过氧化,光合作用受到抑制。营养盐限制使得微藻在红霉素对微藻光合色素合成方面的胁迫更加敏感。

可溶性蛋白质与细胞内多种代谢过程紧密相关,在受到外界胁迫时,可溶性蛋白质含量增多,以维持细胞较低的渗透势,提高自身抗性;当超过其调节限度时,蛋白质含量降低,蛋白质合成受损^[24]。本实验中,非氮限制时,低浓度红霉素 ($\leq 1 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)胁迫下米氏凯伦藻可溶性蛋白质含量上升,以提高自身抗性;高浓度红霉素超过其调节限度,蛋白质含量降低,蛋白质合成受损。氮限制时,红霉素会抑制米氏凯伦藻蛋白质的合成,即氮限制时,低浓度红霉素已超过米氏凯伦藻的调节限度,蛋白质合成受损。而对于东海原甲藻来说,当红霉素浓度为 1 000 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,细胞内的蛋白质含量较其他处理组显著增多,高浓度红霉素有利于东海原甲藻可溶性蛋白质的合成,提高自身抗性。红霉素会抑制中肋骨条藻的蛋白质合成,即 0.5 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 红霉素就已超过中肋骨条藻的调节限度,因此蛋白质合成受损。中肋骨条藻对红霉素的敏感性最高。

MDA 是脂质过氧化的产物,其含量可以解释肋

迫下的氧化和脂质损伤. SOD 是氧化应激的重要生物指标. 受到红霉素胁迫时, 微藻产生大量的 MDA, 细胞氧化损伤程度随红霉素浓度的升高而增大, 抗氧化能力也随之升高. 当超过其调节限度时, 抗氧化能力降低. Wu 等^[25]的研究发现添加土霉素可加重等鞭金藻 (*Isochrysis galbana*) 细胞膜过氧化. Liu 等^[26]的研究也发现具有抑制蛋白质功能的氟苯尼考能加重中肋骨条藻的氧化损伤. 此次实验也发现, 红霉素可以加重米氏凯伦藻、东海原甲藻和中肋骨条藻的氧化损伤. 同时营养盐限制会使微藻氧化损伤加重, 抗氧化能力降低.

综上所述, 红霉素和营养盐结构会影响米氏凯伦藻、东海原甲藻和中肋骨条藻的生长. 不同的营养结构下, 同种微藻对红霉素的响应是存在差异的. 因此, 在评估海水中的红霉素对微藻生理的影响时, 需要考虑海域的营养盐结构. 受人类活动、降水变化等的影响, 海域营养盐结构失衡, 存在时空变化^[27]. 营养盐结构不同的海域里, 同种微藻对红霉素的响应是不同的. 同一海域, 不同季节时, 同种微藻对红霉素的响应也是有差异的. 不同微藻对红霉素的敏感性是不同的. 在这 3 种微藻中, 中肋骨条藻最敏感, 其次是东海原甲藻, 米氏凯伦藻最不敏感. 在红霉素的胁迫下, 这 3 种微藻中米氏凯伦藻可能更具竞争力. 在种间竞争中, 米氏凯伦藻在面临红霉素胁迫时可能更具优势.

4 结论

本实验范围内, 红霉素的浓度对米氏凯伦藻的生长影响不显著, 高于 $100 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 的红霉素会显著抑制东海原甲藻和中肋骨条藻的生长. 红霉素可以加重米氏凯伦藻、东海原甲藻和中肋骨条藻的氧化损伤. 不同微藻对红霉素的敏感性是不同的, 其中中肋骨条藻最敏感, 而米氏凯伦藻最不敏感. 不同的营养结构下, 同种微藻对红霉素的响应是存在差异的. 营养盐限制会降低米氏凯伦藻、东海原甲藻、中肋骨条藻对红霉素的耐受性. 红霉素和营养盐会对微藻的生长产生复合影响, 会对海洋生态产生一定影响. 目前, 海水营养盐结构严重失衡, 虽然海水中的抗生素浓度为 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$ 至 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, 可能没有实验中的红霉素浓度那么高, 但若不加控制, 可能会对海水中的微藻造成严重影响, 进而破坏海洋生态环境的生态平衡.

参考文献:

- [1] Gothwal R, Shashidhar T. Antibiotic pollution in the environment: a review[J]. Clean-Soil, Air, Water, 2015, **43**(4): 479-489.
- [2] 刘昌孝. 当代抗生素发展的挑战与思考[J]. 中国抗生素杂志, 2017, **42**(1): 1-12.
- [3] Liu C X. Challenges and thinking of current antibiotic development[J]. Chinese Journal of Antibiotics, 2017, **42**(1): 1-12.
- [4] Zhang R J, Tang J H, Li J, et al. Antibiotics in the offshore waters of the Bohai Sea and the Yellow Sea in China: occurrence, distribution and ecological risks[J]. Environmental Pollution, 2013, **174**: 71-77.
- [5] Zheng Q, Zhang R J, Wang Y H, et al. Occurrence and distribution of antibiotics in the Beibu Gulf, China: impacts of river discharge and aquaculture activities [J]. Marine Environmental Research, 2012, **78**: 26-33.
- [6] 杨弯弯, 武氏秋贤, 吴亦潇, 等. 恩诺沙星和硫氰酸红霉素对铜绿微囊藻的毒性研究[J]. 中国环境科学, 2013, **33**(10): 1829-1834.
- [7] Yang W W, Hien V T T, Wu Y X, et al. Toxicity of enrofloxacin and erythromycin thiocyanate on *Microcystis aeruginosa*[J]. China Environmental Science, 2013, **33**(10): 1829-1834.
- [8] 刘滨扬. 红霉素、环丙沙星和磺胺甲噁唑对羊角月牙藻的毒性效应及其作用机理[D]. 广州: 暨南大学, 2011.
- [9] Liu B Y. Toxic effects and its mechanism of erythromycin, ciprofloxacin and sulfamethoxazole to *Selenastrum capricornutum* [D]. Guangzhou: Jinan University, 2011.
- [10] Perales-Vela H V, García R V, Gómez- Juárez E A, et al. Streptomycin affects the growth and photochemical activity of the alga *Chlorella vulgaris* [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2016, **132**: 311-317.
- [11] Bashir K M I, Cho M G. The effect of kanamycin and tetracycline on growth and photosynthetic activity of two chlorophyte algae [J]. BioMed Research International, 2016, **2016**: 5656304.
- [12] 王洪斌, 成明, 杨艳艳, 等. 绿色巴夫藻和米氏凯伦藻对 3 种常见抗生素胁迫的响应研究[J]. 水产科学, 2012, **31**(6): 329-332.
- [13] Wang H B, Cheng M, Yang Y Y, et al. The responses of algae *Pavlova viridis* and *Karenia mikimotoi* to three conventional antibiotics stress[J]. Fisheries Science, 2012, **31**(6): 329-332.
- [14] 祝雅轩, 裴绍峰, 张海波, 等. 莱州湾营养盐和富营养化特征与研究进展[J]. 海洋地质前沿, 2019, **35**(4): 1-9.
- [15] Zhu Y X, Pei S F, Zhang H B, et al. Characteristics and research progress of nutrients and eutrophication in Laizhou Bay, China[J]. Marine Geology Frontiers, 2019, **35**(4): 1-9.
- [16] 马龙, 王培刚, 朱葆华, 等. 米氏凯伦藻与亚心形扁藻在不同营养盐水平下的种间竞争[J]. 海洋环境科学, 2013, **32**(2): 221-226.
- [17] Ma L, Wang P G, Zhu B H, et al. Inter-specific competition of *Karenia mikimotoi* and *Platymonas subcordiformis* under different level of nutrients[J]. Marine Environmental Science, 2013, **32**(2): 221-226.
- [18] 沈益绿, 李道季. 不同营养盐水平对东海原甲藻和米氏凯伦藻生长的影响[J]. 海洋渔业, 2016, **38**(4): 415-423.
- [19] Shen A L, Li D J. Effects of different nutrients levels on the growth of *Prorocentrum donghaiense* and *Karenia mikimotoi* [J]. Marine Fisheries, 2016, **38**(4): 415-423.
- [20] 刘东艳, 孙军, 陈宗涛, 等. 不同氮磷比对中肋骨条藻生长特性的影响[J]. 海洋湖沼通报, 2002, (2): 39-44.
- [21] Liu D Y, Sun J, Chen Z T, et al. Effect of N/P ratio on the growth of a red tide diatom *Skeletonema costatum* [J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 2002, (2): 39-44.

- [14] Sendra M, Moreno-Garrido I, Blasco J, *et al.* Effect of erythromycin and modulating effect of CeO₂ NPs on the toxicity exerted by the antibiotic on the microalgae *Chlamydomonas reinhardtii* and *Phaeodactylum tricornutum* [J]. Environmental Pollution, 2018, **242**: 357-366.
- [15] Bishop D G, Bain J M, Smillie R M. The effect of antibiotics on the ultrastructure and photochemical activity of a developing chloroplast[J]. Journal of Experimental Botany, 1973, **24**(2): 361-362.
- [16] Bishop D G. The effect of polyene antibiotics on photosynthetic electron transfer[J]. Journal of Experimental Botany, 1974, **25**(86): 491-502.
- [17] 张文慧, 窦勇, 高金伟, 等. 纤丝裸藻对 5 种抗生素的胁迫响应[J]. 水生态学杂志, 2017, **38**(6): 48-56.
Zhang W H, Dou Y, Gao J W, *et al.* Response of *Euglena gracilis* to five kinds of antibiotic stress [J]. Journal of Hydroecology, 2017, **38**(6): 48-56.
- [18] 刘巨源, 张晓丹. 药理学[M]. 郑州: 郑州大学出版社, 2007.
- [19] Sandmann G, Böger P. Inhibition of photosynthetic electron transport by amphotericin B[J]. Physiologia Plantarum, 1981, **51**(3): 326-328.
- [20] Koussevitzky S, Nott A, Mockler T C, *et al.* Signals from chloroplasts converge to regulate nuclear gene expression [J]. Science, 2007, **316**(5825): 715-719.
- [21] Vannini C, Domingo G, Marsoni M, *et al.* Effects of a complex mixture of therapeutic drugs on unicellular algae *Pseudokirchneriella subcapitata* [J]. Aquatic Toxicology, 2010, **101**(2): 459-465.
- [22] 孙开明, 李瑞香, 李艳, 等. 东海原甲藻光合系统 II 荧光参数在种群生长中的变化[J]. 海洋环境科学, 2016, **35**(2): 226-230.
Sun K M, Li R X, Li Y, *et al.* Changes of fluorescence parameters of photosynthetic system II in *Prorocentrum donghaiense* Lu during population growth [J]. Marine Environmental Science, 2016, **35**(2): 226-230.
- [23] Thurnham D. Anti-oxidant vitamins and cancer prevention [J]. Journal of Micronutrient Analysis, 1990, **7**(3-4): 279-299.
- [24] 万禁禁. 淡水微藻对几种抗生素胁迫的响应研究[D]. 泉州: 华侨大学, 2014.
Wan J J. Study the response of freshwater microalgae to several antibiotics stress[D]. Quanzhou: Huaqiao University, 2014.
- [25] Wu C L, He C Q. Interaction effects of oxytetracycline and copper at different ratios on marine microalgae *Isochrysis galbana* [J]. Chemosphere, 2019, **225**: 775-784.
- [26] Liu W H, Ming Y, Huang Z W, *et al.* Impacts of florfenicol on marine diatom *Skeletonema costatum* through photosynthesis inhibition and oxidative damages [J]. Plant Physiology and Biochemistry, 2012, **60**: 165-170.
- [27] Wei Q S, Yao Q Z, Wang B D, *et al.* Long-term variation of nutrients in the southern Yellow Sea [J]. Continental Shelf Research, 2015, **111**: 184-196.

CONTENTS

Contribution of Emissions from the Iron and Steel Industry to Air Quality in China	TANG Ling, XUE Xiao-da, BO Xin, <i>et al.</i> (2981)
Interannual Characteristics of Fine Particulate Matter in North China and Its Relationship with Land Use and Land Cover Change	YANG Wei, JIANG Xiao-li (2995)
Evaluation of the Reduction in PM _{2.5} Concentration During the National Traditional Games of Ethnic Minorities in Zhengzhou	WANG Shen-bo, LOU Ya-min, XU Yi-fei, <i>et al.</i> (3004)
Pollution Characteristics of Water-soluble Inorganic Ions in Chengdu in Summer and Winter	FENG Yan-peng, ZHANG Jun-ke, HUANG Xiao-juan, <i>et al.</i> (3012)
Analysis of Transport Pathways and Potential Sources of Atmospheric Particulate Matter in Zigong, in South of Sichuan Province	LEI Yu, ZHANG Xiao-ling, KANG Ping, <i>et al.</i> (3021)
Source Composition Spectrum of Volatile Organic Compounds in Typical Industries in Sichuan	XU Chen-xi, CHEN Jun-hui, HAN Li, <i>et al.</i> (3031)
Source Profiles of Industrial Emission-Based VOCs in Chengdu	ZHOU Zi-hang, DENG Ye, ZHOU Xiao-ling, <i>et al.</i> (3042)
Emission Characteristics and Risk Assessment of Volatile Organic Compounds from Typical Factories in Zhengzhou	QI Yi-jin, NI Jing-wei, ZHAO Dong-xu, <i>et al.</i> (3056)
Characteristics, Source Apportionment, and Environmental Impact of Volatile Organic Compounds in Summer in Yangquan	NIU Yue-yuan, LIU Zhuo-cheng, LI Ru-mei, <i>et al.</i> (3066)
Characteristics and Reactivity of VOCs in Hangzhou During a Typical Photochemical Pollution Episode	JING Sheng-ao, YE Xu-hong, GAO Ya-qin, <i>et al.</i> (3076)
Pollution Characteristics and Sensitivity of Surface Ozone in a Typical Heavy-Industry City of the North China Plain in Summer	OU Sheng-ju, WEI Wei, WANG Xiao-qi, <i>et al.</i> (3085)
Source Apportionment of Atmospheric Ammonia; Sensitivity Test Based on Stable Isotope Analysis in R Language	GU Meng-na, PAN Yue-peng, HE Yue-xin, <i>et al.</i> (3095)
Distribution Characteristics and Source Analysis of Atmospheric Mercury Speciation in Suzhou	LU Ren-jie, WU Ye-zheng, ZHANG Xiao-jie, <i>et al.</i> (3102)
Emission Characteristics of Light-Duty Gasoline Vehicle Exhaust Based on Acceleration Simulation Mode	XIE Yan, LIAO Song-di, ZHU Man-ni, <i>et al.</i> (3112)
Comparative Analysis of NO _x Emission Characteristics of Non-Ultra-Low- and Ultra-Low-Emission Coal-Fired Power Units During the Start-Up Process	LI Hui, ZHU Fa-hua, SUN Xue-li, <i>et al.</i> (3121)
Source Identification and Pollution Characteristics of Heavy Metals in Suspended Particles of Urban Road Dust from Xingtai City	SONG Yi, LU Xin-wei, ZHOU Xiao, <i>et al.</i> (3130)
Impacts of Leaf Surface Micromorphology Variation on the Ability to Capture Particulate Matter	WEI Wen-jun, WANG Bing, NIU Xiang (3136)
Analysis of Hydrogen and Oxygen Stable Isotope Characteristics and Vapor Sources of Precipitation in the Guanzhong Plain	ZHAO Ming-hua, LU Yan-wei, Rachana Heng, <i>et al.</i> (3148)
Analysis of Nitrate Sources in Different Waters of a Karst Basin	TIAN Yong-zhu, HAN Zhi-wei, ZHAO Ran, <i>et al.</i> (3157)
Analysis of Nitrogen Pollution and Its Pollution Sources in the Muli River Basin	QI Ran, XU Fei-fei, YANG Fan, <i>et al.</i> (3165)
Temporal and Spatial Variation Patterns of the Environmental Elements in the Sediments of the Liaohu Estuary and the Related Influencing Factors	QI Yue, SUN Yong-guang, MA Gong-bo, <i>et al.</i> (3175)
Transport Characteristics of Phosphorus Sources at the Multi-scale Watershed and the Associated Ecological Effects on Poyang Lake	WANG Shuo-yue, GAO Yang, LU Yao, <i>et al.</i> (3186)
Risk Assessment and Source Analysis of Heavy Metals in the River of a Typical Bay Watershed	WANG Lei, WANG Wen-dong, LIU Dong, <i>et al.</i> (3194)
Concentrations of Typical Perfluoroalkyl Acids and Contributions of Their Precursors in the Water of the Le'an River in China	ZHANG Hui, WANG Shi-liang, YU Yang (3204)
Distribution Characteristics of Microplastics in Surface Water and Sediments of Haizhou Bay, Lianyungang	LI Zheng, GAO Chun-mei, YANG Jin-long, <i>et al.</i> (3212)
Profiles and Risk of Antibiotic Resistance Genes in Domestic Wells in the Maozhou River Basin	WU Dai-ling, ZOU Hai-yan, HE Lu-xi, <i>et al.</i> (3222)
Release Mechanisms of Iron and Manganese from Sediments in Jinpen Reservoir	LU Lin-chao, HUANG Ting-lin, LI Nan, <i>et al.</i> (3231)
Characterization of Microplastic Pollution of Sediments from Urban Lakes	WANG Xuan, NIU Si-ping, SONG Xiao-long, <i>et al.</i> (3240)
Structural Characteristics of Microbial Communities in the Sediments of the Niyang River in Tibet	LIU Xiao-dan, HUANG Yi, WANG Yong-hua, <i>et al.</i> (3249)
Combined Effects of Erythromycin and Nutrients on Microalgae in Seawater	WANG Na, ZHAO Wei-hong, MIAO Hui (3257)
Longitudinal Distribution of Benthic Macroinvertebrates Affected by a Hydropower Plant Cascade in the Mudan River	WEN Jia-qi, WANG Hao-ran, CHEN Yong-can, <i>et al.</i> (3266)
Analysis of Rainwater Runoff Pollution Characteristics of Various Typical Underlying Surfaces in Ningbo	XU Yu-jie, GONG Yue-min, BI Jun-peng, <i>et al.</i> (3275)
Water Quality and Bacterial Population Driving Mechanism of Algae Vertical Succession in Stratified Reservoir	YAN Miao-miao, CHEN Sheng-nan, HUANG Ting-lin, <i>et al.</i> (3285)
Distribution Characteristics of Disinfection By-Products and the Effects of Booster Chlorination in Long-Distance Water Supply Systems	BI Wei-wei, YE Sheng, YU Jian-quan, <i>et al.</i> (3297)
Occurrence and Prediction Model of Disinfection By-Products in Tap Water	LIU Jun-ping, CHEN Jing-ji, SONG Ya-li, <i>et al.</i> (3307)
Adsorption Characteristics and Mechanism of Cadmium in Water by Alkali and Magnetic Composite Modified Wheat Straw Biochar	CUI Zhi-wen, REN Yan-fang, WANG Wei, <i>et al.</i> (3315)
Enhanced Chromate (VI) Removal Characteristics and Mechanism Using Graphene Oxide Immobilized Nanoscale Zero-Valent Iron Coupled with a Weak Magnetic Field (GO-nFe ⁰ /WMF)	JI Meng, BAO Jian-guo, ZHU Xiao-wei, <i>et al.</i> (3326)
Characteristics and Influencing Factors of Monothioarsenate Adsorption on Goethite	LIAO Dan-xue, SHAN Hui-mei, ZHANG Jin-xian, <i>et al.</i> (3337)
Fast Start-Up ANAMMOX Operation Strategy and Flora Characteristics of a Biofilter	WANG Xiao-tong, YANG Hong, SU Yang, <i>et al.</i> (3345)
Effects of Aeration Strategy on Denitrifying Performance of Activated Sludge Processes in Treating Low-Carbon-Source Municipal Wastewater	ZHANG Xin-ni, CHI Yu-lei, WANG Qian, <i>et al.</i> (3356)
Effect of Hydroxylamine on Community of ANAMMOX Sludge	XING Chong-yang, FAN Yu-chen, CHEN Xuan, <i>et al.</i> (3365)
Microbial Diversity of Filamentous Sludge Bulking at Low Temperature	GAO Chun-di, ZHANG Na, HAN Hui, <i>et al.</i> (3373)
Main Influencing Factors and Strengthening of Anaerobic Transformation of Excess Sludge in China	DONG Bin, GAO Jun, CHEN Si-si, <i>et al.</i> (3384)
Relationship Between CO ₂ and CH ₄ Emissions in Urban Rivers and Sewage Discharging from a Municipal Drainage Network	LI Lei, CHEN Hao, ZHU Yi, <i>et al.</i> (3392)
Effects of Controlled-Release Urea Application on N ₂ O Emission in Maize-Cultivated Sandy Loam Soil	JIANG You-jin, YUAN Jun-ji, DING Wei-xin, <i>et al.</i> (3402)
Greenhouse Gas Emissions for Typical Open-Field Vegetable Production in China	ZHANG Fen, CHENG Tai-hong, CHEN Xin-ping, <i>et al.</i> (3410)
Effects of Water Management on Soil Properties and Cd Behavior of Typical Paddy Soils	HUANG Jing, LI Xin-yang, WEN Sha, <i>et al.</i> (3418)
Effect of Mn-Modified Biochar on the Characteristics of Aggregate Structure and the Content of Cd in Weakly Alkaline Cd-Contaminated Soil	SUN Tong, FU Yu-tong, LI Ke, <i>et al.</i> (3426)
Effects of the Immobilization of Cadmium in Soil Alone or Combined with Foliar Application of Selenium on Cadmium Accumulation in the Plants of Different Genotypes of Tsai-tai	CAO Kun-kun, LI Cheng-cheng, HU Xue-yu, <i>et al.</i> (3434)
Effects of Foliar Spraying of 2,3-dimercaptosuccinic Acid on Cadmium Uptake, Transport, and Antioxidant System in Rice Seedlings	YANG Xiao-rong, HUANG Yong-chun, LIU Zhong-qi, <i>et al.</i> (3441)