

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第33卷 第6期

Vol.33 No.6

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

我国湖泊富营养化效应区域差异性分析 曹金玲,许其功,席北斗,李小平,杨柳燕,江立文,魏自民,吴献花(1777)

基于“源”“汇”景观格局指数的海河流域总氮流失评价 孙然好,陈利顶,王伟,王赵明(1784)

云蒙湖流域土地利用变化对非点源氮污染负荷的影响 孟晓云,于兴修,泮雪芹(1789)

深圳市沿岸表层海水中全氟化合物的残留特征及其分布规律 陈清武,张鸿,柴之芳,沈金灿,杨波(1795)

典型电器工业区河涌沉积物中多环芳烃的分布、来源和潜在生态风险 邓代永,邱孟德,孙国萍,郭俊,张宏涛,张琴,许玫英(1801)

珠江下游河段沉积物中重金属含量及污染评价 谢文平,王少冰,朱新平,陈昆慈,潘德博,洪孝友,尹怡(1808)

扎龙湿地南山湖沉积岩芯重金属污染特征及来源判别 苏丹,臧淑英,叶华香,孙丽,贾晓丹,李苗(1816)

汕头湾沉积物磷的形态分布与季节变化特征研究 赵建刚,乔永民(1823)

氮磷比对东海浮游植物群落生长影响的微宇宙实验 黄伟,朱旭宇,曾江宁,寿鹿,陈全震,江志兵(1832)

春季福建北部海域浙闽沿岸流消亡期浮游桡足类种类组成及其分布 王彦国,林景宏,王春光,林茂(1839)

滩涂红树林种植-养殖耦合系统中多环芳烃含量水平分析 陈冠秋,李耀初,黄晋沐,南燕,林茂宏(1846)

四溴双酚 A 在 5 种巢湖鱼类体内的组织分布与生物浓缩因子研究 杨苏文,王圣瑞,闫振广,张普青(1852)

五氯酚对稀有鮑肌卵黄蛋白原及 p53 的诱导效应 熊力,马永鹏,张晓峥,金帮明,李伟,苏永良,毛思予,刘堰(1858)

全氟辛烷磺酸 (PFOS) 对斑马鱼卵黄蛋白原 mRNA 水平的影响 程艳,崔媛,党志超,谢文平,李海山,殷缓缓,陈会明(1865)

水溶性有机物电子转移能力与荧光峰强度的关系研究 陶亚,袁田,周顺桂,袁勇,庄莉,王辉亮(1871)

MIEX 中试实验对二级出水中有机物去除的 3DEEM 解析 杨建,高金华,常江(1878)

XDLVO 理论解析钙离子对腐殖酸反渗透膜污染的影响机制 姚淑娣,高欣玉,郭本华,包南,谢慧君,梁爽(1884)

栅藻 LX1 在水产养殖废水中的生长、脱氮除磷和油脂积累特性 马红芳,李鑫,胡洪管,于茵,巫寅虎(1891)

氯化铁用于反硝化同步化学生物絮凝工艺研究 王宏杰,董文艺,刘莉莎,韩贵超(1897)

合成氨废水短程反硝化特性研究 李妍,李泽兵,马家轩,王晓毅,赵白航,李军(1902)

基于新型反应器的好氧颗粒污泥的稳定性控制 李志华,杨帆,李胜,谢磊,王晓昌(1907)

采用非生长能量代谢参数表征颗粒污泥稳定性 李志华,吴军,李胜,谢磊,王晓昌(1913)

酸-碱预处理促进剩余污泥厌氧消化的研究 袁光环,周兴求,伍健东(1918)

小回流比条件下污泥浓度分区试验研究 史思,王素兰,李瑞,邢传宏(1923)

非离子表面活性剂对污泥调理脱水效果的影响 侯海攀,濮文虹,时亚飞,于文华,樊明明,刘欢,杨昌柱,李野,杨家宽(1930)

中国空气污染指数变化特征及影响因素分析 李小飞,张明军,王圣杰,赵爱芳,马潜(1936)

南京 3 类不同大气污染过程下气溶胶水溶性无机离子的特征研究 张秋晨,朱彬,苏继峰,王红磊(1944)

深圳市郊区大气中 PM_{2.5} 的特征分析 戴伟,高佳琪,曹罡,欧阳峰(1952)

餐饮业油烟的颗粒物分析 谭德生,邝元成,刘欣,戴飞鸿(1958)

Fe-MnO_x-CeO₂/ZrO₂ 低温催化还原 NO 性能研究 刘荣,杨志琴(1964)

自然型氨基酸及其钾盐的 CO₂ 吸收和再生特性 晏水平,陈竞翔,徐明亮,艾平,张衍林(1971)

耕作方式对紫色水稻土农田生态系统 CH₄ 和 N₂O 排放的影响 张军科,江长胜,郝庆菊,唐其文,程炳红,李辉,陈璐豪(1979)

垄作覆膜条件下田间氨挥发及影响因素 上官宇先,师日鹏,李娜,韩坤,李会科,王林权(1987)

添加不同 N 源条件下典型除草剂对土壤呼吸和 N₂O 排放的影响 孙青,史淳星,石坤,言儒斌,蒋静艳,吴以中(1994)

某石墨阳极法氯碱生产场地二噁英污染特征分析 余立凤,魏文侠,田亚静,吴广龙,李培中,赵丹(2000)

脱硫石膏对酸化森林土壤短期修复效果的研究 罗遥,康荣华,余德祥,谭炳全,段雷(2006)

岩溶山地土壤氧化铁形态及其与成土环境的关系 张治伟,朱章雄,傅瓦利,文志林(2013)

废弃尾矿库 15 种植物对重金属 Pb、Zn 的积累和养分吸收 施翔,陈益泰,王树凤,李江川(2021)

铬胁迫对 3 种草本植物生长及铬积累的影响 王爱云,黄姗姗,钟国锋,徐刚标,刘志祥,申响保(2028)

湘西花垣矿区主要植物种类及优势植物重金属蓄积特征 杨胜香,田启建,梁士楚,周耀渝,邹慧成(2038)

增施 CO₂ 对 C3 和 C4 植物根际氯氰菊酯残留浓度的影响 慕楠,刁晓君,王曙光,王鹏腾,李攀峰(2046)

生物强化去除吡啶的特性及微生物种群动态变化分析 乔琳,赵宏,王建龙(2052)

A/O MBR 处理生活污水效率与菌群多样性的关系 邝斌宇,史青, Montcho Leon Monthero,丁嫄,温东辉(2061)

石油污染土壤生物修复过程中氮循环功能基因的动态检测 吴彬彬,卢滇楠,刘铮(2068)

武汉市儿童多途径铅暴露风险评估 郝汉舟,陈同斌,吴基良,雷梅,田辉,祖文普,钟学斌(2075)

电子鼻预处理装置的开发及适用性研究 卜凡阳,文晓刚,万梅,刘锐,陈吕军,张永明(2083)

ToxTell 生物传感器在 Cu²⁺、Cd²⁺ 冲击活性污泥系统分析中的应用 王学江,王鑫,刘免,吴真,杨连珍,夏四清(2090)

环境样品免疫检测基质效应分析与控制 盛建武,何苗,施汉昌(2095)

热等离子体熔融固化模拟医疗废物的研究 张璐,严建华,杜长明,陆胜勇,李晓东(2104)

城市生活垃圾组分低温干燥特性及模型研究 吴亚娟,刘红梅,陆胜勇,严建华,李晓东(2110)

厌氧-准好氧联合型生物反应器填埋场产气规律的研究 韩智勇,刘丹,李启彬(2118)

处理垃圾渗滤液的 Fe/C 空气阴极 MFC 性能研究 唐玉兰,彭漫,于燕,何亚婷,傅金祥,赵玉华(2125)

基于冗余分析的典型喀斯特山区土壤-石漠化关系研究 龙健,廖洪凯,李娟,陈彩云(2131)

北京市能源消费与经济增长关系的协整检验分析 陈操操,张妍,刘春兰,王海华,李铮(2139)

《环境科学》征稿简则(1877) 《环境科学》征订启事(1890) 信息(1822,1857,1896,2138)

增施 CO₂ 对 C3 和 C4 植物根际氯氰菊酯残留浓度的影响

慕楠¹, 刁晓君², 王曙光^{1, 3*}, 王鹏腾¹, 李攀峰³

(1. 北京化工大学化工学院环境科学与工程系, 北京 100029; 2. 中国环境科学研究院城市环境系统工程研究室, 北京 100012; 3. 新疆工业高等专科学校化工系, 乌鲁木齐 830091)

摘要: CO₂ 减排和土壤污染修复是我国实现经济和环境可持续发展必须解决的两大难题. 基于生物固碳对根际微环境的影响, 本研究提出通过增施 CO₂ 强化土壤有机污染的植物修复过程, 为同时解决 CO₂ 减排和土壤污染植物修复面临的困境提供新思路. 在模拟的 CO₂ 增施环境中, 以 C3 植物菜豆和 C4 植物玉米为供试植物, 以氯氰菊酯为目标污染物, 研究增施 CO₂ 对 C3 和 C4 植物根际氯氰菊酯残留浓度的影响. 结果表明, 增施 CO₂ 可显著增加 C3 植物菜豆的地上和地下干重, 在氯氰菊酯添加浓度为 0、20、40 mg·kg⁻¹ 时地下干重分别比自然 CO₂ 水平时增加了 54.3%、31.9% 和 30.0%. 增施 CO₂ 提高了未添加氯氰菊酯土壤的菜豆根际微生物数量, 但降低了添加氯氰菊酯土壤的菜豆根际微生物数量. 增施 CO₂ 对未添加氯氰菊酯土壤的菜豆根际氯氰菊酯残留浓度没有显著影响, 但降低了菜豆根际氯氰菊酯的残留浓度, 分别比自然 CO₂ 水平时下降 24.0% (20 mg·kg⁻¹) 和 16.9% (40 mg·kg⁻¹). 然而, 对 C4 植物玉米而言, 增施 CO₂ 对植物生物量、根际微生物、根际氯氰菊酯残留浓度下降没有明显促进作用, 甚至有抑制作用. 本实验表明, 增施 CO₂ 降低了 C3 植物根际氯氰菊酯残留浓度, 可以考虑将增施 CO₂ 作为 C3 植物修复土壤污染的强化措施, 但对 C4 植物的影响还有待进一步研究.

关键词: 增施 CO₂; 植物修复; 氯氰菊酯; 根际; 微生物量

中图分类号: X53 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2012)06-2046-06

Effect of CO₂ Fertilization on Residual Concentration of Cypermethrin in Rhizosphere of C3 and C4 Plant

MU Nan¹, DIAO Xiao-jun², WANG Shu-guang^{1, 3}, WANG Peng-teng¹, LI Pan-feng³

(1. Department of Environmental Engineering and Science, College of Chemical Engineering, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China; 2. Office of Urban Environmental Systems Engineering, Chinese Research of Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China; 3. Department of Chemical Engineering, Xinjiang Polytechnic College, Urumqi 830091, China)

Abstract: In order to achieve sustainable economic and environmental development in China, CO₂-emission reduction and phytoremediation of polluted soil must be resolved. According to the effect of biological carbon sequestration on rhizosphere micro-environment, we propose that phytoremediation of polluted soil can be enhanced by CO₂ fertilization, and hope to provide information for resolving dilemma of CO₂-emission reduction and phytoremediation technology. In this study, effects of CO₂ fertilization on cypermethrin reduction in rhizosphere of C3-plant (bush bean) and C4-plant (maize) were investigated. Results showed that dry weight of shoot and root of bush bean (C3 plant) was increased by CO₂ fertilization. Relative to ambient CO₂, dry weight of root was increased by 54.3%, 31.9% and 30.0% in soil added with 0, 20 and 40 mg·kg⁻¹ cypermethrin respectively. Microbial biomass was increased by CO₂ fertilization in rhizosphere soil added with 0 mg·kg⁻¹ cypermethrin, but negative effect was found in rhizosphere soil added with 20 and 40 mg·kg⁻¹ cypermethrin. CO₂ fertilization slightly affected residual concentration of cypermethrin in rhizosphere soil added with 0 mg·kg⁻¹ cypermethrin, but significantly decreased residual concentration of cypermethrin as 24.0% and 16.9% in soil added with 20 and 40 mg·kg⁻¹ relative to ambient CO₂. In maize plant, however, plant growth, microbial biomass and residual cypermethrin concentration in rhizosphere was slightly affected by CO₂ fertilization, and even negative effect was observed. This study indicated that CO₂ fertilization decreases the residual concentration of cypermethrin in rhizosphere of C3-plant, and it is possible to enhance phytoremediation of organic-polluted soil by C3-plant through CO₂ fertilization. However, further study is needed for C4-plant.

Key words: CO₂ fertilization; phytoremediation; cypermethrin; rhizosphere; microbial biomass

收稿日期: 2011-09-13; 修订日期: 2011-11-16

基金项目: 中央高校科研业务费项目 (ZZ1106); 国家自然科学基金项目 (40701180)

作者简介: 慕楠 (1987~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为环境微生物, E-mail: mmily876@126.com

* 通讯联系人, E-mail: shgwang2002@yahoo.com.cn

作为世界上最大的二氧化碳排放国,我国面临着巨大的二氧化碳减排压力.在2010年哥本哈根世界气候大会上,我国承诺2020年单位GDP二氧化碳排放量比2005降低40%~45%,可以说,实质性的CO₂减排已经启动.在各种CO₂减排技术中,CO₂捕集和封存技术(CCS)被认为是最有发展前景的技术之一,并已在炼油、合成氨等工业的CO₂减排中得到了应用^[1].然而,目前CCS技术不但成本较高,而且CO₂封存还存在不少技术方面的问题,如CO₂封存场所的选择及安全性等,这使得通过CCS技术减排CO₂遇到了很大挑战^[2,3].如何处置捕集到的CO₂成为CO₂减排的关键.

生物固碳被认为是目前最安全、有效、经济的碳减排方式^[4].CO₂不仅是温室气体,还是植物光合作用不可或缺的原料.研究表明,增施CO₂(俗称“气肥”)可促进植物生长,增强植物的抗逆能力^[5,6],这与增施CO₂促进植物的光合作用、改善根际微环境(根系分泌物、微生物、酶活)有很大关系.根际也是植物修复的基础和主要功能区^[7],近年来随着土壤污染的加重,植物修复技术受到越来越多的重视,但该技术目前普遍存在植物生长慢、污染修复效率低等缺点^[8,9].在CO₂捕集技术较为成熟的条件下^[10],若能捕集到的CO₂用于强化土壤污染的植物修复,不仅可为捕集性CO₂处置提供新的思路,降低CO₂减排成本,而且有望提高土壤污染的植物修复效率.氯氰菊酯是我国现阶段应用最广泛的农药之一,由于其对光、热稳定以及长期大量使用,造成了严重的土壤和水体污染,并对生物和人体健康构成了极大威胁^[11].因此,本研究拟以氯氰菊酯为对象,通过模拟捕集性CO₂增施环境,探索增施CO₂用于强化土壤氯氰菊酯污染植物修复的可行性.

1 材料与与方法

1.1 供试土壤

实验土壤取自北京昌平区小汤山镇某农田,采集深度0~20 cm.风干,除去植物根系和其他大固体颗粒物,过20目筛.170℃下干热灭菌2 h,备用.土壤的基本理化性质如下:pH值(水:土=2.5:1)为8.0,有机质21.8 g·kg⁻¹,全氮1.28 g·kg⁻¹,有效磷37.2 mg·kg⁻¹,有效钾123.5 mg·kg⁻¹.

1.2 供试植物

基于C3植物和C4植物的光合作用路径和CO₂饱和点不同,对CO₂浓度升高的响应可能不同,本研究选取C4植物玉米(*Zea mays* L.)和C3植物菜

豆(*Phaseolus vulgaris* L.)这2种常见的农作物作为供试植物.选取子粒大小一致、饱满的种子,蒸馏水冲洗干净后,用10% H₂O₂表面消毒10 min,以消除种子表面的霉菌等可能影响种子萌发的有害微生物,再用蒸馏水冲洗干净H₂O₂,在25℃下催芽48 h,种子发芽后,选取芽大小一致的种子移栽至实验容器中,每盆移栽1株.同时,把剩下的发芽种子作为备用苗培养.

1.3 实验容器及CO₂增施装置

实验容器为长×宽×高=18 cm×10 cm×15 cm,底部带5个直径为5 mm孔径的三室有机玻璃根箱,3个室中间由75 μm的尼龙网隔开,中间为根室,种植植物,在两侧格室内获得根际土和非根际土.每个容器装土2 000 kg.

CO₂熏气装置为开顶式气室.箱内温度白天控制在20~25℃,晚上控制在15~20℃;相对湿度为50%~85%;光强30 000 lx,每天光照时间为10 h.

1.4 实验处理

实验为三因子正交设计,即:①2个CO₂浓度:自然水平(380~400 μL·L⁻¹)和增施水平(750~800 μL·L⁻¹);②3个氯氰菊酯浓度:自然浓度(0.87 mg·kg⁻¹)、低浓度(20.00 mg·kg⁻¹)和高浓度(40.00 mg·kg⁻¹);③2种植物:玉米和菜豆.每个处理4个重复.

氯氰菊酯污染土壤:将称量好的氯氰菊酯溶解到丙酮中,再通过小型喷雾器将含有氯氰菊酯的丙酮均匀喷洒到称量好的灭菌土壤中.为了保证氯氰菊酯在土壤中的均匀度,喷施时将土壤摊成薄层状,均匀施药,每喷施一遍后将土壤混匀,再重新摊开继续喷施,直至用尽丙酮溶液.最后再将施药后的土壤混匀,过20目筛.将处理好的土壤摊开3 d,以使丙酮挥发干净.

以钢瓶装CO₂作为气源,通过计算机-研华模块(ADAM4000)-气体质量流量计组成的自动控制系统控制箱内CO₂浓度.CO₂浓度由CO₂浓度监测仪(美国热电公司)实时监测.

实验共持续50 d.实验开始20 d后每周浇一次Hoagland营养液,每盆平均每次浇30 mL.每天浇水,维持作物处在最佳生长状态.

1.5 测试指标

土壤中氯氰菊酯测定^[12]:将根际土置于100 mL玻璃离心管中,加入60 mL的石油醚(30~60℃重蒸)/丙酮混合液(1:1,体积比),超声提取1 h后离心,将上层液定量转移至250 mL的分液漏斗中,

加入 60 mL 2% 的硫酸钠溶液,充分摇匀,将下层丙酮水溶液再用石油醚提取一次,与上层石油醚一并过无水硫酸钠层,于旋转蒸发器上浓缩至 2 mL. 将浓缩液转移到装有硅胶的 SPE 柱净化,用 40 mL 含 2% 乙酸乙酯的石油醚洗脱,洗脱液于旋转蒸发器浓缩,最后定容至 2 mL,进行色谱分析(Shimadzu GC-14C). 色谱条件为:载气高纯 N_2 , 流速 $30 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$; 起始炉温 210°C , $10^\circ\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ 升温至 285°C ; 进样器和检测器温度分别是 270°C 和 320°C , 电子捕获检测器(ECD), 不分流进样, $1 \mu\text{L}$. 外标法定量. 样品中氯氰菊酯的含量以各异构体峰面积总量计.

植物干生物量: 植物地上、地下分开收获后 70°C 烘 48 h, 称重.

土壤微生物测定: 平板计数法^[13].

1.6 统计分析

采用 SPSS 13.0 对所有数据进行统计分析, $P < 0.05$ 认为处理间差异显著.

2 结果与讨论

2.1 增施 CO_2 对 C3 植物菜豆和 C4 植物玉米生物量的影响

对植物修复来说,植物生物量大小很重要. 生物量越大,植物抗、耐污染胁迫的能力、对污染物的吸收量和根际效应才可能越强. 但目前用于植物修复的大多植物在污染土壤中恰恰面临长势不好、生物量小的问题^[7,9], 这其中有超积累植物自身特性的原因,也有非超积累植物受污染物和环境条件胁迫的原因. 为此,很多学者探索通过转基因技术、微生物-植物联合技术、化学-植物技术等来改变植物自身特性,改善植物的生长环境,促进植物生长,进而提高污染修复效率,但效果并不理想^[14,15]. 笔者认为,通过增施 CO_2 促进植物的光合作用,增加植物生物量,增强植物根际效应,可能是提高植物修复效率的有效方法之一.

农田是土壤有机污染的主要发生区,由于植物修复是个缓慢过程,需要时间较长,因此修复农田土壤污染首先要考虑对农业生产的影响. 鉴此,本研究选择了常用植物玉米和菜豆,拟在进行农业生产的同时,逐渐修复土壤污染. 从表 1 可以看出,增施 CO_2 明显促进了菜豆地上、地下生物量,与自然 CO_2 水平时比, 3 个氯氰菊酯浓度下地上生物量分别增加了 14.8% ($0 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)、27.1% ($20 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) 和 34.9% ($30 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$), 地下生物量分别增加了

54.3%、31.9% 和 30.0%. 比较而言,地下生物量增加更为明显. 这表明无论菜豆是否遭受污染胁迫,增施 CO_2 均可促进其生长. CO_2 浓度升高可促进非污染环境植物的光合作用,在之前的很多研究中已得到了证实,这是因为高浓度 CO_2 可以增加 RuBP 羧化的底物,提高 RuBP 羧化酶的活性,减少 O_2 对 RuBP 的竞争氧化,从而增加叶片的光合活性^[16].

然而,对于 C4 植物玉米来说,增施 CO_2 并没有显示出同 C3 植物菜豆类似的影响,反而显著降低了玉米的地下生物量,对地上生物量虽有促进作用,但差异不显著(表 2),这可能与高浓度 CO_2 导致的光合作用下降有关. 之前也有高浓度 CO_2 导致 C4 植物光合作用下降的报道^[17],称之为光合适应(photosynthetic acclimation)或光合下调(down regulation of photosynthesis)^[18]. 可能的原因有以下 4 个:①由于 C4 植物具有特殊的光合机制,在正常 CO_2 浓度下,其光合作用已接近饱和状态,这使得 C4 植物的光合作用对 CO_2 浓度变化的响应低于 C3 植物^[19]; ②高 CO_2 浓度下植物叶片可溶性蛋白含量、RubisCO 含量和 RubisCO 活性降低甚至失活,抑制光合作用^[20]; ③ CO_2 浓度升高使光合速率的提高超过了光合产物合成、运输和利用的能力,从而形成了光合产物的反馈抑制,使光合速率下降,产生短期生物量增加长期生物下降的现象^[21]; ④ CO_2 浓度升高促进淀粉累积,使蔗糖合成受到抑制,从而抑制了磷酸三糖载体运输无机磷(Pi)的能力,使得叶

表 1 增施捕集性 CO_2 对 C3 植物菜豆干重的影响¹⁾

Table 1 Effect of CO_2 fertilization on dry weight of bush bean (C3-plant)

CO_2 浓度 $/\mu\text{L}\cdot\text{L}^{-1}$	氯氰菊酯添加浓度 $/\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	地上干重 $/\text{g}\cdot\text{plant}^{-1}$	地下干重 $/\text{g}\cdot\text{plant}^{-1}$
380 ~ 400	0.00	3.31b	0.81b
	20.00	2.66c	0.47d
	40.00	2.35d	0.70bc
750 ~ 800	0.00	3.80a	1.25a
	20.00	3.38b	0.62c
	40.00	3.17b	0.91b

1) 同一列不同小写字母表示各处理在 $P < 0.05$ 水平上差异显著,下同

表 2 增施捕集性 CO_2 对 C4 植物玉米干重的影响¹⁾

Table 2 Effect of CO_2 fertilization on dry weight of maize (C4-plant)

CO_2 浓度 $/\mu\text{L}\cdot\text{L}^{-1}$	氯氰菊酯添加浓度 $/\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	地上干重 $/\text{g}\cdot\text{plant}^{-1}$	地下干重 $/\text{g}\cdot\text{plant}^{-1}$
380 ~ 400	0.00	5.60b	3.49a
	20.00	6.05ab	3.51a
	40.00	6.51a	3.51a
750 ~ 800	0.00	6.76a	2.22b
	20.00	6.85a	2.52b
	40.00	6.18ab	2.38b

绿体中 Pi 含量下降, 光合速率降低, 叶绿体中淀粉的累积造成叶绿体膜结构受到破坏, 抑制了光合作用^[21].

2.2 增施 CO₂ 对 C3 和 C4 植物根际微生物的影响

由表 3 可以看出, 无论是否增施 CO₂, 菜豆根际细菌、真菌、放线菌的数量都明显大于非根际. 从增施 CO₂ 的影响看, 在未添加氯氰菊酯的对照土壤中, 增施 CO₂ 促进了菜豆根际细菌、真菌与放线菌的数量, 三者分别比自然 CO₂ 水平时增 81.3%、194.5% 和 94.2%, 这与增施 CO₂ 后菜豆生物量特别是根系生物量的增加有关(表 1); 但在 2 个添加

氯氰菊酯处理中, 增施 CO₂ 反而降低了根际细菌、放线菌和真菌的数量. 这表明, CO₂ 对根际微生物的影响与氯氰菊酯浓度有关, 受两者交互作用影响很大, 即增施 CO₂ 提高了根际微生物数量, 但氯氰菊酯又会对丰富的微生物产生选择性影响, 使耐氯氰菊酯胁迫能力强的微生物得以生存, 耐受力弱的微生物迅速死亡, 当前者增殖速度低于后者死亡速度时, 就会出现总微生物数量下降的结果. 但笔者认为, 这些得以生存的微生物可能是根际氯氰菊酯降解的主体微生物, 虽然量少, 但对根际氯氰菊酯降解贡献较大.

表 3 增施捕集性 CO₂ 对 C3 植物菜豆根际微生物量的影响¹⁾

Table 3 Effect of CO₂ fertilization on microbial biomass in rhizosphere of bush bean (C3-plant)

CO ₂ /μL·L ⁻¹	氯氰菊酯 /mg·kg ⁻¹	细菌 × 10 ⁶ /CFU·g ⁻¹		放线菌 × 10 ⁵ /CFU·g ⁻¹		真菌 × 10 ² /CFU·g ⁻¹	
		根际	非根际	根际	非根际	根际	非根际
380 ~ 400	0.00	13.07c	9.18b	7.66c	5.80b	25.62b	4.85b
	20.00	17.27b	10.56a	2.74d	2.02c	7.46c	0.80c
	40.00	11.7c	8.15c	10.3b	2.31c	0.37d	0.29c
750 ~ 800	0.00	23.69a	10.19a	22.56a	12.61a	49.76a	29.31a
	20.00	7.67d	3.10d	1.26e	1.15cd	0.52d	0.37c
	40.00	2.96e	1.72e	0.18f	0.07d	0.35d	0.29c
ANOVA							
CO ₂		**	*	**	**	**	**
氯氰菊酯		**	**	**	**	**	**
CO ₂ × 氯氰菊酯		**	**	**	**	**	**

1) 同一列不同小写字母表示各处理在 $P < 0.05$ 水平上差异显著; ** 表示 $P < 0.01$, * 表示 $P < 0.05$

从氯氰菊酯的影响看, 自然 CO₂ 水平时根际细菌数量不但受添加氯氰菊酯的影响, 而且氯氰菊酯添加浓度为 20 mg·kg⁻¹ 时反而提高了根际细菌数量(32.1%, 与未添加氯氰菊酯时相比), 同样, 添加 40 mg·kg⁻¹ 氯氰菊酯使根际放线菌数量增加 34.5%. 这种现象在之前的一些研究中也发现过, 称之为农药的激发效应^[22]. 其他无论是否增施 CO₂, 添加氯氰菊酯后菜豆根际微生物数量都呈下降趋

势, 尤其在增施 CO₂ 环境中, 下降趋势更明显, 显示了氯氰菊酯对微生物的毒性^[23].

统计结果分析表明, CO₂、氯氰菊酯及其交互作用对根际细菌、放线菌和真菌数量的影响都达到显著水平($P < 0.05$).

由表 4 可以看出, 增施 CO₂ 对未施氯氰菊酯的对照土壤中玉米根际细菌和放线菌数量没有产生明显影响, 这可能是由于 C4 植物光饱和点低^[24], 在正

表 4 增施捕集性 CO₂ 对 C4 植物玉米根际微生物量的影响¹⁾

Table 4 Effect of CO₂ fertilization on microbial biomass in rhizosphere of maize (C4-plant)

CO ₂ /μL·L ⁻¹	氯氰菊酯 /mg·kg ⁻¹	细菌 × 10 ⁵ /CFU·g ⁻¹		放线菌 × 10 ⁴ /CFU·g ⁻¹		真菌 × 10 ² /CFU·g ⁻¹	
		根际	非根际	根际	非根际	根际	非根际
380 ~ 400	0.00	14.86a	12.42a	13.73b	13.04b	44.61a	8.01a
	20.00	3.61c	3.19c	16.54a	15.21a	7.18b	8.43a
	40.00	3.59c	2.02d	3.12c	1.75c	0.38d	0.36c
750 ~ 800	0.00	13.90b	7.59b	13.80b	12.75b	2.15c	3.64b
	20.00	4.24c	3.30c	3.12c	2.23c	0.37d	0.29c
	40.00	2.29d	2.22d	2.17d	1.96c	0.28d	0.43c
ANOVA							
CO ₂		NS	**	**	**	**	**
氯氰菊酯		**	**	**	**	**	**
CO ₂ × 氯氰菊酯		**	**	**	**	**	**

1) 同一列不同小写字母表示各处理在 $P < 0.05$ 水平上差异显著; ** 表示 $P < 0.01$, NS 表示影响不显著

常 CO_2 浓度下,其光合作用已接近饱和状态,所以对增施 CO_2 响应较低,甚至有负响应(表 2). 增施 CO_2 对添加氯氰菊酯的土壤中玉米根际细菌也没产生明显影响,可能是由于添加氯氰菊酯后根际细菌数量急剧下降,总量较小,再加上根系生物量不大,所以对增施 CO_2 响应较小. 但添加氯氰菊酯后根际放线菌和真菌死亡较少,总量较大,故受 CO_2 增施影响较大,数量下降,当然这也可能跟 CO_2 与氯氰菊酯的协同影响有关,详细机制有待进一步研究.

从氯氰菊酯对玉米根际微生物的影响看,不管是否增施 CO_2 ,添加氯氰菊酯都显著降低了玉米根际三大菌的数量,这也再次表明了氯氰菊酯对土壤微生物的毒害作用. 统计结果表明,除增施 CO_2 对根际细菌数量影响不显著外, CO_2 、氯氰菊酯及其交互作用对根际放线菌和真菌数量,以及两者交互作用对根际细菌数量的影响都达到显著水平($P < 0.05$).

此外,氯氰菊酯对菜豆和玉米根际微生物量影响都不一致,这其中的主要原因可能与 2 种植物根系分泌物种类不同,诱导的根际微生物种类不同有关^[25],从而导致它们对氯氰菊酯胁迫的耐受能力不同.

2.3 增施 CO_2 对 C3 和 C4 植物根际土壤中氯氰菊酯残留浓度的影响

图 1(a)为增施 CO_2 对 C3 植物菜豆根际氯氰菊酯残留浓度的影响. 可以看出,在未添加氯氰菊酯的

对照土壤中,根际与非根际土壤氯氰菊酯浓度差异不明显,增施 CO_2 也没使菜豆根际和非根际土壤中氯氰菊酯浓度进一步下降,这可能是由于此时土壤中的氯氰菊酯浓度已低于土著微生物所能代谢的最低浓度,所以无论是根际、非根际还是增施 CO_2 对土壤氯氰菊酯浓度下降都没有影响. 但是,氯氰菊酯施加浓度为 20 和 40 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时,增施 CO_2 降低了根际氯氰菊酯的残留浓度,分别比自然 CO_2 水平时降低 24.0% 和 16.9%,不过对非根际氯氰菊酯残留浓度没有显著影响. CO_2 的作用在 40 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 氯氰菊酯小于 20 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时,可能与高浓度氯氰菊酯导致的植物生物量,特别是地下生物量下降(表 1)以及由此导致的根际微生物活性下降有一定关系(表 3). 当然,根际氯氰菊酯浓度下降不仅仅缘自根际微生物的降解,植物吸收也可能有一定的作用,虽然研究表明植物吸收的氯氰菊酯量很少^[26].

图 1(b)为增施 CO_2 对 C4 植物玉米根际氯氰菊酯残留浓度的影响. 可以看出,在未添加氯氰菊酯的对照土壤中,增施 CO_2 没有改变玉米根际的氯氰菊酯残留浓度,原因同 C3 植物菜豆. 但是,在 2 个添加氯氰菊酯处理中,增施 CO_2 非但没有降低根际氯氰菊酯的残留浓度,反而使 20 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时的根际氯氰菊酯残留浓度有增高的趋势,这可能与增施 CO_2 抑制了 C4 植物的地下生物量有关(表 2),根系生物量下降,势必导致根系分泌物减少,根际微生物活性下降,从而导致根际氯氰菊酯残留浓度升高.

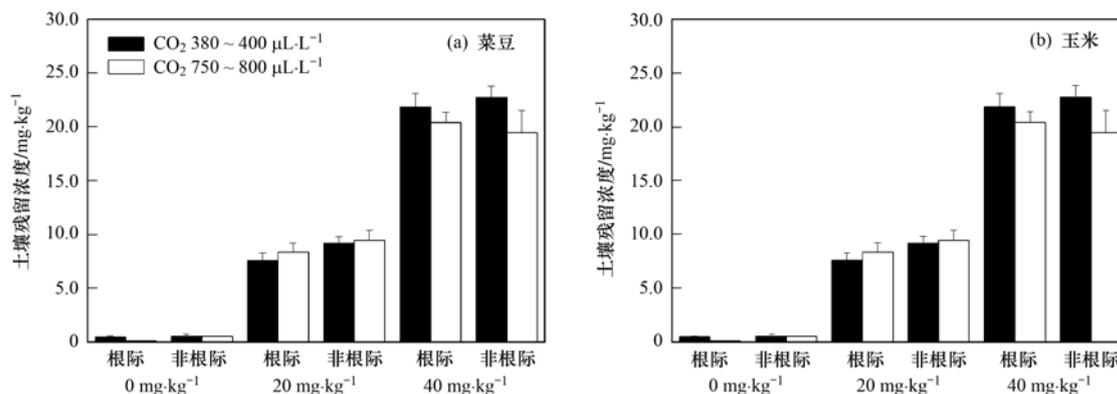


图 1 增施 CO_2 对菜豆和玉米根际氯氰菊酯残留浓度的影响

Fig. 1 Effects of CO_2 fertilization on residual cypermethrin in rhizosphere of bush bean and maize

3 结论

(1) 无论土壤是否遭受污染,增施 CO_2 均可增加 C3 植物菜豆的地上、地下干重,但对 C4 玉米的生物量促进作用不明显,甚至有一定程度的抑制

作用.

(2) 增施 CO_2 可促进 C3 植物菜豆根际细菌、放线菌和真菌的数量,但当氯氰菊酯存在时,根际细菌和放线菌的数量受到 2 种因素的复合影响,数量下降. 增施 CO_2 对 C4 植物玉米根际微生物没有明显

有益影响。

(3) 增施 CO₂ 可促进 C3 植物菜豆根际氯氰菊酯浓度的下降, 但对 C4 植物玉米根际氯氰菊酯浓度的消减没有明显促进作用, 这表明可以考虑将增施 CO₂ 作为 C3 植物修复污染土壤修复的强化措施, 但对 C4 植物有待进一步研究。

参考文献:

- [1] Oh T H. Carbon capture and storage potential in coal-fired plant in Malaysia-A review [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2010, **14**(9): 2697-2709.
- [2] 全浩, 温雪峰, 郭琳琳. CO₂ 捕集和地下封存技术的现状及发展趋势(一) [J]. *煤炭工程*, 2007, (12): 75-79.
- [3] Hansson A, Bryngelsson M. Expert opinions on carbon dioxide capture and storage-A framing of uncertainties and possibilities [J]. *Energy Policy*, 2009, **37**(6): 2273-2282.
- [4] 黄永梅, 龚吉蕊, 张新时. 我国开展生物固碳研究的关键科学问题及其研究进展与展望 [J]. *中国科学基金*, 2008, **22**(5): 268-271.
- [5] 尹燕东. CO₂ 施肥对黄瓜幼苗根系生长代谢及根际微生态系统的影响 [D]. 泰安: 山东农业大学, 2006.
- [6] Jaffrin A, Bentounes N, Joan A M, *et al.* Landfill Biogas for heating greenhouses and providing carbon dioxide supplement for plant growth [J]. *Biosystems Engineering*, 2003, **86**(1): 113-123.
- [7] Glick B R. Using soil bacteria to facilitate phytoremediation [J]. *Biotechnology Advances*, 2010, **28**(3): 367-374.
- [8] 彭胜巍, 周启星. 持久性有机污染土壤的植物修复及其机理研究进展 [J]. *生态学杂志*, 2008, **27**(3): 469-475.
- [9] Gerhardt K E, Huang X D, Glick B R, *et al.* Phytoremediation and rhizoremediation of organic soil contaminants: potential and challenges [J]. *Plant Science*, 2009, **176**(1): 20-30.
- [10] Kuuskra V A. Review and evaluation of the CO₂ capture project by the technology advisory board: carbon dioxide capture for storage in deep geologic formations-results from the CO₂ capture project I [M]. UK: Elsevier, 2005.
- [11] 李文艳, 杨宏莉, 蒋雪, 等. 氯氰菊酯和高效氯氰菊酯的生殖毒性研究进展 [J]. *环境与健康杂志*, 2010, **27**(7): 652-654.
- [12] Xie W J, Zhou J M, Wang H Y, *et al.* Effect of nitrogen on the degradation of cypermethrin and its metabolite 3-phenoxybenzoic acid in soil [J]. *Pedosphere*, 2008, **18**(5): 638-644.
- [13] 许光辉, 郑洪元. 土壤微生物分析方法手册 [M]. 北京: 农业出版社, 1986. 103-119.
- [14] Johnsona D L, Maguirea K L, Andersonb D R, *et al.* Enhanced dissipation of chrysene in planted soil: the impact of a rhizobial inoculum [J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2004, **36**(1): 33-38.
- [15] Abhilash P C, Jamil S, Singh N. Transgenic plants for enhanced biodegradation and phytoremediation of organic xenobiotics [J]. *Biotechnology Advances*, 2009, **27**(4): 474-488.
- [16] 张颖, 王金春, 薛庆林, 等. CO₂ 施肥对光合作用及相关生理过程的影响 [J]. *中国农学通报*, 2006, **22**(2): 212-215.
- [17] Cure J D, Acock B. Crop responses to carbon dioxide doubling: a literature survey [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1986, **38**(1-3): 127-145.
- [18] 范桂枝, 蔡庆生. 植物对大气 CO₂ 浓度升高的光合适应机理 [J]. *植物学通报*, 2005, **22**(4): 486-493.
- [19] Bowes G. Facing the inevitable: plants and increasing atmospheric CO₂ [J]. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*, 1993, **44**(1): 309-332.
- [20] Sage R F, Sharkey T D, Seemann J R. The in-vivo response of the ribulose-1, 5-bisphosphate carboxylase activation state and the pool sizes of photosynthetic metabolites to elevated CO₂ in *Phaseolus vulgaris* L. [J]. *Planta*, 1988, **174**(3): 407-416.
- [21] 张其德, 卢从明, 匡廷云. 大气 CO₂ 浓度升高对光合作用的影响 [J]. *植物学通报*, 1992, **9**(4): 18-24.
- [22] 傅丽君, 杨文金. 4 种农药对枇杷园土壤磷酸酶活性及微生物呼吸的影响 [J]. *中国生态农业学报*, 2007, **15**(6): 113-116.
- [23] 许育新, 李晓慧, 滕齐辉, 等. 氯氰菊酯污染土壤的微生物修复及对土著微生物的影响 [J]. *土壤学报*, 2008, **45**(4): 693-698.
- [24] 李卫华, 郝乃斌, 戈巧英, 等. C3 植物中 C4 途径的研究进展 [J]. *植物学通报*, 1999, **16**(2): 97-106.
- [25] Fu S L, Zou X M, Coleman D. Highlights and perspectives of soil biology and ecology research in China [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2009, **41**(5): 868-876.
- [26] 周振惠, Viswanathan R. ¹⁴C-氯氰菊酯农药在“微宇”环境中的迁移、归宿 [J]. *环境科学*, 1990, **11**(5): 2-6.

CONTENTS

Regional Heterogeneity of Lake Eutrophication Effects in China	CAO Jin-ling, XU Qi-gong, XI Bei-dou, <i>et al.</i> (1777)
Correlating Landscape Pattern with Total Nitrogen Concentration Using a Location-weighted Sink-source Landscape Index in the Haihe River Basin, China	SUN Ran-hao, CHEN Li-ding, WANG Wei, <i>et al.</i> (1784)
Impact of the Land-use Change on the Non-point Source Nitrogen Load in Yunmeng Lake Watershed	MENG Xiao-yun, YU Xing-xiu, PAN Xue-qin (1789)
Residue Characteristics and Distributions of Perfluorinated Compounds in Surface Seawater Along Shenzhen Coastline	CHEN Qing-wu, ZHANG Hong, CHAI Zhi-fang, <i>et al.</i> (1795)
Distribution and Potential Ecological Risk of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Sediments from Typical Electronics Industrial Zone	DENG Dai-yong, QIU Meng-de, SUN Guo-ping, <i>et al.</i> (1801)
Residues and Potential Ecological Risk Assessment of Metal in Sediments from Lower Reaches and Estuary of Pearl River	XIE Wen-ping, WANG Shao-bing, ZHU Xin-ping, <i>et al.</i> (1808)
Character and Sources Identification of Heavy Metals Contamination in Sediment from the Core Sediment in Nanshan Lake, the Zhalong Wetland	SU Dan, ZANG Shu-ying, YE Hua-xiang, <i>et al.</i> (1816)
Distribution Characteristics of Phosphorus Forms in Surface Sediments of the Shantou Bay in China	ZHAO Jian-gang, QIAO Yong-min (1823)
Microcosm Experiments on the Influence of Different N/P Ratios on Phytoplankton Community Growth in the East China Sea	HUANG Wei, ZHU Xu-yu, ZENG Jiang-ning, <i>et al.</i> (1832)
Species Composition and Distribution Characteristics of Pelagic Copepods in the Northern Sea of Fujian During Withdraw of Zhe-Min Coastal Current	WANG Yan-guo, LIN Jing-hong, WANG Chun-guang, <i>et al.</i> (1839)
PAHs Concentrations in Aquatic Products and Food Safety Evaluation in the Coupled Mangrove Planting-Aquaculture Ecological System	CHEN Guan-qiu, LI Yao-chu, HUANG Jin-mu, <i>et al.</i> (1846)
Tissue Distribution and Bioconcentration Factors of Tetrabromobisphenol A in Five Fishes in Lake Chaohu	YANG Su-wen, WANG Sheng-rui, YAN Zhen-guang, <i>et al.</i> (1852)
Induction Effects of Pentachlorophenol on Vitellogenin and p53 in Chinese Rare Minnow (<i>Gobiocypris rarus</i>)	XIONG Li, MA Yong-peng, ZHANG Xiao-zheng, <i>et al.</i> (1858)
Effects of Perfluorooctane Sulfonate (PFOS) Exposure on Vitellogenin mRNA Level in Zebrafish (<i>Brachydanio rerio</i>)	CHENG Yan, CUI Yuan, DANG Zhi-chao, <i>et al.</i> (1865)
Relationship Between Electron Transfer Capacity and Fluorescence Characteristics of Dissolved Organic Matter	TAO Ya, YUAN Tian, ZHOU Shun-gui, <i>et al.</i> (1871)
Characterization of the Change in DOM During Municipal Secondary Effluent Treatment with Magnetic Ion Exchange Resin by 3DEEM	YANG Jian, GAO Jin-hua, CHANG Jiang (1878)
Reverse Osmosis Membrane Fouling by Humic Acid Using XDLVO Approach; Effect of Calcium Ions	YAO Shu-di, GAO Xin-yu, GUO Ben-hua, <i>et al.</i> (1884)
Growth, Removal of Nitrogen and Phosphorus, and Lipid Accumulation Property of <i>Scenedesmus</i> sp. LX1 in Aquaculture Wastewater	MA Hong-fang, LI Xin, HU Hong-ying, <i>et al.</i> (1891)
Iron Chloride for Simultaneous Denitrification and Chemical-Biological Flocculation Process	WANG Hong-jie, DONG Wen-yi, LIU Li-sha, <i>et al.</i> (1897)
Characteristic Research of Shortcut Denitrification in Synthetic Ammonia Industrial Wastewater Treatment Process	LI Yan, LI Ze-bing, MA Jia-xuan, <i>et al.</i> (1902)
Stability Control of Aerobic Granules Using an Innovative Reactor	LI Zhi-hua, YANG Fan, LI Sheng, <i>et al.</i> (1907)
Description of the Stability of Granules Using Nongrowth-related Parameters	LI Zhi-hua, WU Jun, LI Sheng, <i>et al.</i> (1913)
Enhancement of Anaerobic Digestion of Excess Sludge by Acid-Alkali Pretreatment	YUAN Guang-huan, ZHOU Xing-qiu, WU Jian-dong (1918)
Pilot Validation of Sludge Concentration Partition at Small Reflux Ratio Condition	SHI Si, WANG Su-lan, LI Rui, <i>et al.</i> (1923)
Influence of Non-ionic Surfactants on Sludge Dewaterability	HOU Hai-pan, PU Wen-hong, SHI Ya-fei, <i>et al.</i> (1930)
Variation Characteristics and Influencing Factors of Air Pollution Index in China	LI Xiao-fei, ZHANG Ming-jun, WANG Sheng-jie, <i>et al.</i> (1936)
Characteristics of Aerosol Water-Soluble Inorganic Ions in Three Types Air-Pollution Incidents of Nanjing City	ZHANG Qiu-chen, ZHU Bin, SU Ji-feng, <i>et al.</i> (1944)
Characterization of Atmospheric PM _{2.5} in the Suburb of Shenzhen	DAI Wei, GAO Jia-qi, CAO Gang, <i>et al.</i> (1952)
Analysis on Oil Fume Particles in Catering Industry Cooking Emission	TAN De-sheng, KUANG Yuan-cheng, LIU Xin, <i>et al.</i> (1958)
Low-Temperature Catalytic Reduction of NO over Fe-MnO _x -CeO ₂ /ZrO ₂ Catalyst	LIU Rong, YANG Zhi-qin (1964)
CO ₂ Absorption and Regeneration Performance of a Natural Amino Acid and Its Potassium Salt	YAN Shui-ping, CHEN Jing-ao, XU Ming-liang, <i>et al.</i> (1971)
Effects of Tillage-Cropping Systems on Methane and Nitrous Oxide Emissions from Agro-Ecosystems in a Purple Paddy Soil	ZHANG Jun-ke, JIANG Chang-sheng, HAO Qing-ju, <i>et al.</i> (1979)
Factors Influencing Ammonia Volatilization in a Winter Wheat Field with Plastic Film Mulched Ridges and Unmulched Furrows	SHANGGUAN Yu-xian, SHI Ri-peng, LI Na, <i>et al.</i> (1987)
Effects of Typical Herbicides on Soil Respiration and N ₂ O Emissions from Soil Added with Different Nitrogen Fertilizers	SUN Qing, SHI Chun-xing, SHI Kun, <i>et al.</i> (1994)
Analysis of Characteristics of Dioxin Contamination in the Chlor-alkali Site that Uses Graphite Anode for Production	YU Li-feng, WEI Wen-xia, TIAN Ya-jing, <i>et al.</i> (2000)
Effect of Flue Gas Desulfurization Gypsum Application on Remediation of Acidified Forest Soil	LUO Yao, KANG Rong-hua, YU De-xiang, <i>et al.</i> (2006)
Morphology of Soil Iron Oxides and Its Correlation with Soil-Forming Process and Forming Conditions in a Karst Mountain	ZHANG Zhi-wei, ZHU Zhang-xiong, FU Wa-li, <i>et al.</i> (2013)
Pb, Zn Accumulation and Nutrient Uptake of 15 Plant Species Grown in Abandoned Mine Tailings	SHI Xiang, CHEN Yi-tai, WANG Shu-feng, <i>et al.</i> (2021)
Effect of Cr(VI) Stress on Growth of Three Herbaceous Plants and Their Cr Uptake	WANG Ai-yun, HUANG Shan-shan, ZHONG Guo-feng, <i>et al.</i> (2028)
Bioaccumulation of Heavy Metals by the Dominant Plants Growing in Huayuan Manganese and Lead/Zinc Mineland, Xiangxi	YANG Sheng-xiang, TIAN Qi-jian, LIANG Shi-chu, <i>et al.</i> (2038)
Effect of CO ₂ Fertilization on Residual Concentration of Cypermethrin in Rhizosphere of C3 and C4 Plant	MU Nan, DIAO Xiao-jun, WANG Shu-guang, <i>et al.</i> (2046)
Bioaugmented Removal of Pyridine and the Microbial Community Dynamic Analysis	QIAO Lin, ZHAO Hong, WANG Jian-long (2052)
Relationship Between Sewage Treatment Efficiency and Bacterial Community Diversity in an A/O MBR	KUANG Bin-yu, SHI Qing, Montcho Leon Monthero, <i>et al.</i> (2061)
Dynamic Changes in Functional Genes for Nitrogen Cycle During Bioremediation of Petroleum-Contaminated Soil	WU Bin-bin, LU Dian-nan, LIU Zheng (2068)
Risk Assessment of Lead Exposure from Different Intake Pathways for Children in Wuhan City	HAO Han-zhou, CHEN Tong-bin, WU Ji-liang, <i>et al.</i> (2075)
Implementation of a Pretreatment Device for an Electronic Nose	BU Fan-yang, WEN Xiao-gang, WAN Mei, <i>et al.</i> (2083)
Copper and Cadmium Toxicities to Activated Sludge Investigated with ToxTell Biosensor	WANG Xue-jiang, WANG Xin, LIU Mian, <i>et al.</i> (2090)
Matrix Effect and Control of Immunoassay for Environmental Samples	SHENG Jian-wu, HE Miao, SHI Han-chang (2095)
Study on Vitrification of Simulated Medical Wastes by Thermal Plasma	ZHANG Lu, YAN Jian-hua, DU Chang-ming, <i>et al.</i> (2104)
Study on the Low Temperature Drying of Components of Municipal Solid Waste and Its Model Analysis	WU Ya-juan, LIU Hong-mei, LU Sheng-yong, <i>et al.</i> (2110)
Aerogenesis Evolution of the Anaerobic-semiaerobic Bioreactor Landfill	HAN Zhi-yong, LIU Dan, LI Qi-bin (2118)
Performance of Microbial Fuel Cells with Fe/C Catalyst Carbon Felt Air-Cathode for Treating Landfill Leachate	TANG Yu-lan, PENG Man, YU Yan, <i>et al.</i> (2125)
Relationships Between Soil and Rocky Desertification in Typical Karst Mountain Area Based on Redundancy Analysis	LONG Jian, LIAO Hong-kai, LI Juan, <i>et al.</i> (2131)
Energy Consumption and GDP Growth in Beijing: Cointegration and Causality Analysis	CHEN Cao-cao, ZHANG Yan, LIU Chun-lan, <i>et al.</i> (2139)

《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6月15日 33卷 第6期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 33 No. 6 Jun. 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