

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第3期

Vol.35 No.3

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

青岛近海生物气溶胶中可培养微生物浓度及群落多样性的季节变化	祁建华, 武丽婧, 高冬梅, 金川 (801)
基于重庆本地碳成分谱的 PM _{2.5} 碳组分来源分析	张灿, 周志恩, 翟崇治, 白志鹏, 陈刚才, 姬亚芹, 任丽红, 方维凯 (810)
重庆市北碚城区大气污染物浓度变化特征观测研究	徐鹏, 郝庆菊, 吉东生, 张军科, 刘子锐, 胡波, 王跃思, 江长胜 (820)
基于气溶胶光学特性垂直分布的一次浮尘过程分析	王苑, 邓军英, 史兰红, 陈勇航, 张强, 王胜, 徐婷婷 (830)
基于悬铃木叶片重金属累积特性的大气污染分析和评价	刘玲, 方炎明, 王顺昌, 谢影, 汪承润 (839)
典型染整企业定型机废气排放特征及潜在环境危害浅析	徐志荣, 王鹏, 王浙明, 许明珠, 吴剑波, 李嫣 (847)
火电厂大气污染物排放标准实施效果的数值模拟研究	王占山, 潘丽波 (853)
国IV天然气公交车实际道路颗粒物排放特性	楼狄明, 成伟, 冯谦 (864)
稻草和玉米秸秆烟尘中的正构脂肪醇	刘刚, 李久海, 吴丹, 徐慧 (870)
河口湿地近地面大气 CO ₂ 浓度日变化和季节变化	张林海, 仝川, 曾从盛 (879)
三峡库区库中干流及支流水体夏季二氧化碳分压及扩散通量	李双, 王雨春, 操满, 钱慧君, 许涛, 周子然, 邓兵, 汪福顺 (885)
施用畜禽粪便堆肥的蔬菜地 CH ₄ 、N ₂ O 和 NH ₃ 排放特征	万合峰, 赵晨阳, 钟佳, 葛振, 魏源送, 郑嘉熹, 鄢玉龙, 韩圣慧, 郑博福, 李洪枚 (892)
干湿交替条件下不同晶型铁氧化物对水稻土甲烷排放的影响	张天娇, 汤佳, 庄莉, 熊格生, 刘志, 周顺桂 (901)
长江口邻近海域沉积物中生物硅溶解行为研究	吴彬, 吕伟香, 鲁超, 刘素美 (908)
汾河中游浮游藻类群落特征及水质分析	王爱爱, 冯佳, 谢树莲 (915)
基于三维荧光光谱-平行因子技术联用的湖泊浮游藻化学分类学研究	陈小娜, 韩秀荣, 苏荣国, 石晓勇 (924)
三峡库区典型消落带土壤及沉积物中溶解性有机质 (DOM) 的紫外-可见光谱特征	李璐璐, 江韬, 闫金龙, 郭念, 魏世强, 王定勇, 高洁, 赵铮 (933)
黄河口湿地表层沉积物中磷赋存形态的分析	于子洋, 杜俊涛, 姚庆祯, 陈洪涛, 于志刚 (942)
太湖和呼伦湖沉积物对磷的吸附特征及影响因素	揣小明, 杨柳燕, 程书波, 陈小锋, 穆云松 (951)
黄浦江溶解有机质光学特性与消毒副产物 NDMA 生成潜能的关系	董倩倩, 张艾, 李咏梅, 陈玲, 黄清辉 (958)
纳米零价铁降解水中多溴联苯醚 (PBDEs) 及降解途径研究	杨雨寒, 徐伟伟, 彭思侃, 卢善富, 相艳, 梁大为 (964)
铸铁还原氯乙酸的影响因素与机制研究	唐顺, 杨宏伟, 王小任, 解跃峰 (972)
磷回收对厌氧/好氧交替式生物滤池蓄磷/除磷的影响	张顺, 田晴, 汤曼琳, 李方 (979)
预处理方法对玉米芯作为反硝化固体碳源的影响	赵文莉, 郝瑞霞, 李斌, 张文怡, 杜鹏 (987)
陶粒 CANON 反应器的接种启动与运行	付昆明, 左早荣, 仇付国 (995)
冬季低温下 MBR 与 CAS 工艺运行及微生物群落特征	黄菲, 梅晓洁, 王志伟, 吴志超 (1002)
烷基多苷促进污泥水解产酸的研究	陈灿, 孙秀云, 黄诚, 沈锦优, 王连军 (1009)
高温厌氧消化中底物浓度对病原指示微生物杀灭的影响	操宏庆, 章菲菲, 李健, 童子林, 胡真虎 (1016)
兰州市大气降尘重金属污染评价及健康风险评价	李萍, 薛粟尹, 王胜利, 南忠仁 (1021)
珠江河口水域有机磷农药水生生态系统风险评价	郭强, 田慧, 毛潇萱, 黄韬, 高宏, 马建民, 吴军年 (1029)
海州湾表层沉积物重金属的来源特征及风险评价	李飞, 徐敏 (1035)
再生水无计划间接补充饮用水的雌激素健康风险	吴乾元, 邵一如, 王超, 孙艳, 胡洪营 (1041)
瓦埠湖流域庄墓镇农田土壤氮磷分布及流失风险评估	李如忠, 邵阳, 徐晶晶, 丁贵珍 (1051)
三峡库区消落带土壤汞形态分布与风险评价	张成, 陈宏, 王定勇, 孙荣国, 张金洋 (1060)
基于棕地的居民小区土壤重金属健康风险评价	陈星, 马建华, 李新宁, 刘德新, 李一蒙 (1068)
干旱区绿洲土壤氟污染生态风险评估研究	薛粟尹, 李萍, 王胜利, 南忠仁 (1075)
缙云山 3 种典型森林降雨过程及其氮素输入	孙素琪, 王玉杰, 王云琦, 张会兰, 于雷, 刘婕 (1081)
三峡库区兰陵溪小流域土地利用及景观格局对氮磷输出的影响	韩黎阳, 黄志霖, 肖文发, 田耀武, 曾立雄, 吴东 (1091)
黄土丘陵区县域农田土壤近 30 年有机碳变化及影响因素研究: 以甘肃庄浪县为例	师晨迪, 许明祥, 邱宇洁, 张志霞, 张晓伟 (1098)
天然林土壤有机碳及矿化特征研究	杨添, 戴伟, 安晓娟, 庞欢, 邹建美, 张瑞 (1105)
不同土壤湿润速率下中性紫色土磷素淋溶的动态变化	张思兰, 石孝均, 郭涛 (1111)
硫脲对酸性红壤 pH 值与金属元素有效性的影响	杨波, 王文, 曾清如, 周细红 (1119)
6 种陕北适生豆科植物生长对原油污染土壤的响应	山宝琴, 张永涛, 曹巧玲, 康振妍, 李淑媛 (1125)
基于 N:P 化学计量特征的高寒草甸植物养分状况研究	张仁懿, 徐当会, 陈凌云, 王刚 (1131)
人工生物结皮的发育演替及表土持水特性研究	吴丽, 陈晓国, 张高科, 兰书斌, 张德禄, 胡春香 (1138)
农田土壤自养微生物碳同化潜力及其功能基因数量、关键酶活性分析	陈晓娟, 吴小江, 简燕, 袁红朝, 周萍, 葛体达, 童成立, 邹冬生, 吴金水 (1144)
中亚热带马尾松林凋落物分解过程中的微生物与酶活性动态	宋影, 辜夕容, 严海元, 毛文韬, 吴雪莲, 万宇轩 (1151)
苏南地区香樟树皮中有机氯农药 (OCPs) 的污染水平及来源解析	周丽, 张秀蓝, 杨文龙, 李玲玲, 史双昕, 张利飞, 董亮, 黄业茹 (1159)
UV-B 辐射增强与 1,2,4-三氯苯污染复合胁迫对青菜生长的影响	刘翠英, 樊建凌, 徐向华 (1164)
Cu 和 Cd 胁迫下接种外生菌根真菌对油松根际耐热蛋白固持重金属能力的影响	张英伟, 柴立伟, 王东伟, 汪杰, 黄艺 (1169)
对硝基苯胺耐盐降解菌 S8 的筛选及特性研究	宋彩霞, 邓新平, 厉阍, 肖伟 (1176)
克雷伯氏菌生产絮凝剂 M-C11 的培养优化及其在污泥脱水中的应用	刘杰伟, 马俊伟, 刘彦忠, 杨娅, 岳东北, 王洪涛 (1183)
铅元素人为循环环境释放物形态分析	梁静, 毛建素 (1191)
污染排放与环境质量关系模型构建与应用	李名升, 孙媛, 陈远航, 张建辉 (1198)
微囊藻毒素微生物降解途径与分子机制研究进展	闫海, 王华生, 刘晓璐, 尹春华, 许倩倩, 吕乐, 马万彪 (1205)
《环境科学》征订启事 (809) 《环境科学》征稿简则 (819) 信息 (971, 978, 1050, 1175)	

UV-B 辐射增强与 1,2,4-三氯苯污染复合胁迫对青菜生长的影响

刘翠英¹, 樊建凌², 徐向华¹

(1. 南京信息工程大学应用气象学院, 江苏省农业气象重点实验室, 南京 210044; 2. 中国科学院南京土壤研究所, 南京 210008)

摘要: 采用盆栽实验, 分析了单一 UV-B 辐射增强或 1,2,4-三氯苯 (TCB) 污染土壤与两种胁迫复合作用对青菜生长发育、气孔阻力及叶片结构的影响。结果表明, 单一 1,2,4-TCB 污染对青菜生长发育的抑制作用大于两种胁迫复合作用。UV-B 辐射增强和 1,2,4-TCB 污染均显著增加青菜叶片正面和反面气孔阻力。UV-B 辐射增强使青菜叶片产生白化现象。1,2,4-TCB 污染使叶片颜色变淡, 并使青菜叶片表面出现黑斑症状, 且 UV-B 辐射增强使黑斑症状加剧。总之, 单一增强 UV-B 辐射或 1,2,4-TCB 污染及其复合作用对青菜各生长发育指标的影响结果不同。

关键词: UV-B 辐射; 1,2,4-三氯苯; 复合作用; 青菜; 生长

中图分类号: X171.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 0250-3301(2014)03-1164-05 **DOI:** 10.13227/j.hjkk.2014.03.049

Combined Stress of Enhanced UV-B Radiation and 1,2,4-Trichlorobenzene Contamination on the Growth of Green Vegetable

LIU Cui-ying¹, FAN Jian-ling², XU Xiang-hua¹

(1. Jiangsu Key Laboratory of Agricultural Meteorology, College of Applied Meteorology, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China; 2. Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

Abstract: A pot experiment was conducted to study the effects of UV-B radiation enhancement alone, 1,2,4-trichlorobenzene (TCB) contamination soil alone, and the combined stress on the growing process, stomatal resistance and leaf structure of green vegetable. The results showed that 1,2,4-TCB contamination alone had more significant inhibitory effect on the growth of green vegetable than the combined stress. Both UV-B radiation enhancement and 1,2,4-TCB contamination reduced the stomatal resistance of front and reverse leaves. Enhanced UV-B radiation resulted in the albino of leaves. 1,2,4-TCB contamination resulted in the fading of leaf color and the appearing of black spots on leaf surfaces, and the enhanced UV-B radiation strengthened the black-spot symptom. In conclusion, the effects of UV-B radiation enhancement alone, 1,2,4-trichlorobenzene (TCB) contamination soil alone and the combined stress on the growth indicators of green vegetable were different.

Key words: UV-B radiation; 1,2,4-trichlorobenzene; combined effect; green vegetable; growth

20 世纪以来, 人类活动导致大量的氯氟烃和氮氧化物等气体进入大气平流层, 导致平流层臭氧层变薄及臭氧空洞的出现, 使到达地面的太阳紫外辐射增强^[1]。目前, 由于大气臭氧层的破坏, 使到达地表的太阳紫外辐射比 1980 年前增加了 6% ~ 14%, 且在今后几十年内, 地表紫外辐射仍将持续增强^[2]。从生物学角度分析, 对地球生物造成直接影响的紫外辐射主要是中波紫外 (UV-B) 辐射^[3]。因此, 由平流层臭氧耗损导致的地表 UV-B 辐射增强, 已成为全球变化研究的重要问题之一。

国内外有关 UV-B 辐射增强对陆生植物的影响已有大量研究成果。其中, 对农作物的研究证实, UV-B 增强影响作物的形态结构、生长发育和生理代谢^[4], 使植株矮化、叶面积减少、发育迟缓、光合

作用和蒸腾作用下降、生物量和产量降低^[5~7]。UV-B 辐射增加还导致植物器官生长不均匀、根冠比降低, 对根系生长发育也具有抑制作用^[8]。

由于生物对增强的 UV-B 辐射响应同样依赖于其它强迫因子, 仅研究增强 UV-B 辐射对生物的影响很难正确评价自然界中 UV-B 辐射增强的实际生物学效应。因此, 目前关于生物对 UV-B 辐射增强与其他因子复合胁迫响应的研究, 越来越受到国内外研究者的重视。目前已有研究者针对增强的 UV-B 辐射与重金属、极端温度、干旱和营养限制等因

收稿日期: 2013-07-08; **修订日期:** 2013-10-29

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41201314, 41001134); 土壤与农业可持续发展国家重点实验室开放课题项目 (0812201227)

作者简介: 刘翠英 (1982 ~), 女, 博士, 讲师, 主要研究方向为环境化学与污染控制, E-mail: 002263@nuist.edu.cn

子对植物生长复合作用进行研究^[9]. 而关于作物对 UV-B 辐射与有机污染复合胁迫响应的研究仍罕有报道.

1,2,4-三氯苯(1,2,4-TCB)属于氯苯类有机化合物,其工业用途广泛^[10]. 目前,1,2,4-TCB 已在土壤、地下水、沉积物以及农作物中被大量检出^[11]. 由于其持久性、高毒性以及随食物链富集,美国环境保护局(EPA)已将其列入 31 种环境优先控制污染物名单. 而且 1,2,4-TCB 是三氯苯中用量最大的同分异构体,其苯环上的氯取代基存在邻位、间位、对位这 3 种空间结构. 因此,1,2,4-TCB 作为氯苯类的模式污染物,其环境行为已引起广大学者关注.

本研究通过温室盆栽实验,分析了 UV-B 辐射增强和 1,2,4-TCB 污染的复合胁迫对青菜生长发育的影响及其主要控制因素,以期评价生物对未来 UV-B 辐射增强和氯苯类有机污染共同胁迫的响应提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 实验材料

本研究采用温室盆栽实验,供试土壤采自南京市郊的农田,供试青菜为南京矮脚黄. UV-B 灯管由上海华德光源厂生产(40 W,峰值 313 nm),大部分属 UV-B 光谱(280 ~ 320 nm); 1,2,4-TCB(纯度 ≥99.5%,购于德国 Dr. Ehrenstorfer 公司).

1.2 实验设计

实验设 6 个处理:对照(自然光,无 1,2,4-TCB 污染);单一低水平 1,2,4-TCB 污染土壤(土壤中 1,2,4-TCB 含量为 10 mg·kg⁻¹);单一高水平 1,2,4-TCB 污染土壤(土壤中 1,2,4-TCB 含量为 20 mg·kg⁻¹);单一增强 UV-B 辐射(紫外辐射增强 0.70 W·m⁻²,相当于南京地区夏天日平均 UV-B 辐射增强 8%);UV-B 辐射增强和低水平 1,2,4-TCB 污染土壤;UV-B 辐射增强和高水平 1,2,4-TCB 污染土壤. 每个处理设 3 个重复. 紫外辐射增强采用可升降式的 UV-B 灯架,将 UV-B 灯管(280 ~ 320 nm)置于植株群体上方 1 m,用于模拟 UV-B 辐射增

强,紫外光每天 08:00 ~ 17:00 照射 9 h,阴雨天停止照射.

青菜播种时间为 2013 年 3 月,10 d 后齐苗,每盆定苗 3 株,在青菜生长过程中,定期进行浇水、追肥和消灭害虫.

1.3 测定指标及方法

分别于青菜生长的第 20、40、60 d 测定叶片气孔阻力. 于青菜生长的第 60 d 进行收获,小心地将青菜根从盆钵内的土壤中取出,将植株分为茎叶和根两部分,各部分植物样用自来水冲洗干净,测定主根长度. 植物样烘干后,称量各部分干重.

分别于青菜生长的第 20、40、60 d,采用 AP4 动态气孔计(英国 Delta 公司生产)测定青菜叶片正反两面的气孔阻力,测点在叶片中上部. 测定时间为每天早上 10:00.

叶片表面观察:在青菜长出 10 ~ 12 片真叶时,选择每个处理的第 4 片叶子用显微镜观察并拍照.

2 结果与讨论

2.1 青菜的生长发育指标

由表 1 和表 2 可以看出,在自然光照条件下,低浓度 1,2,4-TCB 污染土壤中生长的青菜,其地上部干重和主根长与对照相比均显著减少($P < 0.05$),根干重和叶片数也有减少趋势,但无显著差异($P > 0.05$). 高浓度 1,2,4-TCB 污染土壤中生长的青菜,地上部干重、根干重、叶片数和主根长与对照相比均显著减少($P < 0.05$). 另外,在自然光照条件下,除主根长外,本研究所测定的高浓度 1,2,4-TCB 污染土壤处理的青菜其它生长发育指标均显著低于低浓度 1,2,4-TCB 污染处理($P < 0.05$). 该结果表明,在自然光照条件下,土壤 1,2,4-TCB 污染抑制青菜生长,且浓度越高,抑制作用越强. 在 UV-B 辐射增强条件下,两个污染水平的 1,2,4-TCB 对青菜地上部分和根的生物量均无显著影响($P > 0.05$),但均可减少叶片总数($P < 0.05$),而且高水平的 1,2,4-TCB 污染显著减少青菜主根长($P < 0.05$).

表 1 1,2,4-三氯苯(TCB)污染和 UV-B 辐射增强及其复合作用对青菜生长发育指标的影响¹⁾

Table 1 Influence of 1,2,4-trichlorobenzene (TCB) contamination, UV-B radiation enhancement and their combined effect on the growth indicators of green vegetable

处理 1,2,4-TCB	地上部干重/g		根干重/g		叶片总数/片		主根长/cm	
	自然光	UV-B	自然光	UV-B	自然光	UV-B	自然光	UV-B
0	5.08 ± 0.39a	4.69 ± 0.29a	0.73 ± 0.08a	0.79 ± 0.02a	61 ± 6a	68 ± 7a	6.26 ± 0.55a	4.11 ± 0.77a
低	3.99 ± 0.21b	4.85 ± 0.67a	0.65 ± 0.20a	0.80 ± 0.21a	59 ± 4a	58 ± 6b	4.59 ± 0.22b	4.57 ± 0.38a
高	2.41 ± 0.52c	4.31 ± 0.45a	0.40 ± 0.13b	0.81 ± 0.18a	48 ± 6b	53 ± 7b	4.44 ± 0.36b	3.08 ± 0.59b

1) 同一列数据后不同字母表示在 0.05 水平有显著差异

表 2 方差分析¹⁾

Table 2 Analysis of variance

处理	地上部干重 /g	根干重 /g	叶片总数 /片	主根长 /cm
1,2,4-TCB	$P < 0.05$	ns	ns	$P < 0.05$
UV-B	ns	ns	ns	$P < 0.05$
1,2,4-TCB + UV-B	$P < 0.05$	ns	ns	ns

1) ns 表示在 0.05 水平差异不显著

方差分析结果显示,1,2,4-TCB 污染显著降低青菜地上部生物量和主根长($P < 0.05$),而对根干重和叶片总数无显著影响($P > 0.05$)。增强 UV-B 辐射显著缩短主根长($P < 0.05$),而对生物量和叶片总数无显著影响($P > 0.05$)。1,2,4-TCB 污染和 UV-B 辐射增强复合作用能够削弱单一 1,2,4-TCB 污染对降低青菜生物量的影响($P < 0.05$),而两种胁迫对青菜其它生长发育指标无显著交互作用($P > 0.05$)。

结果表明,单一 1,2,4-TCB 污染土壤对青菜生长发育具有抑制作用,且浓度越高,抑制效果越明显。这可能是由于土壤中的 1,2,4-TCB 通过青菜根系直接吸收或从土壤中挥发被青菜吸收,1,2,4-TCB 毒性较强,属于内分泌干扰物并能够使生物体的新陈代谢发生紊乱^[12,13],进而阻碍青菜的生长发育。前人研究也表明 1,2,4-TCB 对作物生长具有抑制作用,如杜青平等^[14]研究表明,水稻种子的萌发率和活力指数随 1,2,4-TCB 处理浓度的升高而逐渐降低,而且 1,2,4-TCB 对水稻幼苗的株高和根长有抑制作用;也有研究表明,1,2,4-TCB 可显著抑制根系的伸长生长^[15,16]。单一的 UV-B 辐射增强 8% 对青菜的各项生长发育指标的影响主要表现在缩短主根长,

对生物量影响较小。前人研究也表明,地表 UV-B 辐射增强能使作物根系数量、根长和根体积低于对照植株,同时也使根系活力降低,并且根系受抑制程度比地上部分更明显^[17~19]。本研究发现,UV-B 辐射增强能够削弱 1,2,4-TCB 污染对降低青菜生物量的影响,可能原因是 UV-B 辐射能够抵消一部分 1,2,4-TCB 对青菜生理反应的影响,具体机制有待进一步研究。目前有许多关于 UV-B 辐射增强与重金属污染复合作用的研究,如土壤镉污染会加剧 UV-B 辐射对欧洲云杉的损伤作用,镉与 UV-B 复合作用增强了对大豆生长和根伸长的抑制,加剧了生物产量的减少,并使株高降低^[20],很少有关于 UV-B 辐射增强与有机污染复合作用的报道。

2.2 青菜生长不同阶段的气孔阻力

叶片的气孔阻力影响叶片吸收气态物质的效率,进而影响其生长发育过程。由表 3 和表 4 可以看出,在青菜生长的第 20、40 和 60 d,在自然光和 UV-B 辐射增强条件下,两个 1,2,4-TCB 污染水平处理的叶片正面气孔阻力均显著高于对照($P < 0.05$),而且叶片正面气孔阻力在两个 1,2,4-TCB 污染水平处理之间无显著差异($P > 0.05$)。与叶片正面气孔阻力相比,1,2,4-TCB 污染对叶片反面气孔阻力的影响较小。除了在 20 d 时 UV-B 辐射增强条件下和 40 d 时自然光照条件下,两个污染水平的 1,2,4-TCB 均对叶片反面气孔阻力无显著影响外($P > 0.05$),其它时间的不同光照条件下,仅高水平 1,2,4-TCB 污染显著增加叶片反面气孔阻力($P < 0.05$),低水平 1,2,4-TCB 污染对叶片反面气孔阻力无显著影响($P > 0.05$)。

表 3 1,2,4-三氯苯 (TCB) 污染和 UV-B 辐射增强及其复合作用对青菜生长不同阶段的叶片正反面气孔阻力的影响¹⁾/s·cm⁻¹Table 3 Influence of 1,2,4-trichlorobenzene (TCB) contamination, UV-B radiation enhancement and their combined effect on the front and reverse stomatal resistance of green vegetable leaves during different growth stages/s·cm⁻¹

处理	气孔	20 d		40 d		60 d	
		自然光	UV-B	自然光	UV-B	自然光	UV-B
1,2,4-TCB							
0		6.32 ± 1.23b	14.03 ± 2.23b	13.31 ± 1.12b	15.93 ± 1.14b	13.48 ± 0.92b	15.42 ± 1.32b
低	正面气孔	15.22 ± 1.74a	20.67 ± 2.79a	16.59 ± 1.32a	24.82 ± 2.81a	16.52 ± 1.15a	21.52 ± 2.56a
高		14.34 ± 1.71a	20.58 ± 3.13a	17.61 ± 2.03a	22.32 ± 3.17a	16.17 ± 1.28a	18.01 ± 1.05a
0		4.63 ± 0.72b	8.43 ± 1.31a	7.22 ± 0.98a	11.43 ± 0.71b	6.02 ± 0.58b	8.82 ± 1.51b
低	反面气孔	6.02 ± 0.65b	10.08 ± 0.85a	8.34 ± 1.12a	12.21 ± 1.13b	5.01 ± 0.67b	11.34 ± 0.79b
高		9.76 ± 0.88a	10.72 ± 1.02a	10.17 ± 1.24a	15.34 ± 1.37a	9.87 ± 1.21a	14.09 ± 1.32a

1) 同一列数据后不同字母表示在 0.05 水平有显著差异

表 4 方差分析¹⁾

Table 4 Analysis of variance

处理	正面气孔	反面气孔
1,2,4-TCB	$P < 0.05$	$P < 0.05$
UV-B	$P < 0.05$	$P < 0.05$
1,2,4-TCB + UV-B	ns	ns

1) ns 表示在 0.05 水平差异不显著

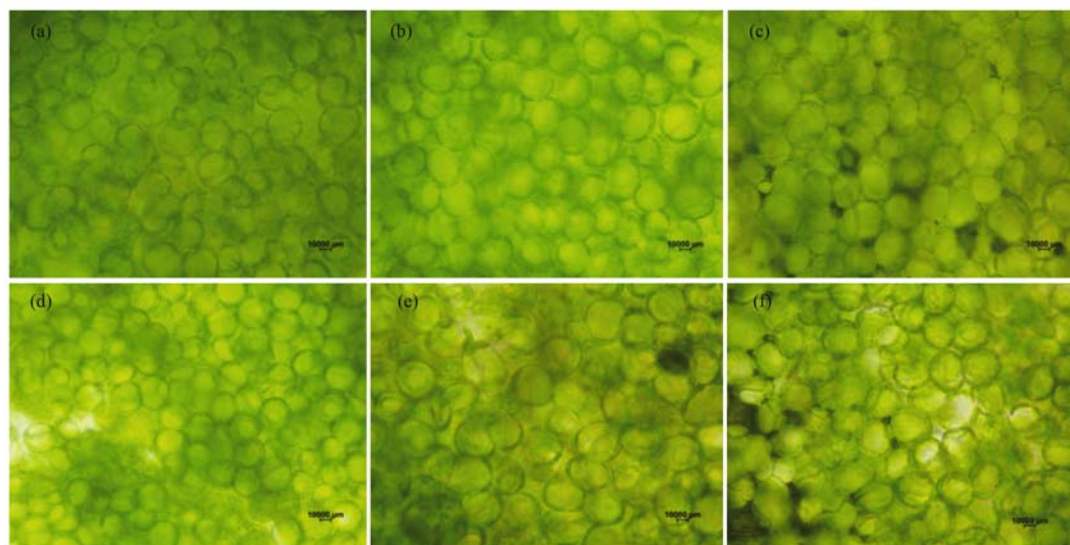
方差分析结果表明,单一 1,2,4-TCB 污染或单一 UV-B 辐射增强均显著增加青菜叶片正面和反面气孔阻力($P < 0.05$),表明青菜叶片可通过增加气孔阻力来抵御 UV-B 辐射增强和 1,2,4-TCB 污染的胁迫作用。而两种胁迫对青菜叶片正面和反面气孔

阻力均无显著交互作用 ($P > 0.05$)。结果表明, 1,2,4-TCB 污染物显著增加青菜叶片正面气孔阻力, 不利于叶片吸收气态物质如 CO_2 、 H_2O 等进行光合作用, 进而降低青菜地上部生物量, 与前人研究结果一致^[21]。已有研究表明, UV-B 辐射增强能够增加作物叶片的气孔阻力, 并降低光合速率^[22~24], 本研究发现青菜 UV-B 辐射增强对青菜生物量无显著影响, 可能原因是 UV-B 辐射能够削弱 1,2,4-TCB 对青菜生长代谢的负面影响, 其机制仍需进一步

研究。

2.3 叶片表面显微结构

由图 1 叶片表面显微结构观察结果可以看出, 在自然光照条件下, 1,2,4-TCB 污染水平越高, 叶片绿色越淡, 而且高水平 1,2,4-TCB 污染处理的叶片出现黑色斑点, 在增强 UV-B 辐射条件下, 也具有同样的规律, 但影响程度比自然光照条件更显著。在相同 1,2,4-TCB 污染处理条件下, 增强 UV-B 辐射处理的叶片绿色变淡, 而且表面均出现白化现象。



(a) 对照; (b) 1,2,4-TCB(低); (c) 1,2,4-TCB(高); (d) UV-B; (e) UV-B + 1,2,4-TCB(低); (f) UV-B + 1,2,4-TCB(高)

图 1 不同处理叶片表面显微结构

Fig. 1 Microstructure of leaf surface for different treatments

土壤中的 1,2,4-TCB 通过青菜根系运输或从土壤中挥发被青菜叶片吸收, 在叶片积累, 使其表现出明显的黑斑症状。而且 1,2,4-TCB 污染使叶片绿色变淡, 主要原因可能是 1,2,4-TCB 使叶绿素含量降低, 如 1,2,4-TCB 能够使水稻叶片叶绿素含量减少^[14, 21]。

UV-B 辐射增强主要使叶片绿色变淡而且产生白化现象, 可能是 UV-B 辐射能够被植物叶片吸收, 对叶片中叶绿素的合成和分解产生影响。前人研究也表明, UV-B 辐射增强能破坏叶绿体系统, 使其中的叶绿素 a、叶绿素 b 及叶绿素总量下降。而且 UV-B 辐射能破坏类囊体光系统尤其是捕光色素系统, 从而导致叶绿体吸收光能减少, 叶片光系统 II 原初光能转换效率和光系统 II 潜在活性下降。所以 UV-B 辐射增强会破坏叶绿体等光合器官结构, 引起光合色素降解^[25, 26]。

观察结果显示, UV-B 辐射增强加剧 1,2,4-TCB 污染所导致的青菜叶片表面黑斑症状, 表明 UV-B

辐射增强和 1,2,4-TCB 污染复合胁迫对青菜叶表黑斑症状具有协同作用。

3 结论

(1) 土壤 1,2,4-TCB 污染抑制青菜生长, 且浓度越高抑制效果越显著。在 UV-B 辐射增强条件下, 土壤 1,2,4-TCB 污染对降低青菜生物量的影响小于自然光照条件。

(2) 1,2,4-TCB 污染和 UV-B 辐射增强均显著增加叶片正面和反面气孔阻力。

(3) 土壤 1,2,4-TCB 污染水平越高, 青菜叶片绿色越淡, 而且 1,2,4-TCB 污染导致叶片出现黑色斑点症状, 该症状在 UV-B 辐射增强条件下更显著。增强 UV-B 辐射使叶片表面出现白化现象。

参考文献:

- [1] Kerril B. Evidence for large upward trends of ultraviolet-B radiation linked to ozone depletion [J]. Science, 1994, 262 (5136): 1032-1034.
- [2] UNEP. Executive Summary. Final of UNEP/WMO scientific

- assessment of ozone depletion; 2002 [A]. In: Prepared by the Scientific Assessment Panel of the Montreal Protocol on Substances that Deplete the Ozone Layer[C]. UNEP, 2002.
- [3] 娄运生, 程焕友, 王恩眷, 等. UV-B 辐射增强下施氮对大麦土壤微生物量碳、氮的影响[J]. 中国农学通报, 2010, **26**(13): 219-224.
- [4] 周党卫, 韩发, 滕中华, 等. UV-B 辐射增强对植物光合作用的影响及植物的相关适应性研究[J]. 西北植物学报, 2002, **22**(4): 1004-1010.
- [5] Kakani V G, Reddy K R, Zhao D, *et al.* Field crop responses to ultraviolet-B radiation: a review [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2003, **120**(1-4): 191-218.
- [6] 郑有飞, 胡会芳, 吴荣军, 等. O₃ 和 UV-B 共同作用对大豆干物质和产量的影响[J]. 环境科学研究, 2013, **26**(6): 624-630.
- [7] 张益锋, 何平, 张春平. 干旱及增强 UV-B 胁迫对金荞麦生物量积累与分配的影响[J]. 中国中药杂志, 2011, **36**(15): 2032-2037.
- [8] Ziskal L H, Teramura A H. CO₂ enhancement of growth and photosynthesis in rice (*Oryza-sativa*): modification by increased ultraviolet-B radiation [J]. *Plant Physiology*, 1992, **99**(2): 473-481.
- [9] 郑有飞, 刘建军, 王艳娜, 等. 增强 UV-B 辐射与其它因子复合作用对植物生长的影响研究[J]. 西北植物学报, 2007, **27**(8): 1702-1712.
- [10] Rapp P. Multiphasic kinetics of transformation of 1, 2, 4-trichlorobenzene at Nano- and Micromolar concentrations by *Burkholderia* sp. strain PS14 [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2001, **67**(8): 3496-3500.
- [11] Zolezzi M, Cattaneo C, Tarazona J V. Probabilistic ecological risk assessment of 1,2,4-trichlorobenzene at a former industrial contaminated site [J]. *Environmental Science and Technology*, 2005, **39**(9): 2920-2926.
- [12] 张国良, 陈文军, 仇利民, 等. 不同基因型水稻苗期对 1,2,4-三氯苯胁迫的生理响应[J]. 作物学报, 2009, **35**(4): 733-740.
- [13] 丁艳, 葛才林, 王泽港, 等. 小麦幼苗对镉和 1,2,4-三氯苯污染的响应[J]. 中国农业大学学报, 2011, **16**(3): 48-52.
- [14] 杜青平, 贾晓珊, 袁保红. 1,2,4-三氯苯对水稻种子萌发及幼苗生长的毒性机理[J]. 应用生态学报, 2006, **17**(11): 2185-2188.
- [15] 王泽港, 葛才林, 万定珍, 等. 1, 2, 4-三氯苯和萘对水稻幼苗生长的影响[J]. 农业环境科学学报, 2006, **25**(6): 1402-1407.
- [16] 宋玉芳, 周启星, 许华夏, 等. 菲、芘、1,2,4-三氯苯对土壤高等植物根伸长抑制的生态毒性效应 [J]. 生态学报, 2002, **22**(11): 1945-1950.
- [17] 马飞, 欧明君, 葛才林, 等. 氟污染对作物光合产物输配的影响[J]. 农业环境保护, 2001, **20**(2): 94-97.
- [18] 侯扶江, 贲桂英. UV-B 辐射对大豆和黄瓜幼苗某些生理特性的影响[J]. 应用与环境生物学报, 1999, **5**(5): 455-458.
- [19] 王传海, 郑有飞, 何都良, 等. 小麦不同指标对紫外辐射 UV-B 增加反应敏感性差异的比较[J]. 中国农学通报, 2003, **19**(6): 43-45.
- [20] 强维亚, 周九菊, 杨晖, 等. 镉(Cd)与 UV-B 复合胁迫影响大豆胚轴生长的生理调节机制研究[J]. 西北植物学报, 2005, **25**(1): 82-87.
- [21] 王泽港, 骆剑峰, 高红明, 等. 1,2,4-三氯苯和萘对水稻抽穗期叶片光合特性的影响[J]. 中国农业科学, 2005, **38**(6): 1113-1119.
- [22] 贺军民, 余小平, 刘成, 等. 增强 UV-B 辐射和 NaCl 复合胁迫下绿豆光合作用的气孔和非气孔限制[J]. 植物生理与分子生物学报, 2004, **30**(1): 53-58.
- [23] 孟朝妮, 刘成, 贺军民, 等. 增强 UV-B 辐射、NaCl 胁迫及其复合处理对小麦幼苗光合作用及黄酮代谢的影响[J]. 光子学报, 2005, **34**(12): 1868-1871.
- [24] 郑有飞, 徐卫民, 吴荣军, 等. 地表臭氧浓度增加和 UV-B 辐射增强及其复合处理对大豆光合特性的影响[J]. 生态学报, 2012, **32**(8): 2515-2524.
- [25] Cassi-Lit M, Whitecross M J, Nayudu M, *et al.* UV-B irradiation induces differential leaf damage, ultrastructural changes and accumulation of specific phenolic compounds in rice cultivars [J]. *Australian Journal of Plant Physiology*, 1997, **24**(3): 261-274.
- [26] 李涵茂, 胡正华, 杨燕萍, 等. UV-B 辐射增强对大豆叶绿素荧光特性的影响[J]. 环境科学, 2009, **30**(12): 3669-3675.

CONTENTS

Concentration and Community Diversity of Microbes in Bioaerosols in the Qingdao Coastal Region	QI Jian-hua, WU Li-jing, GAO Dong-mei, <i>et al.</i> (801)
Carbon Source Apportionment of PM _{2.5} in Chongqing Based on Local Carbon Profiles	ZHANG Can, ZHOU Zhi-en, ZHAI Chong-zhi, <i>et al.</i> (810)
Observation of Atmospheric Pollutants in the Urban Area of Beibei District, Chongqing	XU Peng, HAO Qing-ju, JI Dong-sheng, <i>et al.</i> (820)
A Floating-Dust Case Study Based on the Vertical Distribution of Aerosol Optical Properties	WANG Yuan, DENG Jun-ying, SHI Lan-hong, <i>et al.</i> (830)
Analysis and Assessment of Atmospheric Pollution Based on Accumulation Characterization of Heavy Metals in <i>Platanus acerifolia</i> Leaves	LIU Ling, FANG Yan-ming, WANG Shun-chang, <i>et al.</i> (839)
Study on the Emission Characteristics and Potential Environment Hazards of the Heat-setting Machine of the Typical Dyeing and Finishing Enterprise	XU Zhi-rong, WANG Peng, WANG Zhe-ming, <i>et al.</i> (847)
Implementation Results of Emission Standards of Air Pollutants for Thermal Power Plants; a Numerical Simulation	WANG Zhan-shan, PAN Li-bo (853)
On Road Particle Emission Characteristics of a Chinese Phase IV Natural Gas Bus	LOU Di-ming, CHENG Wei, FENG Qian (864)
Chemical Compositions of <i>n</i> -Alkanols in Smoke from Rice and Maize Straw Combustion	LIU Gang, LI Jiu-hai, WU Dan, <i>et al.</i> (870)
Diurnal and Seasonal Variations of Surface Atmospheric CO ₂ Concentration in the River Estuarine Marsh	ZHANG Lin-hai, TONG Chuan, ZENG Cong-sheng (879)
Partial Pressure and Diffusion Flux of Dissolved Carbon Dioxide in the Mainstream and Tributary of the Central Three Gorges Reservoir in Summer	LI Shuang, WANG Yu-chun, CAO Man, <i>et al.</i> (885)
Emission of CH ₄ , N ₂ O and NH ₃ from Vegetable Field Applied with Animal Manure Composts	WAN He-feng, ZHAO Chen-yang, ZHONG Jia, <i>et al.</i> (892)
Effects of Different Iron Oxides on Methane Emission in Paddy Soil as Related to Drying/Wetting Cycles	ZHANG Tian-jiao, TANG Jia, ZHUANG Li, <i>et al.</i> (901)
Study on the Dissolution Behavior of Biogenic Silica in the Changjiang Estuary Adjacent Sea	WU Bin, LÜ Wei-xiang, LU Chao, <i>et al.</i> (908)
Phytoplankton Community Structure and Assessment of Water Quality in the Middle and Lower Reaches of Fenhe River	WANG Ai-ai, FENG Jia, XIE Shu-lian (915)
Lake Algae Chemotaxonomy Technology Based on Fluorescence Excitation Emission Matrix and Parallel Factor Analysis	CHEN Xiao-na, HAN Xiu-rong, SU Rong-guo, <i>et al.</i> (924)
Ultraviolet-Visible (UV-Vis) Spectral Characteristics of Dissolved Organic Matter (DOM) in Soils and Sediments of Typical Water-Level Fluctuation Zones of Three Gorges Reservoir Areas	LI Lu-lu, JIANG Tao, YAN Jin-long, <i>et al.</i> (933)
Distribution of Phosphorus in Surface Sediments from the Yellow River Estuary Wetland	YU Zi-yang, DU Jun-tao, YAO Qing-zhen, <i>et al.</i> (942)
Characteristics and Influencing Factors of Phosphorus Adsorption on Sediment in Lake Taihu and Lake Hulun	CHUAI Xiao-ming, YANG Liu-yan, CHENG Shu-bo, <i>et al.</i> (951)
Linking Optical Properties of Dissolved Organic Matter with NDMA Formation Potential in the Huangpu River	DONG Qian-qian, ZHANG Ai, LI Yong-mei, <i>et al.</i> (958)
Reductive Debromination of Polybrominated Diphenyl Ethers in Aquifer by Nano Zero-valent Iron; Debromination Kinetics and Pathway	YANG Yu-han, XU Wei-wei, PENG Si-kan, <i>et al.</i> (964)
Influencing Factors and Reaction Mechanism of Chloroacetic Acid Reduction by Cast Iron	TANG Shun, YANG Hong-wei, WANG Xiao-mao, <i>et al.</i> (972)
Effect of Phosphorus Recovery on Phosphorous Bioaccumulation/Harvesting in an Alternating Anaerobic/Aerobic Biofilter System	ZHANG Shun, TIAN Qing, TANG Man-lin, <i>et al.</i> (979)
Effects of Pretreatment Methods on Corncob as Carbon Source for Denitrification	ZHAO Wen-li, HAO Rui-xia, LI Bin, <i>et al.</i> (987)
Start-Up by Inoculation and Operation of a CANON Reactor with Haydite as the Carrier	FU Kun-ming, ZUO Zao-rong, QIU Fu-guo (995)
Diversity of Operation Performance and Microbial Community Structures in MBRs and CAS Processes at Low Temperature	HUANG Fei, MEI Xiao-jie, WANG Zhi-wei, <i>et al.</i> (1002)
Enhanced Hydrolysis and Acidification of Waste Activated Sludge by Alkyl Polyglycosides	CHEN Can, SUN Xiu-yun, HUANG Cheng, <i>et al.</i> (1009)
Effect of Substrate Concentration on Pathogen Indicators Inactivation During Thermophilic Anaerobic Digestion	CAO Hong-qing, ZHANG Fei-fei, LI Jian, <i>et al.</i> (1016)
Pollution Evaluation and Health Risk Assessment of Heavy Metals from Atmospheric Deposition in Lanzhou	LI Ping, XUE Su-yin, WANG Sheng-li, <i>et al.</i> (1021)
Ecological Risk Assessment of Organophosphorus Pesticides in Aquatic Ecosystems of Pearl River Estuary	GUO Qiang, TIAN Hui, MAO Xiao-xuan, <i>et al.</i> (1029)
Source Characteristics and Contamination Evaluation of Heavy Metals in the Surface Sediments of Haizhou Bay	LI Fei, XU Min (1035)
Health Risk Induced by Estrogens During Unplanned Indirect Potable Reuse of Reclaimed Water from Domestic Wastewater	WU Qian-yuan, SHAO Yi-ru, WANG Chao, <i>et al.</i> (1041)
Distribution Characteristics and Erosion Risk of Nitrogen and Phosphorus in Soils of Zhuangmu Town in Lake Wabuhu Basin	LI Ru-zhong, ZOU Yang, XU Jing-jing, <i>et al.</i> (1051)
Distribution and Risk Assessment of Mercury Species in Soil of the Water-Level-Fluctuating Zone in the Three Gorges Reservoir	ZHANG Cheng, CHEN Hong, WANG Ding-yong, <i>et al.</i> (1060)
Health Risk Assessment of Soil Heavy Metals in Residential Communities Built on Brownfields	CHEN Xing, MA Jian-hua, LI Xin-ning, <i>et al.</i> (1068)
Study on Ecological Risk Assessment Technology of Fluoride Pollution from Arid Oasis Soil	XUE Su-yin, LI Ping, WANG Sheng-li, <i>et al.</i> (1075)
Rainfall Process and Nitrogen Input in Three Typical Forests of Jinyun Mountain	SUN Su-qi, WANG Yu-jie, WANG Yun-qi, <i>et al.</i> (1081)
Effects of Land Use and Landscape Pattern on Nitrogen and Phosphorus Exports in Lanlingxi Watershed of the Three Gorges Reservoir Area, China	HAN Li-yang, HUANG Zhi-lin, XIAO Wen-fa, <i>et al.</i> (1091)
Changes and Influencing Factors of the Soil Organic Carbon in Farmland in the Last 30 Years on Hilly Loess Plateau; A Case Study in Zhuanglang County, Gansu Province	SHI Chen-di, XU Ming-xiang, QIU Yu-jie, <i>et al.</i> (1098)
Organic Carbon and Carbon Mineralization Characteristics in Nature Forestry Soil	YANG Tian, DAI Wei, AN Xiao-juan, <i>et al.</i> (1105)
Dynamic Change of Phosphorus Leaching of Neutral Purple Soil at Different Re-wetting Rate	ZHANG Si-lan, SHI Xiao-jun, GUO Tao (1111)
Effects of Thiourea on pH and Availability of Metal Ions in Acid Red Soil	YANG Bo, WANG Wen, ZENG Qing-ru, <i>et al.</i> (1119)
Growth Responses of Six Leguminous Plants Adaptable in Northern Shaanxi to Petroleum Contaminated Soil	SHAN Bao-qin, ZHANG Yong-tao, CAO Qiao-ling, <i>et al.</i> (1125)
Plant N Status in the Alpine Grassland of the Qinghai-Tibet Plateau; Base on the N:P Stoichiometry	ZHANG Ren-yi, XU Dang-hui, CHEN Ling-yun, <i>et al.</i> (1131)
Development and Succession of Artificial Biological Soil Crusts and Water Holding Characteristics of Topsoil	WU Li, CHEN Xiao-guo, ZHANG Gao-ke, <i>et al.</i> (1138)
Carbon Dioxide Assimilation Potential, Functional Gene Amount and RubisCO Activity of Autotrophic Microorganisms in Agricultural Soils	CHEN Xiao-juan, WU Xiao-hong, JIAN Yan, <i>et al.</i> (1144)
Dynamics of Microbes and Enzyme Activities During Litter Decomposition of <i>Pinus massoniana</i> Forest in Mid-subtropical Area	SONG Ying, GU Xi-rong, YAN Hai-yuan, <i>et al.</i> (1151)
Levels and Possible Sources of Organochlorine Pesticides (OCPs) in Camphor (<i>Cinnamomum camphora</i>) Tree Bark from Southern Jiangsu, China	ZHOU Li, ZHANG Xiu-lan, YANG Wen-long, <i>et al.</i> (1159)
Combined Stress of Enhanced UV-B Radiation and 1,2,4-Trichlorobenzene Contamination on the Growth of Green Vegetable	LIU Cui-ying, FAN Jian-ling, XU Xiang-hua (1164)
Effect of Ectomycorrhizae on Heavy Metals Sequestration by Thermostable Protein in Rhizosphere of <i>Pinus tabulaeformis</i> Under Cu and Cd Stress	ZHANG Ying-wei, CHAI Li-wei, WANG Dong-wei, <i>et al.</i> (1169)
Isolation and Characterization of a Halotolerant <i>p</i> -nitroaniline Degrading Strain S8	SONG Cai-xia, DENG Xin-ping, LI Tian, <i>et al.</i> (1176)
Optimized Cultivation of a Bioflocculant M-C11 Produced by <i>Klebsiella pneumoniae</i> and Its Application in Sludge Dewatering	LIU Jie-wei, MA Jun-wei, LIU Yan-zhong, <i>et al.</i> (1183)
Speciation Analysis of Lead Losses from Anthropogenic Flow in China	LIANG Jing, MAO Jian-su (1191)
Establishment and Application of Pollutant Discharge-Environment Quality Model	LI Ming-sheng, SUN Yuan, CHEN Yuan-hang, <i>et al.</i> (1198)
Advances in the Pathway and Molecular Mechanism for the Biodegradation of Microcystins	YAN Hai, WANG Hua-sheng, LIU Xiao-lu, <i>et al.</i> (1205)

《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3月15日 35卷 第3期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 3 Mar. 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