

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)	

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

(延安大学石油工程与环境工程学院,延安 716000)

摘要:为筛选优良的石油污染土壤修复植物,选取陕北适生的6种豆科乡土植物,对不同浓度原油污染土壤中植物的生长差异进行研究.采用混油法盆栽试验,分设0、5 000、10 000、20 000、40 000 mg·kg⁻¹共5个不同的原油污染浓度,分析其对土壤理化性质的改变,对植物出芽时间、出芽率、株高、植物干重、叶绿素含量和枯萎率的影响.结果表明,原油污染显著改变土壤理化性质.5 000 mg·kg⁻¹低浓度原油污染,对受试植物的发芽率和植物株高有促进作用,后随原油浓度加大植物生长受到明显抑制.原油污染浓度低时草本植物耐受力较强,其中紫花苜蓿(*Medicago sativa*)在出芽时间、出芽率、株高及枯萎率等方面综合表现较优.从40 000 mg·kg⁻¹浓度时枯萎率及叶绿素含量分析,刺槐(*Robinia pseudoacacia*)表现较高的耐受力.相关分析表明,原油污染浓度与植物出芽时间、出芽率、株高、干重均呈显著负相关,但与叶绿素含量呈极显著正相关.

关键词:陕北;豆科植物;原油污染;土壤;耐受力

中图分类号:X53 文献标识码:A 文章编号:0250-3301(2014)03-1125-06 DOI: 10.13227/j.hjxx.2014.03.043

Growth Responses of Six Leguminous Plants Adaptable in Northern Shaanxi to Petroleum Contaminated Soil

SHAN Bao-qin, ZHANG Yong-tao, CAO Qiao-ling, KANG Zhen-yan, LI Shu-yuan

(School of Petroleum Engineering and Environmental Engineering, Yan'an University, Shaanxi 716000, China)

Abstract: To select appropriate native species in Northern Shaanxi for phytoremediation, the growth index of six kinds of leguminous plants planted in petroleum contaminated soils were investigated through pot culture. Petroleum concentrations were set at 0, 5 000, 10 000, 20 000, 40 000 mg·kg⁻¹ respectively with three replicates. Using different levels of seed germination rate, germination time, individual height, wilting rate, dry weight and chlorophyll content in leaves of tested plants as the ecological indicator. The results showed that tested plants have significantly different responses to petroleum pollution. Compared with those planted in clean soils, seed germination rate and individual height were promoted when petroleum concentration was lower than 5 000 mg·kg⁻¹, but inhibition occurred when petroleum concentrations were higher than 10 000 mg·kg⁻¹. Strong endurance of *Medicago sativa* was observed to petroleum polluted soil, especially at lower petroleum concentration. Leaf wilting of *Robinia pseudoacacia* was unobserved even when petroleum concentration was 40 000 mg·kg⁻¹, thus displaying the potential of remediating petroleum contaminated soils. The petroleum concentration was significantly and negatively correlated with seed germination rate, individual height and dry weight, but positively correlated with chlorophyll content in leaves.

Key words: Northern Shaanxi; leguminous plants; petroleum contamination; soil; endurance

陕北作为中国重要的能源基地,石油探明储量已达11亿t.在长期勘探开采、储运炼制过程中,由于操作不当、事故泄漏及钻井液影响,石油烃类污染已造成严重的土壤环境破坏^[1~3].陕北油井井场土壤普遍存在原油污染^[4],原油堵塞土壤孔隙、使土壤结构破坏、生物多样性降低,特别是多环芳烃的致癌致畸性会随食物链影响人体健康,因此污染土壤的修复迫在眉睫.

原油开采区土壤污染的修复技术研究已经成为当今环保领域新热点^[5~7].植物修复(phytoremediation)技术是以植物忍耐和超积累特定污染物的理论为基础,利用植物及共存微生物体系对环境污染物质进行清除、分解、吸收或吸附,使

土壤环境重新得以恢复的新兴应用技术^[8],因为成本低、无二次污染等优点备受青睐^[9,10].植物修复在降解污染物的同时也增加植被覆盖、控制风沙水蚀、改善生态环境及野生生物繁衍生境,并给人以美的享受.由于其所具有的巨大发展潜力,植物修复技术需要系统化应用性的研究.

针对具体的地域环境,筛选出最佳的土壤类别-适生植物-耐油污力的组合,是植物修复技术的前期

收稿日期:2013-07-24;修订日期:2013-09-22

基金项目:陕西省自然科学基金项目(2010JQ5007);陕西省教育厅科研项目(2010JK920);延安大学校内基金项目(YD2009-03);国家大学生创新性实验项目(201307123)

作者简介:山宝琴(1970~),女,博士,副教授,主要研究方向石油污染土壤生物修复,E-mail:xiaoshanbao@163.com

基础工作,也是决定未来修复效果的核心技术. 石油烃具有的生态毒性会使强致癌物质随农作物采收进入食物链并传播,修复植物的选用因而需要更为慎重,寻找耐油污的花卉、牧草等植物作为新的修复介质一直是研究的热点^[11~13]. 选择修复植物必须坚持“适生”的原则,将乡土物种应用于退化生态系统修复,并利用植被的演替而渐次削弱土壤的生态毒性应是一个良好的思路,针对陕北区域特征,进行适生乡土植物原油耐受力的筛选研究尚鲜见报道. 陕北黄土高原属生态脆弱区,气候干旱少雨,寒暑温差显著,土壤瘠薄,植被分布因而有其独特的地域性. 豆科植物因为耐阴寒、干旱、瘠薄,根系发达且适应性强,成为陕北地区野外分布的优势种群. 本研究针对陕北地区油井周边优势植物种类,选取6种豆科乡土植物沙打旺(*Astragalus adsurgens*)、紫花苜蓿(*Medicago sativa*)、红三叶草(*Trifolium pratense*)、柠条(*Caragana korshinskii*)、胡枝子(*Lespedeza bicolor*)和刺槐(*Robinia pseudoacacia*)作为供试植物^[14],就植物对原油污染物的耐受力差异性进行了研究,采用混油法盆栽试验,分设0、5 000、10 000、20 000、40 000 mg·kg⁻¹这5个不同的原油污染浓度,分析它们对土壤理化性质的改变,对植物出苗率、株高、植物干重、叶绿素含量和枯萎率的影响,并进行相关性分析. 旨在筛选出最佳土壤类别-适生植物-耐油污能力的组合,为后期深入研究其原油污染的降解力,利用乡土物种的生命力和适生性降低修复成本,增加陕北油污土壤修复效果提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 研究材料

试验用植物种子均采自野外. 原油污染物取自延长石油集团七里村采油厂. 供试土壤取自延安市宝塔区杨家岭后山黄绵土. 土壤样品风干后压碎成细小颗粒过2 mm筛,再同细沙以3:1的比例混匀,待用. 供试花盆的规格为直径20 cm,深20 cm,每

盆定值20粒种子.

1.2 土壤理化性质的测定

用1:1水浸提液测定土壤pH,土壤总有机碳含量用德国Elementar总有机碳测定仪(Vario TOC Select)测定,土壤速效氮用碱解扩散法,土壤速效磷采用碳酸氢钠-钼锑抗比色法测定^[15],土壤脲酶采用靛酚比色法测定^[16],以每h每g土壤中NH₄⁺-N的毫克数表示.

1.3 植物原油污染物耐受力的测定

2012年4月进行盆栽试验,采用混油法设0、5 000、10 000、20 000、40 000 mg·kg⁻¹共5个处理浓度,每种浓度设3组重复. 每盆装3:1的沙土混合物1 kg,共90盆. 用石油醚按1:1溶解原油并施入土壤,静置7 d使石油污染物与土样充分混合. 将盆放置在温度光照基本一致的地方,保持良好的光照和通风,花盆随机分组排列,并定期调换,以达到局部控制的目的. 试验于4月7号播种,每盆播20粒种子,覆土1 cm左右. 每天2次浇灌,使土壤含水率控制在25%左右. 每天观察并记录出苗率、幼苗生长状况,并分别浓度定期测定植物株高、枯萎率,2个月后收获测定植物叶绿素(丙酮法)和植物干重.

1.4 数据处理

试验数据用Excel和SPSS 18.0进行统计分析,Excel软件制图.

2 结果与分析

2.1 原油污染对土壤理化性质的影响

为深入研究不同原油污染浓度处理对土壤理化因子的改变,及对植物生长的作用,测定了5种原油浓度中土壤的理化性质,见表1. 土壤总有机碳含量随原油浓度的增加而显著增加;土壤速效氮含量添加原油后显著大于未添加,但不同添加浓度差异不显著;土壤速效磷含量在原油含量≥20 000 mg·kg⁻¹浓度时显著高于未添加对照;样地土壤pH值为碱性,≥10 000 mg·kg⁻¹原油浓度后随原油浓

表1 不同浓度原油污染土壤的理化性质¹⁾

Table 1 Soil factors in different concentrations of petroleum hydrocarbon

石油烃浓度 /mg·kg ⁻¹	总有机碳 /%	速效氮 /μg·g ⁻¹	速效磷 /μg·g ⁻¹	pH	脲酶 /μg·(g·h) ⁻¹	电导率 /μS·cm ⁻¹
0	2.15a	8.95a	2.04a	7.62a	0.16c	112.56a
5 000	3.93ab	10.22ab	2.92a	7.72a	0.07b	145.03a
10 000	7.19ab	15.35b	2.09a	8.08b	0.06ab	208.56a
20 000	15.92bc	14.80b	4.09ab	8.18b	0.05ab	427.13b
40 000	26.41c	15.10b	8.09b	8.30c	0.02a	704.56c

1) 同列数据后标不同小写字母者表示不同污染浓度在P<0.05水平上差异显著

度增加而显著增加; 脲酶活性添加原油后显著小于未添加土壤, 并随添加浓度的增加而显著减小. 土壤电导率添加原油后大于未添加处理, 20 000 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 40 000 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 浓度时差异显著.

2.2 植物耐油污力分析

2.2.1 原油污染对植物发芽时间及发芽率的影响

从表 2 可知, 植物出芽率和出芽时间受到物种本身生物学特性和原油污染的双重影响. 6 种豆科植物中沙打旺、紫花苜蓿、红三叶草属于草本植物, 胡枝子和柠条属于灌木, 刺槐属于乔木. 无污染处理时, 植物出芽时间为 3~6 d, 乔木>灌木>草本植物, 可见不同受试植物本身的生物特性存在差异.

同种植物出芽时间随污染浓度增高而明显延迟, 延迟期限乔木>灌木>草本植物, 刺槐延迟最明显; 各浓度污染处理时, 植物出芽率均为草本>灌

木类>乔木, 但同种植物出芽率显著受到原油污染的影响, 5 000 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时 6 种植物的发芽率均高于无污染的对照, 说明低浓度原油对植物发芽有促进作用, 后随原油污染浓度增高出芽率降低, 40 000 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 高浓度污染时出芽率最低. 与无污染对照相比较 6 种植物出芽率分别下降为: 紫花苜蓿 8.3%、胡枝子 19.8%、柠条 27.4%、沙打旺 29.9%、红三叶草 33.3%、刺槐 42.2%, 其中紫花苜蓿受污染影响最小, 刺槐最大.

另外, 沙打旺、红三叶草、胡枝子和柠条均在 20 000 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 浓度处理时出现叶片枯萎, 分别是 21%、32%、14%、7%, 40 000 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 浓度时枯萎率分别达到 28%、46%、19%、10%; 紫花苜蓿 40 000 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 浓度时有叶片枯萎 9%, 刺槐未见枯萎.

表 2 不同浓度原油污染土壤植物出芽率及出芽时间

供试植物	石油烃浓度/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$									
	0		5 000		10 000		20 000		40 000	
	出芽时间/d	出芽率/%	出芽时间/d	出芽率/%	出芽时间/d	出芽率/%	出芽时间/d	出芽率/%	出芽时间/d	出芽率/%
1 沙打旺	4	66.7	5	73.3	7	60.0	8	46.7	16	46.7
2 紫花苜蓿	3	80.0	5	86.7	6	80.0	8	73.3	14	73.3
3 红三叶草	4	73.3	6	77.8	8	73.3	9	62.2	15	48.9
4 胡枝子	4	62.1	6	70.5	10	55.8	14	51.3	16	49.8
5 柠条	5	53.2	6	55.9	11	46.7	16	42.1	18	38.6
6 刺槐	6	46.2	6	46.7	13	40.0	20	26.7	22	26.7

2.2.2 原油污染对植物生长指标的影响

图 1 分析可知, 植物株高、干重和叶绿素含量均受到原油污染显著影响, 紫花苜蓿和柠条的株高在 5 000 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 处理时略高于无污染对照, 后随污染浓度加大而逐渐减小. 沙打旺、三叶草、胡枝子和刺槐的株高均受到原油污染显著影响, 且随污染浓度加大而降低. 6 种植物株高在 40 000 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 处理时与无污染对照相比, 降低量依次为: 红三叶草 68.8%、刺槐 41.5%、柠条 39.2%、胡枝子 35.5%、沙打旺 21.6%、紫花苜蓿 25.0%. 显著抑制植物株高的原油浓度值随物种而不同, 沙打旺出现在 5 000 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 刺槐在 10 000 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 柠条在 20 000 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$.

紫花苜蓿和柠条的干重在 5 000 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 处理时略高于无污染对照, 后随污染浓度加大而逐渐减小. 沙打旺、红三叶草、胡枝子和刺槐的干重在污染处理时都小于无污染对照, 且随污染浓度加大而减小. 6 种植物干重在 40 000 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 处理时与无污染对照相比, 减小量依次为: 红三叶草 70.1%、沙

打旺 52.0%、紫花苜蓿 40.5%、刺槐 38.9%、胡枝子为 31.5%、柠条 30.4%.

6 种植物的叶绿素含量首先随物种而有差异, 乔木>灌木>草本. 红三叶草叶绿素含量随原油污染浓度加大无一定规律, 其它植物在 5 000 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 处理时与无污染对照基本持平, 后随污染浓度加大而逐渐增加, 40 000 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 处理浓度时达到最大值, 与植物株高与干重表现出相反的趋势.

2.2.3 相关性分析

表 3 中植物生长与土壤因子相关性分析表明, 植物出芽率首先随物种不同而有差异, 与物种大小呈极显著负相关, 草本最易萌芽, 乔木最难. 同种植物出芽率则与原油污染浓度显著负相关. 植物出芽时间受到原油污染显著影响, 随土壤总有机碳、速效氮、速效磷、pH 及电导率的增加而显著延长, 只与脲酶显著负相关. 植物株高和干重均与物种本身特性极显著相关, 同种植物则与原油污染浓度显著负相关. 叶绿素含量与物种显著正相关, 乔木>灌木>草本, 同时与原油污染浓度显著正相关, 与土壤

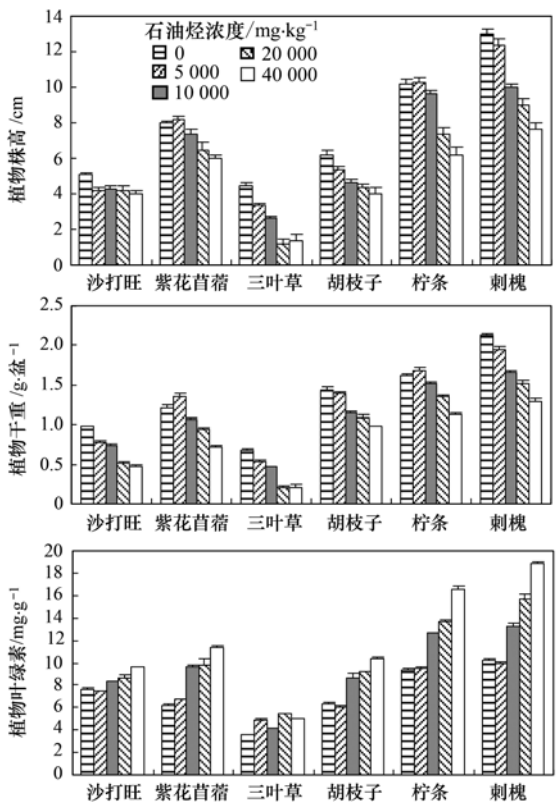


图 1 不同原油污染浓度植物的生长指标
Fig. 1 Index of tested plant in different concentrations of petroleum pollution

表 3 植物生长与土壤因子相关性分析¹⁾

Table 3 Correlation analysis between plant growth and soil factors

	出芽率	出芽时间	株高	干重	叶绿素	枯萎率
物种	-0.653 **	0.377	0.723 **	0.719 **	0.506 *	0.065
原油浓度	-0.450 *	0.849 **	-0.456 *	-0.462 *	0.601 *	0.551 *
总有机碳	-0.658 **	0.454 *	-0.408	-0.401	0.523 *	0.082
速效氮	-0.377	0.715 **	-0.357	-0.366	0.525 *	0.346
速效磷	-0.343	0.741 **	-0.384	-0.363	0.458 *	0.639 *
pH	-0.431	0.820 **	-0.411	-0.415	0.577 *	0.478 *
脲酶	0.287	-0.704 *	0.339	0.332	-0.461 *	-0.453 *
电导率	-0.423	0.829 **	-0.424	-0.414	0.543 *	0.609 *

1) * 表示两者之间在 $P < 0.05$ 水平上有显著相关性, ** 表示两者之间在 $P < 0.01$ 水平上有极显著相关性

枝子 < 柠条 < 刺槐 < 红三叶草, 紫花苜蓿表现出较强的耐受力。从高浓度处理时植物的枯萎率分析, 草本中紫花苜蓿仅在 $40\,000\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 浓度时出现 9%, 而刺槐无枯萎现象。说明土壤低原油浓度污染情况下宜选用草本植物, 其中紫花苜蓿综合表现较优, 素有“牧草之王”称号的紫花苜蓿很受关注, 研究也证明紫花苜蓿有优良的石油烃降解力^[13,18]。而高浓度污染时, 乔木的后期生长耐受力可能更好, 其潜在的优势可能表现在根系的抗环境毒理性能力方面^[19], 这尚需更进一步的研究。

总有机碳、速效氮、pH、电导率均显著正相关, 但与脲酶显著负相关。植物枯萎率与原油浓度、速效磷、pH、电导率均显著正相关, 但与脲酶显著负相关。

3 讨论

植物的生态效应受到气候、土壤、水文、污染及管理等多种因子的影响而具有多样性, 本研究采用室内盆栽, 严格控制生态因子差异并以原油浓度为唯一毒理条件, 旨在筛选优秀的陕北适生性耐油污植物。从 6 种豆科植物的出芽时间、出芽率受原油污染影响分析, 同种植物出芽时间随污染浓度增加而明显延迟, 延迟期限乔木 > 灌木 > 草本植物, 刺槐延迟最明显。与无污染处理对比, 出芽率下降依次为紫花苜蓿 < 胡枝子 < 柠条 < 沙打旺 < 红三叶草 < 刺槐。紫花苜蓿在 $40\,000\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时出芽率下降仅 8.3%, 表现出较强的耐受力, 种子萌发的抑制可能由于高浓度石油烃抑制了种子贮蛋白水解酶的活性, 影响贮蛋白的分解进而妨碍了养分的供给^[17]。

植物株高和生物量是修复原油污染度的指示指标, 一般认为相同时间内植物生长发育形成的生物量越大, 修复效果越好。 $40\,000\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 浓度时与无污染相比, 株高变化依次为紫花苜蓿 < 沙打旺 < 胡

由原油污染所造成的土壤理化因子的改变是复杂的, 黄绵土土体疏松、软绵, 有机质含量低, 土壤呈碱性, 透水性强^[20], 但原油渗透污染易造成土壤黏结而降低其透水性。由于原油增加了土壤中相应的碳含量, $5\,000\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 浓度污染反而表现出对植物出芽率和个别株高生长的促进, 污染对植物生长的抑制作用在 $10\,000\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 后才表现出来。其抑制原因可能如下: ①原油在水中的溶解度很小, 高浓度污染时, 原油吸附在土壤表面形成油膜, 影响根系吸水, 致植物生长受限。原油污染造成的植物生理

性干旱使叶片组织活力下降,出现植物叶片枯萎^[21]。②数据分析表明原油污染土壤中总有机碳的含量显著增加,土壤中碳氮比和碳磷比被显著改变,土壤 pH 和电导率增加,这和王小雨等^[22]及王传远等^[23]研究结论相一致。原油污染改变了土壤的性质和盐离子浓度从而影响到根对营养物质的吸收,宋雪英等^[19]研究证明矿物油对植物根系的毒害性更强。③本研究表明油区土壤脲酶活性随原油污染浓度增加而显著降低,脲酶活性反映土壤有机态氮向有效态氮的转化能力和土壤无机氮的供应能力。说明由于石油烃污染所导致的碳、氮的增加,并不具有生物有效活性,相关性分析也表明随土壤脲酶活性降低,植物出芽时间延长,枯萎率和叶绿素含量显著增加。蔺昕等^[24]研究证明随土壤油浓度的增加,土壤中过氧化氢酶和多酚氧化酶的活性下降。原油增加土壤黏性造成土壤板结,降低土壤通透性,抑制土壤酶的活性等都会降低植物对土壤养分的利用吸收。

植物叶绿素含量与物种显著正相关,乔木 > 灌木 > 草本。同时叶绿素含量与原油含量极显著正相关,主要在 10 000 ~ 40 000 mg·kg⁻¹ 浓度范围随原油污染增加而增加,40 000 mg·kg⁻¹ 浓度时达到最大值,与岳冰冰等^[25]研究结果类似。这一方面可能是由于原油污染增加了土壤中光合作用所需要的碳源,再者可能是植物通过增强光合作用积累营养物质用以对抗逆境生理的适应方式。

4 结论

(1)原油污染显著改变土壤理化性质,土壤总有机碳的含量显著增加,但表征土壤养分无机氮的生物活性的脲酶含量显著减少,土壤碳、氮、磷的比率被改变。

(2)本研究中原油污染浓度低时草本植物耐受力较强,其中紫花苜蓿综合表现较优。从高浓度枯萎率及叶绿素含量分析,刺槐表现较高的耐受力。以上两种植物在陕北油田区野外生存广泛,生命力强且繁殖迅速,适应粗放型种植和管理,经济成本较低。因此,黄绵土-紫花苜蓿-低浓度污染和黄绵土-刺槐-高浓度污染是具有修复潜力的两种组合。

(3)受试植物生长所能承受的污染极限不同。沙打旺、红三叶草、胡枝子和柠条所能承受的污染限值为 20 000 mg·kg⁻¹,紫花苜蓿所能承受的污染限值为 40 000 mg·kg⁻¹,刺槐未现枯萎现象,土壤高浓度污染时,乔木的后期生长耐受力可能更好。

(4) 5 000 mg·kg⁻¹ 低浓度原油污染,对受试植物的发芽率和植物株高有促进作用。植物出芽时间、出芽率、株高和干重在 10 000 mg·kg⁻¹ 处理浓度后明显降低,与原油污染浓度呈显著负相关。叶绿素则在 10 000 ~ 40 000 mg·kg⁻¹ 浓度范围与原油污染浓度呈极显著正相关。

参考文献:

- [1] 孙铁珩,周启星,李培军. 污染生态学[M]. 北京: 科学出版社, 2001.
- [2] 李春荣,王文科,曹玉清,等. 石油污染土壤对黄豆生长的生态毒性效应[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2008, 36(1): 116-120.
- [3] Kottler B D, Alexander M. Relationship of properties of polycyclic aromatic hydrocarbons to sequestration in soil [J]. Environmental Pollution, 2001, 113(3): 293-298.
- [4] 李小利,刘国彬,许明祥. 陕北油田土壤和地表水石油污染特征[J]. 水土保持研究, 2009, 16(5): 145-148.
- [5] 宋雪英,宋玉芳,孙铁珩,等. 矿物油污染土壤中芳烃组分的生物降解与微生物生长动态[J]. 环境科学, 2004, 25(3): 115-119.
- [6] Stallwood B, Shears J, Williams P A. Low temperature bioremediation of oil-contaminated soil using biostimulation and bioaugmentation with a *Pseudomonas* sp. from maritime Antarctica [J]. Journal of Applied Microbiology, 2005, 99(4): 794-802.
- [7] 叶淑红,丁鸣,马达,等. 微生物修复辽东湾油污污染湿地研究[J]. 环境科学, 2005, 26(5): 143-147.
- [8] 唐世荣. 污染环境植物修复的原理与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- [9] 周启星,宋玉芳. 污染土壤修复原理与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2004.
- [10] Chaillan F, Chaineau C H, Point V, et al. Factors inhibiting bioremediation of soil contaminated with weathered oils and drill cuttings[J]. Environmental Pollution, 2006, 144(1): 255-265.
- [11] 彭胜巍,周启星,张浩,等. 8 种花卉植物种子萌发对石油烃污染土壤的响应[J]. 环境科学学报, 2009, 29(4): 786-790.
- [12] 欧阳威,刘红,于勇勇,等. 高羊茅对微生物强化修复石油污染土壤影响的研究[J]. 环境污染治理技术与设备, 2006, 7(1): 94-97.
- [13] 张松林,董庆士,周喜滨,等. 人为石油污染土壤紫花苜蓿田间修复试验[J]. 兰州大学学报(自然科学版) 2008, 44(1): 47-50.
- [14] 吴德邻,陈邦余,卫兆芬,等. 中国植物志第 39 卷[M]. 北京: 科学出版社, 1988.
- [15] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- [16] 周礼恺. 土壤酶学[M]. 北京: 科学出版社, 1987.
- [17] 张松林,赵首彩,顾娟. 土壤柴油污染对紫花苜蓿种子发芽率的影响[J]. 环境科学与技术, 2002, 27(5): 88-90.

- [18] 王忠强, 刘婷婷, 孟宪民, 等. 泥炭保护紫花苜蓿根系对柴油污染土壤修复的研究[J]. 环境科学学报, 2007, **27**(3): 421-425.
- [19] 宋雪英, 宋玉芳, 孙铁珩, 等. 石油污染土壤植物修复后对陆生高等植物的生态毒性[J]. 环境科学, 2006, **27**(9): 1866-1871.
- [20] 郭兆元, 黄自立, 冯立孝, 等. 陕西土壤[M]. 北京: 科学出版社, 1992.
- [21] 吕志萍, 程龙飞. 石油污染土壤中石油含量对玉米的影响[J]. 油气田环境保护, 2001, **11**(1): 36-37.
- [22] 王小雨, 冯江, 王静. 莫莫格湿地油田开采区土壤石油烃污染及对土壤性质的影响[J]. 环境科学, 2009, **30**(8): 2394-2400.
- [23] 王传远, 杨翠云, 孙志高, 等. 黄河三角洲生态区土壤石油污染及其与理化性质的关系[J]. 水土保持学报, 2010, **24**(2): 214-217.
- [24] 蔺昕, 李培军, 孙铁珩, 等. 石油污染土壤的生物修复与土壤酶活性关系[J]. 生态学杂志, 2005, **24**(10): 1226-1229.
- [25] 岳冰冰, 李鑫, 任芳菲, 等. 石油污染对紫花苜蓿部分生理指标的影响[J]. 草业科学, 2011, **28**(2): 236-240.

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