

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第5期

Vol.37 No.5

2016

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

2015年12月北京市空气重污染过程分析及污染源排放变化	薛亦峰,周震,聂滕,潘涛,齐璐,聂磊,王占山,李云婷,李雪峰,田贺忠(1593)
北京 APEC 期间大气颗粒物中类腐殖酸的污染特征及来源	周雪明,仝雪娇,项萍,谭吉华,段菁春,何晓明,贺克斌,马永亮(1602)
利用 SPAMS 分析北京市硫酸盐、硝酸盐和铵盐季节变化特征及潜在源区分布	刘浪,张文杰,杜世勇,侯鲁健,韩斌,杨文,陈敏东,白志鹏(1609)
兰州城区大气 PM _{2.5} 污染特征及来源解析	王新,聂燕,陈红,王博,黄韬,夏敦胜(1619)
成都市西南郊区春季大气 PM _{2.5} 的污染水平及来源解析	林瑜,叶芝祥,杨怀金,张菊,殷蔚雯,李晓芬(1629)
中亚热带背景区重庆四面山大气气态总汞含量变化特征	刘伟明,马明,王定勇,孙涛,魏世强(1639)
固定源排放污染物健康风险评价方法的建立	陈强,吴焕波(1646)
北京市典型燃烧源颗粒物排放水平与特征测试	胡月琪,郭晓东,王琛,梁云平,马召辉(1653)
南京公园降尘中重金属污染水平及风险评价	王呈,钱新,李慧明,孙一轩,王金花(1662)
CoCuMnO ₂ 光催化氧化多组分 VOCs 特性及其动力学	孟海龙,卜龙利,刘嘉栋,高波,冯奇奇,谭娜,谢帅(1670)
大辽河感潮河段及近岸河口氮、磷的分布及潜在性富营养化	张雷,曹伟,马迎群,韩超南,秦延文,赵艳民,刘志超,杨晨晨(1677)
典型温冰川区湖泊的稳定同位素空间分布特征	史晓宜,蒲焘,何元庆,陆浩,牛贺文,夏敦胜(1685)
利用δ ¹⁵ N-NO ₃ ⁻ 和 δ ¹⁸ O-NO ₃ ⁻ 示踪北京城区河流硝酸盐来源	赵庆良,马慧雅,任玉芬,王效科,彭剑锋,贺成武,武俊良,刘梦贞,闫苗苗(1692)
柳江盆地浅层地下水硝酸盐分布特征及影响因素分析	王贺,谷洪彪,迟宝明,李海君,姜海宁(1699)
三峡库区小流域不同土地利用类型对氮素流失影响	陈成龙,高明,倪九派,谢德体,邓华(1707)
亚热带农区生态沟渠对农业径流中氮素迁移拦截效应研究	王迪,李红芳,刘锋,王毅,钟元春,何洋,肖润林,吴金水(1717)
平原河网典型污染物生物降解系数的研究	冯帅,李叙勇,邓建才(1724)
沉水植物对沉积物微生物群落结构影响:以洪泽湖湿地为例	张丁予,章婷曦,董丹萍,李德芳,王国祥(1734)
苏南水库硅藻群落结构特征及其控制因素	任杰,周涛,朱广伟,金颖薇,崔扬,许海,朱梦圆,夏明芳,陈伟民(1742)
河北衡水湖湿地汞污染现状及生态风险评价	王乃姗,张曼胤,崔丽娟,马牧源,颜亮,穆泳林,秦鹏(1754)
顺德水道土壤及沉积物中重金属分布及潜在生态风险评价	蔡怡敏,陈卫平,彭驰,王铁宇,肖荣波(1763)
台州电子垃圾拆解区水和沉积物中多溴联苯醚污染特征与生态风险	陈香平,彭宝琦,吕素平,陈强,张勇,黄长江,董巧香(1771)
乌江中上游段河水主要离子化学特征及控制因素	黄奇波,覃小群,刘朋雨,蓝芳宁,张连凯,苏春田(1779)
岩溶流域地下水 TOC 输出及影响因素分析:以重庆丰都雪玉洞地下河流域为例	王巧莲,蒋勇军,陈宇(1788)
广东英德宝晶宫洞穴滴水元素季节变化与影响因素	黄嘉仪,陈琳,陈琼,刘淑华,杨亮,童晓宁,贺海波,米小建,邓肖敏,彭小桃,李汉杰,杨琰,周厚云(1798)
基于 PCR-DGGE 和拟杆菌(<i>Bacteroides</i>) 16S rRNA 的岩溶地下水粪便污染源示踪研究:以重庆南山老龙洞地下河系统为例	张弘,蒋勇军,张远瞩,段逸凡,吕现福,贺秋芳(1805)
典型岩溶区地下河中溶解态脂类生物标志物来源解析及其变化特征	梁作兵,孙玉川,李建鸿,王尊波,谢正兰,张媚,廖昱,江泽利(1814)
钴活化过一硫酸盐氧化过程中卤代副产物的生成	刘阔,金浩,董为,季跃飞,陆隽鹤(1823)
天冬氨酸在氯化过程中生成消毒副产物二氯乙腈的研究	丁春生,李乃军,张涛,章梦青(1831)
臭氧氧化饮用水过程中可同化有机碳生成的影响因素	董秉直,张佳丽,何畅(1837)
污水管网典型混流制区域水量水质波动特征解析	程珣,张明凯,刘艳臣,施汉昌(1845)
HDTMA 改性沸石的制备及吸附废水中对硝基苯酚的性能和动力学	郭俊元,王彬(1852)
放射性废水处理中吸附铀的优势藻种筛选	李鑫,胡洪营,余骏一,赵文玉(1858)
微米 Fe ₃ O ₄ 磁粉调理-压力电场污泥脱水工艺过程研究	钱旭,王毅力,赵丽(1864)
间歇曝气 SBR 处理养猪沼液的短程脱氮性能	宋小燕,刘锐,税勇,川岸朋树,占新民,陈吕军(1873)
不同灌溉方式对华北平原冬小麦田土壤 CO ₂ 和 N ₂ O 排放通量的影响	郭树芳,齐玉春,尹飞虎,彭琴,董云社,贺云龙,闫钟清(1880)
卫河新乡市区段春季溶解 CH ₄ 与 N ₂ O 浓度特征	侯翠翠,张芳,李英臣,王奇博,刘赛(1891)
模拟氮沉降对内蒙古克什克腾草原 N ₂ O 排放的影响	杨涵越,张婷,黄永梅,段雷(1900)
土壤呼吸与土壤有机碳对不同秸秆还田的响应及其机制	曹湛波,王磊,李凡,付小花,乐毅全,吴纪华,陆兵,徐殿胜(1908)
黑土丘陵区小流域土壤有机质空间变异及分布格局	高凤杰,马泉来,韩文文,单培明,周军,张少良,张志民,王宏燕(1915)
耕作方式对紫色水稻土团聚体中有机质及重金属的分布特征影响	史琼彬,赵秀兰,常同举,卢吉文(1923)
北京东南郊典型地层重金属分布特征与潜在生态风险	赵倩,马琳,刘翼飞,何江涛,李广贺(1931)
准东煤田露天矿区土壤重金属污染现状评价及来源分析	刘巍,杨建军,汪君,王果,曹月娥(1938)
纳米 TiO ₂ 对土壤重金属释放及形态变化的影响	张金洋,王定勇,梁丽,李楚娟,张成,周雄,刘娟(1946)
纳米零价铁铜双金属对铬污染土壤中 Cr(VI) 的还原动力学	马少云,祝方,商执峰(1953)
低分子有机酸对硫杆菌活性的抑制作用及对土壤重金属脱除的影响	宋永伟,王鹤茹,曹艳晓,李飞,崔春红,周立祥(1960)
粒径和包裹物对纳米银在海洋微藻中的毒性影响	黄俊,衣俊,强丽媛,程金平(1968)
萱草修复石油烃污染土壤的根际机制和根系代谢组学分析	王亚男,程立娟,周启星(1978)
高温堆肥过程对猪粪来源抗生素抗性基因的影响	郑宁国,黄南,王卫卫,喻曼,陈晓旻,姚燕来,王卫平,洪春来(1986)
磺胺抗性消长与堆肥进程交互特征	林辉,汪建妹,孙万春,符建荣,陈红金,马军伟(1993)
《环境科学》征订启事(1830) 《环境科学》征稿简则(1977) 信息(1698,1851,1992)	

萱草修复石油烃污染土壤的根际机制和根系代谢组学分析

王亚男, 程立娟, 周启星*

(南开大学环境科学与工程学院, 环境污染过程与基准教育部重点实验室/天津市城市生态环境修复与污染防治重点实验室, 天津 300071)

摘要: 采用温室盆栽方法, 研究花卉植物萱草 (*Hemerocallis middendorffii* Trautv. et Mey.) 对大港油田石油烃污染土壤的修复, 设定的土壤石油烃污染含量为: 0、10 000和40 000 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。结果表明, 萱草对石油烃含量 $\leq 40\,000\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 具有良好的耐性, 并且萱草对石油烃污染土壤中石油烃的修复效果比较显著, 主要表现在试验组石油烃的去除率分别为53.7%和33.4%, 显著高于空白对照组(31.8%和12.0%)。通过GC-MS测定土壤中的氨基酸、有机酸以及糖类等成分的相对含量, 并结合PCA和PLS-DA模型探讨了土壤石油烃去除的根际机制。结果发现, 萱草的种植确实改变了土壤各成分的分布特征, 而且其中葡萄糖对石油烃的去除起到关键的作用。此外, 对萱草根系代谢组学的分析结果显示, 仅在污染组发现了特殊的代谢物丙氨酸、肉豆蔻酸、棕榈酸和亚油酸。而且, 石油烃的暴露确实改变了萱草根系的初生代谢流, 引起了一些代谢物的显著变化。总之, 萱草可以种植于石油烃含量 $\leq 40\,000\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的污染土壤, 并具备了对石油烃的修复能力; 同时石油烃的暴露改变了萱草的根系代谢, 而这种改变可能是萱草对石油烃污染土壤做出的代谢响应。

关键词: 石油烃; 污染土壤; 萱草; 根际机制; 根系; 代谢组学分析

中图分类号: X171; X53 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)05-1978-08 DOI: 10.13227/j.hjks.2016.05.048

Rhizospheric Mechanisms of *Hemerocallis middendorffii* Trautv. et Mey. Remediating Petroleum-contaminated Soil and Metabonomic Analyses of the Root Systems

WANG Ya-nan, CHENG Li-juan, ZHOU Qi-xing*

(Key Laboratory of Pollution Processes and Environmental Criteria (Ministry of Education)/Tianjin Key Laboratory of Environmental Remediation and Pollution Control, College of Environmental Science and Engineering, Nankai University, Tianjin 300071, China)

Abstract: The effects of a special ornamental plant *Hemerocallis middendorffii* Trautv. et Mey. on remediating petroleum-contaminated soil from the Dagang Oilfield in Tianjin, China, was studied by a greenhouse pot-culture experiment and the gradients of TPHs were 0, 10 000 and 40 000 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. The results suggested that *H. middendorffii* had a high tolerance to TPHs ($\leq 40\,000\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$). And *H. middendorffii* significantly ($P < 0.05$) promoted the removal rate of TPHs (53.7% and 33.4%) compared with corresponding controls (31.8% and 12.0%) by natural degradation, respectively. The relative abundance of amino acids, organic acids and sugars and others in soil were analyzed by gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS), and PCA and PLS-DA models were to investigate the rhizospheric mechanisms. The results suggested that *H. middendorffii* changed the distribution characteristics of each component in soil, and the glucopyranoside played a key role in the removal of TPHs. Furthermore, the results about comparative metabolic profile showed that some special metabolites were only found in the contaminated groups, including alanine, tetradecanoic acid, hexadecanoic acid and 9,12-octadecadienoic acid. Additionally, the exposure of TPHs changed the primary metabolic flux of roots, and caused the significant ($P < 0.01$) change of metabolites. In conclusion, *H. middendorffii* might be an enduring ornamental plant for effective remediating TPHs ($\leq 40\,000\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) in soil. But the exposure of TPHs had changed the metabolic profile of *H. middendorffii* in roots, which might be the metabolic response of *H. middendorffii* to petroleum-contaminated soil.

Key words: total petroleum hydrocarbons (TPHs); contaminated soil; *Hemerocallis middendorffii* Trautv. et Mey.; rhizospheric mechanism; root; metabonomic analyses

土壤的石油烃 (total petroleum hydrocarbons, TPHs) 污染是世界性的环境问题之一^[1]。TPHs 属于混合物, 主要包括烷烃、芳香烃, 以及难降解的沥青质和极性组分^[2], 对许多组织器官有生物毒性, 特别是其中的一些芳香烃组分, 不仅具有强烈的致癌、致畸和致突变毒性, 还能通过食物链在动植物体内逐级富集和放大, 对人体健康造成严重的威胁^[3]。在 TPHs 污染土壤修复技术中, 植物修复是目

前最具潜力的修复技术, 概括来说, 就是利用植物及其根际圈微生物体系的吸收、挥发和转化、降解等作用机制来清除污染环境中的污染物^[4]。植物修

收稿日期: 2015-10-04; 修订日期: 2015-11-15

基金项目: 国家高技术研究发展计划 (863) 重大项目 (2013AA06A205); 国家自然科学基金委-广东省联合基金项目 (U1133006)

作者简介: 王亚男 (1989~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为污染土壤生态修复, E-mail: ynwang89@163.com

* 通讯联系人, E-mail: zhouqx@nankai.edu.cn

复以其操作相对简单, 经济和技术上能够大面积实施等优点, 几乎成为污染程度较轻且污染面积巨大土壤修复的不可替代技术^[5]. 野生花卉作为一种新的 TPHs 污染土壤的植物修复品种, 除了具有一般植物修复的优势外, 还具有很多优点, 例如它可以在去除 TPHs 的同时, 美化周围的环境; 同时可以尽量避免一些污染物进入食物链, 减少对人类的危害. 在以往的研究中, 周启星等率先从 30 种花卉植物中筛选出了 3 种对石油烃污染具有强耐受力且能促进 TPHs 降解的野生花卉植物, 分别为: 紫茉莉 (*Mirabilis jalapa* L.)、凤仙花 (*Impatiens balsamina* L.) 和牵牛花 (*Pharbitis nil* L.)^[2, 6, 7].

植物在生长过程中, 在根系附近会形成一个特殊的生态修复圈层, 即根际区^[8]. 由于根际区特殊的物理、化学和生物属性, 许多污染物在根际比在非根际区去除得更加迅速和完全^[9, 10]. 根际分泌物是根际区石油烃去除的重要驱动者^[11], 是根际修复的一个重要机制. 良好的植物根系分部网可以作为一种天然的注射系统, 将植物化学物 (phytochemicals) 以根系分泌物的形式释放到根际区^[12], 例如低分子的有机酸、氨基酸、糖类等以及其它的大分子有机化合物^[13], 可以为根际微生物的生长和长期生存提供碳源和能源, 或增加污染物和营养元素的生物有效性, 以及作为 TPHs 的共代谢物^[11, 14~16], 促进土壤 TPHs 的去除.

最近, “组学”技术, 如转录组学、蛋白质组学和代谢组学, 已被认为是一种检测化学诱导对生物产生影响的一种更加全面的方法^[17]. 其中代谢组学是研究生物系统科学的一个重要分支, 它是生物系统对内源性和外源性因素做出的整体性的响应^[18, 19]. 目前, 代谢组学分析已经在哺乳动物和植物的应激响应的研究中得到成功应用, 并成为植物病理生理学研究的有力工具^[20].

试验通过温室盆栽试验研究了野生花卉萱草对大港油田 TPHs ($\leq 40\,000\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) 污染土壤的修复. 萱草属于百合科萱草属多年生草本植物, 耐寒性强, 耐光线充足, 又耐半荫, 对土壤要求不严, 适应多种土壤环境, 无论盐碱地、砂石地、贫瘠荒地, 均可生长良好. 试验通过对萱草鲜重、根长和株高, 土壤氨基酸、有机酸、糖类等成分以及萱草根系代谢物的测定, 研究萱草对污染的耐性和 TPHs 的降解能力; 不同处理组, 土壤中有机酸、氨基酸、糖类等组分的分布特征; TPHs 的暴露对萱草根系代谢组学的影响, 旨在探讨萱草修复 TPHs 污染土壤的

可行性、根际修复机制以及 TPHs 暴露下萱草根系代谢的响应. 本研究结果对今后开展 TPHs 污染土壤植物修复研究及 TPHs 污染暴露下代谢组学研究具有一定借鉴意义.

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试植物: 萱草 (*Hemerocallis middendorfi* Trautv. et Mey.) 购买自北京绿普方圆花卉有限公司.

供试土壤: TPHs 污染土采自大港油田第一采油厂, 清洁土取自天津市滨海新区森林公园. 设定的 TPHs 污染含量为: 0、10 000 和 40 000 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. 将风干的 TPHs 污染土过 10 目筛子, 测定其含量为 61 675 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 用清洁土将其稀释, 并混合均匀. 稀释后得到实际 TPHs 污染含量为: 0、11 829 和 39 971 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 土壤 pH 7.65 ~ 8.32, 含盐量 0.3% ~ 5.3%.

1.2 盆栽试验设计

盆栽试验位于天津南开大学泰达学院温室内, 温室温度控制在 18 ~ 25℃, 每天保持光照 16 h, 黑暗 8 h.

按照每盆装土 1.5 kg 的标准, 将已经混好的 TPHs 污染土装入花盆 (直径 230 mm, 高 180 mm), 每个浓度设 3 个平行, 同时准备不种植植物的空白对照组, 共 18 盆, 浇水平衡 2 周后待用.

盆栽试验采用栽种的方式进行. 选取长势相近的萱草, 用自来水清洗其根部, 然后种植于平衡好的土壤中, 每盆 1 棵, 试验期间每天浇适量的水, 空白对照组与试验组处理一致.

1.3 石油烃 (TPHs) 的测定

土壤 TPHs 的测定方法参考索氏提取方法 (US EPA 3550c), 具体方法参考文献[21].

1.4 植物生物量的测定

为了更好地评价萱草对 TPHs 的耐性, 种植 5 个月, 将其收获, 具体操作如下, 将萱草先用自来水冲洗干净表面, 再用去离子水充分洗净萱草植株, 然后用滤纸擦干表面的水分, 最后用剪刀将植株的根部与地上部分分开, 测量其鲜重、根长和株高.

1.5 萱草根系代谢组学分析

萱草根系代谢组学采用 GC-MS 进行分析, 具体方法参考文献[22].

1.6 土壤氨基酸、有机酸及糖类等成分的测定

关于土壤有机酸、氨基酸及糖类等成分的测定参照代谢组学的研究方法^[22], 并做一定的改变, 具

体操作如下:将土壤样品冷冻干燥 48 h,过 100 目筛,称取 100 mg 放入 10 mL 的离心管;样品中加入 4.5 mL 提前保存于 -20°C 的提取混合溶液 1[甲醇-氯仿-水 2.5:1:1(体积比)];加入 50 μL 的核糖醇 ($0.2\text{ mg}\cdot\text{mL}^{-1}$),作为水相的内标;在 40°C 下,微波萃取 20 min,然后于 $8\,000\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$, 4°C 离心 10 min. 将上清液转移到干净的 10 mL 离心管中. 底部沉淀中加入 2 mL 保存于 -20°C 的溶液 2[甲醇-氯仿 1:1(体积比)]. 于 40°C 下,微波萃取 20 min,然后 $8\,000\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$, 4°C 离心 10 min. 收集第二次上清液,并与第一次收集的上清液混合. 加入 1 mL 超纯水,过 $0.22\text{ }\mu\text{m}$ 的有机相滤膜,然后 $8\,000\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$, 4°C 离心 5 min. 离心后,上层溶液是甲醇/水相约 5 mL,下层为氯仿相约 1 mL. 用氮气吹干氯仿相,而甲醇/水相冷冻干燥 16 h,取出. 需要注意的是:样品衍生化后,需在 24 h 内上样,如若不上样,可将冷冻干燥后的样品封口后放于 -80°C 冰箱中保存. 采用两步法进行衍生化:首先加入 50 μL 用吡啶(pyridine)溶解的甲氧氨基盐酸盐(*o*-methyl amine hydrochloride) $20\text{ mg}\cdot\text{mL}^{-1}$,密封,涡旋 1 min, $8\,000\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$, 4°C 离心 3 min,于 30°C 水浴 90 min; 然后加入 80 μL 硅烷化试剂 *N*-甲基-*N*-(三甲基硅烷)-三氟乙酰胺(MSTFA), 37°C 水浴 30 min; 最后将衍生化好的样品转移到适合 GC-MS 分析的内衬管中,待测.

气相色谱进样参数:进样量 1 μL ,进样口温度 230°C ,不分流进样模式,载气为氦气,流速 $2\text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$,使用自动进样器进样. 气相色谱参数:MDN-35 毛细管色谱柱(30 m),温度程序为 80°C 恒温 2 min,然后以 $15^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ 的速率升温到 330°C ,然后持续 6 min. 传输线(transfer line)温度设定为 250°C . 质谱参数:离子源温度设定为 250°C ,质量扫描范围是 $m/z\ 70\sim 600$,采集速率每秒 20 个扫描,质谱电子轰击源灯丝开启时间在色谱溶剂延迟 170 s 后,检测器电压 $2\,100\text{ V}$.

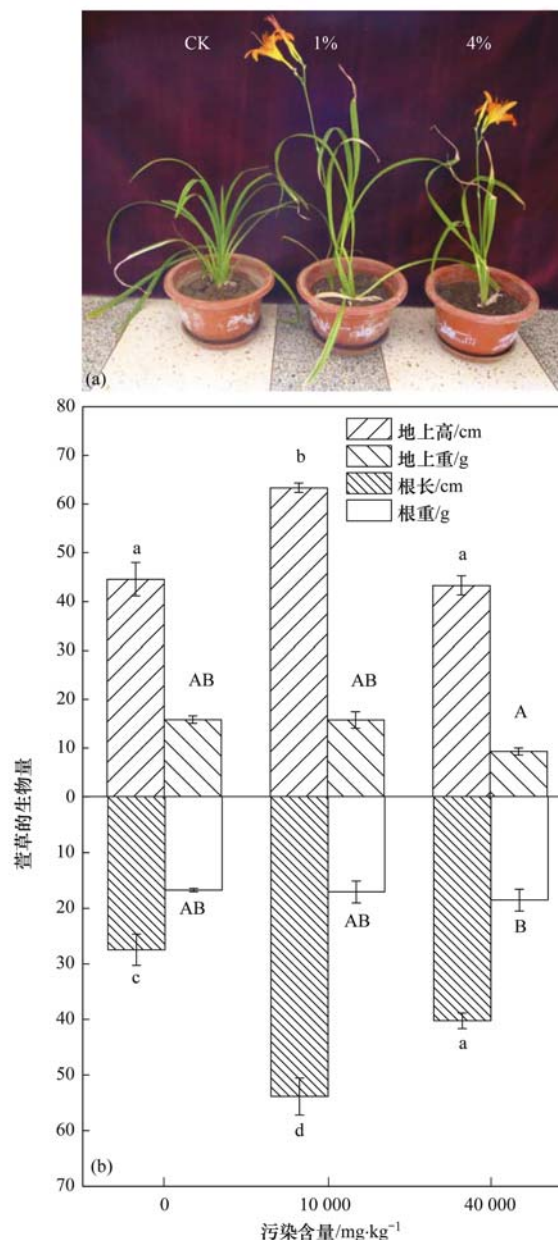
1.7 统计分析

数据统计与分析采用 SPSS 20.0 与 Origin 9.0 进行. 按单因素方差分析(ANOVA)方法中 LDS 进行多样本间的显著性检验($P<0.05$). 软件 SIMCA-P11.5 进行主成分分析(PCA)和偏最小二乘判别分析(PLS-DA). MeV4.9.0 软件绘制代谢物热图,并通过分层聚类(hierarchical clustering, HCL)进行计算,相关参数距离和联系方法选择默认选项分别为 Pearson correlation 和 The average linkage clustering. 使用软件 Venny 2.0.2 制作 Venn 图.

2 结果与讨论

2.1 萱草对石油烃(TPHs)的耐性

植物种植 5 个月后,将其收获. 由图 1(a)可以看出,不同 TPHs 污染浓度下的萱草从外表看生长状况良好,无叶片发黄落叶枯萎等明显的毒害症状,



CK, 萱草, 空白; 1%, 萱草, TPHs $10\,000\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; 4%, 萱草, TPHs $40\,000\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; 数据由平均值 $\pm$ 标准差组成; 误差棒代表标准偏差; 标注不同的小写和大写英文字母分别是不同 TPHs 处理下, 高度和鲜重差异显著性分析($P<0.05$)

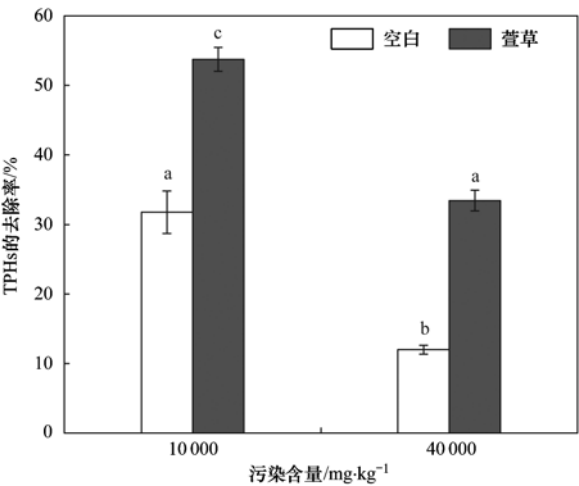
图 1 不同 TPHs 污染浓度下, 萱草收获时的图片以及株高、根长和鲜重比较

Fig. 1 A set of pictures during harvesting *H. middendorffii*, length of root and shoot and the fresh weight of root and shoot of *H. middendorffii* at different TPHs contamination levels

说明萱草对 TPHs 污染土壤具备一定的耐性. 另外, 由图 1(b) 可知, 与空白对照组相比, 无论从鲜重还是株高和根长上看, TPHs ($\leq 40\,000\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) 的存在对萱草的生长并没有明显 ($P < 0.05$) 的抑制作用. 植物的根部是比地上部更为重要的耐性指标, 仅从根的鲜重来看, 污染组根的鲜重没有受到明显的抑制. 然而萱草在 TPHs 污染状态下的根长明显高于空白对照组. 这说明 TPHs 的暴露对萱草的根系生长影响不大, 甚至有促进作用. 不同 TPHs 浓度处理下萱草的生长相对于空白对照组无明显降低, 并且在一定浓度下有所增加, 这对于其发挥修复作用极为有利, 虽然其在 TPHs 胁迫下的耐性机制有待于进一步研究, 但萱草显然对于 TPHs 污染具备一定耐性. 因而, 对萱草修复 TPHs 污染土壤的探讨, 将为 TPHs 污染胁迫下污染土壤的植物修复提供新的思路.

2.2 石油烃 (TPHs) 的去除和根际机制

由图 2 可以看出, 与空白对照相比, 萱草显著地促进了土壤 TPHs 的去除. 主要表现在试验组 TPHs 的去除率分别为 53.7% 和 33.4%, 而对应空白对照组仅为 31.8% 和 12.0%. 而且在 TPHs 浓度 $10\,000\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $40\,000\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的浓度下, 试验组去除率分别是空白对照组的 1.69 和 2.78 倍. 这说明萱草具有修复 TPHs 污染土壤的能力. 类似地, 一些研究人员也发现一些植物, 可用于高浓度 TPHs 污染土



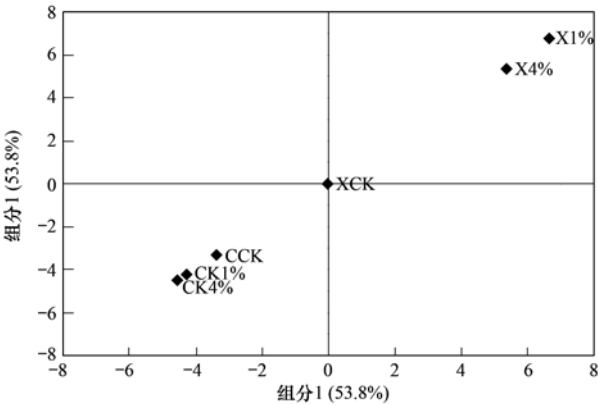
数据由平均值 $\pm$ 标准差组成, 误差棒代表标准偏差;
所有均值用% (质量浓度) 表示; 标注不同英文字母是不同
TPHs 处理下, 差异显著性分析 ($P < 0.05$)

图 2 种植萱草试验组与空白对照组对不同浓度
TPHs 污染土壤的去除率

Fig. 2 Removal rates of TPHs in contaminated soil with
different pollutant concentrations planted with
or without *H. middendorffii*

壤中 TPHs 的去除, 例如短叶茼蒿 (*Cyperus brevifolius* (Rottb.) Hassk)、玉米草 (*Zea mexicana*)、披碱草 (*Elymus dahuricum*) 和紫花苜蓿 (*Medicago sativa* L.)^[23~25], 均可用于修复大于 $60\,000\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 石油烃污染土壤.

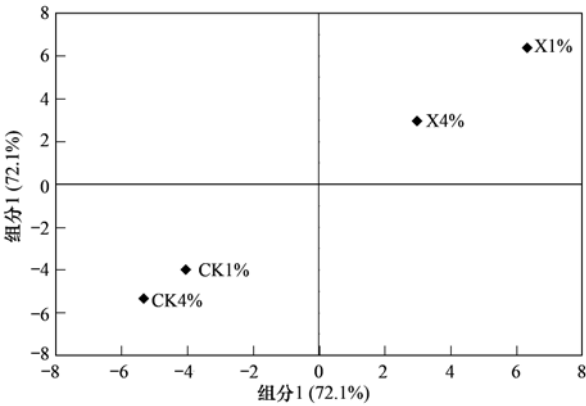
主成分分析 (principal component analysis, PCA) 是一个比较好的用于评价多变量样本间差别的工具^[26]. 对土壤样品中 46 种检测出的氨基酸、有机酸及糖类成分的量化数据进行 PCA 计算, 以确定土壤样品间的差异性. 图 3 是在组分 1 (占总变



XCK: 萱草, 空白; X1%: 萱草, TPHs $10\,000\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; X4%: 萱草, TPHs $40\,000\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; CCK: 未种植, 空白; CK1%: 未种植, TPHs $10\,000\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; CK4%: 未种植, TPHs $40\,000\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$

图 3 在 PCA 模型下, 对土壤氨基酸、有机酸及
糖类成分进行聚类分析

Fig. 3 Cluster analysis of amino acid, organic acid,
carbohydrate and others in soil using PCA scores plot



土壤氨基酸、有机酸及糖类成分用于分析 TPHs 的去除率;
X1%: 萱草, TPHs $10\,000\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; X4%: 萱草, TPHs $40\,000\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. CK1%: 未种植, TPHs $10\,000\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; CK4%: 未种植, TPHs $40\,000\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$

图 4 在 PLS-DA 模型下, 对土壤氨基酸、有机酸及
糖类成分进行聚类分析

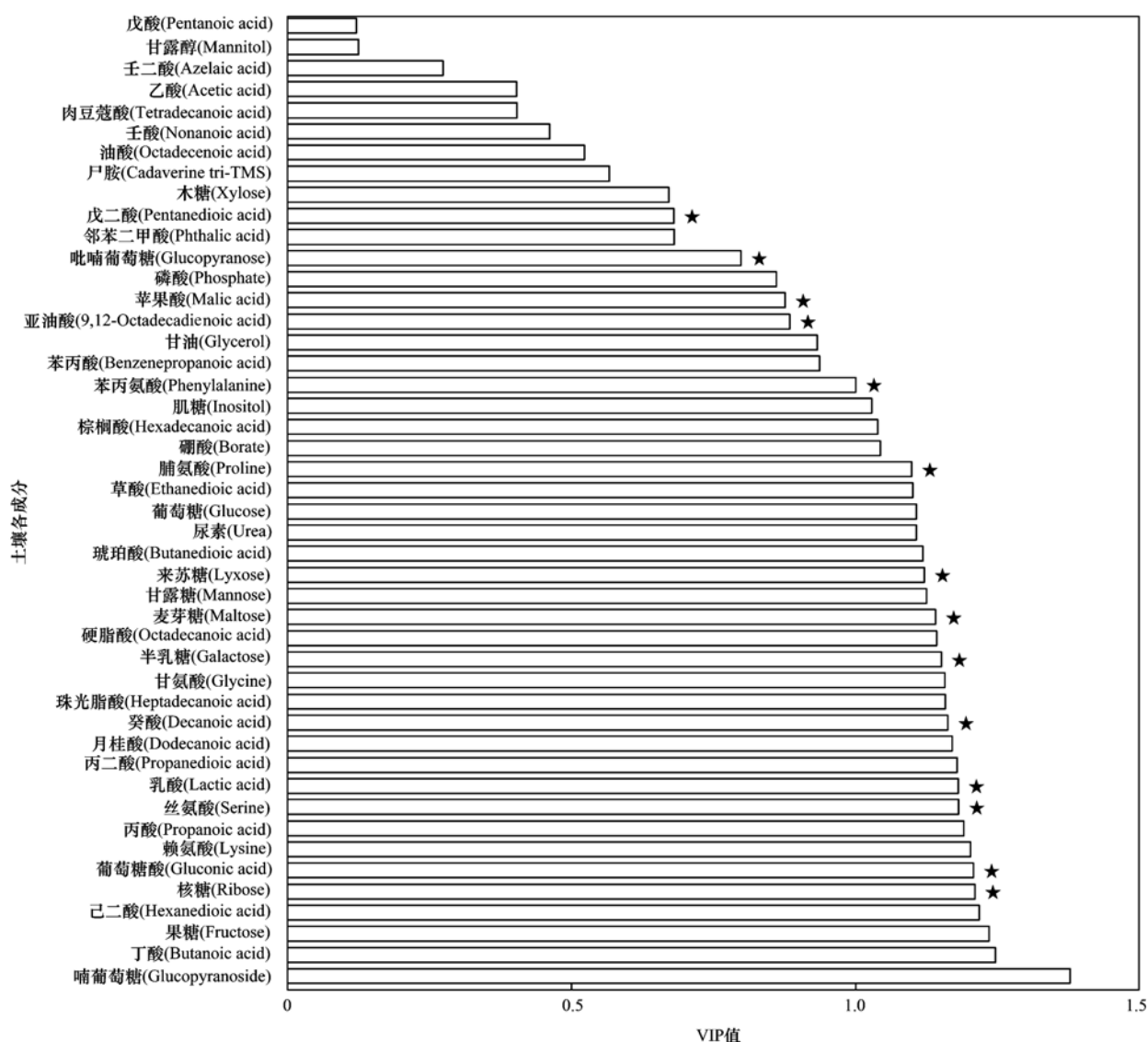
Fig. 4 Cluster analysis of amino acid, organic acid,
carbohydrate and others in soil using PLS-DA scores plot

量的 53.8%)的基础上进行的计算,结果显示种植萱草土壤与空白土壤明显的分开了,尤其是萱草 TPHs 浓度 $10\,000\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $40\,000\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 明显区别于其它样本. 偏最小二乘法判别分析(partial least squares-discriminate analysis, PLS-DA)可以从多因素中解析出主要影响因素^[22]. 图 4 是用土壤氨基酸、有机酸和糖类等成分对土壤 TPHs 去除率的计算结果,其中组分 1(占总变量的 72.1%)结果显示不同土壤样本间较好地分开了,并且土壤样本的分布特征与 TPHs 的降解率一致,因此组分 1 可以较好地解释土壤 TPHs 的去除.

为了进一步分析土壤各成分对 TPHs 去除起到主要作用的贡献者,需要对 VIP(Variable importance in the projection)值进行计算. 因为当 $\text{VIP} > 1$ 时,变

量对模型具有显著的统计学意义^[26]. 分析土壤各成分的 VIP 值(图 5),发现其中葡萄糖的 VIP 值最大为 1.38,其次是丁酸、果糖、己二酸、核糖、葡萄糖酸、赖氨酸($\text{VIP} > 1.20$),在土壤 TPHs 去除中起到实质性的作用. 而且试验过程中发现与空白对照组土壤相比,仅在种植萱草的土壤中检测到 14 种特殊的成分(图 5 和图 6),其中氨基酸类有丝氨酸、脯氨酸和苯丙氨酸,有机酸类有乳酸、癸酸、亚油酸、苹果酸和戊二酸,糖类和糖酸类有核糖、半乳糖、麦芽糖、来苏糖、吡喃葡萄糖和葡萄糖酸. 另外,种植萱草土壤各成分与检测到的萱草根系代谢物有 36 种共有组分(图 6).

研究发现植物根系可以将 5%~21% 的植物光合产物,例如有机酸、氨基酸、糖类等释放到根际



土壤氨基酸、有机酸及糖类等成分用于分析 TPHs 的去除率;“★”代表种植萱草土壤可以检测到,而空白对照组不能检测到的成分

图 5 PLS-DA 模型处理后的土壤氨基酸、有机酸及糖类等成分的 VIP 值

Fig. 5 Variable important projection (VIP) of amino acid, organic acid, carbohydrate and others in soil using PLS-DA model

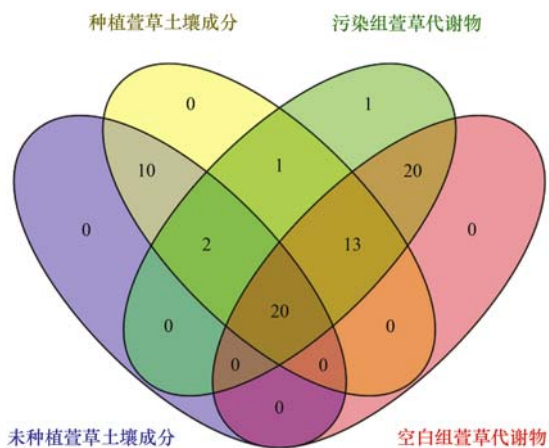


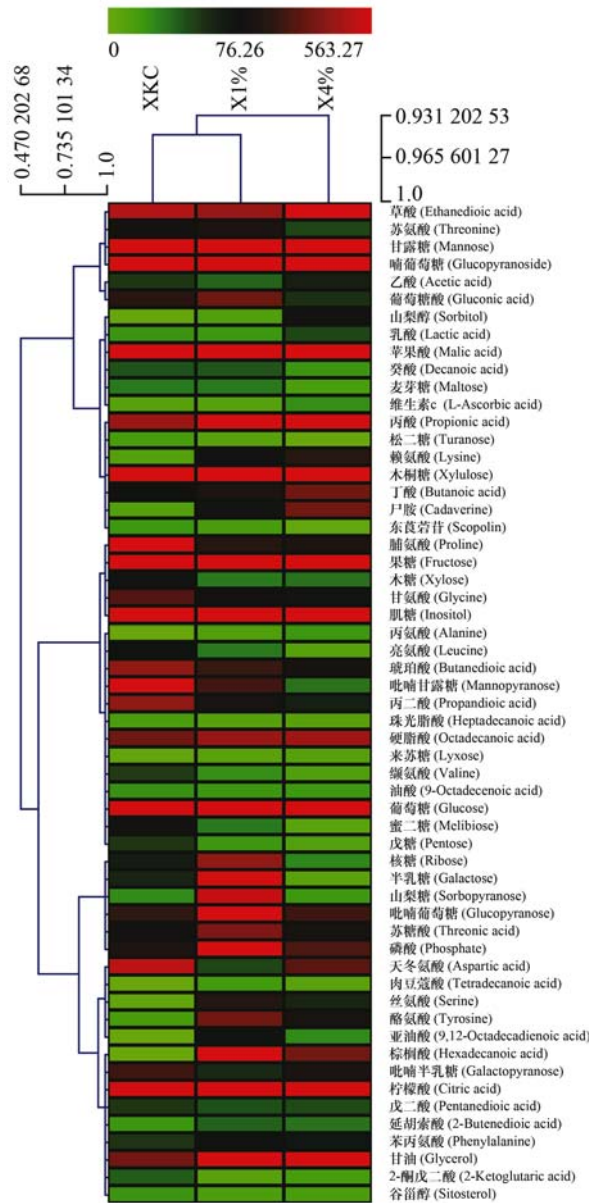
图6 Venn图展现未种植萱草土壤成分、种植萱草土壤成分、污染组萱草代谢物和空白组萱草代谢物的种类数

Fig. 6 Venn diagram showing the number of components of soil with or without *H. middendorffii*, and root metabolites of *H. middendorffii* in control and contaminated groups

周围^[27],一方面它们可以作为根际微生物碳源和能源,或作为共代谢物^[12],增加微生物的数量和代谢活性,另一方面,也可以作为表面活性剂,增加 TPHs 的生物有效性^[14, 15]. 试验过程中在土壤中检测到的成分主要包括氨基酸、有机酸和糖类,这些成分多是植物光合作用的产物,属于植物代谢物,而且植物体内的含量远大于土壤,所以极有可能是萱草以根系分泌物的形式将代谢物经根部释放到了根际区,进而促进了土壤 TPHs 的去除,这是一个重要的 TPHs 根际修复机制. 由于土壤组成的复杂性,只能观察到修复后样本各成分含量和种类的整体变化,无法确认哪些成分来自植物根系分泌. 未来工作可以集中在利用稳定同位素探针技术,在¹³C标记的空气环境下进行试验,确定植物修复过程中活跃的根系分泌物种类和对土壤 TPHs 去除的主要贡献者.

2.3 萱草根系代谢组学分析

萱草根系代谢物经过 GC-MS 分析后,共得到 57 种代谢物. 大部分的代谢物是在初生代谢途径中产生的,包括氨基酸、有机酸、糖类、糖醇和糖酸以及其它组分. 图 7 是对萱草根系代谢物进行的分层聚类(hierarchical cluster, HCL)分析,结果显示 TPHs 的暴露,使得根系代谢发生了不同程度的变化. 萱草空白组和 TPHs 含量 $10\,000\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 先聚在了一起,然后再与高含量 $40\,000\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 聚在一起. 这说明 TPHs 的存在改变了萱草的根系代谢,同时低含量 TPHs 对代谢的改变较小,而高含量 TPHs 引起的改变较大.



热图代表不同处理间代谢物的相对含量; XKC:萱草,空白;
X1% :萱草,TPHs $10\,000\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$;
X4% :萱草,TPHs $40\,000\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$

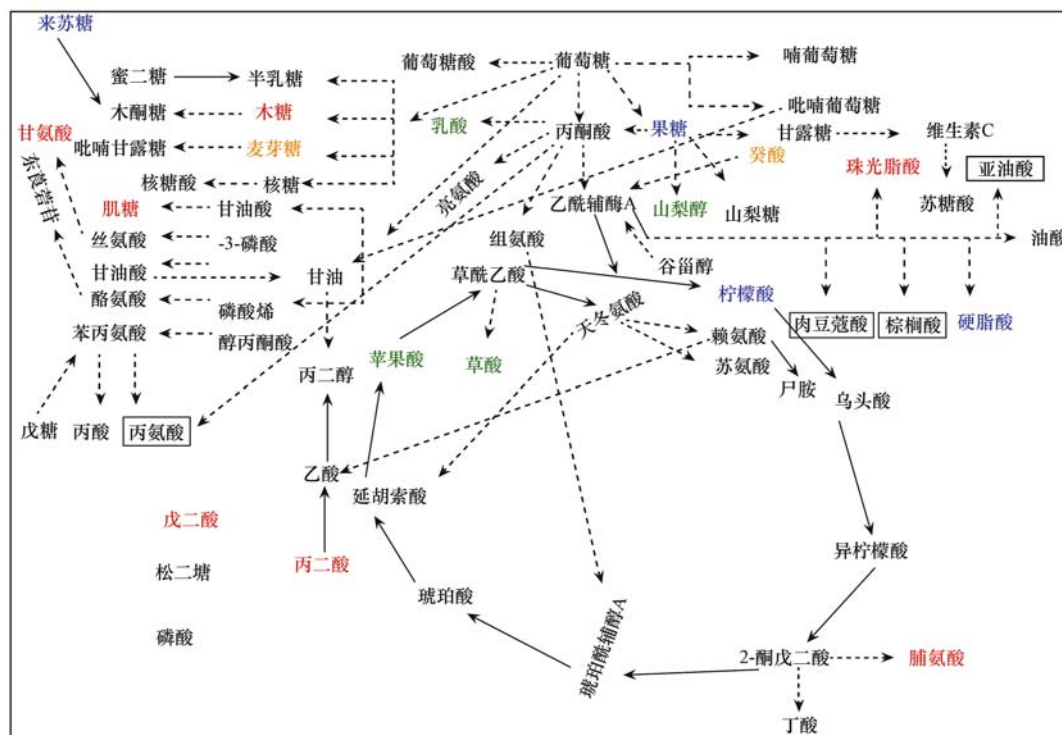
图7 在不同含量 TPHs 暴露下,使用 HCL 模型对萱草根系代谢物进行的代谢分析

Fig. 7 Metabolic analysis in roots of *H. middendorffii* using HCL model under different concentrations of TPHs exposure

图 8 是根据萱草根系代谢物绘制的初生代谢流^[28]. 与空白组相比,TPHs 的存在显著地 ($P < 0.01$) 增加了萱草根系中来苏糖、果糖、硬脂酸和柠檬酸的含量,而减少了甘氨酸、肌糖、戊二酸、木糖、丙二酸、珠光脂酸和脯氨酸的含量. 同时与空白和低含量 TPHs ($10\,000\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) 相比,高含量 TPHs ($40\,000\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) 的暴露显著地 ($P < 0.01$) 增加了乳酸、草酸、山梨醇和苹果酸的含

量,却减少了癸酸和麦芽糖的含量. 类似地,Zhang 等^[29]发现城市污水的暴露会显著地改变小鼠血清中的 2-氧化戊二酸和乳酸,以及尿液中的乙酸、柠檬酸和延胡索酸的含量. 试验仅在萱草污染组的代谢物中发现了 4 种特殊的代谢物(图 6 和图 8),丙氨酸、肉豆蔻酸、棕榈酸和亚油酸. 类似地,Hu 等^[30]在研究纳米材料氧化石墨烯(GO)污染对小

麦代谢的影响时,也在污染组发现了特殊的代谢物:亚油酸和阿拉伯呋喃糖. 结果说明一些异生型环境污染物的暴露会诱导生物内部代谢调控紊乱,进而改变生物的代谢流,引起某些代谢物含量的显著变化,或产生一些特殊的代谢物,这可能是生物面对环境污染物暴露时,发生在代谢层面的响应.



蓝色和红色分别代表着污染组代谢物含量明显($P < 0.01$)高于和低于空白组;绿色和橙色分别代表 TPHs $40\,000\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 明显高于和低于空白组和 TPHs $10\,000\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$;黑色框中的代谢物代表在试验组可以检测到,在空白对照组未检出的代谢物;实线和虚线分别代表的直接和间接的代谢途径

图 8 暴露于不同 TPHs 处理下,萱草根系的初生代谢流示意

Fig. 8 Primary metabolic flux map of *H. middendorfi* in roots exposed to different TPHs treatments

3 结论

(1)通过对大港油田 TPHs 污染土壤 5 个月的盆栽试验,发现萱草对 TPHs 污染具有一定的耐性,并显著地($P < 0.05$)促进了 TPHs 污染土壤中 TPHs 的去除,因此萱草具备了用于 TPHs ($\leq 40\,000\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)污染土壤的修复能力.

(2)通过 PCA 和 PLS-DA 分析土壤各成分对 TPHs 去除的贡献,发现萱草的种植确实改变了土壤各成分的分布特征,并发现葡萄糖、丁酸、果糖、己二酸、核糖、葡萄糖酸、赖氨酸(VIP 值 > 1.20),对土壤 TPHs 的去除起到关键的作用.

(3)土壤检测到的各成分种类中有 36 种与萱草根系代谢物相同,而且大部分代谢物的相对含量

远大于土壤各成分,这可能是萱草将代谢物以根系分泌物的形式释放到了根际区,进而促进土壤 TPHs 的去除,这是一个重要的 TPHs 根际修复机制.

(4)对萱草根系代谢物的分层聚类 and 初生代谢流分析,发现 TPHs 的暴露确实改变了萱草根系的代谢. 这可能是植物对土壤 TPHs 暴露作出的代谢响应,或者说是一种适应性响应.

参考文献:

- [1] 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.
- [2] Zhang Z N, Zhou Q X, Peng S W, et al. Remediation of petroleum contaminated soils by joint action of *Pharbitis nil* L. and its microbial community [J]. Science of the Total Environment, 2010, 408(22): 5600-5605.

- [3] 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.
- [4] 魏树和, 周启星. 重金属污染土壤植物修复基本原理及强化措施探讨[J]. 生态学杂志, 2004, **23**(1): 65-72.
- [5] 魏树和, 周启星, Koval P V, 等. 有机污染环境植物修复技术[J]. 生态学杂志, 2006, **25**(6): 716-721.
- [6] Cai Z, Zhou Q X, Peng S W, *et al.* Promoted biodegradation and microbiological effects of petroleum hydrocarbons by *Impatiens balsamina* L. with strong endurance[J]. Journal of Hazardous Materials, 2010, **183**(1-3): 731-737.
- [7] Peng S W, Zhou Q X, Cai Z, *et al.* Phytoremediation of petroleum contaminated soils by *Mirabilis jalapa* L. in a greenhouse plot experiment[J]. Journal of Hazardous Materials, 2009, **168**(2-3): 1490-1496.
- [8] Anderson T A, Guthrie E A, Walton B T. Bioremediation in the rhizosphere[J]. Environmental Science & Technology, 1993, **27**(13): 2630-2636.
- [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] Joner E J, Corgié S C, Amellal N, *et al.* Nutritional constraints to degradation of polycyclic aromatic hydrocarbons in a simulated rhizosphere[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2002, **34**(6): 859-864.
- [11] Martin B C, George S J, Price C A, *et al.* The role of root exuded low molecular weight organic anions in facilitating petroleum hydrocarbon degradation: current knowledge and future directions[J]. Science of the Total Environment, 2014, **472**: 642-653.
- [12] Singer A C, Crowley D E, Thompson I P. Secondary plant metabolites in phytoremediation and biotransformation [J]. Trends in Biotechnology, 2003, **21**(3): 123-130.
- [13] Alkorta I, Garbisu C. Phytoremediation of organic contaminants in soils[J]. Bioresource Technology, 2001, **79**(3): 273-276.
- [14] Ling W, Sun R, Gao X, *et al.* Low-molecular-weight organic acids enhance desorption of polycyclic aromatic hydrocarbons from soil[J]. European Journal of Soil Science, 2015, **66**(2): 339-347.
- [15] Sun B Q, Gao Y Z, Liu J, *et al.* The impact of different root exudate components on phenanthrene availability in soil[J]. Soil Science Society of America Journal, 2012, **76**(6): 2041-2050.
- [16] Técher D, Laval-Gilly P, Henry S, *et al.* Contribution of *Miscanthus x giganteus* root exudates to the biostimulation of PAH degradation: an *in vitro* study [J]. Science of the Total Environment, 2011, **409**(20): 4489-4495.
- [17] Skelton D M, Ekman D R, Martinović-Weigelt D, *et al.* Metabolomics for *in situ* environmental monitoring of surface waters impacted by contaminants from both point and nonpoint sources[J]. Environmental Science & Technology, 2014, **48**(4): 2395-2403.
- [18] Tang H R, Wang Y L. Metabonomics: a revolution in progress [J]. Progress in Biochemistry and Biophysics, 2006, **33**(5): 401-417.
- [19] Fiehn O, Kopka J, Dörmann P, *et al.* Metabolite profiling for plant functional genomics[J]. Nature Biotechnology, 2001, **18**(11): 1157-1161.
- [20] Zhang J T, Zhang Y, Du Y Y, *et al.* Dynamic metabolomic responses of tobacco (*Nicotiana tabacum*) plants to salt stress [J]. Journal of Proteome Research, 2011, **10**(4): 1904-1914.
- [21] 程立娟, 周启星. 野生观赏植物长药八宝对石油烃污染土壤的修复研究[J]. 环境科学学报, 2014, **34**(4): 980-986.
- [22] Park S Y, Lim S H, Ha S H, *et al.* Metabolite profiling approach reveals the interface of primary and secondary metabolism in colored cauliflowers (*Brassica oleracea* L. ssp. *botrytis*) [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2013, **61**(28): 6999-7007.
- [23] Basumatary B, Bordoloi S, Sarma H P. Crude oil-contaminated soil phytoremediation by using *Cyperus brevifolius* (Rottb.) Hassk [J]. Water, Air, & Soil Pollution, 2012, **223**(6): 3373-3383.
- [24] 唐景春, 王斐, 褚洪蕊, 等. 玉米草 (*Zea Mexicana*) 与海藻寡糖联合修复石油烃污染土壤的研究[J]. 农业环境科学学报, 2010, **29**(11): 2107-2113.
- [25] 陈嫣, 李广贺, 张旭, 等. 石油污染土壤植物根际微生态环境与降解效应[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2005, **45**(6): 784-787.
- [26] Kim J K, Choi S R, Lee J, *et al.* Metabolic differentiation of diamondback moth (*Plutella xylostella* (L.)) resistance in cabbage (*Brassica oleracea* L. ssp. *capitata*) [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2013, **61**(46): 11222-11230.
- [27] Bais H P, Weir T L, Perry L G, *et al.* The role of root exudates in rhizosphere interactions with plants and other organisms[J]. Annual Review of Plant Biology, 2006, **57**(1): 233-266.
- [28] Karp P D. The metacyc metabolic pathway database[EB/OL]. <http://www.metacyc.org/MetaCycUserGuide.shtml>, 2015-09-25.
- [29] Zhang Y, Huang K L, Deng Y F, *et al.* Evaluation of the toxic effects of municipal wastewater effluent on mice using omic approaches[J]. Environmental Science & Technology, 2013, **47**(16): 9470-9477.
- [30] Hu X G, Mu L, Kang J, *et al.* Humic acid acts as a natural antidote of graphene by regulating nanomaterial translocation and metabolic fluxes *in vivo* [J]. Environmental Science & Technology, 2014, **48**(12): 6919-6927.

CONTENTS

Exploring the Severe Haze in Beijing During December, 2015; Pollution Process and Emissions Variation	XUE Yi-feng, ZHOU Zhen, NIE Teng, <i>et al.</i> (1593)
Pollution Characteristics and Source of HULIS in the Fine Particle During the Beijing APEC	ZHOU Xue-ming, QI Xue-jiao, XIANG Ping, <i>et al.</i> (1602)
Seasonal Variation Characteristics and Potential Source Contribution of Sulfate, Nitrate and Ammonium in Beijing by Using Single Particle Aerosol Mass Spectrometry	LIU Lang, ZHANG Wen-jie, DU Shi-yong, <i>et al.</i> (1609)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of PM _{2.5} in Lanzhou City	WANG Xin, NIE Yan, CHEN Hong, <i>et al.</i> (1619)
Pollution Level and Source Apportionment of Atmospheric Particles PM _{2.5} in Southwest Suburb of Chengdu in Spring	LIN Yu, YE Zhi-xiang, YANG Huai-jin, <i>et al.</i> (1629)
Variation Characteristics of Total Gaseous Mercury at Simian Mountain Background Station in Mid-subtropical Region	LIU Wei-ming, MA Ming, WANG Ding-yong, <i>et al.</i> (1639)
Establishment of Method for Health Risk Assessment of Pollutants from Fixed Sources	CHEN Qiang, WU Huan-bo (1646)
Testing of Concentration and Characteristics of Particulate Matters Emitted from Stationary Combustion Sources in Beijing	HU Yue-qi, WU Xiao-dong, WANG Chen, <i>et al.</i> (1653)
Pollution Evaluation and Risk Assessment of Heavy Metals from Atmospheric Deposition in the Parks of Nanjing	WANG Cheng, QIAN Xin, LI Hui-ming, <i>et al.</i> (1662)
CoCuMnO ₂ Photocatalyzed Oxidation of Multi-component VOCs and Kinetic Analysis	MENG Hai-long, BO Long-li, LIU Jia-dong, <i>et al.</i> (1670)
Distribution of Nitrogen and Phosphorus in the Tidal Reach and Estuary of the Daliao River and Analysis of Potential Eutrophication	ZHANG Lei, CAO Wei, MA Ying-qun, <i>et al.</i> (1677)
Spatial Distribution of Stable Isotope from the Lakes in Typical Temperate Glacier Region	SHI Xiao-yi, PU Tao, HE Yuan-qing, <i>et al.</i> (1685)
$\delta^{15}\text{N-NO}_3^-$ and $\delta^{18}\text{O-NO}_3^-$ Tracing of Nitrate Sources in Beijing Urban Rivers	ZHAO Qing-liang, MA Hui-ya, REN Yu-fen, <i>et al.</i> (1692)
Distribution Characteristics and Influencing Factors of Nitrate Pollution in Shallow Groundwater of Liujiang Basin	WANG He, GU Hong-biao, CHI Bao-ming, <i>et al.</i> (1699)
Nitrogen Losses Under the Action of Different Land Use Types of Small Catchment in Three Gorges Region	CHEN Cheng-long, GAO Ming, NI Jiu-pai, <i>et al.</i> (1707)
Interception Effect of Ecological Ditch on Nitrogen Transport in Agricultural Runoff in Subtropical China	WANG Di, LI Hong-fang, LIU Feng, <i>et al.</i> (1717)
Biodegradation Coefficients of Typical Pollutants in the Plain Rivers Network	FENG Shuai, LI Xu-yong, DENG Jian-cai (1724)
Influence of Submerged Plants on Microbial Community Structure in Sediment of Hongze Lake	ZHANG Ding-yu, ZHANG Ting-xi, DONG Dan-ping, <i>et al.</i> (1734)
Community Structure Characteristics of Diatom in Reservoirs Located in the South of Jiangsu Province, China and Its Control Factors	REN Jie, ZHOU Tao, ZHU Guang-wei, <i>et al.</i> (1742)
Contamination and Ecological Risk Assessment of Mercury in Hengshuihu Wetland, Hebei Province	WANG Nai-shan, ZHANG Man-yin, CUI Li-juan, <i>et al.</i> (1754)
Spatial Distribution and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Soils and Sediments in Shunde Waterway, Southern China	CAI Yi-min, CHEN Wei-ping, PENG Chi, <i>et al.</i> (1763)
Pollution Characteristics and Ecological Risk of PBDEs in Water and Sediment from an Electronic Waste Dismantling Area in Taizhou	CHEN Xiang-ping, PENG Bao-qi, LÜ Su-ping, <i>et al.</i> (1771)
Major Ionic Features and Their Controlling Factors in the Upper-Middle Reaches of Wujiang River	HUANG Qi-bo, QIN Xiao-qun, LIU Peng-yu, <i>et al.</i> (1779)
Export of Total Organic Carbon (TOC) from Karst Watershed and Its Influencing Factors; An Example from Xueyudong Underground River System, Chongqing	WANG Qiao-lian, JIANG Yong-jun, CHEN Yu (1788)
Seasonal Variations and Controlling Factors of the Element Contents in Drip Waters Collected from the Baojinggong Cave in Guangdong Province	HUANG Jia-yi, CHEN Lin, CHEN Qiong, <i>et al.</i> (1798)
Tracing the Fecal Contamination Sources Based on <i>Bacteroides</i> 16S rRNA PCR-DGGE in Karst Groundwater; Taking Laolongdong Underground River System, Nanshan, Chongqing as an Example	ZHANG Hong, JIANG Yong-jun, ZHANG Yuan-zhu, <i>et al.</i> (1805)
Sources and Variation Characteristics of Dissolved Lipid Biomarkers in a Typical Karst Underground River	LIANG Zuo-bing, SUN Yu-chuan, LI Jian-hong, <i>et al.</i> (1814)
Formation of Halogenated By-products in Co ²⁺ Activated Peroxymonosulfate Oxidation Process	LIU Kuo, JIN Hao, DONG Wei, <i>et al.</i> (1823)
Aspartic Acid Generated in the Process of Chlorination Disinfection By-product Dichloroacetonitrile	DING Chun-sheng, LI Nai-jun, ZHANG Tao, <i>et al.</i> (1831)
Influencing Factors of Assimilable Organic Carbon (AOC) Formation in Drinking Water During Ozonation Process	DONG Bing-zhi, ZHANG Jia-li, HE Chang (1837)
Wastewater Quantity and Quality Fluctuation Characteristics of Typical Area of Hybrid Sewage System	CHENG Xun, ZHANG Ming-kai, LIU Yan-chen, <i>et al.</i> (1845)
Preparation of HDTMA-modified Zeolite and Its Performance in Nitro-phenol Adsorption from Wastewaters	GUO Jun-yuan, WANG Bin (1852)
Selection of Suitable Microalgal Species for Sorption of Uranium in Radioactive Wastewater Treatment	LI Xin, HU Hong-ying, YU Jun-yi, <i>et al.</i> (1858)
Magnetic Fe ₃ O ₄ Microparticles Conditioning-Pressure Electro-osmotic Dewatering (MPEOD) of Sewage Sludge	QIAN Xu, WANG Yi-li, ZHAO Li (1864)
Stability of Short-cut Nitrification Nitrogen Removal in Digested Piggery Wastewater with an Intermittently Aerated Sequencing Batch Reactor	SONG Xiao-yan, LIU Rui, SHUI Yong, <i>et al.</i> (1873)
Effect of Irrigation Patterns on Soil CO ₂ and N ₂ O Emissions from Winter Wheat Field in North China Plain	GUO Shu-fang, QI Yu-chun, YIN Fei-hu, <i>et al.</i> (1880)
Characteristics of Dissolved CH ₄ and N ₂ O Concentrations of Weihe River in Xinxiang Section in Spring	HOU Cui-cui, ZHANG Fang, LI Ying-chen, <i>et al.</i> (1891)
Effect of Stimulated N Deposition on N ₂ O Emission from a <i>Stipa krylovii</i> Steppe in Inner Mongolia, China	YANG Han-yue, ZHANG Ting, HUANG Yong-mei, <i>et al.</i> (1900)
Response of Soil Respiration and Organic Carbon to Returning of Different Agricultural Straws and Its Mechanism	CAO Zhan-bo, WANG Lei, LI Fan, <i>et al.</i> (1908)
Spatial Variability and Distribution Pattern of Soil Organic Matter in a Mollisol Watershed of China	GAO Feng-jie, MA Quan-lai, HAN Wen-wen, <i>et al.</i> (1915)
Effects of Tillage on Distribution of Heavy Metals and Organic Matter Within Purple Paddy Soil Aggregates	SHI Qiong-bin, ZHAO Xiu-lan, CHANG Tong-ju, <i>et al.</i> (1923)
Distribution Characteristics and Potential Ecological Hazards Assessment of Soil Heavy Metals in Typical Soil Profiles in Southeast Suburb of Beijing	ZHAO Qian, MA Lin, LIU Yi-fei, <i>et al.</i> (1931)
Contamination Assessment and Sources Analysis of Soil Heavy Metals in Opencast Mine of East Junggar Basin in Xinjiang	LIU Wei, YANG Jian-jun, WANG Jun, <i>et al.</i> (1938)
Effect of Nano-TiO ₂ on Release and Speciation Changes of Heavy Metals in Soil	ZHANG Jin-yang, WANG Ding-yong, LIANG Li, <i>et al.</i> (1946)
Reduction Kinetics of Cr(VI) in Chromium Contaminated Soil by Nanoscale Zerovalent Iron-copper Bimetallic	MA Shao-yun, ZHU Fang, SHANG Zhi-feng (1953)
Inhibition of Low Molecular Organic Acids on the Activity of <i>Acidithiobacillus</i> Species and Its Effect on the Removal of Heavy Metals from Contaminated Soil	SONG Yong-wei, WANG He-ru, CAO Yan-xiao, <i>et al.</i> (1960)
Contribution of Particle Size and Surface Coating of Silver Nanoparticles to Its Toxicity in Marine Diatom <i>Skeletonema costatum</i>	HUANG Jun, YI Jun, QIANG Li-yuan, <i>et al.</i> (1968)
Rhizospheric Mechanisms of <i>Hemerocallis middendorffii</i> Trautv. et Mey. Remediating Petroleum-contaminated Soil and Metabonomic Analyses of the Root Systems	WANG Ya-nan, CHENG Li-juan, ZHOU Qi-xing (1978)
Effects of Thermophilic Composting on Antibiotic Resistance Genes (ARGs) of Swine Manure Source	ZHENG Ning-guo, HUANG Nan, WANG Wei-wei, <i>et al.</i> (1986)
Interaction Between Sulfonamide Antibiotics Fates and Chicken Manure Composting	LIN Hui, WANG Jian-mei, SUN Wan-chun, <i>et al.</i> (1993)

《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 刘 毅 汤鸿霄 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)

2016年5月15日 第37卷 第5期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 5 May 15, 2016

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: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行人