

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第2期

Vol.36 No.2

2015

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

霾与非霾期间汞在不同粒径颗粒物上的分布特征	朱琮宇,程金平,魏雨晴,薄丹丹,陈筱佳,江璇,王文华(373)
大气传输路径对上甸子本底站气溶胶光学特性的影响	蒲维维,石雪峰,马志强,赵秀娟,张小玲,徐晓峰(379)
近3年太原市夏季降水的化学特征研究	郭晓方,崔阳,王开扬,何秋生,王新明(388)
太原市PM _{2.5} 中有机碳和元素碳的污染特征	刘珊,彭林,温彦平,白慧玲,刘凤娴,史美鲜,李丽娟(396)
青海省西宁市和天峻县大气颗粒物中有机氯农药和类二噁英多氯联苯的水平与分布	李秋旭,何畅,马召辉,马丽花,扎西卓玛,王英,金军(402)
北京10个常绿树种颗粒物吸附能力研究	王兵,张维康,牛香,王晓燕(408)
人工湿地空气微生物群落碳源代谢特征	宋志文,王琳,徐爱玲,吴等等,夏岩(415)
春季融雪补给后巩乃斯河水物理化学性质空间分布特征研究	刘翔,郭玲鹏,张飞云,马杰,牟书勇,赵鑫,李兰海(421)
青藏高原湖泊小流域水体离子组成特征及来源分析	李鹤,李军,刘小龙,杨曦,张伟,王洁,牛颖权(430)
亚热带深水水库——龙滩水库季节性分层与富营养化特征分析	张垒,李秋华,黄国佳,欧腾,李钊,吴迪,周黔兰,高廷进(438)
长江河口水库沉积物磷形态、吸附和释放特性	金晓丹,吴昊,陈志明,宋红军,何义亮(448)
黄河口溶解无机碳时空分布特征及影响因素研究	郭兴森,吕迎春,孙志高,王传远,赵全升(457)
苕溪干流悬浮物和沉积物的磷形态分布及成因分析	陈海龙,袁旭音,王欢,李正阳,许海燕(464)
滇池表层沉积物氮污染特征及其潜在矿化能力	孟亚媛,王圣瑞,焦立新,刘文斌,肖焱波,祖维美,徐天敏,丁帅,周童(471)
城郊排水沟渠溶质传输的暂态存储影响及参数灵敏性	李如忠,钱靖,董玉红,唐文坤,杨继伟(481)
艾比湖表层沉积物重金属的来源、污染和潜在生态风险研究	张兆永,吉力力·阿不都外力,姜逢清(490)
工矿业绿洲城郊排污渠沉积物重金属的形态分布规律及风险评价	臧飞,王胜利,南忠仁,王兆炜,任业萌,王德鹏,廖琴,周婷(497)
山东省典型工业城市土壤重金属来源、空间分布及潜在生态风险评价	戴彬,吕建树,战金成,张祖陆,刘洋,周汝佳(507)
UV协同ClO ₂ 去除三氯生及其降解产物的研究	李玉瑛,何文龙,李青松,金伟伟,陈国元,李国新(516)
氯化铁絮凝-直接过滤工艺对地下水中As(V)的去除机制研究	康英,段晋明,景传勇(523)
负载纳米零价铁铜藻基活性炭的制备及其去除水中Cr(VI)的研究	曾淦宁,武晓,郑林,伍希,屠美玲,王铁杆,艾宁(530)
磁性石墨烯吸附水中Cr(VI)研究	刘伟,杨琦,李博,陈海,聂兰玉(537)
TiO ₂ @酵母复合微球固定床吸附荧光增白剂-VBL的研究	吴菲,张凯强,白波,王洪伦,索有瑞(545)
MnO ₂ /CFP复合电极的制备及电吸附Pb ²⁺ 特性的研究	刘方园,胡承志,李永峰,梁乾伟(552)
吸附相反应技术制备微弱光响应的多组分掺杂TiO ₂ 催化剂	王挺,祝轶琛,孙志轩,吴礼光(559)
掺铁TiO ₂ 纳米管阵列模拟太阳光光电催化降解双酚A的研究	项国梁,喻泽斌,陈颖,徐天佐,彭振波,刘钰鑫(568)
天然矿物负载Fe/Co催化H ₂ O ₂ 氧化降解阳离子红3R	马楠,刘华波,谢鑫源(576)
臭氧微气泡处理酸性大红3R废水特性研究	张静,杜亚威,刘晓静,周玉文,刘春,杨景亮,张磊(584)
碳源类型、温度及电子受体对生物除磷的影响	韩芸,许松,董涛,王斌帆,王显耀,彭党聪(590)
低温低溶解氧EBPR系统的启动、稳定运行及工艺失效问题研究	马娟,李璐,俞小军,魏雪芬,刘娟丽(597)
O池溶解氧水平对石化废水A/O工艺污染物去除效果和污泥微生物群落的影响	丁鹏元,初里冰,张楠,王星,王建龙(604)
改善污泥脱水性能的丝状真菌的分离及其促进污泥脱水的机制初探	周雨璐,付豪逸,范先锋,王振宇,郑冠宇(612)
热碱处理对污水处理厂污泥特性的影响研究	杨世东,陈霞,刘操,肖本益(619)
不同退化程度羊草草原碳收支对模拟氮沉降变化的响应	齐玉春,彭琴,董云社,肖胜生,贾军强,郭树芳,贺云龙,闫钟清,王丽芹(625)
地表臭氧浓度升高对旱作农田N ₂ O排放的影响	吴杨周,胡正华,李岑子,陈书涛,谢燕,肖启涛(636)
亚热带次生林不同土壤呼吸组分的多年观测研究	刘义凡,陈书涛,胡正华,沈小帅,张旭(644)
川中丘陵县域土壤氮素空间分布特征及其影响因素	罗由林,李启权,王昌全,李冰,张新,冯文颖,翁倩,吴冕(652)
黄土丘陵区土地利用变化对深层土壤活性碳组分的影响	张帅,许明祥,张亚锋,王超华,陈盖(661)
汶川地震灾区不同气候区土壤微生物群落碳源代谢多样性	张广帅,林勇明,马瑞丰,邓浩俊,杜锟,吴承祯,洪伟(669)
土壤电动修复的电极空间构型优化研究	刘芳,付融冰,徐珍(678)
有机氯农药污染场地挖掘过程中污染物的分布及健康风险	张石磊,薛南冬,杨兵,李发生,陈宣宇,刘博,孟磊(686)
水稻不同生育期根际及非根际土壤砷形态迁移转化规律	杨文骏,王英杰,周航,易开心,曾敏,彭佩钦,廖柏寒(694)
植物根系体外溶液提取方法研究:以多环芳烃为例	朱满党,都江雪,乐乐,李金凤,杨青青,陆守昆,占新华(700)
垂序商陆叶细胞壁结合锰机制研究	徐向华,刘翠英,李平,郎漫,赵小艳,杨建军,官敏(706)
1株筛自柴油污染土壤的铜绿假单胞菌对萘的降解特性研究	刘文超,吴彬彬,李晓森,卢滇楠,刘永民(712)
CdSe/ZnS量子点对斑马鱼胚胎发育的毒性效应	陈幕飞,黄承志,蒲德永,郑朝依,袁开米,金星星,张耀光,金丽(719)
锯齿新米虾对Cu ²⁺ 和毒死蜱毒性的生理响应	李典宝,张玮,王丽卿,张瑞雷,季高华(727)
同步衍生超声乳化微萃取气相色谱法测定环境水样中的苯胺类化合物	田立勋,戴之希,王国栋,翁焕新(736)
热水环境中Na ⁺ 活化斜发沸石吸附钙离子除硬过程研究	张硕,王栋,陈远超,张兴文,陈贵军(744)
区域经济-污染-环境三维评价模型的构建与应用	樊新刚,米文宝,马振宁(751)
《环境科学》征订启事(401)	
《环境科学》征稿简则(437)	
信息(489,522,726,735)	

植物根系质外体溶液的提取方法研究:以多环芳烃为例

朱满党, 都江雪, 乐乐, 李金凤, 杨青青, 陆守昆, 占新华*

(南京农业大学资源与环境科学学院, 南京 210095)

摘要: 根系质外体溶液中多环芳烃(PAHs)的分析对于阐明植物根系 PAHs 吸收运移机制及阻控意义重大。然而,迄今鲜有便捷成熟的植物根系质外体溶液提取方法的报道。为此,本研究以小麦为材料,菲为 PAHs 的代表,探究了植物根系质外体溶液的真空渗透离心提取方法。结果表明,小麦根系质外体菲提取量随真空度、真空时间、离心速率、离心时间的增加而增大;小麦根系质外体六磷酸葡萄糖脱氢酶(G6PDH)活性随真空度、真空时间、离心速率、离心时间的增加而升高。依据质外体溶液受原生质污染程度小于1%且尽量提取完全的原则,真空渗透离心提取法的最佳真空度为70 kPa,最佳真空时间为10 min,最佳离心速率为3 068 r·min⁻¹,最佳离心时间为15 min。研究结果可为污染物的植物根系质外体运输研究提供有效、简便的方法支撑。

关键词: 小麦; 根系质外体; 多环芳烃; 菲; 真空渗透离心法; 六磷酸葡萄糖脱氢酶

中图分类号: X171 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)02-0700-06 DOI: 10.13227/j. hjkx. 2015. 02. 043

Extraction of Plant Root Apoplast Solution: A Case Study with Polycyclic Aromatic Hydrocarbons

ZHU Man-dang, DU Jiang-xue, YUE Le, LI Jin-feng, YANG Qing-qing, LU Shou-kun, ZHAN Xin-hua*

(College of Resources and Environmental Sciences, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China)

Abstract: It is of great importance to investigate the extraction of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in plant root apoplast solution for elucidating the mechanisms underlying root absorption and translocation of PAHs and their control. However, little information is available on the extraction of plant root apoplast solution to date. In this study, wheat was employed and phenanthrene was used as the representative of PAHs. Phenanthrene extracted from wheat root apoplast solution increased with increasing vacuum degree, vacuum time, centrifugal speed and centrifugal time. Glucose-6-phosphate dehydrogenase (G6PDH) activity in wheat root apoplast solution was enhanced with increasing vacuum degree, vacuum time, centrifugal speed and centrifugal time. For the vacuum infiltration centrifugation extraction, the optimal vacuum degree was 70 kPa, the optimal vacuum time was 10 min, the optimal centrifugal speed was 3 068 r·min⁻¹, and the optimal centrifugal time was 15 min. Our results provide a more convenient and effective method for investigation on pollutant transport in plant root apoplast.

Key words: wheat; root apoplast; polycyclic aromatic hydrocarbons; phenanthrene; vacuum infiltration centrifugation; glucose-6-phosphate dehydrogenase activity

多环芳烃(PAHs)是一类具有致癌、致畸、致突变效应的中性或非极性的持久性有机污染物。环境中的PAHs主要赋存于土壤中^[1,2]。由于其对脂肪和碳水化合物的亲和力强,因而会在植物体内积累并沿着食物链进入人体,进而危害人类健康。据报道,非吸烟者体内的PAHs主要来自摄取的农产品^[3]。因此,研究植物根系对生长介质中PAHs的吸收转运及其机制对于阻控PAHs进入食物链就显得非常重要。

尽管国内外关于植物根系对介质中PAHs的吸收已有颇多研究^[4~6],但是关于植物根系吸收PAHs的确切过程和机制的报道却较为鲜见,如质外体在根系PAHs吸收过程中有何作用和贡献等。质外体是指原生质以外的结构部分及空间,包括细胞壁、细胞间隙和木质部的导管等组成的体系^[7]。质外体

内存在着大量的水分、矿质离子以及有机物质。质外体是一个动态空间,其内部会发生许多重要的生理生化过程,如溶质和水分的运输、组织形态的维持、内环境动态平衡的维持、生长与发育、信号转导以及抵抗逆境、光合作用的气体交换等^[8]。水分、矿质营养元素和污染物等都可以通过质外体途径进行运输。植物质外体物理、化学和生物化学功能的探究已经成为近年的研究热点^[9,10],物质质外体运输的研究对于阐明物质在植物体内的运输过程及其调控具有重要意义。

虽然质外体运输的作用早已为人们所认识,但

收稿日期: 2014-07-30; 修订日期: 2014-09-04

基金项目: 国家自然科学基金项目(31370521); 中央高校基本科研业务费专项(KYZ201145)

作者简介: 朱满党(1989~),男,硕士研究生,主要研究方向为污染控制化学, E-mail: 2012103062@njau.edu.cn

* 通讯联系人, E-mail: xhzhao@njau.edu.cn

迄今关于质外体运输的研究还极为少见. 究其原因主要是尚无成熟、可靠的植物根系质外体溶液物质的提取方法. 目前质外体溶液物质的提取方法有压力法^[11]、淋洗法^[12]、离子选择电极法^[13]、微透析法^[14]和真空渗透离心法^[15]. 这些方法中,压力法可能会使质外体溶液提取不完全;淋洗法容易造成细胞膜的破裂和质外体溶液被严重稀释;离子选择电极法和微透析法比较耗时,并对操作技术要求较高,重复性差. 由于真空渗透离心法具有简便、高效和重现性好等特点,其已在一些植物叶片质外体溶液物质的提取中进行了尝试^[16~18]. 然而,真空渗透离心法也存在细胞膜破裂导致质外体溶液被原生质污染的问题^[19]. 为解决此问题,需要对真空渗透离心法影响质外体溶液组分的参数(真空度、真空时间、离心速率和离心时间)进行优化分析,以便在质外体溶液受原生质影响可忽略的情况下尽可能完全地提取质外体溶液中的物质.

菲是优先控制的 16 种 PAHs 中的一种,由于其大量用于染料和农药生产,具有一定的致癌、致畸作用;且此种化合物在环境中的含量和检出率高,从而成为众多研究者研究 PAHs 的代表物^[20~23]. 为此,本研究以小麦为材料,菲为 PAHs 的代表,采用真空渗透法提取小麦根系质外体液,测定其中的菲含量,并对影响提取的各因素进行优化,通过建立可靠的植物根系质外体溶液的分离方法,以期揭示根系质外体内 PAHs 的运输过程及其调控提供方法依据.

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试小麦 (*Triticum aestivum* L.) 品种为南农 9918(江苏地区主要的栽培品种之一),购于江苏省农业科学院种子站.

1.2 试验设计

1.2.1 小麦培养

选取一定量比较均一的小麦种子用去离子水浮选去除瘪粒,然后用 3% H_2O_2 消毒 5 min. 消毒后的小麦种子置于底部铺有用去离子水浸湿的滤纸的搪瓷托盘中,并放入恒温培养箱中,在黑暗、25℃ 条件下进行催芽. 种子出芽后转移至底部铺有石英砂的搪瓷托盘中,并放入人工气候箱(白天/晚上温度分别为 25℃/20℃,光照强度为 $400 \mu\text{mol} \cdot (\text{s} \cdot \text{m}^2)^{-1}$,光周期为 16 h,相对空气湿度为 75%)内用去离子水培养 7 d. 选择长势比较一致的植株幼苗移入水

培箱内进行连续曝气培养,先后在 1/2 浓度和全浓度的 Hoagland 营养液(pH 5.50)中各培养 3 d. 接着用去离子水饥饿培养 1 d,然后在 Hoagland 营养液(含菲 $1.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)中培养 4 h. 营养液中菲用甲醇溶解后加入,且各处理均含有等量的甲醇(控制甲醇浓度小于 0.1%,在此浓度范围内甲醇对植物生长无影响^[24]). 上述处理结束后,植株根系用超纯水洗净后,放入甲醇中浸泡 1~2 min,然后再用纯水洗净备用.

1.2.2 质外体溶液真空渗透离心法提取参数的优化

真空渗透离心法的主要流程为:称取一定量的植物根系鲜样于烧杯中→加入缓冲液→在真空干燥器中进行真空渗透→渗透后的根系进行离心→收集溶液. 上述流程中能导致质外体溶液被原生质污染的环节是真空渗透和离心,涉及参数有真空度、真空时间、离心速率和离心时间. 参数设置依据参考文献[15].

(1) 真空度对小麦根系质外体溶液提取的影响

擦干小麦根系表面水分后,称取 1 g 根(鲜重)于 50 mL 烧杯中,向烧杯中加入足量的 $50 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ HCl-Tris (pH 8.0), $0.6 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ NaCl, 0.1% β -巯基乙醇缓冲液. 将烧杯放入真空干燥器中,在真空度分别为 10、30、40、50、70、90 kPa 下抽 10 min. 取出根系用吸水纸擦干后放入 5 mL 注射器内,再把注射器放入 50 mL 离心管中,在 4℃、离心速率 $3\,068 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 条件下离心 15 min,质外体浸提液收集于离心管内,收集到的质外体液立即分析或者 -20℃ 保存.

(2) 真空时间对小麦根系质外体溶液提取的影响

抽提步骤同(1),但真空度为 70 kPa,真空时间分别设置为 5、10、15、20、25、30 min.

(3) 离心速率对小麦根系质外体溶液提取的影响

抽提步骤同(2),但真空时间为 10 min,离心速率分别为 2 170、3 068、3 758、4 339、4 852、5 315 $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$.

(4) 离心时间对小麦根系质外体溶液提取的影响

抽提步骤同(3),但离心速率为 $3\,068 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$,离心时间设置为 5、10、15、20、25、30 min.

1.3 测定方法

1.3.1 质外体溶液中菲的测定

1.2.2 节中经抽提后的根系用 5 mL 甲醇洗涤根系表面,将洗涤液和质外体提取液混合作为质外体浸提液. 将质外体浸提液过无水 Na_2SO_4 柱后转移到 50 mL 圆底烧瓶,在 40℃ 下用真空旋转蒸发仪

蒸干,然后用正己烷溶解后转移至装有 2 g 硅胶的玻璃柱净化,并用 25 mL 体积比为 1:1 的正己烷和二氯甲烷混合液淋洗,洗脱液收集至圆底烧瓶,再次蒸干后,用 2 mL 甲醇溶解,过 0.22 μm 滤膜后用 HPLC 分析。

HPLC 分析条件:HPLC 为美国 Waters 公司生产,泵的型号为 1525,紫外检测器型号为 2487,色谱柱是 Waters 4.6 mm $\times$ 150 mm C_{18} 反向柱,柱温 30 $^{\circ}\text{C}$,流动相为甲醇/水(80/20,体积比),流速为 1.0 mL $\cdot\text{min}^{-1}$ 。进样量为 10 μL ,菲的紫外检测波长为 254 nm。该方法菲的最低检出限为 48.5 μg ,测定的相对标准偏差($n=5$) $<2.85\%$ 。在样品测定前进行分析标准的测定,采用内标法定量,菲的回收率为 90.67%。根系质外体菲含量以鲜重计。

1.3.2 六磷酸葡萄糖脱氢酶(G6PDH)活性测定

通常采用 G6PDH 活性判断质外体组分受原生质污染的程度。

(1) 根系总蛋白的提取 称取小麦根系 1 g(鲜重),加入 3 mL 提取液(100 mmol $\cdot\text{L}^{-1}$ HCl-Tris pH 7.5, 0.2 mol $\cdot\text{L}^{-1}$ KCl, 20 mmol $\cdot\text{L}^{-1}$ MgCl_2 , 2 mmol $\cdot\text{L}^{-1}$ EDTA, 1% TX-100, 5 mmol $\cdot\text{L}^{-1}$ DTT, 1 mmol $\cdot\text{L}^{-1}$ PMSF)和 0.2 g 硅胶进行冰浴匀浆。然后在 10 629 $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ 、4 $^{\circ}\text{C}$ 离心 20 min,上清液置冰上备用。

(2) G6PDH 活性检测 G6PDH 作为原生质的内标酶其活性检测是通过检测 25 $^{\circ}\text{C}$ 条件下,5 min 内 340 nm 处吸光值的变化来衡量^[25]。向 1 mL 石英比色皿中加入 750 μL 反应液(100 mmol $\cdot\text{L}^{-1}$ HCl-Tris pH 7.5, 65 mmol $\cdot\text{L}^{-1}$ MgCl_2 , 3 mmol $\cdot\text{L}^{-1}$ G6P, 1.2 mmol $\cdot\text{L}^{-1}$ NADPH)和 50 μL 质外体提取液或总蛋白提取液,迅速混匀,立即测定。G6PDH 的活性以鲜重计。

G6PDH 的活性($\text{U}\cdot\text{g}^{-1}$) = (反应后吸光度数值 - 反应前吸光度数值) $\times$ 反应总体积(μL) $\div$ 样本体积 $\div$ 反应时间(min) $\div$ NADPH 消光系数(0.00622) $\div$ 样品鲜重($\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$)。

1.4 数据统计分析

采用 Excel 及 Origin 8.5 软件对试验结果进行统计分析,数据以平均值 $\pm$ 标准差(SD)表示,数据平行测定的样品数 $n=5$ 。

2 结果与讨论

2.1 真空度对小麦根系质外体溶液提取的影响

真空渗透是对整个系统抽真空(旨在把细胞间

隙中存在的空气抽出),解除真空后,渗透液借助外部大气压力进入根系质外体空间。体系的真空程度用真空度衡量。真空度为大气压强与系统实际压强的差值(单位为 kPa)。真空度越高,系统内压强越小,解除真空后渗透越彻底,质外体溶液物质离心提取就越完全。然而,真空度过高会导致细胞膜的破裂,造成原生质外渗,进而污染质外体溶液,使得质外体溶液中溶质浓度升高。因此,需探索适宜的系统真空程度。在此真空度下,既尽可能完全地提取质外体溶液,又可避免细胞膜的破裂。小麦根系质外体菲提取量随真空度的变化如图 1 所示。在溶液中菲浓度为 1.0 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 条件下,小麦根系质外体菲的提取量随真空度的增高而增大,增加幅度也随真空度的增高而增加。真空度从 70 kPa 增高到 90 kPa 时,根系质外体内菲提取量增加迅速,由 2.34 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 增到 2.90 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$;而真空度从 10 kPa 增高到 70 kPa 时,根系质外体内菲提取量增加缓慢,差异不显著($P>0.05$)。

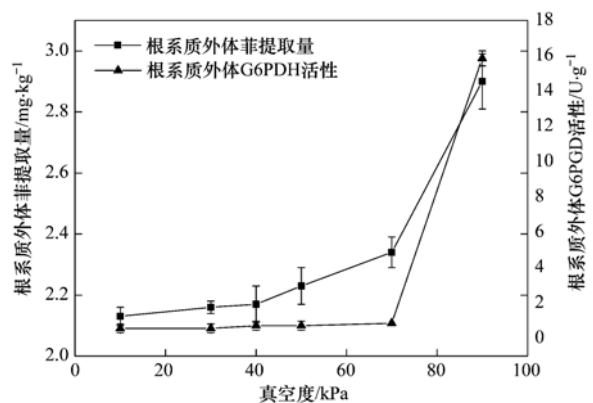


图 1 不同真空度下小麦根系质外体菲的提取量和 G6PDH 活性

Fig. 1 Changes of phenanthrene extraction amount and G6PDH activity in wheat root apoplast under different vacuum degree

G6PDH 是存在于原生质体内的一种酶,通过检测质外体内 G6PDH 的活性,可以判断质外体组分受原生质污染的程度^[26]。污染程度通常用污染率表示,污染率为根系质外体提取液 G6PDH 活性/根系总蛋白提取液 G6PDH 活性。一般地,污染率低于 1% 即认为原生质对质外体溶液的污染可忽略不计^[27]。不同真空度下小麦根系质外体溶液 G6PDH 的活性如图 1。从中可以看出,当真空度由 10 ~ 70 kPa 不断升高时,G6PDH 的活性变化差异不显著($P>0.05$),这说明原生质对质外体溶液的影响很小。当真空度由 70 kPa 继续升高时,G6PDH 的活性显著增强($P<0.05$),这是由于真空度继续增高时,细

胞膜的破裂导致了原生质对质外体溶液的污染所致. 本研究中小麦根系 G6PDH 总活性(以鲜重计)为 $(177.4 \pm 11.2) \text{ U} \cdot \text{g}^{-1}$. 结合图 1 可知: 真空度为 90、70、50、40、30、10 kPa 时质外体液受原生质体污染的程度(污染率)分别为 8.9%、0.48%、0.41%、0.41%、0.32%、0.32%. 为了质外体液尽可能提取完全而又不受原生质的污染, 小麦根系质外体溶液提取的适宜真空度为 70 kPa.

2.2 真空时间对小麦根系质外体溶液提取的影响

通常真空时间越长, 小麦根系抽提的质外体溶液的体积也越大; 但是超过一定程度, 可能会导致根系细胞破裂, 进而使得胞内原生质外渗. 因此, 必须选择适宜的真空时间. 小麦根系质外体内菲提取量与真空时间关系如图 2 所示. 在不同真空时间下小麦根系质外体对菲的提取量有较大差异, 其范围是 $2.23 \sim 3.26 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 其中真空时间为 5 min 和 10 min 时, 根系质外体菲提取量较低, 分别为 $2.23 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 与 $2.32 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; 随着真空时间的延长, 根系质外体菲提取量显著增加 ($P < 0.05$).

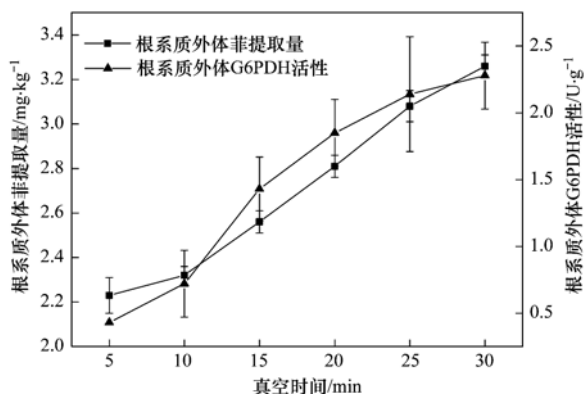


图2 不同真空时间下小麦根系质外体菲提取量和 G6PDH 活性

Fig. 2 Changes of phenanthrene extraction amount and G6PDH activity in wheat root apoplast after different vacuum time

真空时间的不同会使质外体溶液受到不同程度的污染. 不同真空时间小麦根系质外体溶液 G6PDH 活性变化如图 2. 在 5 ~ 10 min 内, 小麦根系质外体内 G6PDH 活性增加, 但差异不显著 ($P > 0.05$). 由图 2 和根系 G6PDH 总活性可知: 真空时间为 5 min、10 min 时质外体溶液受原生质污染的程度分别为 0.24%、0.41%. 当真空时间由 10 min 增至 30 min 时, G6PDH 活性快速增加, 真空时间为 15、20、25、30 min 时质外体液受原生质污染的程度各为 0.81%、1.0%、1.2%、1.3%. 因此, 10 min 是提取小麦质外体溶液的最佳真空时间.

2.3 离心速率对小麦根系质外体溶液提取的影响

不同离心速率对小麦根系质外体菲提取量的影响见图 3. 统计分析显示不同离心速率下, 质外体菲提取量明显不同, 且随着离心速率的增大菲的提取量明显升高. 离心速率为 $2170 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 和 $5315 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 时, 质外体菲提取量分别为 $2.21 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $3.35 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 后者是前者的 1.5 倍. 离心速率为 $3068 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 时, 质外体菲提取量为 $2.33 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 其与离心速率 $2070 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 的处理差异不显著 ($P > 0.05$), 而与其它处理间差异显著 ($P < 0.05$).

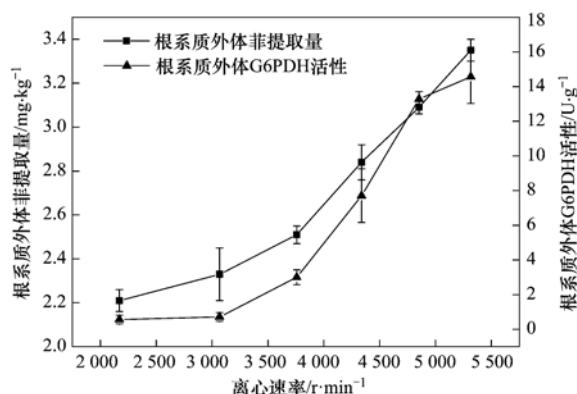


图3 不同离心速率下小麦根系质外体菲提取量和 G6PDH 活性

Fig. 3 Changes of phenanthrene extraction amount and G6PDH activity in wheat root apoplast under different centrifugal speed

离心速率作为质外体溶液菲真空渗透离心法提取的主要影响因素之一, 其与真空度和真空时间一样, 离心速率过高会导致细胞膜的破裂, 造成原生质外渗, 进而污染质外体溶液. 离心速率对小麦根系质外体溶液 G6PDH 活性的影响如图 3. 离心速率在 $2170 \sim 3068 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 范围内, G6PDH 活性随离心速率的增大逐渐增加, 但差异不显著 ($P > 0.05$); 而在离心速率大于 $3068 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 时, G6PDH 活性增加明显 ($P < 0.05$), 这是由于细胞膜受损导致原生质进入质外体溶液所致. 由图 3 和根系 G6PDH 总活性可知: 离心速率为 2170 、 3068 、 3758 、 4339 、 4852 、 $5315 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 时质外体溶液的污染率分别为 0.32%、0.41%、1.70%、4.3%、7.5%、8.2%. 为了避免原生质对质外体溶液的影响, 宜选择 $3068 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 作为真空渗透离心法提取小麦根系质外体溶液菲的离心速率.

2.4 离心时间对小麦根系质外体溶液提取的影响

随着离心时间的延长, 小麦根系质外体菲提取量有增加的趋势(图 4). 在 5 ~ 15 min 内, 根系质外体菲提取量缓慢增加 ($P > 0.05$); 从 15 ~ 30 min, 根系质外体菲提取量显著增加 ($P < 0.05$). 离心时间

为 5、15、30 min 时的根系质外体内菲含量分别为 1.96、2.23、3.02 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 15 min、30 min 时根系质外体内菲含量分别是 5 min 时的 1.5 倍、1.1 倍。

离心时间的不同也会使质外体溶液受到原生质不同程度的污染,需要选择合适的离心时间减少原生质对质外体溶液的影响。不同离心时间小麦根系质外体 G6PDH 活性变化如图 4。其结果表明,在 5~15 min 内,小麦根系质外体 G6PDH 活性差异不显著($P>0.05$)。由图 4 和根系 G6PDH 总活性可知:离心时间为 5、10、15 min 时质外体溶液的污染率分别为 0.24%、0.32%、0.48%。当离心时间由 15 min 增至 30 min 时,G6PDH 活性快速增加;离心时间为 20、25、30 min 时质外体溶液受原生质污染率为 3.4%、4.1%、6.8%。因此,离心时间为 5~15 min 时,原生质对质外体溶液的影响可忽略不计;15~30 min 时,原生质对质外体溶液的影响较大,在用真空渗透离心法提取小麦根系质外体溶液菲时离心时间应选用 15 min。

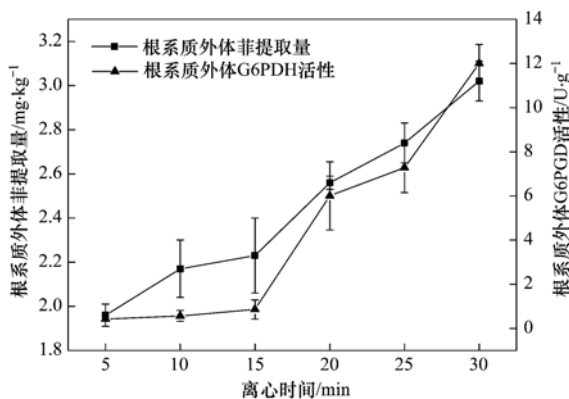


图 4 不同离心时间下小麦根系质外体菲提取量和 G6PDH 活性

Fig. 4 Changes of phenanthrene extraction amount and G6PDH activity in wheat root apoplast after different centrifugal time

3 结论

(1)小麦根系质外体菲提取量随真空度、真空时间、离心速率和离心时间的增加而增大。小麦根系质外体 G6PDH 的活性随真空度、真空时间、离心速率和离心时间的增加而升高。

(2)在真空度为 70 kPa、真空时间为 10 min、离心速率为 $3\,068\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 、离心时间为 15 min 条件下,小麦根系质外体菲的提取量分别为 2.34、2.32、2.33、2.23 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

(3)在质外体溶液受原生质污染程度小于 1% 且尽量提取完全的前提下,质外体溶液中菲提取的适宜参数为真空度 70 kPa、真空渗透时间 10 min、

离心速率 $3\,068\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 、离心时间 15 min。

参考文献:

- [1] Wild S R, Jones K C. Polynuclear aromatic hydrocarbons in the united kingdom environment: a preliminary source inventory and budget[J]. Environmental Pollution, 1995, **88**(1): 91-108.
- [2] Zhan X H, Liang X, Xu G H, et al. Influence of plant root morphology and tissue composition on phenanthrene uptake: Stepwise multiple linear regression analysis[J]. Environmental Pollution, 2013, **179**: 294-300.
- [3] Jones K C, Grimmer G, Jacob J, et al. Changes in the polynuclear aromatic hydrocarbon content of wheat grain and pasture grassland over the last century from one site in the U. K [J]. Science of the Total Environment, 1989, **78**: 117-130.
- [4] Zhan X H, Ma H L, Zhou L X, et al. Accumulation of phenanthrene by roots of intact wheat (*Triticum aestivum* L.) seedlings: passive or active uptake? [J]. BMC Plant Biology, 2010, **10**: 52.
- [5] Yin X M, Liang X, Xu G H, et al. Effect of phenanthrene uptake on membrane potential in roots of soybean, wheat and carrot[J]. Environmental and Experimental Botany, 2014, **99**: 53-58.
- [6] Gao Y Z, Zhu L Z, Ling W T, et al. Analysis method for polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in plant and soil samples[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2005, **24** (5): 1003-1006.
- [7] Sattelmacher B. The apoplast and its significance for plant mineral nutrition[J]. New Phytologist, 2001, **149** (2): 167-192.
- [8] Sakurai N. Dynamic function and regulation of apoplast in the plant body[J]. Journal of Plant Research, 1998, **111**(1): 133-148.
- [9] Maksimović J D, Maksimović V, Živanović B, et al. Peroxidase activity and phenolic compounds content in maize root and leaf apoplast, and their association with growth[J]. Plant Science, 2008, **175**(5): 656-662.
- [10] Redjala T, Sterckeman T, Skiker S et al. Contribution of apoplast and symplast to short term nickel uptake by maize and leptoanax emarginata roots[J]. Environmental and Experimental Botany, 2010, **68**(1): 99-106.
- [11] Jachetta J J, Appleby A P, Boersma L. Use of the pressure vessel to measure concentrations of solutes in apoplastic and membrane-filtered symplastic sap in sunflower leaves[J]. Plant Physiology, 1986, **82**(4): 995-999.
- [12] Long J M, Widders I E. Quantification of apoplastic potassium content by elution analysis of leaf lamina tissue from pea (*Pisum sativum* L cv. Argenteum) [J]. Plant Physiology, 1990, **94** (3): 1040-1047.
- [13] Felle H H, Hanstein S. The apoplastic pH of the substomatal cavity of *Vicia faba* leaves and its regulation responding to different stress factors [J]. Journal of Experimental Botany, 2002, **53**(366): 73-82.

- [14] Miro M, Frenzel W. The potential of microdialysis as an automatic sample-processing technique for environmental research [J]. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 2005, **24**(4): 324-333.
- [15] Klement Z. Method of obtaining fluid from the intercellular spaces of foliage and the fluid's merit as substrate for phytochemical pathogens[J]. *Phytopathology*, 1965, **55**: 1033-1034.
- [16] Shenton M R, Berberich T, Kamo M, *et al.* Use of intercellular washing fluid to investigate the secreted proteome of the rice-*Magnaporthe* interaction[J]. *Journal of Plant Research*, 2012, **125**(2): 311-316.
- [17] Nouchi I, Hayashi K, Hiradate S, *et al.* Overcoming the difficulties in collecting apoplastic fluid from rice leaves by the infiltration-centrifugation method[J]. *Plant and Cell Physiology*, 2012, **53**(9): 1659-1668.
- [18] Guevara M G, Oliva C R, Huarte M, *et al.* An aspartic protease with antimicrobial activity is induced after infection and wounding in intercellular fluids of potato tubers[J]. *European Journal of Plant Pathology*, 2002, **108**(2): 131-137.
- [19] 周露, 刘进元. 不同提取液提取水稻幼苗质外体蛋白效果的比较[J]. *中国生物工程杂志*, 2011, **31**(1): 51-55.
- [20] 汪祖丞, 刘敏, 杨毅, 等. 菲在长江口的多介质归趋模拟[J]. *环境科学*, 2011, **32**(8): 2444-2449.
- [21] Hadibarata T, Tachibana S. Characterization of phenanthrene degradation by strain *Polyporus* sp. S133 [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2010, **22**(1): 142-149.
- [22] Pantsyrnaya T, Blanchard F, Delaunay S, *et al.* Effect of surfactants, dispersion and temperature on solubility and biodegradation of phenanthrene in aqueous media [J]. *Chemosphere*, 2011, **83**(1): 29-33.
- [23] Joosten M H A J. Isolation of apoplastic fluid from leaf tissue by the vacuum infiltration-centrifugation technique [A]. In: *Methods in Molecular Biology*[M]. Totowa, NJ: Humana Press, 2012, **835**: 603-610.
- [24] 谢明吉, 严重玲, 叶菁. 菲对黑麦草根系几种低分子量分泌物的影响[J]. *生态环境*, 2008, **17**(2): 576-579.
- [25] Weimar M, Rothe G M. Preparation of extracts from mature spruce needles for enzymatic analyses [J]. *Physiologia Plantarum*, 1987, **69**(4): 692-698.
- [26] Sgherri C, Quartacci M F, Navari-Izzo F. Early production of activated oxygen species in root apoplast of wheat following copper excess[J]. *Journal of Plant Physiology*, 2007, **164**(9): 1152-1160.
- [27] Fernández M B, Pagano M R, Daleo G R, *et al.* Hydrophobic proteins secreted into the apoplast may contribute to resistance against *Phytophthora infestans* in potato[J]. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2012, **60**: 59-66.

CONTENTS

Size Distribution Characteristics of Particulate Mercury on Haze and Non-haze Days	ZHU Qiong-yu, CHENG Jin-ping, WEI Yu-qing, <i>et al.</i> (373)
Impact of Atmospheric Pollutants Transport Pathways on Aerosol Optical Properties at Shangdianzi Background Station	PU Wei-wei, SHI Xue-feng, MA Zhi-qiang, <i>et al.</i> (379)
Chemical Characteristics of 3-year Atmospheric Precipitation in Summer, Taiyuan	GUO Xiao-fang, CUI Yang, WANG Kai-yang, <i>et al.</i> (388)
Pollution Characteristics of Organic and Elemental Carbon in PM _{2.5} in Taiyuan	LIU Shan, PENG Lin, WEN Yan-ping, <i>et al.</i> (396)
Levels and Distribution of Organochlorine Pesticides and Dioxin-Like Polychlorinated Biphenyls in Atmospheric Particulates in Xining and Tianjun, Qinghai Province, China	LI Qiu-xu, HE Chang, MA Zhao-hui, <i>et al.</i> (402)
Particulate Matter Adsorption Capacity of 10 Evergreen Species in Beijing	WANG Bing, ZHANG Wei-kang, NIU Xiang, <i>et al.</i> (408)
Carbon Sources Metabolic Characteristics of Airborne Microbial Communities in Constructed Wetlands	SONG Zhi-wen, WANG Lin, XU Ai-ling, <i>et al.</i> (415)
Spatial Distribution Characteristics of the Physical and Chemical Properties of Water in the Kunes River After the Supply of Snowmelt During Spring	LIU Xiang, GUO Ling-peng, ZHANG Fei-yun, <i>et al.</i> (421)
Composition Characteristics and Source Analysis of Major Ions in Four Small Lake-watersheds on the Tibetan Plateau, China	LI He, LI Jun, LIU Xiao-long, <i>et al.</i> (430)
Seasonal Stratification and Eutrophication Characteristics of a Deep Reservoir, Longtan Reservoir in Subtropical Area of China	ZHANG Lei, LI Qiu-hua, HUANG Guo-jia, <i>et al.</i> (438)
Phosphorus Fractions, Sorption Characteristics and Its Release in the Sediments of Yangtze Estuary Reservoir, China	JIN Xiao-dan, WU Hao, CHEN Zhi-ming, <i>et al.</i> (448)
Spatial-Temporal Distributions of Dissolved Inorganic Carbon and Its Affecting Factors in the Yellow River Estuary	GUO Xing-sen, LÜ Ying-chun, SUN Zhi-gao, <i>et al.</i> (457)
Distributions of Phosphorus Fractions in Suspended Sediments and Surface Sediments of Tiaoxi Mainstreams and Cause Analysis	CHEN Hai-long, YUAN Xu-yin, WANG Huan, <i>et al.</i> (464)
Characteristics of Nitrogen Pollution and the Potential Mineralization in Surface Sediments of Dianchi Lake	MENG Ya-yuan, WANG Sheng-rui, JIAO Li-xin, <i>et al.</i> (471)
Influence of Transient Storage on Solute Transport and the Parameter Sensitivity Analysis in a Suburban Drainage Ditch	LI Ru-zhong, QIAN Jing, DONG Yu-hong, <i>et al.</i> (481)
Sources, Pollution Statue and Potential Ecological Risk of Heavy Metals in Surface Sediments of Aibi Lake, Northwest China	ZHANG Zhao-yong, Jilili Abuduwaili, JIANG Feng-qing (490)
Speciation Distribution and Risk Assessment of Heavy Metals in Sediments in Suburban Outfall of Industrial Oasis Region	ZANG Fei, WANG Sheng-li, NAN Zhong-ren, <i>et al.</i> (497)
Assessment of Sources, Spatial Distribution and Ecological Risk of Heavy Metals in Soils in a Typical Industry-based City of Shandong Province, Eastern China	DAI Bin, LÜ Jian-shu, ZHAN Jin-cheng, <i>et al.</i> (507)
Removal of Triclosan with the Method of UV/ClO ₂ and Its Degradation Products	LI Yu-ying, HE Wen-long, LI Qing-song, <i>et al.</i> (516)
Mechanism of Groundwater As(V) Removal with Ferric Flocculation and Direct Filtration	KANG Ying, DUAN Jin-ming, JING Chuan-yong (523)
Preparation of Nano Zero-valent Iron/ <i>Sargassum horneri</i> Based Activated Carbon for Removal of Cr(VI) from Aqueous Solution	ZENG Gan-ming, WU Xiao, ZHENG Lin, <i>et al.</i> (530)
Adsorption of Cr(VI) on Magnetic Graphene from Aqueous Solution	LIU Wei, YANG Qi, LI Bo, <i>et al.</i> (537)
Adsorption of the TiO ₂ @Yeast Composite Microspheres for Adsorbing Fluorescent Whitening Agent-VBL in Fixed Bed	WU Fei, ZHANG Kai-qiang, BAI Bo, <i>et al.</i> (545)
Preparation and Pb ²⁺ Electrosorption Characteristics of MnO ₂ /CFP Composite Electrode	LIU Fang-yuan, HU Cheng-zhi, LI Yong-feng, <i>et al.</i> (552)
Preparation of Weak Light Driven TiO ₂ Multi Composite Photocatalysts via Adsorption Phase Synthesis	WANG Ting, ZHU Yi-chen, SUN Zhi-xuan, <i>et al.</i> (559)
Photoelectrocatalytic Degradation of Bisphenol A in Water by Fe Doped-TiO ₂ Nanotube Arrays Under Simulated Solar Light Irradiation	XIANG Guo-liang, YU Ze-bin, CHEN Ying, <i>et al.</i> (568)
Oxidation of Cationic Red 3R in Water with H ₂ O ₂ Catalyzed by Mineral Loaded with Fe/Co	MA Nan, LIU Hua-bo, XIE Xin-yuan (576)
Characteristics of Acid Red 3R Wastewater Treatment by Ozone Microbubbles	ZHANG Jing, DU Ya-wei, LIU Xiao-jing, <i>et al.</i> (584)
Effects of Carbon Sources, Temperature and Electron Acceptors on Biological Phosphorus Removal	HAN Yun, XU Song, DONG Tao, <i>et al.</i> (590)
Startup, Stable Operation and Process Failure of EBPR System Under the Low Temperature and Low Dissolved Oxygen Condition	MA Juan, LI Lu, YU Xiao-jun, <i>et al.</i> (597)
Effects of Dissolved Oxygen in the Oxidative Parts of A/O Reactor on Degradation of Organic Pollutants and Analysis of Microbial Community for Treating Petrochemical Wastewater	DING Peng-yuan, CHU Li-bing, ZHANG Nan, <i>et al.</i> (604)
Isolation of Filamentous Fungi Capable of Enhancing Sludge Dewaterability and Study of Mechanisms Responsible for the Sludge Dewaterability Enhancement	ZHOU Yu-jun, FU Hao-yi, FAN Xian-feng, <i>et al.</i> (612)
Impacts of Alkaline Thermal Treatment on Characteristics of Sludge from Sewage Treatment Plant	YANG Shi-dong, CHEN Xia, LIU Cao, <i>et al.</i> (619)
Responses of Ecosystem Carbon Budget to Increasing Nitrogen Deposition in Differently Degraded <i>Leymus chinensis</i> Steppes in Inner Mongolia, China	QI Yu-chun, PENG Qin, DONG Yun-she, <i>et al.</i> (625)
Impacts of Elevated Ozone Concentration on N ₂ O Emission from Arid Farmland	WU Yang-zhou, HU Zheng-hua, LI Cen-zi, <i>et al.</i> (636)
Multi-Year Measurement of Soil Respiration Components in a Subtropical Secondary Forest	LIU Yi-fan, CHEN Shu-tao, HU Zheng-hua, <i>et al.</i> (644)
Spatial Variability of Soil Nitrogen and Related Affecting Factors at a County Scale in Hilly Area of Mid-Sichuan Basin	LUO You-lin, LI Qi-quan, WANG Chang-quan, <i>et al.</i> (652)
Effects of Land Use Change on Soil Active Organic Carbon in Deep Soils in Hilly Loess Plateau Region of Northwest China	ZHANG Shuai, XU Ming-xiang, ZHANG Ya-feng, <i>et al.</i> (661)
Carbon Source Metabolic Diversity of Soil Microbial Community Under Different Climate Types in the Area Affected by Wenchuan Earthquake	ZHANG Guang-shuai, LIN Yong-ming, MA Rui-feng, <i>et al.</i> (669)
Optimization of Electrode Configuration in Soil Electrokinetic Remediation	LIU Fang, FU Rong-bing, XU Zhen (678)
Distribution and Health Risk of HCHs and DDTs in a Contaminated Site with Excavation	ZHANG Shi-lei, XUE Nan-dong, YANG Bing, <i>et al.</i> (686)
Transformation and Mobility of Arsenic in the Rhizosphere and Non-Rhizosphere Soils at Different Growth Stages of Rice	YANG Wen-tao, WANG Ying-jie, ZHOU Hang, <i>et al.</i> (694)
Extraction of Plant Root Apoplast Solution; A Case Study with Polycyclic Aromatic Hydrocarbons	ZHU Man-dang, DU Jiang-xue, YUE Le, <i>et al.</i> (700)
Mechanism of Manganese Binding to Leaf Cell Wall of <i>Phytolacca americana</i> L.	XU Xiang-hua, LIU Cui-ying, LI Ping, <i>et al.</i> (706)
Degradation Characteristics of Naphthalene with a <i>Pseudomonas aeruginosa</i> Strain Isolated from Soil Contaminated by Diesel	LIU Wen-chao, WU Bin-bin, LI Xiao-sen, <i>et al.</i> (712)
Toxic Effects of CdSe/ZnS QDs to Zebrafish Embryos	CHEN Mu-fei, HUANG Cheng-zhi, PU De-yong, <i>et al.</i> (719)
Physiological Response of <i>Neocaridina denticulata</i> to the Toxicity of Cu ²⁺ and Chlorpyrifos	LI Dian-bao, ZHANG Wei, WANG Li-qing, <i>et al.</i> (727)
Determination of Anilines in Environmental Water Samples by Simultaneous Derivatization and Ultrasound Assisted Emulsification Microextraction Combined with Gas Chromatography-Flame Ionization Detectors	TIAN Li-xun, DAI Zhi-xi, WANG Guo-dong, <i>et al.</i> (736)
Adsorption of Calcium Ion from Aqueous Solution Using Na ⁺ -Conditioned Clinoptilolite for Hot-Water Softening	ZHANG Shuo, WANG Dong, CHEN Yuan-chao, <i>et al.</i> (744)
Construction and Application of Economy-Pollution-Environment Three-Dimensional Evaluation Model for District	FAN Xin-gang, MI Wen-bao, MA Zhen-ni (751)

《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)

2015年2月15日 第36卷 第2期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 2 Feb. 15, 2015

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