

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第6期

Vol.38 No.6

2017

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

PM_{2.5}浓度空间分异模拟模型对比:以京津冀地区为例 吴健生,王茜,李嘉诚,涂媛杰(2191)

北京地区近35年大气污染扩散条件变化 郭淳薇,孙兆彬,李梓铭,张小玲,杨慧玲(2202)

北京市典型区域夏季降水及其对大气污染物的影响 韩力慧,张海亮,向欣,张鹏,程水源,魏巍(2211)

北京山谷风环流特征分析及其对PM_{2.5}浓度的影响 董群,赵普生,王迎春,苗世光,高健(2218)

北京市建筑施工扬尘排放特征 薛亦峰,周震,黄玉虎,王堃,聂滕,聂磊,秦建平(2231)

生物质成型燃料锅炉挥发性有机物排放特征 吴昌达,张春林,白莉,沈丽冉,王伯光,刘军,杨立辉(2238)

广州番禺大气成分站复合污染过程VOCs对O₃与SOA的生成潜势 邹宇,邓雪娇,李菲,殷长秦(2246)

南京北郊大气臭氧周末效应特征分析 王俊秀,安俊琳,邵平,邹嘉南,林旭,张玉欣(2256)

亚热带稻区大气氨/铵态氮污染特征及干湿沉降 王杰飞,朱潇,沈健林,曾冠军,王娟,吴金水,李勇(2264)

宣威肺癌高发区燃煤排放颗粒物中铁的价态及其氧化性 王强翔,谭正莹,赵慧,李继华,田林玮,王青耀,米持真一,吕森林(2273)

垃圾焚烧厂二噁英污染及厂区工人呼吸暴露评估 杜国勇,汪倩,张姝琳,张素坤,邓春萍,张洪铭,朱盟翔,蒋昕,朱成旺,任燕玲(2280)

重庆市新型干法水泥厂汞排放特征 张成,张雅惠,王永敏,王定勇,罗程钟,徐凤,何秀清(2287)

轻型汽油车简易瞬态工况法与定容全流稀释采样法(CVS)的排放相关性 王鸿宇,黄成,胡馨遥,李莉,陈勇航,徐健(2294)

不同排放标准公交车燃用生物柴油颗粒物排放特性 楼狄明,赵成志,徐宁,谭丕强,胡志远(2301)

西江水氧同位素组成的空间变化及环境意义 许琦,李建鸿,孙平安,何师意,于爽(2308)

基于SWAT与DNDC模型对比研究亚热带流域氮淋溶与输出过程 韩宁,陈维梁,高扬,郝卓,于贵瑞(2317)

三峡库区澎溪河与磨刀溪电导率等水质特征与水华的关系比较 姜伟,周川,纪道斌,刘德富,任豫霜,Douglas Haffner,谢德体,张磊(2326)

滇池草海间隙水与上覆水氮磷时空变化特征 王一茹,王圣瑞,焦立新,张云,高秋生,杨枫(2336)

香溪河沉积物、间隙水的磷分布特征及释放通量估算 罗玉红,聂小倩,李晓玲,戴泽龙,胥焱,黄应平(2345)

大冶湖表层水和沉积物中重金属污染特征与风险评价 张家泉,田倩,许大毛,占长林,刘婷,姚瑞珍,刘先利,肖文胜(2355)

海水淡化低温多效蒸馏工艺(LT-MED)沿程溴代消毒副产物的生成 齐菲,孙迎雪,杨哲,胡春芳,常学明,胡洪营(2364)

两种水体铜配合容量测试方法的适用性比较及应用 王晨焱,姜括,谢文龙,汪磊(2373)

高地下水地区透水铺装控制径流污染的现场实验 金建荣,李田,时珍宝(2379)

稳定型纳米零价铁去除地下水中2,4-二氯苯酚 张永祥,常杉,李飞,徐毅,高维春(2385)

超声、紫外增强H₂O₂/KI降解磺胺甲基嘧啶 魏红,孙博成,杨小雨,李克斌(2393)

不同铅负载量改性膨润土对水中磷酸盐吸附作用的对比 姜博汇,林建伟,詹艳慧,邢云青,黄宏,储鸣,王星星(2400)

铁炭内电解垂直流人工湿地对污水厂尾水深度脱氮效果 郑晓英,朱星,周翔,徐亚东,王菊,韦诚,高雅洁,周徽(2412)

组合生物滤池对养殖废水的净化效率及影响因素分析 张世羊,张胜花,张翔凌,王广军(2419)

温度对聚磷菌活性及基质竞争的影响 张玲,彭党聪,常蝶(2429)

海洋厌氧氨氧化菌的富集培养及其脱氮特性 冯莉,于德爽,李津,单晓静,杨振琳(2435)

不同生物过滤系统铵态氮转化速率及生物膜特性分析 周洪玉,韩梅琳,仇天雷,高敏,孙兴滨,王旭明(2444)

磷酸盐对厌氧氨氧化活性污泥脱氮效能的影响 周正,刘凯,王凡,林兴,李祥,黄勇,顾澄伟(2453)

碳源胁迫下脱氮除磷颗粒污泥性能变化及其机制 秦诗友,陈威,马兆瑞,刘小英,陈晓国,余文韬,夏媛媛,黄健(2461)

外源Ca²⁺对SBR启动期活性污泥胞外多聚物的动态影响 任丽飞,杨新萍,张雯雯(2470)

膨胀污泥中丝状菌的分离鉴定与特性分析 张崇森,牛全睿,徐雨梅,王院梅,王岱,武少华(2477)

反硝化悬浮填料适用性及其微生物群落结构解析 谭阳,李激,徐巧,付磊,尤世界,王硕(2486)

硫代硫酸钠对排硫硫杆菌固碳能力的影响及其作用机制 李欢,王磊,王亚楠(2496)

关帝山森林土壤真菌群落结构与遗传多样性特征 乔沙沙,周永娜,柴宝峰,贾彤,李磊(2502)

基于受体模型与地统计的城市居民区土壤重金属污染源解析 陈秀端,卢新卫(2513)

基于蒙特卡罗模拟的土壤环境健康风险评价:以PAHs为例 佟瑞鹏,杨校毅(2522)

Eh、pH和铁对水稻土砷释放的影响机制 钟松雄,尹光彩,陈志良,林亲铁,黄润林,刘德玲,彭焕龙,黄玲,王欣,蒋晓璐(2530)

典型土壤不同提取态Cd与水稻吸收累积的关系 陈齐,邓潇,陈珊,侯红波,彭佩钦,廖柏寒(2538)

复合改良剂对Cd污染稻田早晚稻产地修复效果 陈立伟,杨文骏,辜娇峰,周航,高子翔,廖柏寒(2546)

两种钝化剂对土壤Pb、Cd、As复合污染的菜地修复效果 田桃,雷鸣,周航,杨文骏,廖柏寒,胡立琼,曾敏(2553)

大豆和小麦根系对非的吸持作用及其生物有效性 王红菊,李倩倩,沈羽,顾若尘,盛好,占新华(2561)

源自腐殖土的溶解性有机质组分对棕壤和黑土吸附苯并三唑的影响 杨宁伟,毕二平(2568)

地形、树种和土壤属性对喀斯特山区土壤胞外酶活性的影响 罗攀,陈浩,肖孔操,杨利琼,文丽,李德军(2577)

长期定位有机物料还田对关中平原冬小麦-玉米轮作土壤N₂O排放的影响 郝耀旭,刘继璇,袁梦轩,周应田,杨学云,顾江新(2586)

基于大气被动式采样的人体头发中类二噁英多氯联苯暴露的途径 袁浩东,白瑶,李秋旭,王英,金军(2594)

广西刁江野生鱼类重金属积累特征及其健康风险评价 王俊能,马鹏程,张丽娟,陈棉彪,黄楚珊,柳晓琳,胡国成,许振成(2600)

活性炭在中高温条件下对玉米秸秆厌氧发酵的影响 甘荣,葛明民,刘勇迪,贾红华,闫志英,雍晓雨,吴夏莞,周俊(2607)

工艺过程源和溶剂使用源挥发性有机物排放成分谱研究进展 王红丽,杨肇勋,景盛翱(2617)

《环境科学》征稿简则(2452) 《环境科学》征订启事(2560) 信息(2201, 2230, 2384)

大豆和小麦根系对菲的吸持作用及其生物有效性

王红菊, 李倩倩, 沈羽, 顾若尘, 盛妤, 占新华*

(南京农业大学资源与环境科学学院, 南京 210095)

摘要: 不同作物根系对多环芳烃(PAHs)的吸持作用及其生物有效性研究有助于深入揭示 PAHs 在生态系统中的环境行为和科学评估 PAHs 的生态风险. 然而, 不同作物根系吸持 PAHs 的差异性及其生物有效性鲜有报道. 为此, 本研究以菲作为 PAHs 的代表, 探究了不同条件下大豆和小麦根系对菲的吸持/解吸及其吸持菲的有效性. 结果表明, 根系菲吸持随时间的变化表现为: 活体根处理先增加再降低而后趋于平衡, 这与活体根系存在菲转运延迟有关; 灭活根和烘干根处理则先增加而后趋于平衡. 根系的比表面积越大, 脂肪含量越高, 菲的吸持速率越快. 不同菲浓度条件下, 各处理根系菲的吸持量均随平衡浓度的增加而增大, Henry 吸附等温式拟合 R^2 均大于 0.973, 灭活根和烘干根用 Freundlich 吸附等温式拟合效果更好, 小麦根系的 Langmuir 吸附等温式拟合效果优于大豆根系, 说明分配作用和表面吸附共同控制作物根系菲的吸持, 而活体根系与菲存在特殊的键合作用, 其拟合效果较差. 脂肪含量越高、含水率越高、膜的通透性越大, 根系的吸持容量也越大. 吸持在根系上的菲的解吸率的大小顺序为活体根 > 烘干根 > 灭活根; 大豆各处理根系小于相应的小麦根系. 不同根系吸持菲的生物有效性与解吸结果一致, 因此可以用解吸率评价其生物有效性. 研究结果可为作物根系吸持 PAHs 的当季和后茬作物有效性评估提供依据.

关键词: 根系; 多环芳烃; 吸持/解吸; 生物有效性; 大豆; 小麦

中图分类号: X171 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)06-2561-07 DOI: 10.13227/j.hjxk.201612020

Sorption of Phenanthrene to Soybean and Wheat Roots and the Bioavailability of Sorbed Phenanthrene

WANG Hong-ju, LI Qian-qian, SHEN Yu, GU Ruo-chen, SHENG Yu, ZHAN Xin-hua*

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

Abstract: The study of PAHs sorption and bioavailability to different crop roots could help to reveal the environmental behavior of PAHs in the ecosystem and evaluate the ecological risk of PAHs. However, there is little information about the differences in PAHs sorption to different roots and the bioavailability of the sorbed PAHs. In this paper, the experiments were conducted on the sorption/desorption of phenanthrene to soybean and wheat roots under different sorption times and different phenanthrene concentrations. The results showed that the trend of phenanthrene sorption in vivo was first increased and then decreased and finally reached a balance, which was related to the transport delay in vivo; the trend in dead and dried roots was first increased and then reached a balance. The greater specific surface area and the higher fat content, the faster the balance was. Freundlich isotherm was fitted better than Henry isotherm for dead and dried roots, Langmuir isotherm was best fitted in wheat roots. All of the fitted isotherms indicated that the distribution and the surface adsorption could control the phenanthrene sorption. Because of the special binding between living roots and phenanthrene, the fit effect was poor. The phenanthrene sorption capacity of soybean roots was higher than that of wheat, which was related to the high water content, fat content and membrane permeability. The phenanthrene sorbed on the roots was hard to desorb, and the desorption trends were wheat roots > soybean roots; living roots > dried roots > dead roots. The bioavailability of root-sorbed phenanthrene was consistent with the desorption results. Our results could provide data for the assessment of environmental risks of PAHs sorbed onto crop roots.

Key words: roots; polycyclic aromatic hydrocarbons; adsorption/desorption; bioavailability; soybean; wheat

多环芳烃 (polycyclic aromatic hydrocarbons, PAHs) 是指两个或两个以上的苯环稠合在一起的一类中性或非极性有机化合物. 在环境毒理学研究中, 多环芳烃已被列入具有三致性 (致癌性、致畸性、致突变) 的持久性有机污染物名单, 并引起了人们的高度关注^[1~4]. PAHs 作为脂溶性的有机污染物, 很容易被植物吸收积累, 通过食物链进入生物循环, 对人类的健康造成威胁^[5~7]. 有研究表明, 环境中的 PAHs 主要赋存于土壤中^[8,9], 这势必会造成种

植于其上的农作物的污染. 因此, 植物根系对 PAHs 的吸持作用及其生物有效性的研究有利于保障农业生产的安全和增进人类的身体健康.

通常情况下, 土壤中既残存有前茬的失活根系, 也存在现茬的活体根系. 尽管植物根系对介质中

收稿日期: 2016-12-02; 修订日期: 2016-12-26

基金项目: 国家自然科学基金项目(31370521)

作者简介: 王红菊(1990~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为污染控制化学, E-mail: 2014103044@njau.edu.cn

* 通信作者, E-mail: xhzhzhan@njau.edu.cn

PAHs 的吸持作用已有颇多研究^[10-12], 并且取得了一些创新性结果, 然而, 上述两种根系对 PAHs 的吸持作用有无差异及吸持的 PAHs 生物有效性有何不同等问题迄今鲜有报道, 而这些问题的阐明有助于科学评估作物根系吸持的 PAHs 的当季和后茬生物有效性及其健康风险. 为此, 本文以菲为 PAHs 的代表, 研究了大豆和小麦活体根系、灭活根系和烘干根系在不同时间和菲浓度下对菲的吸持作用, 比较了大豆和小麦各类根系吸持菲的差异, 并对产生差异的原因进行了探讨; 此外, 还观察了根系吸持菲的解吸行为和生物有效性.

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, 大豆 (*Glycine max* L.) 品种为中黄 25, 均为江苏地区的主要栽培品种. 两种作物的种子购自江苏省农业科学院种子站.

1.2 试验设计

1.2.1 植物培养

取适量的种子放入烧杯中, 清水冲洗去除瘪粒, 用 3% 的 H_2O_2 溶液浸泡 5 min 进行消毒. 消毒后的种子放置在底部铺有滤纸的托盘中, 上面滤纸覆盖并用去离子水润湿. 然后置于恒温培养箱中, 在 25℃ 黑暗的条件下进行催芽. 种子萌发后播种在以蛭石为基质的塑料花盆中并放入光照培养箱中培养 15 d, 培养条件: 光照强度为 $400 \mu\text{mol} \cdot (\text{s} \cdot \text{m}^2)^{-1}$, 光照周期为白天 16 h, 夜晚 8 h, 白天/晚上温度设置为 25/20℃, 湿度为 75%. 培养结束后, 用清水洗掉根系表面的蛭石, 将根系剪下, 用去离子水将根系洗涤 3 遍并用吸水纸擦干备用.

1.2.2 根系菲吸持/解吸试验

大豆和小麦根系菲吸持的动力学: 按照 Su 等^[13]的方法, 称取 2 g 活体根或灭活根 (在 105℃ 下处理 45 min) 或烘干根 0.2 g 于 250 mL 的三角瓶中, 加入 50 mL 混合溶液 (含 $0.01 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ CaCl}_2$ 、 $400 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \text{ NaN}_3$ 和 $1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 菲), 三角瓶密封后置于恒温摇床上, 在 25℃, $180 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 的条件下避光振荡. 分别在振荡 0.1、0.5、1、4、8、12、16、24 h 时, 取样测定根系菲吸持量. 采用 NaN_3 抑制体系中微生物的活性.

大豆和小麦根系菲吸持的浓度依赖性: 称取 2 g 活体根或灭活根或 0.2 g 烘干根于 250 mL 的三角瓶中, 加入 50 mL 混合溶液 (含 $0.01 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$

CaCl_2 、 $400 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \text{ NaN}_3$ 和一定浓度的菲), 溶液中菲浓度分别为 0、0.2、0.4、0.6、0.8、1.0 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 将三角瓶密封后置于恒温摇床上, 在 25℃, $180 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 的条件下避光振荡 8 h 取样, 测定根系菲的吸持量.

大豆和小麦根系吸持菲的解吸试验: 将一定质量菲吸持饱和的大豆和小麦根系置于无非背景溶液 (含 $0.01 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ CaCl}_2$ 、 $400 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \text{ NaN}_3$) 中, 在 25℃、 $180 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 的条件下恒温振荡 72 h, 然后测定背景溶液中菲浓度.

1.2.3 根系吸持的菲的生物有效性试验

将菲吸持量相同的大豆和小麦活体根、灭活根与烘干根分别放入盛有 500 mL Hoagland 营养液的烧杯中, 然后向烧杯中移入正常生长的 5 株大豆和 15 株小麦植株, 处理 4 h 后测定植株中菲含量.

1.3 菲的提取和测定

吸持菲的提取: 按照 Schwab 等^[14]方法提取根系吸持的菲. 吸持完成后用去离子水冲洗根系表面, 然后将根浸入 40 mL 甲醇中 3 min. 用去离子水稀释至甲醇/水 (体积比) 为 1:9. 用移液管移取 10 mL 混合液于分液漏斗中, 用二氯甲烷萃取 3 次, 收集有机相, 真空旋转蒸干. 用 2 mL 甲醇重新溶解, 过 $0.22 \mu\text{m}$ 有机滤膜后用 HPLC 分析.

植株中菲的提取: 按照 Zhan 等^[15]的方法提取根系吸收的菲. 处理结束后, 将根系用超纯水洗涤擦干后放入甲醇中浸泡 3 min, 再用超纯水冲洗根系并用滤纸擦干. 将洗净擦干的植株剪碎放入 50 mL 的玻璃离心管中, 用 1:1 (体积比) 二氯甲烷/丙酮混合液 10 mL 超声提取 30 min, 重复提取 3 次. 提取液过无水硫酸钠硅胶柱收集至 50 mL 锥形瓶中, 然后用 10 mL 1:1 (体积比) 的二氯甲烷/正己烷混合液冲洗硅胶柱. 最后将收集到的溶液真空旋转蒸干后用 2 mL 甲醇重新溶解, 过 $0.22 \mu\text{m}$ 有机滤膜后用 HPLC 测定.

HPLC 分析条件: 美国 Thermo 公司生产 UltiMate 3000, 泵型号为 LPG-3400SDN, 紫外检测器型号为 VWD-3100, 色谱柱为 4.6 mm × 150 mm C_{18} 柱, 柱温 30℃, 流动相为甲醇/水 (80/20, 体积比), 流速为 $1.0 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$, 进样量为 10 μL , 菲的紫外检测波长为 254 nm. 在样品测定前, 采用内标法进行分析标准的测定, 菲的回收率为 90.88%.

1.4 根系含水率和比表面积的测定

含水率的测定: 称取一定量的植物样品烘干至恒重, 以样品烘干前后质量差计算根系的含水率.

比表面积的测定:将洗净的植物根系放入盛有超纯水的有机玻璃盘中,运用 LA1600 型根系扫描仪(LA 1600 + scaimer, Regent Instruments Inc, Canada)扫描根系并对根图像进行数据处理,获得根表面积参数。

1.5 根系脂肪含量的测定

大豆和小麦根系脂肪含量的测定参照 Li 等^[16]的方法。将烘干的大豆和小麦根系用研钵研碎。称取一定量的研磨后的根系于 500 mL 的索氏提取器中,加入三氯甲烷:甲醇 = 2:1 (体积比)的混合液提取 12 h,将提取液旋转蒸干,用正己烷重新溶解,过 0.22 μm 的有机滤膜后装入称重的烧杯中,等正己烷挥发完全后再次称重,计算根系脂肪含量。

1.6 数据统计分析

采用 Excel 2007 和 Origin 8.5 软件对试验数据进行处理、分析、绘图,用 SPSS 21.0 对试验数据进行方差分析和 Duncan 显著性检验。

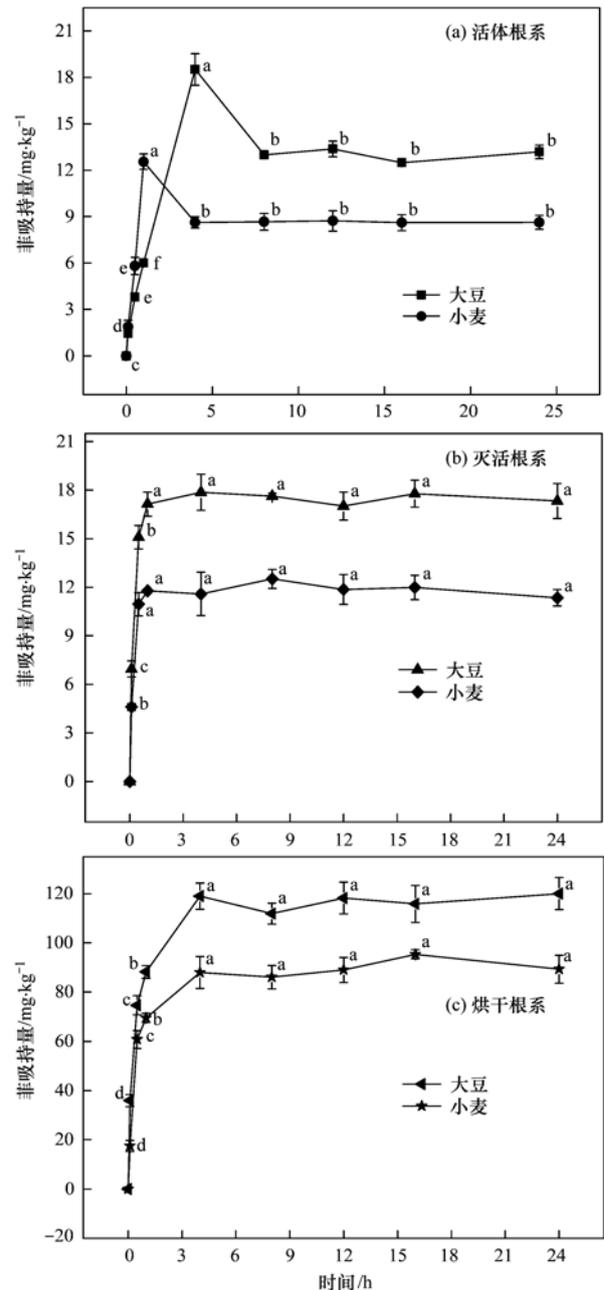
2 结果与讨论

2.1 大豆和小麦根系菲吸持动力学

大豆和小麦根系菲吸持的时间动态如图 1 所示。随着吸持时间的增加,大豆和小麦活体根系对菲的吸持量均呈现先增加后减少,然后逐渐达到平衡的趋势[图 1(a)]。大豆活体根系对菲的吸持量在 4 h 达到最大值 18.52 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,8 h 时达到吸持稳定状态,吸持量最终稳定在 13 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 左右;小麦活体根系对菲的吸持则在 1 h 时达到最大值(12.98 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$),并在 4 h 时达到吸持平衡状态,平衡时吸持量为 8.7 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 左右。

活体根系菲吸持表现为先增加再减少最后趋于平衡的原因是:当活体根系置于菲溶液中,菲首先会吸持在与溶液直接接触的根系细胞壁上,随后细胞壁上吸持的部分菲会转移到细胞内部,从而造成细胞壁上吸持的菲逐渐减少;一段时间后,这种动态过程会达到稳定状态,这时吸持在细胞壁上的菲含量也趋于稳定。Kang 等^[17]对黑麦草试验结果与本研究一致。

由图 1(b)和 1(c)可知,随着暴露时间的延长,大豆和小麦灭活根系和烘干根系对菲的吸持均先增加然后趋于稳定,这与刘建武等^[18]报道的结果一致。大豆灭活根系在 1 h 达到吸持平衡,菲的最大吸持量为 17 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$;而小麦灭活根系在 0.5 h 达到吸持平衡,菲最大吸持量为 11 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。大豆和小麦烘干根系均在 4 h 达到吸持平衡,菲的吸持量



同一曲线标记不同字母表示差异显著($P < 0.05$)

图 1 大豆和小麦活体根系、灭活根系、烘干根系对菲吸持的时间动态

Fig. 1 Variation of sorption content of phenanthrene to soybean and wheat living roots, dead roots and dried roots with time

分别为 120 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 90 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

灭活根系较活体根系更快达到吸持平衡是因为活体根经高温灭活,其细胞壁和细胞膜的通透性增加^[13],有机污染物可快速进入根系,从而更快地达到吸持稳定状态。烘干根系达到吸持平衡的时间比灭活根系长是由于烘干根系浸于菲的水溶液后,根系存在吸水膨胀过程,导致其达到吸持平衡时间较长。

根系理化性质、植物生育期等因素会对植物根系吸持有机污染物产生影响^[14,19]。试验所用大豆和小麦根系的性质如表 1 所示。小麦活体根系的比表面积为 $178.5 \text{ cm}^2 \cdot \text{g}^{-1}$, 远大于大豆活体根系 ($80.64 \text{ cm}^2 \cdot \text{g}^{-1}$); 小麦灭活根系的比表面积为 $229.8 \text{ cm}^2 \cdot \text{g}^{-1}$, 也显著大于大豆灭活根系 ($114.5 \text{ cm}^2 \cdot \text{g}^{-1}$)。所以, 在同浓度的菲溶液中, 相同质量的小麦活体/灭活根系比大豆活体/灭活根系具有更大的比表面积, 能更充分地与非溶液接触, 加速菲的吸持, 使吸持更快地达到平衡, 这一结果与 Chen 等^[20]的结果一致。焦杏春等^[21]研究表明比表面积大的水稻侧根对 PAHs 的吸持效率大于节根。Wild 等^[22]发现葱进入比表面积大的小麦活体根系的速度大于玉米活体根系。所以, 植物根系的比表面积越大, 对菲的吸持速率也越大。此外, 小麦根系的最大吸持量小于大豆根系 (图 1), 这也可使小麦根系更快地达到吸持平衡。

为了直观地比较各根系对菲的吸持速率, 本研究计算了各根系从吸持开始至达到吸持最大值时, 单位时间内根系菲的平均吸持速率, 其结果如表 2 所示。从中可以看出, 大豆活体根系和灭活根系的菲吸持速率分别小于小麦活体根系和灭活根系, 但

表 1 大豆和小麦根系的比表面积和含水率
Table 1 Specific surface area and water content of soybean and wheat roots

作物种类	根系种类	比表面积/ $\text{cm}^2 \cdot \text{g}^{-1}$	含水率/%
大豆	活体根系	80.64 ± 2.2	94.65 ± 0.074
	灭活根系	114.5 ± 14	93.65 ± 0.021
	烘干根系	381.4 ± 58	—
小麦	活体根系	178.5 ± 20	92.91 ± 0.18
	灭活根系	229.8 ± 24	91.30 ± 0.078
	烘干根系	543.0 ± 26	—

是大豆烘干根系的菲吸持速率大于小麦烘干根系。通过计算可知小麦活体根、灭活根和烘干根系的比表面积分别是相应大豆根系比表面积的 2.3、1.9、1.5 倍, 菲吸持速率分别是相应大豆根系的 2.8、1.4、0.74 倍。小麦和大豆活体根系和灭活根系比表面积差异越小, 菲吸持速率差异也越小, 说明根系菲的吸持速率与比表面积成正比; 小麦烘干根系的比表面积大于大豆烘干根系, 菲吸持速率却较小, 说明除比表面积外, 还有其他因素影响根系菲的吸持速率。本试验测得大豆和小麦烘干根系的脂肪含量分别为 4.0% 和 2.1%, 脂肪含量越高对菲的亲合力越强, 吸持菲的速率越快。

表 2 大豆和小麦根系菲的吸持速率/ $\text{mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{h})^{-1}$

Table 2 Phenanthrene sorption rate of soybean and wheat roots/ $\text{mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{h})^{-1}$

项目	大豆			小麦		
	活体根系	灭活根系	烘干根系	活体根系	灭活根系	烘干根系
速率	4.63	17.13	29.76	12.98	23.54	22.00

2.2 大豆和小麦根系菲吸持的浓度依赖性

大豆和小麦各根系对菲吸持作用的浓度依赖性结果如图 2 所示。随着溶液中菲浓度的增加, 大豆和小麦各根系的菲吸持量呈显著增加的趋势; 大豆各根系菲吸持量均显著高于相应的小麦根系。

对图 2 中大豆和小麦根系菲吸持的结果分别采用 Henry、Freundlich、Langmuir 吸附等温式进行拟合。3 种等温式的吸持常数列于表 3。对于大豆和小麦各根系来说, Henry 等温式拟合的效果较好, R^2 都大于 0.973, 说明分配作用在吸持过程中占主要地位^[23,24]。大豆和小麦灭活根系和烘干根系的 Freundlich 等温式拟合的 R^2 都为 0.998, 拟合效果优于 Henry 等温式拟合, 小麦根系的 Langmuir 等温式拟合效果优于大豆根系, 表明除了分配作用外表面吸持在根系吸持菲的过程中起到控制作用。构成植物根系的主要组分有纤维素、半纤维素、果胶、

木质素、脂肪等。一方面菲可以强烈地分配到具有芳香碳的木质素和脂肪碳的脂肪中; 另一方面物理或化学作用又可以使菲被吸持到固体表面上。大豆和小麦活体根系的 Freundlich 等温式拟合效果较灭活根系和烘干根系差。Su 等^[13]认为相对于灭活根系, 植物活体根系细胞壁与 PAHs 存在特殊的键和作用; 刘婷婷等^[25]研究了海州香薷根系细胞壁对铜的吸附固定机制, 结果表明细胞壁蛋白结合 Cu^{2+} 的方式主要是在 ATP 酶等动力的供应下, 主动结合 Cu^{2+} , 而离体的细胞壁无能量供应, 加之蛋白质失活, 对 Cu^{2+} 的固定能力消失, 因而植物活体根系具有生物活性, 对菲的吸持也更为复杂。小麦根系的比表面积大于大豆根系, 菲分子在小麦根系上的吸持表现为单分子层的表面吸持, 刘建武等^[18]研究了萘在水葫芦根系上的吸持, 表明 Langmuir 等温式拟合效果最好, 大豆根系的 Langmuir 等温式拟合效果

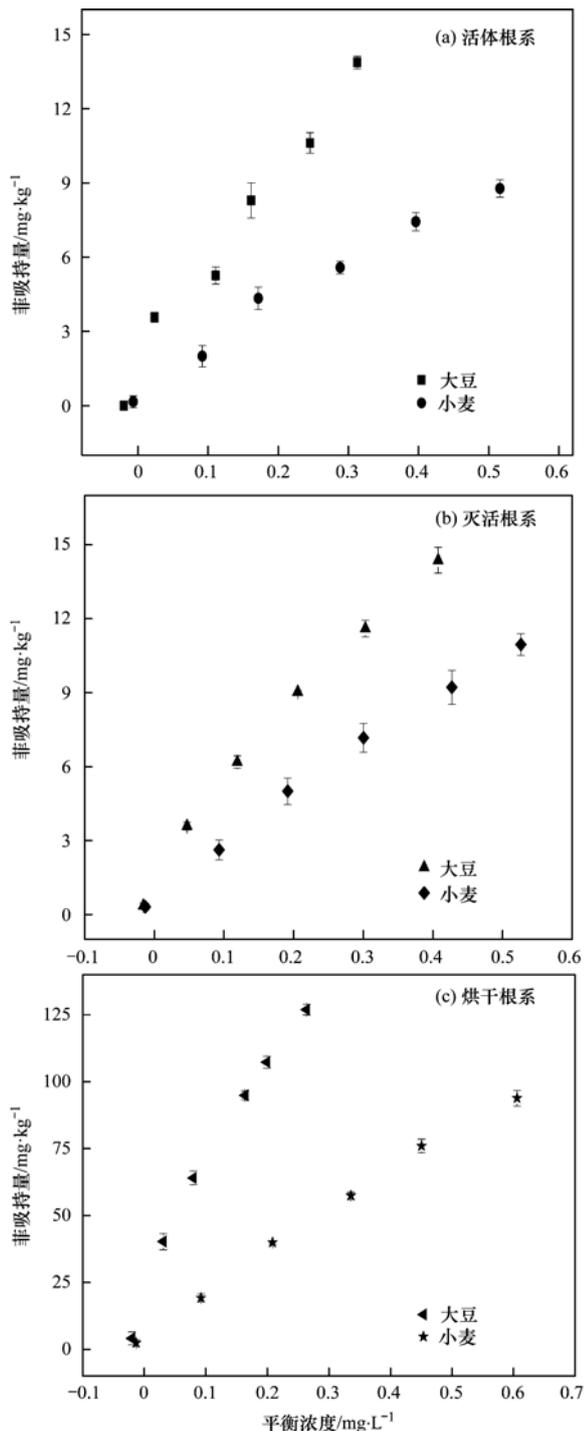


图2 大豆和小麦活体根系、灭活根系、烘干根系的菲吸持的浓度依赖性

Fig. 2 Sorption content of phenanthrene to soybean and wheat living, dead, dried roots at different phenanthrene levels

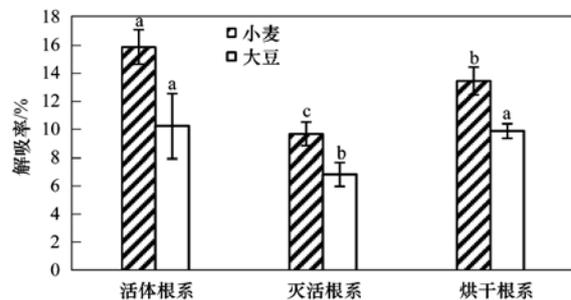
较差,是因为大豆根系的脂肪含量较高,菲在其上的吸持分配作用较小麦根系强。

大豆根系的菲吸持量显著大于相应处理小麦根系的原因是根系脂肪和水分含量的影响。通常,脂肪含量越高,植物根系对有机污染物的吸持能力也越强^[26,27]。大豆根系脂肪含量高于小麦,其对菲的

吸持能力也更强。由表1可知大豆活体根系的含水率高于小麦,使更多的菲溶解在大豆根系质外体或共质体溶液中,增加大豆活体根系菲的吸持量。对于大豆和小麦来说,灭活根系的吸持量均大于活体根系,是因为活体根系经高温灭活后,根系的膜通透性增加,污染物可以快速扩散进入根内,促进有机污染物在根系有机组分间的分配,使根系的吸持容量增大^[13]。

2.3 大豆和小麦根系吸持的菲的解吸

大豆和小麦根系菲解吸的结果如图3所示。大豆各根系的菲解吸率均小于相应的小麦根系;活体根、灭活根和烘干根系的菲解吸率为:活体根 > 烘干根 > 灭活根。



同一图案标注不同字母表示显著性差异 ($P < 0.05$)

图3 大豆和小麦根系的吸持菲的解吸率

Fig. 3 Desorption rate of the sorbed phenanthrene on soybean and wheat roots

本试验测得大豆根系的脂肪含量为4.0%,小麦根系的脂肪含量为2.1%。脂肪中的脂肪族碳等可与菲之间形成强的共轭体系,使吸持的菲难以解吸下来^[28,29],因此,脂肪含量越高,菲的解吸率越低,大豆根系的菲解吸率小于相应的小麦根系。由表1可知小麦活体根、灭活根、烘干根系的比表面积分别是相应的大豆根系的2.3、1.9、1.5倍,吸持菲的小麦活体根、灭活根、烘干根系的解吸率分别是相应大豆根系的1.55、1.42、1.36倍,两者的变化规律一致,因此比表面积也是影响解吸率的另一重要因素。吸持在小麦根系表面的菲能更充分地跟溶液接触,其吸持的菲解吸到溶液中的概率也更大。

Su等^[13]研究表明非极性有机污染物在活体根系上的转运主要是通过质外体途径在细胞间的细胞壁上移动,因而菲在活体根上的吸持主要是吸持在根系细胞壁上。灭活根系的细胞结构被破坏,膜通透性大,菲可快速扩散进入根类脂物中,促进分配,因此菲可以吸持在灭活根系的细胞壁组分上,也可以吸持在细胞膜组分中。细胞膜的主要组分是磷脂双分子层,对菲具有强的亲和作用,吸持在该组分上

的菲更难解吸. 因而灭活根系的菲解吸率较活体根低. 烘干根不具有完整的细胞结构, 菲可以吸持在细胞膜的类脂结构上, 但是烘干根系的比表面积较

大, 可使吸持的菲解吸的概率更大. 因此具有完整细胞结构的活体根系的解吸率高, 且比表面积越大, 解吸率越高.

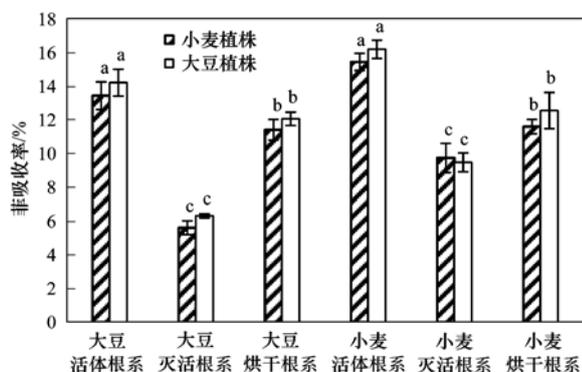
表 3 Henry、Freundlich 和 Langmuir 吸附等温式拟合常数

Table 3 Parameters of Henry, Freundlich and Langmuir model-based sorption isotherm

项目	Henry		Freundlich		Langmuir				
	$K_d/\text{mL}\cdot\text{g}^{-1}$	R^2	$\lg K_f$	n	R^2	$q^0/\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$	b	R^2	
大豆	活体根系	36.06	0.977	1.327	0.507	0.899	11.0	22.7	0.835
	灭活根系	29.66	0.995	1.398	0.641	0.998	18.5	5.41	0.983
	烘干根系	370.3	0.993	2.404	0.534	0.998	167	10.0	0.978
小麦	活体根系	15.34	0.973	1.202	0.829	0.972	45.5	0.523	0.980
	灭活根系	18.90	0.993	1.274	0.819	0.998	31.3	1.07	0.999
	烘干根系	145.4	0.994	2.165	0.845	0.998	333	0.751	0.999

2.4 大豆和小麦根系吸持菲的生物有效性

本研究的生物有效性是指吸持在根系上的菲被植株利用的实际可能性^[30,31]. 大豆和小麦根系吸持菲的生物有效性试验结果如图 4 所示. 对大豆和小麦而言, 根系吸持的菲的生物有效性均表现为活体根系 > 烘干根系 > 灭活根系, 且大豆根系吸持的菲的生物有效性低于相应的小麦根系. 这些结果与解吸率结果相一致, 因此大豆和小麦根系吸持菲的生物有效性与菲的解吸率呈正相关关系, 解吸率可以用于表征根系吸持菲的生物有效性. 同时, 上述结果也说明了作物根系吸持的菲的当季有效性高于残茬.



同一作物根系同一图案标注不同字母表示显著性差异 ($P < 0.05$)

图 4 根系吸持菲的生物有效性

Fig. 4 Bioavailability of the sorbed phenanthrene on soybean and wheat roots

3 结论

(1) 分配作用和表面吸附作用共同控制根系对菲的吸持作用, 活体根的吸持更为复杂. 根系的含水率越高、膜通透性越大、脂肪含量越高, 根系菲的吸持容量越大. 根系吸持菲的能力为: 大豆根系大于相应的小麦根系.

(2) 根系吸持菲的解吸率为: 大豆各根系的菲解吸率均小于相应的小麦根系; 活体根 > 烘干根 > 灭活根.

(3) 根系吸持菲的生物有效性为: 小麦根系 > 大豆根系; 活体根系 > 烘干根系 > 灭活根系.

参考文献:

- [1] Juhasz A L, Naidu R. Bioremediation of high molecular weight polycyclic aromatic hydrocarbons: a review of the microbial degradation of benzo [a] pyrene [J]. International Biodeterioration & Biodegradation, 2000, **45**(1-2): 57-88.
- [2] Dugay A, Herrenknecht C, Czok M, *et al.* New procedure for selective extraction of polycyclic aromatic hydrocarbons in plants for gas chromatographic-mass spectrometric analysis [J]. Journal of Chromatography A, 2002, **958**(1-2): 1-7.
- [3] Wileke W. SYNOPSIS polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in soil-a review [J]. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 2000, **163**(3): 229-248.
- [4] Meudec A, Dussauze J, Jourdin M, *et al.* Gas chromatographic-mass spectrometric method for polycyclic aromatic hydrocarbon analysis in plant biota [J]. Journal of Chromatography A, 2006, **1108**(2): 240-247.
- [5] 占新华, 周立祥, 万寅婧, 等. 水溶性有机物对植物吸收菲的影响及其机制研究 [J]. 环境科学, 2006, **27**(9): 1884-1888.
Zhan X H, Zhou L X, Wan Y J, *et al.* Impact of dissolved organic matter on plant uptake of phenanthrene and its mechanisms [J]. Environmental Science, 2006, **27**(9): 1884-1888.
- [6] McKone T E, Ryan P B. Human exposures to chemicals through food chains: an uncertainty analysis [J]. Environmental Science & Technology, 1989, **23**(9): 1154-1163.
- [7] McLachlan M S. Bioaccumulation of hydrophobic chemicals in agricultural food chains [J]. Environmental Science & Technology, 1995, **30**(1): 252-259.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] Su Y H, Zhu Y G. Uptake of selected PAHs from contaminated soils by rice seedlings (*Oryza sativa*) and influence of rhizosphere on PAH distribution [J]. Environmental Pollution, 2008, **155**(2): 359-365.
- [11] Zhu Y H, Zhang S Z, Zhu Y G, *et al.* Improved approaches for modeling the sorption of phenanthrene by a range of plant species [J]. Environmental Science & Technology, 2007, **41**(22): 7818-7823.
- [12] Chen B L, Yuan M X, Liu H. Removal of polycyclic aromatic hydrocarbons from aqueous solution using plant residue materials as a biosorbent [J]. Journal of Hazardous Materials, 2011, **188**(1-3): 436-442.
- [13] Su Y H, Zhu Y G. Transport mechanisms for the uptake of organic compounds by rice (*Oryza sativa*) roots [J]. Environmental Pollution, 2007, **148**(1): 94-100.
- [14] Schwab A P, Al-Assi A A, Banks M K. Adsorption of naphthalene onto plant roots [J]. Journal of Environmental Quality, 1998, **27**(1): 220-224.
- [15] 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**(1): 52.
- [16] Li H, Sheng G Y, Chiou C T, *et al.* Relation of organic contaminant equilibrium sorption and kinetic uptake in plants [J]. Environmental Science & Technology, 2005, **39**(13): 4864-4870.
- [17] Kang F X, Chen D S, Gao Y Z, *et al.* Distribution of polycyclic aromatic hydrocarbons in subcellular root tissues of ryegrass (*Lolium multiflorum* Lam.) [J]. BMC Plant Biology, 2010, **10**(1): 210.
- [18] 刘建武, 林逢凯, 王郁, 等. 水生植物根系对多环芳烃(萘)吸附过程研究 [J]. 环境科学与技术, 2003, **26**(2): 32-34.
Liu J W, Lin F K, Wang Y, *et al.* Experimental studies of adsorption of naphthalene on roots of *Eichhornia crassipes* solms [J]. Environmental Science and Technology, 2003, **26**(2): 32-34.
- [19] Binet P, Portal J M, Leyval C. Fate of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH) in the rhizosphere and mycorrhizosphere of ryegrass [J]. Plant and Soil, 2000, **227**(1-2): 207-213.
- [20] Chen S H, Xu F L, Dawson R, *et al.* Adsorption and absorption of dichlorodiphenyltrichloroethane (DDT) and metabolites (DDD and DDE) by rice roots [J]. Environmental Pollution, 2007, **147**(1): 256-261.
- [21] 焦杏春, 陈素华, 沈伟然, 等. 水稻根系对多环芳烃的吸着与吸收 [J]. 环境科学, 2006, **27**(4): 760-764.
Jiao X C, Chen S H, Shen W R, *et al.* Sorption and absorption of PAHs to rice roots [J]. Environmental Science, 2006, **27**(4): 760-764.
- [22] Wild E, Dent J, Thomas G O, *et al.* Direct observation of organic contaminant uptake, storage, and metabolism within plant roots [J]. Environmental Science & Technology, 2005, **39**(10): 3695-3702.
- [23] 张明. 碳水化合物及脂肪在黑麦草吸收多环芳烃中的作用 [D]. 杭州: 浙江大学, 2009.
Zhang M. Effect of carbohydrates and lipids on uptake of polycyclic aromatic hydrocarbons by ryegrass [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2009.
- [24] Zhu M J, Yao J, Dong L F, *et al.* Adsorption of naphthalene from aqueous solution onto fatty acid modified walnut shells [J]. Chemosphere, 2016, **144**: 1639-1645.
- [25] 刘婷婷, 彭程, 王梦, 等. 海州香薷根细胞壁对铜的吸附固定机制研究 [J]. 环境科学学报, 2014, **34**(2): 514-523.
Liu T T, Peng C, Wang M, *et al.* Mechanism of fixation and adsorption of copper on root cell wall of *Elsholtzia splendens* [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2014, **34**(2): 514-523.
- [26] Jiao X C, Xu F L, Dawson R, *et al.* Adsorption and absorption of polycyclic aromatic hydrocarbons to rice roots [J]. Environmental Pollution, 2007, **148**(1): 230-235.
- [27] Lin D H, Pan B, Zhu L Z, *et al.* Characterization and phenanthrene sorption of tea leaf powders [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2007, **55**(14): 5718-5724.
- [28] 占新华, 周立祥, 杨红, 等. 水溶性有机物与多环芳烃结合特征的红外光谱学研究 [J]. 土壤学报, 2007, **44**(1): 47-53.
Zhan X H, Zhou L X, Yang H, *et al.* Infrared spectroscopy of DOM-PAHs complexes [J]. Acta Pedologica Sinica, 2007, **44**(1): 47-53.
- [29] Olivella M à, Jové P, Bianchi A, *et al.* An integrated approach to understanding the sorption mechanism of phenanthrene by cork [J]. Chemosphere, 2013, **90**(6): 1939-1944.
- [30] Semple K T, Doick K J, Jones K C, *et al.* Peer reviewed: defining bioavailability and bioaccessibility of contaminated soil and sediment is complicated [J]. Environmental Science & Technology, 2004, **38**(12): 228A-231A.
- [31] 周启星, 罗义. 污染生态化学 [M]. 北京: 科学出版社, 2011.

CONTENTS

Comparison of Models on Spatial Variation of PM _{2.5} Concentration; A Case of Beijing-Tianjin-Hebei Region	WU Jian-sheng, WANG Xi, LI Jia-cheng, <i>et al.</i> (2191)
Change of Atmospheric Pollution Diffusion Conditions in Beijing in Recent 35 Years	GUO Chun-wei, SUN Zhao-bin, LI Zi-ming, <i>et al.</i> (2202)
Precipitation and Its Effects on Atmospheric Pollutants in a Representative Region of Beijing in Summer	HAN Li-hui, ZHANG Hai-liang, XIANG Xin, <i>et al.</i> (2211)
Impact of Mountain-Valley Wind Circulation on Typical Cases of Air Pollution in Beijing	DONG Qun, ZHAO Pu-sheng, WANG Ying-chun, <i>et al.</i> (2218)
Fugitive Dust Emission Characteristics from Building Construction Sites of Beijing	XUE Yi-feng, ZHOU Zhen, HUANG Yu-hu, <i>et al.</i> (2231)
Characteristics of Volatile Organic Compounds Emitted from Biomass-pellets-fired Boilers	WU Chang-da, ZHANG Chun-lin, BAI Li, <i>et al.</i> (2238)
Effect of VOCs on O ₃ and SOA Formation Potential During the Combined Pollution Process in Guangzhou Panyu Atmospheric Composition Station	ZOU Yu, DENG Xue-jiao, LI Fei, <i>et al.</i> (2246)
Characteristic Study on the "Weekend Effect" of Atmospheric O ₃ in Northern Suburb of Nanjing	WANG Jun-xiu, AN Jun-lin, SHAO Ping, <i>et al.</i> (2256)
Atmospheric Ammonia/Ammonium-nitrogen Concentrations and Wet and Dry Deposition Rates in a Double Rice Region in Subtropical China	WANG Jie-fei, ZHU Xiao, SHEN Jian-lin, <i>et al.</i> (2264)
Species of Iron in Size-resolved Particle Emitted from Xuanwei Coal Combustion and Their Oxidative Potential	WANG Qiang-xiang, TAN Zheng-ying, ZHAO Hui, <i>et al.</i> (2273)
Dioxin Pollution and Occupational Inhalation Exposure of PCDD/Fs in Municipal Solid Waste Incinerator	DU Guo-yong, WANG Qian, ZHANG Shu-lin, <i>et al.</i> (2280)
Characteristics of Mercury Emissions from Modern Dry Processing Cement Plants in Chongqing	ZHANG Cheng, ZHANG Ya-hui, WANG Yong-min, <i>et al.</i> (2287)
Correlations of Light-duty Gasoline Vehicle Emissions Based on VMAS and CVS Measurement Systems	WANG Hong-yu, HUANG Cheng, HU Qing-yao, <i>et al.</i> (2294)
Emission Characteristics of Particulate Matter from Diesel Buses Meeting Different China Emission Standards Fueled with Biodiesel	LOU Di-ming, ZHAO Cheng-zhi, XU Ning, <i>et al.</i> (2301)
Spatial Variation and Environmental Significance of δ ¹⁸ O and δD Isotope Composition in Xijiang River	XU Qi, LI Jian-hong, SUN Ping-an, <i>et al.</i> (2308)
Comparative Study of SWAT and DNDC Applied to N Leach and Export from Subtropical Watershed	HAN Ning, CHEN Wei-liang, GAO Yang, <i>et al.</i> (2317)
Comparison of Relationship Between Conduction and Algal Bloom in Pengxi River and Modao River in Three Gorges Reservoir	JIANG Wei, ZHOU Chuan, JI Dao-bin, <i>et al.</i> (2326)
Temporal and Spatial Variation Characteristics of Nitrogen and Phosphorus in Sediment Pore Water and Overlying Water of Dianchi Caohai Lake	WANG Yi-ru, WANG Sheng-ru, JIAO Li-xin, <i>et al.</i> (2336)
Distribution and Emission Flux Estimation of Phosphorus in the Sediment and Interstitial Water of Xiangxi River	LUO Yu-hong, NIE Xiao-qian, LI Xiao-ling, <i>et al.</i> (2345)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metals in Water and Sediment from Daye Lake	ZHANG Jia-quan, TIAN Qian, XU Da-mao, <i>et al.</i> (2355)
Formation of Brominated Disinfection By-products in Low Temperature Multi-effect Distillation (LT-MED) Process for Seawater Desalination	QI Fei, SUN Ying-xue, YANG Zhe, <i>et al.</i> (2364)
Applicability Comparison and Application Study of Two Methods for Determination of the Copper Complexing Capacity of Waters	WANG Chen-ye, JIANG Kuo, XIE Wen-long, <i>et al.</i> (2373)
Performance of Applying Scale Permeable Pavements for Control of Runoff Pollution in an Area with High Groundwater Level	JIN Jian-rong, LI Tian, SHI Zhen-bao (2379)
Removal of 2,4-dichlorophenol in Underground Water by Stabilized Nano Zero-valent Iron	ZHANG Yong-xiang, CHANG Shan, LI Fei, <i>et al.</i> (2385)
Enhancement of Sulfamerazine Degradation Under H ₂ O ₂ /KI System by Ultrasound and UVA Irradiation	WEI Hong, SUN Bo-cheng, YANG Xiao-yu, <i>et al.</i> (2393)
Comparison of Phosphate Adsorption onto Zirconium-Modified Bentonites with Different Zirconium Loading Levels	JINAG Bo-hui, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i> (2400)
Removal of Nitrogen in Municipal Secondary Effluent by a Vertical Flow Constructed Wetland Associated with Iron-carbon Internal Electrolysis	ZHENG Xiao-ying, ZHU Xing, ZHOU Xiang, <i>et al.</i> (2412)
Purification Efficiency and Influencing Factors of Combined Bio-filters for Aquaculture Wastewater	ZHANG Shi-yang, ZHANG Sheng-hua, ZHANG Xiang-ling, <i>et al.</i> (2419)
Effect of Temperature on PAO Activity and Substrate Competition	ZHANG Ling, PENG Dang-cong, CHANG Die (2429)
Enrichment and Nitrogen Removal Characteristics of Marine Anaerobic Ammonium Oxidizing Bacteria	FENG Li, YU De-shuang, LI Jin, <i>et al.</i> (2435)
Ammonia Removal Rate and Microbial Community Structures in Different Biofilters for Treating Aquaculture Wastewater	ZHOU Hong-yu, HAN Mei-lin, QIU Tian-lei, <i>et al.</i> (2444)
Influence of Phosphate on Nitrogen Removal Efficiency of ANAMMOX Sludge	ZHOU Zheng, LIU Kai, WANG Fan, <i>et al.</i> (2453)
Characteristics and Mechanism of Biological Nitrogen and Phosphorus Removal Granular Sludge Under Carbon Source Stress	QIN Shi-you, CHEN Wei, MA Zhao-ni, <i>et al.</i> (2461)
Evolution of Extracellular Polymeric Substances of the Activated Sludge with Calcium Ion Addition During Set-up Period of Sequencing Batch Reactors	REN Li-fei, YANG Xin-ping, ZHANG Wen-wen (2470)
Isolation, Identification and Characterization of the Filamentous Microorganisms from Bulking Sludge	ZHANG Chong-miao, NIU Quan-ru, XU Li-mei, <i>et al.</i> (2477)
Applicability and Microbial Community Structure of Denitrification Suspended Carriers	TAN Yang, LI Ji, XU Qiao, <i>et al.</i> (2486)
Effect of Thiosulfate on the Carbon Fixation Capability of <i>Thiobacillus thioparus</i> and Its Mechanism	LI Huan, WANG Lei, WANG Ya-nan (2496)
Characteristics of Fungi Community Structure and Genetic Diversity of Forests in Guandi Mountains	QIAO Sha-sha, ZHOU Yong-na, CHAI Bao-feng, <i>et al.</i> (2502)
Source Apportionment of Soil Heavy Metals in City Residential Areas Based on the Receptor Model and Geostatistics	CHEN Xiu-duan, LU Xin-wei (2513)
Environmental Health Risk Assessment of Contaminated Soil Based on Monte Carlo Method; A Case of PAHs	TONG Rui-peng, YANG Xiao-yi (2522)
Influencing Mechanism of Eh, pH and Iron on the Release of Arsenic in Paddy Soil	ZHONG Song-xiong, YIN Guang-cai, CHEN Zhi-liang, <i>et al.</i> (2530)
Correlations Between Different Extractable Cadmium Levels in Typical Soils and Cadmium Accumulation in Rice	CHEN Qi, DENG Xiao, CHEN Shan, <i>et al.</i> (2538)
Remediating Effects of a Combined Amendment for Paddy Soil Polluted with Cd for Spring and Autumn Rice	CHEN Li-wei, YANG Wen-tao, GU Jiao-feng, <i>et al.</i> (2546)
Effects of Two Amendments on Remediating Garden Soil Complexly Contaminated with Pb, Cd and As	TIAN Tao, LEI Ming, ZHOU Hang, <i>et al.</i> (2553)
Sorption of Phenanthrene to Soybean and Wheat Roots and the Bioavailability of Sorbed Phenanthrene	WANG Hong-ju, LI Qian-qian, SHEN Yu, <i>et al.</i> (2561)
Effects of Dissolved Organic Matter Fractions Extracted from Humus Soil on Sorption of Benzotriazole in Brown Soil and Black Soil	YANG Ning-wei, BI Er-ping (2568)
Effects of Topography, Tree Species and Soil Properties on Soil Enzyme Activity in Karst Regions	LUO Pan, CHEN Hao, XIAO Kong-cao, <i>et al.</i> (2577)
Effects of Long-term Organic Amendments on Soil N ₂ O Emissions from Winter Wheat-maize Cropping Systems in the Guanzhong Plain	HAO Yao-xu, LIU Ji-xuan, YUAN Meng-xuan, <i>et al.</i> (2586)
Exposure Route of Dioxin-like Polychlorinated Biphenyls in Hair Based on Passive Sampling	YUAN Hao-dong, BAI Yao, LI Qiu-xu, <i>et al.</i> (2594)
Accumulation Characteristics and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Wild Fish Species from Diaojiang River, Guangxi	WANG Jun-neng, MA Peng-cheng, ZHANG Li-juan, <i>et al.</i> (2600)
Effect of Activated Carbon Addition on the Anaerobic Fermentation of Corn Straw in Mesophilic and Thermophilic Conditions	GAN Rong, GE Ming-min, LIU Yong-di, <i>et al.</i> (2607)
Volatile Organic Compounds (VOCs) Source Profiles of Industrial Processing and Solvent Use Emissions; A Review	WANG Hong-li, YANG Zhao-xun, JING Sheng-ao (2617)