

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第33卷 第12期

Vol.33 No.12

2012

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

特别策划:再生水灌溉利用生态风险研究专题

序 陈卫平 (4069)
再生水灌溉利用的生态风险研究进展 陈卫平, 张炜铃, 潘能, 焦文涛 (4070)
绿地再生水灌溉土壤微生物量碳及酶活性效应研究 潘能, 侯振安, 陈卫平, 焦文涛, 彭驰, 刘文 (4081)
绿地再生水灌溉土壤盐度累积及风险分析 潘能, 陈卫平, 焦文涛, 赵忠明, 侯振安 (4088)
再生水灌溉对土壤性质及重金属垂直分布的影响 赵忠明, 陈卫平, 焦文涛, 王美娥 (4094)
模型模拟再生水灌溉对土壤水盐运动的影响 吕斯丹, 陈卫平, 王美娥 (4100)
模型模拟土壤性质和植被种类对再生水灌溉水盐运移的影响 吕斯丹, 陈卫平, 王美娥 (4108)
再生水灌溉农田土壤镉累积规律模拟研究 赵忠明, 陈卫平, 焦文涛, 王美娥 (4115)
再生水灌溉土壤人工合成麝香累积模型模拟 王美娥, 陈卫平, 焦文涛 (4121)
城市绿化草坪再生水灌溉对地下水水质影响研究 王巧环, 陈卫平, 王效科, 任玉芬, 张烨 (4127)
北京市再生水的公众认知度评估 张炜铃, 陈卫平, 焦文涛 (4133)

研究报告

北京地区臭氧时空分布特征的飞机探测研究 陈鹏飞, 张蕾, 权建农, 高扬, 黄梦宇 (4141)
世博会期间上海市大气挥发性有机物排放强度及污染来源研究 王红丽, 陈长虹, 黄海英, 王倩, 陈宜然, 黄成, 李莉, 张钢锋, 陈明华, 楼晟荣, 乔利平 (4151)
贡嘎山本底站大气中 VOCs 的研究 张军科, 王跃思, 吴方堃, 孙杰 (4159)
区域大气环境风险源识别与危险性评估 张晓春, 陈卫平, 马春, 詹水芬, 焦文涛 (4167)
稻草烟尘中正构烷烃和正构脂肪酸的碳同位素 刘刚, 孙丽娜, 李久海, 徐慧 (4173)
汽油轿车 NEDC 循环超细颗粒物排放特性 胡志远, 李金, 谭丕强, 楼狄明 (4181)
城市道路绿化带不同植物叶片附尘对大气污染的磁学响应 隆茜, 周菊珍, 孟颖, 达良俊 (4188)
闽江口养殖塘水-大气界面温室气体通量日进程特征 杨平, 仝川, 何清华, 黄佳芳 (4194)
模拟增温对冬小麦-大豆轮作农田土壤呼吸的影响 刘艳, 陈书涛, 胡正华, 任景全, 沈小帅 (4205)
广西大石围天坑中多环芳烃的大气传输与分异 孔祥胜, 祁士华, 孙莺, 黄保健 (4212)
松花江流域冰封期水体中多环芳烃的污染特征研究 马万里, 刘丽艳, 齐虹, 白杨, 刘吉敏, 陈忠林, 李一凡 (4220)
温州城市河流中多环芳烃的污染特征及其来源 周婕成, 陈振楼, 毕春娟, 吕金刚, 许世远, 潘琪 (4226)
温州城市河流河岸带土壤中 PAHs 的污染特征与来源 周婕成, 毕春娟, 陈振楼, 王璐, 许世远, 潘琪 (4237)
辽河水系沉积物中 PAHs 的分布特征及风险评估 武江越, 刘征涛, 周俊丽, 高富 (4244)
某炼油厂退役场地土壤与浅层地下水酚类污染特征研究 裴芳, 罗泽娇, 彭进进, 祁士华 (4251)
某大型焦化企业污染场地中多环芳烃空间分布的分异性特征 刘庚, 郭观林, 南锋, 魏文侠, 李发生, 毕如田 (4256)
太原市市灌区有机氯农药垂直分布特征及源解析 廖小平, 张彩香, 赵旭, 向青清, 李佳乐 (4263)
上海市崇明岛农田土壤中多环芳烃分布和生态风险评价 吕金刚, 毕春娟, 陈振楼, 周婕成, 韩景超 (4270)
近 50 年来深圳湾红树林湿地 Hg、Cu 累积及其生态危害评价 李瑞利, 柴民伟, 邱国玉, 贺蓓 (4276)
北运河源头区沙河水库沉积物重金属污染特征研究 张伟, 张洪, 单保庆 (4284)
太湖表层沉积物重金属赋存形态分析及污染特征 秦延文, 张雷, 郑丙辉, 曹伟 (4291)
典型季风型温冰川消融期融水化学日变化特征 朱国锋, 蒲焘, 何元庆, 王培震, 孔建龙, 张宁宁, 辛惠娟 (4300)
螺-草水质净化系统氮素环境归趋的实验研究 周露洪, 谷孝鸿, 曾庆飞, 毛志刚, 高华梅, 孙明波 (4307)
固定化果胶酶抑制铜绿微囊藻生长研究 沈清清, 彭谦, 赖泳红, 纪开燕, 韩秀林 (4316)
采用膜污染指数评估天然有机物在低压超滤膜中的污染行为 肖萍, 肖峰, 赵锦辉, 秦潼, 王东升, 冯金荣, 许光 (4322)
水体中甲基汞光化学降解特征研究 孙荣国, 毛雯, 马明, 张成, 王定勇 (4329)
土霉素在乙酸水溶液中的臭氧氧化降解研究 李时银, 李小荣, 朱怡苹, 朱江鹏, 王国祥 (4335)
酰胺咪唑光降解效能与机制及其影响因素研究 陈超, 赵倩, 封莉, 张立秋 (4340)
利用 FeS 去除水中硝基苯的试验研究 王夏琳, 李睿华 (4346)
地下污水管线泄漏原位自动监测模拟实验研究 郭磊, 贾永刚, 付腾飞, 刘晓磊, 赵战坤 (4352)
表面活性剂改性沸石对水中酚类化合物吸附性能研究 谢杰, 王哲, 吴德意, 李春杰 (4361)
抗生素类制药废水厌氧消化产物急性毒性的检测 季军远, 邢雅娟, 郑平 (4367)
废砖块作为人工湿地填料的除磷能力研究 王振, 刘超翔, 李鹏宇, 董健, 刘琳, 朱葛夫 (4373)
基于生物沸石复合滤料的间歇式脱氨水处理 庆承松, 鲍韬, 陈天虎, 陈冬, 谢晶晶 (4380)
硝酸盐对厌氧生物膜和颗粒污泥的同时产甲烷反硝化性能影响研究 钟晨宇, 叶杰旭, 李若愚, 陈胜, 孙德智 (4387)
水平电场作用下活性污泥的脱水研究 季雪元, 王毅力, 冯晶 (4393)
多重环境因子对氟胺磺隆在土壤中降解的影响 宋宁慧, 单正军, 石利利, 郭敏, 许静, 孔德洋 (4400)
碱后处理对互花米草沼渣理化特性的影响研究 陈广银, 郑正, 常志州, 王海芹, 叶小梅 (4406)
含砷废渣高温烧结过程砷的矿物相结构变化与环境释放行为 王兴润, 农泽喜, 王琪 (4412)
国家大气污染物排放标准体系研究 江梅, 张国宁, 张明慧, 邹兰, 魏玉霞, 任春 (4417)
环境基准向环境标准转化的机制探讨 毕岑岑, 王铁宇, 吕永龙 (4422)
对“有毒重金属”实施 2 种总量控制监管方式的利害分析 傅国伟 (4428)
《环境科学》第 33 卷(2012 年)总目录 (4434)
《环境科学》征订启事(4099) 《环境科学》征稿简则(4166) 信息(4180, 4219, 4225, 4275) 专辑征稿通知(4172)

多重环境因子对氟胺磺隆在土壤中降解的影响

宋宁慧, 单正军, 石利利, 郭敏, 许静, 孔德洋

(环境保护部南京环境科学研究所, 南京 210042)

摘要: 氟胺磺隆作为普遍使用的一种磺酰脲类除草剂, 已经对土壤和作物造成了危害, 其环境行为受很多物理化学或生物因素的影响. 为探明不同环境因素对氟胺磺隆在土壤中降解程度的影响, 通过实验室内模拟培养的方法, 研究了土壤微生物、不同土壤类型、水溶性有机物(dissolved organic matter, DOM)、温度、土壤含水量等因素对氟胺磺隆在土壤中降解的影响. 结果表明, 各种环境因子: 温度、湿度、土壤微生物和土壤类型等均在不同程度上影响了氟胺磺隆的土壤降解速率. 土壤微生物量、土壤有机质和 DOM 的增加均有利于氟胺磺隆在土壤中的降解, 并且土壤 pH 的降低, 也会促进氟胺磺隆在土壤中的降解. 其中, 土壤微生物是影响氟胺磺隆土壤降解的主要因素. 该研究结果将为一些生物和物理化学因子调节氟胺磺隆在土壤中消散提供初步数据.

关键词: 氟胺磺隆; 降解; 土壤; 除草剂; DOM

中图分类号: X53 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2012)12-4400-06

Effects of Multiple Environmental Factors on Triflursulfuron-methyl Degradation in Soils

SONG Ning-hui, SHAN Zheng-jun, SHI Li-li, GUO Min, XU Jing, KONG De-yang

(Nanjing Institute of Environmental Science, Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China, Nanjing 210042, China)

Abstract: Triflursulfuron-methyl, a widely used sulfonylurea herbicide, has done harm to the soil and crop. Its environment fate was affected by many factors such as physicochemical or biological factors. In order to understand the effects of different environmental factors on the degradation of triflursulfuron-methyl in soil, simulated indoor incubation experiments were carried out to explore the effects of soil microbe, soil type, dissolved organic matter (DOM), temperature, and soil moisture on triflursulfuron-methyl degradation in soils. The results showed that different environmental factors such as temperature, soil moisture, soil microorganisms and soil type influenced triflursulfuron-methyl degradation in different degrees. The increased soil microbial biomass, soil organic matters and DOM were beneficial to the soil degradation of triflursulfuron-methyl, meanwhile, the decrease in soil pH could accelerate its degradation in soils. The results showed that soil microorganisms were the main factor effecting the degradation of triflursulfuron-methyl in soil. Our results provided initial data for the conclusion that a set of biological and physicochemical factors coordinately regulate the decay of triflursulfuron-methyl in soils.

Key words: triflursulfuron-methyl; degradation; soil; herbicide; dissolved organic matter (DOM)

磺酰脲类除草剂是目前世界上最大的一类除草剂. 近 20 多年来已成为除草剂新品种开发最活跃、最有成效的领域, 近年开发的新农药中有 30% 是该类除草剂^[1]. 磺酰脲类除草剂是高效、低毒、广谱类农药, 由芳环、脲桥和杂环这 3 部分组成, 杂环以二嗪和三嗪类为主, 基本呈弱酸性, pK_a 值为 3.3 ~ 5.2^[2,3]. 由于该类除草剂具有用量少、活性高、毒性低等优点, 广泛应用于水稻、油菜、小麦、大麦和玉米等农作物的田间除草. 但是, 随着磺酰脲类除草剂的开发和广泛应用, 由残留物引起的环境问题尤其是对后茬作物的危害引起了人们的重视^[4]. 因此, 综合研究除草剂在土壤中的降解行为是非常重要的.

近年来农业上污泥、作物秸秆、草木灰等作为土壤有机肥由于其廉价和养分的可循环利用性常用

来改善土壤的有机碳含量^[5]. 然而在农田土壤中添加这些有机物的同时, 大量的水溶性有机物也被引入. 水溶性有机物(dissolved organic matter, DOM)是能溶解于水的有机化合物的统称, 是有机物质、特别是有机肥料中最为活跃的部分^[6]. 水溶性有机物可以与有机污染物相互作用, 这必将成为影响农药在土壤中降解的重要因素. 曾有研究表明微生物降解是磺酰脲类除草剂降解的重要途径之一^[7,8], 其降解行为除受土壤微生物影响外, 还受很多因素的影响, 如土壤温度和相对湿度、土壤类型^[9]以及在土壤中施用的肥料^[10,11]等.

收稿日期: 2012-02-15; 修订日期: 2012-03-25

基金项目: 国家自然科学基金项目(41101307)

作者简介: 宋宁慧(1981~), 女, 博士, 助理研究员, 主要研究方向为农药残留与环境毒理, E-mail: snh@nies.org

目前,一些学者已对磺酰脲类除草剂在不同土壤中的降解^[12],土壤微生物^[13]、pH 值^[14]和温度^[15,16]对其降解的影响进行了初步探讨,但关于不同环境因子对磺酰脲类除草剂在土壤中降解影响的系统性研究还鲜见报道,因此本试验选取氟胺磺隆[化学名称:3-(4-二甲氨基-6-(2,2,2-三氟乙氧基)-1,3,5-三嗪-2-氨基甲酰氨基黄酰基)间甲基苯甲酸甲酯]为研究对象,通过室内模拟培养试验研究多种因素(包括微生物、温度、湿度、和土壤有机质)对氟胺磺隆在土壤中降解的综合性影响,旨在进一步理解这些影响因子如何调节氟胺磺隆在土壤中的降解行为,为氟胺磺隆的合理使用及环境行为评价提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料与仪器

表 1 供试土壤的基本理化性质

Table 1 Major property of the tested soils used in this study

土壤标识	土壤类型	来源	pH	有机质 /g·kg ⁻¹	阳离子代换量 /cmol·kg ⁻¹	土壤结构		
						黏粒/%	粉粒/%	砂粒/%
S1	红壤	江西鹰潭	4.60	3.70	15.2	16.5	67.7	15.7
S2	水稻土	江苏常熟	7.18	29.0	22.7	19.7	76.2	4.18
S3	黑土	黑龙江海伦	6.59	52.1	32.4	15.8	72.9	11.3
S4	潮土	陕西西安	8.26	8.26	10.9	8.76	73.8	17.5

1.2 水溶性有机物的提取

污泥磨碎风干,过 2 mm 筛备用. 水稻秸秆于 105℃ 杀青 20 min,70℃ 烘干 2 h,磨碎,过 2 mm 筛备用. 两种不同来源的水溶性有机物提取时原物质与超纯水的配比 1:10(质量分数). 在天平上分别称取一定量的污泥和水稻秸秆按配比加入超纯水. 在 20℃ 下,以 200 r·min⁻¹ 转速振摇 16 h,然后在 4℃ 以 6 000 r·min⁻¹ 转速离心 15 min,取上清液经 0.45 μm 滤膜抽滤得到净化的 DOM 溶液. 所得溶液在 4℃ 保存备用^[9](不得超过 2 周). 所得可溶性有机物溶液经 TOC 仪检测确定其总有机碳含量. 测得来自污泥和水稻的 DOM 有机碳含量(以 DOC 计)分别为 507.9 mg·L⁻¹ 和 4 274 mg·L⁻¹.

1.3 土壤中氟胺磺隆的测定

称取 20 g 土壤于锥形瓶中,并加 10 mL 水润湿,将待测样品转移到离心管中,加入 40 mL 丙酮,用磷酸调节水相 pH 至 3 左右,置于恒温振荡器中以 200 r·min⁻¹ 的速率振荡提取 40 min,高速离心分离、过滤后,土壤再用 40 mL 丙酮(磷酸调节 pH 至 3 左右)振荡提取两次,合并提取液. 提取液置于旋转蒸发仪上将有机溶剂蒸发完全后,水相用 20 mL

氟胺磺隆,纯度为 95.0%,由江苏省农用激素工程技术研究中心有限公司提供. 4 种来源的土壤分别采自江西赣州、江苏太湖、东北黑龙江河和陕西西安的 0~20 cm 表层土壤,4 种土壤风干过 2 mm 筛后用于分析土壤性质和降解试验. 供试土壤基本性质如表 1 所示. 污泥采自无锡芦村污水处理厂,为二级处理脱水干化污泥并经过无害化处理. 水稻秸秆采自南京农业大学试验田. 丙酮、二氯甲烷、无水硫酸钠、氯化钠等为分析纯(国药集团上海试剂厂);乙腈,色谱纯(德国 Merck 公司).

Waters2695 高效液相色谱仪, PAD 检测器(WATERS,USA); 智能人工气候箱(RXZ-300B,宁波江南仪器厂,CN); 振荡器(EXCELLA E24R,NBS,USA); 冷冻高速离心机(CR-22GII,HITACHI,JP); 旋转蒸发仪(N-1001,EYELA,JP); 氮吹仪(MG-2200,EYELA,JP).

二氯甲烷萃取 3 次,合并有机相,有机相旋转蒸发至近干,N₂ 吹干后,甲醇定容,过 0.45 μm 滤膜,待高效液相色谱仪测定. HPLC 分析条件:Waters 2695 HPLC 仪,2996PAD 检测器; 色谱柱:ACE-129-2546,4.6 mm×250 mm; 温度条件:柱温 25℃; 流动相:乙腈/水=60/40(pH 调节至 3); 流速:1.0 mL·min⁻¹; 进样量:10 μL. 上述条件下,氟胺磺隆的保留时间约为 7.6 min. 将氟胺磺隆以 0.05、1.0、10.0 mg·kg⁻¹ 浓度分别添加到 20.0 g 土壤中,用上述分析过程进行回收率试验,土壤中氟胺磺隆添加浓度在 0.05~10.0 mg·kg⁻¹ 浓度范围内,回收率测定结果为 77.4%~85.0%,相对标准偏差为 1.2%~6.8%. 在上述色谱条件下,氟胺磺隆的仪器最小检出量为 2.5×10⁻¹⁰g(信噪比 3:1),土壤中最低检测浓度为 0.05 mg·kg⁻¹.

1.4 氟胺磺隆土壤降解试验

取上述 4 种已风干过 2 mm 筛的新鲜土壤,调节土壤含水量为最大田间持水量的 60%,在恒温条件下适应性培养 2 周.

1.4.1 土壤灭菌处理和 H₂O₂ 处理

用 30% H₂O₂ 去除土壤有机质^[17];于常州水稻

土(S2)中加入 30% H_2O_2 搅拌,然后用去离子水冲洗土壤去 H_2O_2 ,此过程重复多次,直到水溶液电导率低于 $50 \mu S$. 灭菌土壤的处理:采用高压灭菌锅对水稻土进行湿热灭菌处理. 取 20 g 上述经预培养的灭菌、 H_2O_2 去除土壤有机质的土壤和未进行上述 2 种处理的水稻土(S2)放入 150 mL 锥形瓶中,按 $7 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 土的量加入氟胺磺隆,混匀,调节土壤持水量为土壤饱和持水量的 60%,用棉塞将瓶口塞紧,然后将所有土样放入 $(25 \pm 1)^\circ\text{C}$ 恒温培养箱内黑暗培养.

1.4.2 土壤添加 DOM 对氟胺磺隆降解的影响

取 20 g 上述经预培养的常州水稻土(S2)样品放入 150 mL 锥形瓶中,并且分别加入 2 种来源的 DOM(SL、ST)按 $7 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 土的量加入氟胺磺隆,同时设置 DOM 的浓度为 20、40、60、120 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,经过处理的土壤混匀后,调节土壤持水量为土壤饱和持水量的 60%,用棉塞将瓶口塞紧,然后将所有土样放入 $(25 \pm 1)^\circ\text{C}$ 恒温培养箱内黑暗培养.

1.4.3 温度对氟胺磺隆降解的影响

取 20 g 上述经预培养的常州水稻土(S2)放入 150 mL 锥形瓶中,按 $7 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 土的量加入氟胺磺隆,混匀,调节土壤持水量为土壤饱和持水量的 60%,用棉塞将瓶口塞紧,然后将所有土样放入 (15 ± 1) 、 (25 ± 1) 和 $(35 \pm 1)^\circ\text{C}$ 恒温培养箱内黑暗培养.

1.4.4 湿度对氟胺磺隆降解的影响

取 20 g 上述经预培养的常州水稻土(S2)放入 150 mL 锥形瓶中,按 $7 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 土的量加入氟胺磺隆,混匀,调节土壤含水量,分别使土壤含水量在饱和持水量的 20%、40%、60%、80%、150%. 然后将所有土样放入 $(25 \pm 1)^\circ\text{C}$ 恒温培养箱内黑暗培养.

1.4.5 土壤类型对氟胺磺隆降解的影响

取 20 g 上述经预培养的 4 种土壤(S1、S2、S3、S4)样品放入 150 mL 锥形瓶中,按 $7 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 土的量加入氟胺磺隆,混匀,调节土壤持水量为土壤饱和持水量的 60%,用棉塞将瓶口塞紧,然后将所有土样放入 $(25 \pm 1)^\circ\text{C}$ 恒温培养箱内黑暗培养.

2 结果与讨论

2.1 土壤微生物和有机质对氟胺磺隆在土壤中降解的影响

由图 1 可见,与对照相比,氟胺磺隆在经 H_2O_2 和灭菌处理的土壤中降解速率相对较慢. 当培养周

期为 16 d 时,氟胺磺隆在对照土壤中的残留量为 $0.714 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,然而在经 H_2O_2 和灭菌处理的土壤中的残留量分别为 $2.61 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $1.29 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$. 氟胺磺隆在对照土壤中的降解半衰期为 4.83 d,在经 H_2O_2 和灭菌处理的土壤中的半衰期分别为 11.4 d 和 6.50 d(表 2). 结果表明,土壤微生物和有机质显著影响了氟胺磺隆在土壤中的降解. 氟胺磺隆在土壤中的降解主要由土壤微生物引起,微生物的存在加速了氟胺磺隆的降解,而由水解和化学降解等非生物降解作用所引起的降解相对较小. 由于微生物的易突变性和抗逆性强,它们可以在恶劣的环境中生存下来,对有害化学物质进行分解代谢^[18]. 据报道,参与降解磺酰脲类除草剂的微生物有真菌、细菌与放线菌. 目前已经分离出的降解氟胺磺隆的土壤微生物为浅灰链霉菌(*Streptomyces griseolus*)^[19].

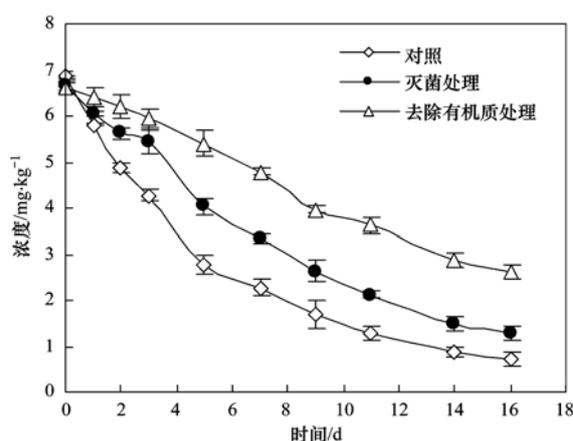


图 1 土壤微生物和有机质对氟胺磺隆在土壤中降解的影响
Fig. 1 Effect of microorganism and SOM on the degradation of triflursulfuron-methyl in soil

表 2 多种因素处理对氟胺磺隆在土壤中的降解动力学参数
Table 2 Degradation kinetic parameters of triflursulfuron-methyl in soil subjected to treatments

土壤处理	$c_t = c_0 e^{-kt}$	R^2	k	半衰期/d
对照	$c_t = 6.41224e^{-0.1434t}$	0.9933	0.1434	4.83
灭菌处理	$c_t = 6.9179e^{-0.1067t}$	0.9962	0.1067	6.50
土壤微生物	$c_t = 1.6019e^{-0.0627t}$	0.9423	0.0627	11.1
去除有机质处理	$c_t = 6.9721e^{-0.0607t}$	0.9900	0.0607	11.4
DOM-ST 添加	$c_t = 5.7699e^{-0.1618t}$	0.9764	0.1618	4.28
DOM-SL 添加	$c_t = 5.9968e^{-0.1550t}$	0.9810	0.1550	4.47

1) c_t : t 时土壤中农药残留含量; c_0 : 土壤中农药的初始含量; k : 降解速率常数; R^2 : 相关系数, 下同

2.2 DOM 对氟胺磺隆在土壤中降解的影响

土壤中添加 $20 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 来源于污泥和秸秆的 2 种 DOM(以 DOC 计)后,氟胺磺隆在土壤中的降解速

率明显加快[图 2(a)]. 2 种 DOM 对氟胺磺隆在土壤中的降解有相似的作用. 氟胺磺隆在对照组, DOM-ST 处理组和 DOM-SL 处理组中的降解半衰期分别为 4.83、4.28、4.47 d(表 2). 为了进一步研究 DOM 对氟胺磺隆在土壤中降解的影响, 设置了不同 DOM 的浓度处理(0、20、40、60、120 mg·kg⁻¹)对氟胺磺隆

在土壤中降解的影响. 氟胺磺隆在土壤中的降解半衰期随着 DOM-ST 加入量的增加而加快[图 2(b), 表 3]. 研究表明 DOM 可以加速氟胺磺隆在土壤中的消解. 由于 DOM 含有的有机物质部分可以调节微生物量^[20,21], 所以在土壤中添加 DOM 可以加快氟胺磺隆在土壤中的消散.

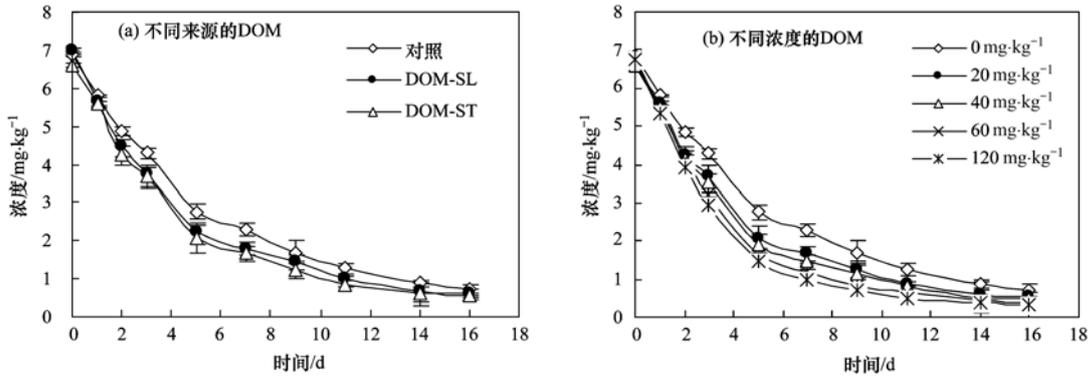


图 2 DOM 对氟胺磺隆在土壤中降解的影响

Fig. 2 Effect of DOM on the degradation of triflursulfuron-methyl in soil

表 3 土壤中添加不同浓度 DOM 后氟胺磺隆的降解动力学参数

Table 3 Degradation kinetic parameters of triflursulfuron-methyl in soil with varied amounts of DOM-ST at 25°C ± 1°C and 60% soil moisture

DOM 的含量 /mg·kg ⁻¹	$c_t = c_0 e^{-kt}$	R^2	k	半衰期/d
0	$c_t = 6.41224e^{-0.1434t}$	0.9933	0.1434	4.83
20	$c_t = 5.7699e^{-0.1618t}$	0.9764	0.1618	4.28
40	$c_t = 5.646e^{-0.1695t}$	0.9734	0.1695	4.09
60	$c_t = 5.5743e^{-0.1888t}$	0.9649	0.1888	3.67
120	$c_t = 5.3199e^{-0.1976t}$	0.9585	0.1976	3.51

2.3 温度对氟胺磺隆在土壤中降解的影响

在不同温度条件下, 氟胺磺隆在土壤中降解的动力学参数见表 4. 从中可见, 随着培养温度的升高, 氟胺磺隆在土壤中的降解速率也随之增加. 在 15、25 和 35°C 条件下氟胺磺隆在土壤中降解的半衰期分别为 6.09、4.83 和 3.67 d(图 3). 在 15 ~ 35°C 之间, 氟胺磺隆的降解速率随温度的升高而明显加快, 在 16 d 内的降解率由 82.8% 增加到 95.5%. 研究表明, 温度是影响微生物生长和生物反应的主要因子之一^[22], 适宜的降解温度(25 ~ 35°C)与微生物活动最旺盛的温度相一致, 生长

表 4 不同温度条件下氟胺磺隆在土壤中的降解动力学参数

Table 4 Degradation kinetic parameters of triflursulfuron-methyl in soil at different temperature

培养温度/°C	$c_t = c_0 e^{-kt}$	R^2	k	半衰期/d
15	$c_t = 6.2342e^{-0.1139t}$	0.9851	0.1139	6.09
25	$c_t = 6.4124e^{-0.1434t}$	0.9933	0.1434	4.83
35	$c_t = 6.6352e^{-0.189t}$	0.9982	0.1890	3.67

在适宜温度时, 微生物活动增强, 酶活性提高, 也促使氟胺磺隆的降解速率加快.

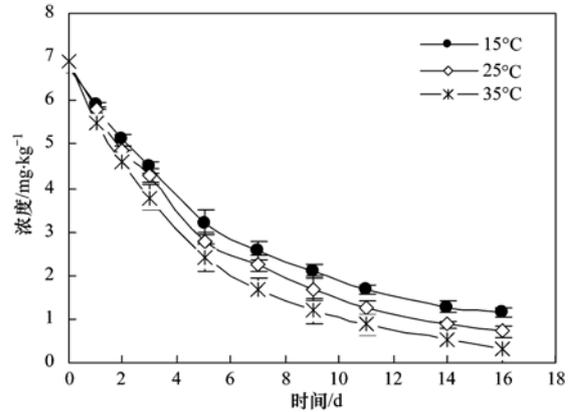


图 3 温度对氟胺磺隆在土壤中降解的影响

Fig. 3 Effect of temperature on the degradation of triflursulfuron-methyl in soil

2.4 湿度对氟胺磺隆在土壤中降解的影响

氟胺磺隆在土壤中的降解速率受土壤含水量的影响, 当土壤饱和持水量为 80% 时, 氟胺磺隆在土壤中的降解最快. 而当土壤饱和持水量为 20% 时, 氟胺磺隆在土壤中的降解最慢. 结果表明土壤饱和和持水量较低时限制了氟胺磺隆在土壤中的降解(图 4 和表 5), 然而当含水量增大到一定程度(150%)时, 相当于土壤积水厌气条件下, 氟胺磺隆在土壤中的降解速率也受到一定限制. 结果表明湿度也是影响微生物生长的主要因子之一^[22], Rosenbom 等^[23]

也曾报道降雨量对磺酰脲类除草剂的影响也很重要,氯磺隆在4个区域其半衰期分别为149、70、59和51 d,而这4个区域降雨量分别为250、508、700和1224 mm.

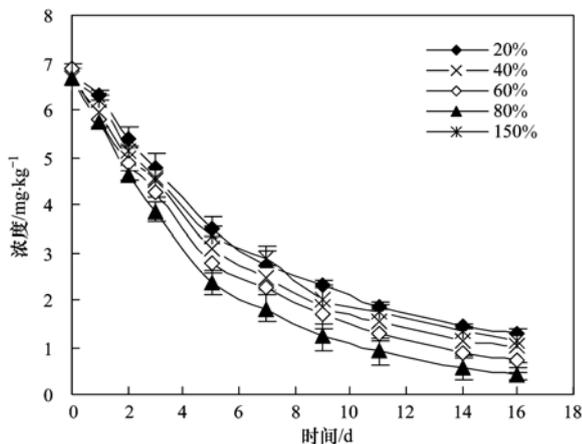


图4 湿度对氟胺磺隆在土壤中降解的影响

Fig. 4 Effect of moisture on the degradation of triflursulfuron-methyl in soil

表5 不同湿度条件下氟胺磺隆在土壤中的降解动力学参数

Table 5 Degradation kinetic parameters of triflursulfuron-methyl in soil at 25°C ± 1°C with different moisture

湿度/%	$c_t = c_0 e^{-kt}$	R^2	k	半衰期/d
20	$c_t = 6.5025e^{-0.1082t}$	0.9858	0.1082	6.41
40	$c_t = 6.2777e^{-0.1234t}$	0.9856	0.1234	5.62
60	$c_t = 6.4124e^{-0.1434t}$	0.9933	0.1434	4.83
80	$c_t = 6.4557e^{-0.1783t}$	0.9968	0.1783	3.89
150	$c_t = 6.4258e^{-0.1156t}$	0.9892	0.1156	6.00

2.5 不同类型土壤对氟胺磺隆土壤降解的影响

本研究继续研究了氟胺磺隆在4种不同类型的土壤中的降解情况(图5). 氟胺磺隆在江西红壤(S1)、太湖水稻土(S2)、东北黑土(S3)和陕西潮土(S4)4种土壤中的降解半衰期分别为:4.89、4.86、4.25和7.04 d(表6). 结果表明,氟胺磺隆在东北黑土中降解最快,其次为太湖水稻土和江西红壤. 原因是东北黑土和太湖水稻土中含有较高的土壤有机质,而江西红壤的pH值较低. 说明土壤有机质和土壤pH是影响氟胺磺隆在土壤中降解的主要因素. 而高的有机质含量,低的pH有利于氟胺磺隆的降解. pH值是影响微生物降解磺酰脲类除草剂的主要因素^[24,25]. 一方面,pH值可以直接影响微生物群落种类及微生物数量等,从而对微生物的降解能力产生影响;另一方面,不同的pH值可以影响磺酰脲类除草剂的存在形式^[26]. 在酸性条件下,主要以分子型存在,这种形态在土壤中比较容易降解,

但在碱性条件下,则以阴离子型存在,水溶性较强,这种形态不易降解,因此磺酰脲类除草剂在酸性条件下比在中性或碱性条件下水解的速率要快.

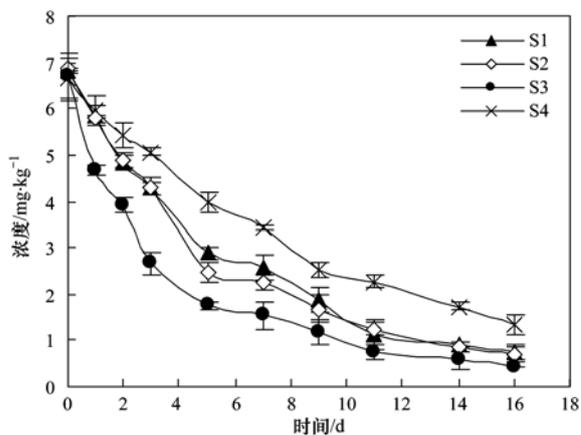


图5 氟胺磺隆在不同类型土壤中的降解

Fig. 5 Effect of soil type on the degradation of triflursulfuron-methyl

表6 氟胺磺隆在4种不同类型土壤中的降解动力学参数

Table 6 Degradation kinetic parameters of triflursulfuron-methyl in the four types of soils at 25°C ± 1°C and 60% moisture

土壤类型	$c_t = c_0 e^{-kt}$	R^2	k	半衰期/d
S1	$c_t = 6.5026e^{-0.1417t}$	0.9887	0.1417	4.89
S2	$c_t = 6.3072e^{-0.1426t}$	0.9862	0.1426	4.86
S3	$c_t = 5.131e^{-0.1632t}$	0.9711	0.1632	4.25
S4	$c_t = 6.6225e^{-0.0984t}$	0.9959	0.0984	7.04

3 结论

(1) 氟胺磺隆在经H₂O₂和灭菌处理的土壤中的降解速率与对照相比显著减慢,土壤微生物和土壤有机质是影响氟胺磺隆土壤降解的主要因素,土壤微生物量和土壤有机质的增加均有利于氟胺磺隆在土壤中的降解.

(2) 添加DOM后,氟胺磺隆在土壤中的降解速率明显加快. 2种DOM对氟胺磺隆在土壤中的降解有相似的作用,同时随着DOM加入量的增高,降解速率加快.

(3) 温度和湿度对氟胺磺隆在土壤中的降解速率有一定影响,在降解温度(25~35°C),土壤饱和持水量为80%时,氟胺磺隆在土壤中的降解最快.

(4) 土壤pH对氟胺磺隆在土壤中的降解影响也很显著,氟胺磺隆在酸性条件下呈现分子形态,更容易发生降解.

参考文献:

- [1] She Y X, Cao W Q, Shi X M, et al. Class-specific molecularly imprinted polymers for the selective extraction and determination of sulfonamide herbicides in maize samples by high-performance

- liquid chromatography-tandem mass spectrometry[J]. *Journal of Chromatography B*, 2010, **878**(23): 2047-2053.
- [2] 王金芳, 张俊燕, 江树人, 等. 8 种磺酰胺类除草剂在腐植酸上的吸附作用与机理初探[J]. *农业环境科学学报*, 2007, **26**(5): 1650-1653.
- [3] Caselli M. Light-induced degradation of metsulfuron-methyl in water[J]. *Chemosphere*, 2005, **59**(8): 1137-1143.
- [4] Boschini G, D'Agostina A, Antonioni C, *et al.* Hydrolytic degradation of azimsulfuron, a sulfonylurea herbicide [J]. *Chemosphere*, 2007, **68**(7): 1312-1317.
- [5] Sigua G C, Adjei M, Rechcigl J. Cumulative and residual effects of repeated sewage sludge applications: forage productivity and soil quality implications in south Florida, USA [J]. *Environmental Science Pollution Research*, 2005, **12**(2): 80-88.
- [6] Pusino A, Braschi I, Petretto S, *et al.* Photodegradation of herbicide triasulfuron [J]. *Pesticide Science*, 1999, **55**(4): 479-481.
- [7] Walker A, Jurado-Exposito M, Bending G D, *et al.* Spatial variability in the degradation rate of isoproturon in soil [J]. *Environmental Pollution*, 2001, **111**(3): 407-415.
- [8] Shabir G, Afzal M, Anwar F, *et al.* Biodegradation of kerosene in soil by a mixed bacterial culture under different nutrient conditions [J]. *International Biodeterioration and Biodegradation*, 2008, **61**(2): 161-166.
- [9] Andersen S M, Hertz P B, Holst T, *et al.* Mineralisation studies of ¹⁴C-labelled metsulfuron-methyl, tribenuron-methyl, chlorsulfuron and thifensulfuron-methyl in one Danish soil and groundwater sediment profile [J]. *Chemosphere*, 2001, **45**(6-7): 775-782.
- [10] Zhou L X, Wong J W C. Microbial decomposition of dissolved organic matter and its control during a sorption experiment [J]. *Journal of Environmental Quality*, 2000, **29**(9): 1852-1856.
- [11] 张健, 关连珠, 颜丽. 鸡粪与猪粪所含土霉素在土壤中的降解的动态变化及原因分析 [J]. *环境科学*, 2012, **33**(1): 323-328.
- [12] 李新安, 赵华, 李广领, 等. 噻吩磺隆在不同类型土壤中的降解行为 [J]. *农药*, 2012, **51**(1): 55-57.
- [13] Huang X, He J, Sun J Q, *et al.* Isolation and characterization of a metsulfuron-methyl degrading bacterium *Methylopila* sp. S113 [J]. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 2007, **60**(3): 152-158.
- [14] Anderson J J, Dulka J J. Environmental fate of sulfometuron-methyl in aerobic soils [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 1985, **33**(4): 596-602.
- [15] 姚东瑞, 陈杰, 宋小玲, 等. 氯磺隆在三种土壤中的降解 [J]. *江苏农业学报*, 1998, **14**(4): 215-219.
- [16] Fenoll J, Hellin P, Flores P, *et al.* Photocatalytic degradation of five sulfonylurea herbicides in aqueous semiconductor suspensions under natural sunlight [J]. *Chemosphere*, 2012, **87**(8): 954-961.
- [17] Cao J, Guo H, Zhu H M, *et al.* Effects of SOM, surfactant and pH on the sorption-desorption and mobility of prometryne in soils [J]. *Chemosphere*, 2008, **70**(11): 2127-2134.
- [18] Jung H, Ahn Y, Choi H, *et al.* Effects of *in-situ* ozonation on indigenous microorganisms in diesel contaminated soil: Survival and regrowth [J]. *Chemosphere*, 2005, **61**(7): 923-932.
- [19] Dietrich R F, Reiser R W, Stieglitz B I. Identification of microbial and rat metabolites of triflusaluron methyl, a new sugar beet herbicide [J]. *Journal of Agriculture Food Chemistry*, 1995, **43**(2): 531-536.
- [20] Said-Pullicino D, Gigliotti G. Oxidative biodegradation of dissolved organic matter during composting [J]. *Chemosphere*, 2007, **68**(6): 1030-1040.
- [21] Song N H, Chen L, Yang H. Effect of dissolved organic matter on mobility and activation of chlorotoluron in soil and wheat [J]. *Geoderma*, 2008, **146**(1-2): 344-352.
- [22] Kurola J, Salkinoja-Salonen M. Potential for biodegradation of anthropogenic organic compounds at low temperature in boreal soils [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2007, **39**(5): 1206-1212.
- [23] Rosenbom A E, Kjaer J, Olsen P. Long-term leaching of rimsulfuron degradation products through sandy agricultural soils [J]. *Chemosphere*, 2010, **79**(8): 830-838.
- [24] Torra J, Cirujeda A, Taberner A, *et al.* Evaluation of herbicides to manage herbicide-resistant corn poppy (*Papaver rhoeas*) in winter cereals [J]. *Crop Protection*, 2010, **29**(7): 731-736.
- [25] Wang N X, Tang Q, Ai G M, *et al.* Biodegradation of tribenuron methyl that is mediated by microbial acidohydrolysis at cell-soil interface [J]. *Chemosphere*, 2012, **86**(11): 1098 - 1105.
- [26] 张蓉, 岳永德, 花日茂, 等. 磺酰胺类除草剂在环境中的转归和影响 [J]. *安徽农业科学*, 2003, **31**(6): 100-109.

CONTENTS

Preface	CHEN Wei-ping (4069)
Ecological Risks of Reclaimed Water Irrigation: A Review	CHEN Wei-ping, ZHANG Wei-ling, PAN Neng, <i>et al.</i> (4070)
Study on Soil Enzyme Activities and Microbial Biomass Carbon in Greenland Irrigated with Reclaimed Water	PAN Neng, HOU Zhen-an, CHEN Wei-ping, <i>et al.</i> (4081)
Soil Salinity in Greenland Irrigated with Reclaimed Water and Risk Assessment	PAN Neng, CHEN Wei-ping, JIAO Wen-tao, <i>et al.</i> (4088)
Effect of Reclaimed Water Irrigation on Soil Properties and Vertical Distribution of Heavy Metal	ZHAO Zhong-ming, CHEN Wei-ping, JIAO Wen-tao, <i>et al.</i> (4094)
Simulation of Effect of Irrigation with Reclaimed Water on Soil Water-Salt Movement by ENVIRO-GRO Model	LÜ Si-dan, CHEN Wei-ping, WANG Mei-e (4100)
Simulation of Effects of Soil Properties and Plants on Soil Water-salt Movement with Reclaimed Water Irrigation by ENVIRO-GRO Model	LÜ Si-dan, CHEN Wei-ping, WANG Mei-e (4108)
Modeling the Cd Accumulation in Agricultural Soil Irrigated with Reclaimed Water	ZHAO Zhong-ming, CHEN Wei-ping, JIAO Wen-tao, <i>et al.</i> (4115)
Model Simulation of the Transportation, Transformation and Accumulation of Synthetic Musk in Soils Input Through Recycle Water Irrigation	WANG Mei-e, CHEN Wei-ping, JIAO Wen-tao (4121)
Impacts of Reclaimed Water Irrigation of Urban Lawn on Groundwater Quality	WANG Qiao-huan, CHEN Wei-ping, WANG Xiao-ke, <i>et al.</i> (4127)
Public Awareness Assessment of Water Reuse in Beijing	ZHANG Wei-ling, CHEN Wei-ping, JIAO Wen-tao (4133)
Temporal and Spatial Distribution of Ozone Concentration by Aircraft Sounding over Beijing	CHEN Peng-fei, ZHANG Qiang, QUAN Jian-nong, <i>et al.</i> (4141)
Emission Strength and Source Apportionment of Volatile Organic Compounds in Shanghai During 2010 EXPO	WANG Hong-li, CHEN Chang-hong, HUANG Hai-ying, <i>et al.</i> (4151)
Study on Atmospheric VOCs in Gongga Mountain Base Station	ZHANG Jun-ke, WANG Yue-si, WU Fang-kun, <i>et al.</i> (4159)
Regional Atmospheric Environment Risk Source Identification and Assessment	ZHANG Xiao-chun, CHEN Wei-ping, MA Chun, <i>et al.</i> (4167)
Carbon Isotopic Compositions of <i>n</i> -Alkanes and <i>n</i> -Alkanoic Acids in the Smoke from Combustion of Rice Straw	LIU Gang, SUN Li-na, LI Jiu-hai, <i>et al.</i> (4173)
Research on NEDC Ultrafine Particle Emission Characters of a Port Fuel Injection Gasoline Car	HU Zhi-yuan, LI Jin, TAN Pi-qiang, <i>et al.</i> (4181)
Magnetic Response of Street Tree Leaves to Particulate Pollution in Shanghai	LONG Qian, ZHOU Ju-zhen, MENG Jie, <i>et al.</i> (4188)
Diurnal Variations of Greenhouse Gas Fluxes at the Water-Air Interface of Aquaculture Ponds in the Min River Estuary	YANG Ping, TONG Chuan, HE Qing-hua, <i>et al.</i> (4194)
Effects of Simulated Warming on Soil Respiration in a Cropland Under Winter Wheat-Soybean Rotation	LIU Yan, CHEN Shu-tao, HU Zheng-hua, <i>et al.</i> (4205)
Transport and Differentiation of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Air from Dashiwei Karst Sinkholes in Guangxi, China	KONG Xiang-sheng, QI Shi-hua, SUN Qian, <i>et al.</i> (4212)
Pollution Characteristics of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Water of Songhua River Basin During the Icebound Season	MA Wan-li, LIU Li-yan, QI Hong, <i>et al.</i> (4220)
Pollution Characteristics and Sources of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Urban Rivers of Wenzhou City	ZHOU Jie-cheng, CHEN Zhen-lou, BI Chun-juan, <i>et al.</i> (4226)
Pollution Characteristics and Sources of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Riparian Soils Along Urban Rivers of Wenzhou City	ZHOU Jie-cheng, BI Chun-juan, CHEN Zhen-lou, <i>et al.</i> (4237)
Spatial Distribution and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Partial Surface Sediments of Liaohe River	WU Jiang-yue, LIU Zheng-tao, ZHOU Jun-li, <i>et al.</i> (4244)
Phenols Pollutants in Soil and Shallow Groundwater of a Retired Refinery Site	PEI Fang, LUO Ze-jiao, PENG Jin-jin, <i>et al.</i> (4251)
Heterogeneous Characteristic of PAHs' Spatial Distribution in a Large Coking Site of China	LIU Geng, GUO Guan-lin, NAN Feng, <i>et al.</i> (4256)
Vertical Distribution and Source Analysis of Organochlorine Pesticides in Sewage Irrigation Area, Taiyuan City	LIAO Xiao-ping, ZHANG Cai-xiang, ZHAO Xu, <i>et al.</i> (4263)
Distribution and Ecological Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Agricultural Soil of the Chongming Island in Shanghai	LÜ Jin-gang, BI Chun-juan, CHEN Zhen-lou, <i>et al.</i> (4270)
Mercury and Copper Accumulation During Last Fifty Years and Their Potential Ecological Risk Assessment in Sediment of Mangrove Wetland of Shenzhen, China	LI Rui-li, CHAI Min-wei, QIU Guo-yu, <i>et al.</i> (4276)
Characteristics of Heavy Metal Pollution in the Sediments from Shahe Reservoir, the Upper Reach of the North Canal River	ZHANG Wei, ZHANG Hong, SHAN Bao-qing (4284)
Speciation and Pollution Characteristics of Heavy Metals in the Sediment of Taihu Lake	QIN Yan-wen, ZHANG Lei, ZHENG Bing-hui, <i>et al.</i> (4291)
Chemical Composition and Daily Variation of Melt Water During Ablation Season in Monsoonal Temperate Glacier Region; A Case Study of Baishui Glacier No. 1	ZHU Guo-feng, PU Tao, HE Yuan-qing, <i>et al.</i> (4300)
Experimental Study on the Environmental Fate of Nitrogen in Snail-Macrophyte Ecosystem for Water Purification	ZHOU Lu-hong, GU Xiao-hong, ZENG Qing-fei, <i>et al.</i> (4307)
Growth Inhibition Effect of Immobilized Pectinase on <i>Microcystis aeruginosa</i>	SHEN Qing-qing, PENG Qian, LAI Yong-hong, <i>et al.</i> (4316)
A Novel Approach of Using Fouling Index to Evaluate NOM Fouling Behavior During Low Pressure Ultrafiltration Process	XIAO Ping, XIAO Feng, ZHAO Jing-hui, <i>et al.</i> (4322)
Characteristics of Monomethylmercury Photodegradation in Water Body	SUN Rong-guo, MAO Wen, MA Ming, <i>et al.</i> (4329)
Degradation of Oxytetracycline with Ozonation in Acetic Acid Solvent	LI Shi-yin, LI Xiao-rong, ZHU Yi-ping, <i>et al.</i> (4335)
Photodegradation Performance and Mechanisms of Carbamazepine and Its Impact Factors	CHEN Chao, ZHAO Qian, FENG Li, <i>et al.</i> (4340)
Investigation of Nitrobenzene Removal by Iron Sulfide (FeS)	WANG Xia-lin, LI Rui-hua (4346)
Experimental Research on <i>In-Situ</i> Auto-Monitoring for Underground Sewage Pipeline Leakage	GUO Lei, JIA Yong-gang, FU Teng-fei, <i>et al.</i> (4352)
Adsorption of Phenol Chemicals by Surfactant-Modified Zeolites	XIE Jie, WANG Zhe, WU De-yi, <i>et al.</i> (4361)
Acute Toxicity of Antibiotics and Anaerobic Digestion Intermediates in Pharmaceutical Wastewaters	JI Jun-yuan, XING Ya-juan, ZHENG Ping (4367)
Study on Phosphorus Removal Capability of Constructed Wetlands Filled with Broken Bricks	WANG Zhen, LIU Chao-xiang, LI Peng-yu, <i>et al.</i> (4373)
Denitrification Water Treatment with Zeolite Composite Filter by Intermittent Operation	QING Cheng-song, BAO Tao, CHEN Tian-hu, <i>et al.</i> (4380)
Influence of Nitrate on the Simultaneous Methanogenesis and Denitrification Reaction of Anaerobic Biofilm and Granular Sludge	ZHONG Chen-yu, YE Jie-xu, LI Ruo-yu, <i>et al.</i> (4387)
Study on Dewatering of Activated Sludge Under Applied Electric Field	JI Xue-yuan, WANG Yi-li, FENG Jing (4393)
Effects of Multiple Environmental Factors on Trifluorsulfuron-methyl Degradation in Soils	SONG Ning-hui, SHAN Zheng-jun, SHI Li-li, <i>et al.</i> (4400)
Effect of Alkaline Post-Treatment on Physicochemical Property of Digested <i>Spartina alterniflora</i>	CHEN Guang-yin, ZHENG Zheng, CHANG Zhi-zhou, <i>et al.</i> (4406)
Structural Changes in Mineral Phases and Environmental Release Behavior of Arsenic During Sintering of Arsenic-containing Waste	WANG Xing-run, NONG Ze-xi, WANG Qi (4412)
Study on Emission Standard System of Air Pollutants	JIANG Mei, ZHANG Guo-ning, ZHANG Ming-hui, <i>et al.</i> (4417)
Mechanism for Transformation of Environmental Criteria into Environmental Standards in China	BI Cen-cen, WANG Tie-yu, LÜ Yong-long (4422)
Effect Analysis on the Two Total Load Control Methods for Poisonous Heavy Metals	FU Guo-wei (4428)

《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)

2012年12月15日 33卷 第12期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 33 No. 12 Dec. 15, 2012

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: 70.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行