

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第33卷 第1期

Vol.33 No.1

**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

30年来中国民航运输行业的大气污染物排放 ..... 何吉成(1)

北京上甸子站气相色谱法大气 CH<sub>4</sub> 和 CO 在线观测方法研究 ..... 汪巍,周凌晔,方双喜,张芳,姚波,刘立新(8)

2010年1月北京城区大气消光系数重建及其贡献因子 ..... 朱李华,陶俊,陈忠明,赵岳,张仁健,曹军骥(13)

广东东江流域多氯萘的大气沉降研究 ..... 王琰,李军,刘向,成志能,张瑞杰,张干(20)

塔克拉玛干沙尘暴源区空气微生物群落的代谢特征 ..... 段魏魏,娄恺,曾军,胡蓉,史应武,何清,刘新春,孙建,晁群芳(26)

紫外光降解对生物过滤塔去除氯苯性能的影响机制研究 ..... 王灿,席劲瑛,胡洪管,姚远(32)

春季黄渤海溶解有机碳的平面分布特征 ..... 丁雁雁,张传松,石晓勇,商荣宁(37)

春季胶州湾海水汞的形态研究 ..... 许廖奇,刘汝海,王金玉,汤爱坤,王舒(42)

丽江盆地地表-地下水的水化学特征及其控制因素 ..... 蒲焘,何元庆,朱国锋,张蔚,曹伟宏,常丽,王春风(48)

塔里木河下游输水间歇地下水埋深及化学组分的变化 ..... 陈永金,李卫红,董杰,刘加珍(55)

某危险废物填埋场地下水污染预测及控制模拟 ..... 马志飞,安达,姜永海,席北斗,李定龙,张进保,杨昱(64)

北京市城市降雨径流水质评价研究 ..... 侯培强,任玉芬,王效科,欧阳志云,周小平(71)

重庆市路面降雨径流特征及污染源解析 ..... 张千千,王效科,郝丽岭,侯培强,欧阳志云(76)

沉水植物床-固定化微生物技术在水源地修复中的应用研究 ..... 陈祈春,李正魁,王易超,吴凯,范念文(83)

Pd/TiO<sub>2</sub> 对水体中2,4-二氯酚的催化加氢脱氯研究 ..... 张寅,邵芸,陈欢,万海勤,万玉秋,郑寿荣(88)

pH 值对纳米零价铁吸附降解 2,4-二氯苯酚的影响 ..... 冯丽,葛小鹏,王东升,汤鸿霄(94)

给水管网中耐氯性细菌的灭活特性研究 ..... 陈雨乔,段晓笛,陆品品,王茜,张晓健,陈超(104)

安徽省畜禽粪便污染耕地、水体现状及其风险评价 ..... 宋大平,庄大方,陈巍(110)

染整废水深度处理纳滤工艺膜污染成因分析 ..... 曹晓兵,李涛,周律,杨海军,王晓(117)

间歇式气水联合反冲洗生物炭池的试验研究 ..... 谢志刚,邱雪敏,赵燕玲(124)

pH 及表面活性剂对诺氟沙星在海洋沉积物上吸附行为的影响 ..... 庞会玲,杨桂朋,高先池,曹晓燕(129)

硅在湖泊沉积物上的吸附特征及形态分布研究 ..... 吕昌伟,崔萌,高际玫,张细燕,万丽丽,何江,孟婷婷,白帆,杨旭(135)

农作物残体制备的生物质炭对水中亚甲基蓝的吸附作用 ..... 徐仁扣,赵安珍,肖双成,袁金华(142)

高分子固体废物基活性炭对有机染料的吸附解吸行为研究 ..... 廉菲,刘畅,李国光,刘一夫,李勇,祝凌燕(147)

活性污泥对四环素的吸附性能研究 ..... 陈瑞萍,张丽,于洁,陶芸,张忠品,李克勋,刘东方(156)

加油站油类污染物自然衰减现场试验研究 ..... 贾慧,武晓峰,胡黎明,刘培斌(163)

生物质炭对土壤中氯苯类物质生物有效性的影响及评价方法 ..... 宋洋,王芳,杨兴伦,卞永荣,谷成刚,谢祖彬,蒋新(169)

利用第二缺氧段硝酸盐氮浓度作为 MUCT 工艺运行控制参数 ..... 王晓玲,尹军,高尚(175)

数学模拟好氧颗粒污泥的形成及水力剪切强度对颗粒粒径的影响 ..... 董峰,张捍民,杨凤林(181)

不同污泥停留时间对城市污泥生物沥浸推流式运行系统的影响 ..... 刘奋武,周立祥,周俊,姜峰,王电站(191)

间歇曝气生物滤池生物除磷性能研究 ..... 曾龙云,杨春平,郭俊元,罗胜联(197)

鸡粪与互花米草沼渣混合发酵产甲烷的研究 ..... 陈广银,常志州,叶小梅,杜静,徐跃定,张建英(203)

北京市生活垃圾填埋场产甲烷不确定性定量评估 ..... 陈操操,刘春兰,李铮,王海华,张妍,王璐(208)

外加酶强化剩余污泥微生物燃料电池产电特性的研究 ..... 杨慧,刘志华,李小明,杨麒,方丽,黄华军,曾光明,李硕(216)

赤潮藻电致化学发光分子探针检测系统的构建 ..... 朱霞,甄毓,米铁柱,池振明,徐晓春(222)

邻苯二甲酸二丁酯对短裸甲藻的抑制机制研究 ..... 别聪聪,李锋民,王一斐,王昊云,赵雅茜,赵薇,王震宇(228)

纳米 TiO<sub>2</sub> 对短裸甲藻的毒性效应 ..... 李锋民,赵薇,李媛媛,田志佳,王震宇(233)

苏州河底泥 3 种内分泌干扰物的空间分布及环境风险 ..... 李洋,胡雪峰,王效举,茂木守,大塚宜寿,细野繁雄,杜艳,姜琪,李珊,冯建伟(239)

电子废物拆解区农业土壤中 PCNs 的污染水平、分布特征与来源解析 ..... 王学彤,贾金盼,李元成,孙阳昭,吴明红,盛国英,傅家谟(247)

洛阳市不同功能区道路灰尘重金属污染及潜在生态风险 ..... 刘德鸿,王发园,周文利,杨玉建(253)

湘江流域土壤重金属污染及其生态环境风险评价 ..... 刘春早,黄益宗,雷鸣,郝晓伟,李希,铁柏清,谢建治(260)

广西铅锡矿冶炼区土壤剖面及孔隙水中重金属污染分布规律 ..... 项萌,张国平,李玲,魏晓飞,蔡永兵(266)

缺氧条件下土壤砷的形态转化与环境行为研究 ..... 吴锡,许丽英,张雪霞,宋雨,王新,贾永锋(273)

可渗透反应复合电极法对铬(VI)污染土壤的电动修复 ..... 付融冰,刘芳,马晋,张长波,何国富(280)

胡敏酸对汞还原能力的测定和表征 ..... 江韬,魏世强,李雪梅,卢松,李梦婕,罗畅(286)

Zn(II) 对生物质碳源处理酸性矿山排水中厌氧微生物活性影响 ..... 黎少杰,陈天虎,周跃飞,岳正波,金杰,刘畅(293)

油气田土壤样品中可培养丁烷氧化菌多样性研究 ..... 张莹,李宝珍,杨金水,汪双清,袁红莉(299)

利用 PCR-DGGE 分析未开发油气田地表微生物群落结构 ..... 满鹏,齐鸿雁,呼庆,马安周,白志辉,庄国强(305)

黄土高原六道沟流域 8 种植物根际细菌与 AMF 群落多样性研究 ..... 封晔,唐明,陈辉,丛伟(314)

鸡粪与猪粪所含土霉素在土壤中降解的动态变化及原因分析 ..... 张健,关连珠,颜丽(323)

杂质对废塑料裂解产物及污染物排放的影响 ..... 赵磊,王中慧,陈德珍,马晓波,栾健(329)

《环境科学》征稿简则(7) 《环境科学》征订启事(19) 信息(47,70,202,304)

# 鸡粪与猪粪所含土霉素在土壤中降解的动态变化及原因分析

张健<sup>1</sup>, 关连珠<sup>2\*</sup>, 颜丽<sup>2</sup>

(1. 山西农业大学资源环境学院, 太谷 030801; 2. 沈阳农业大学土地与环境学院, 沈阳 110866)

**摘要:** 采用室内模拟培养实验, 研究不同用量鸡粪与猪粪所含土霉素在土壤中降解的动态变化规律及消解途径. 结果表明, 畜禽粪便中土霉素在土壤中能迅速进入降解期, 含量变化呈“L”型, 但不同粪肥种类和用量处理的降解率和变化幅度有显著差异 ( $P < 0.05$ ). 180 d 时, 鸡粪处理土壤中 OTC 的降解率高于猪粪处理, 半衰期分别为 26.98 d 和 31.32 d. 低用量鸡粪和猪粪处理土壤中 OTC 降解率最大, 对应分别可达 84.06% 和 80.47%. 降解率与畜禽粪使用量呈负相关, 与时间呈正相关且可用  $v = A + B \ln t$  回归方程拟合 ( $r > 0.96$ ). 土霉素进入土壤 50 d 时, 光降解量占减少总量的 20.03%, 下降了 25.05%; 微生物降解量占 3.16%, 增加了 2.50%. 可见, 鸡粪所含土霉素在土壤中的降解情况好于猪粪, 光照对土壤中土霉素有较好的降解作用, 土壤微生物降解作用很小, 且随着培养时间的延长, 微生物降解增加, 光降解减弱.

**关键词:** 猪粪; 鸡粪; 土霉素; 土壤; 降解; 动态变化; 原因分析

中图分类号: X53 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2012)01-0323-06

## Dynamics of Degradation of Oxytetracycline of Pig and Chicken Manures in Soil and Mechanism Investigation

ZHANG Jian<sup>1</sup>, GUAN Lian-zhu<sup>2</sup>, YAN Li<sup>2</sup>

(1. College of Resources and Environment, Shanxi Agricultural University, Taigu 030801, China; 2. College of Land and Environment, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866, China)

**Abstract:** Simulated indoor incubation experiment was carried out to explore the degradation dynamics of oxytetracycline (OTC) from different manures and the mechanisms were investigated as well. The results suggested that manures accelerated OTC entering soil and degrading period, and resembled the L-type curves. Both degradation rate and degradation percentage were significantly different for different antibiotics with different concentration ( $P < 0.05$ ). At day 180, the OTC degradation percentage of chicken feces was higher than that of pig feces, and the highest degradation percentage reached to 85.4% and 92.3% respectively. The half-lives of chicken and pig manures were 26.98 d, 31.32 d respectively. Degradation percentage was negatively correlated with the amount of manures used and positively correlated with incubation time ( $v = A + B \ln t$ ,  $r > 0.96$ ). At day 50, the photo-degradation and micro-degradation accounted for 20.03% and 3.16% of total reduction. 25.05% decreased in photo degradation and 2.50% increased in microbiological degradation. It is indicated that the degradation effects to OTC from pig manures was superior to chicken manures, photo decomposing played an important role in the process of degradation and indigenous soil microorganisms only had a little effect on it. With the extension of incubation time, microbiological decomposing became better, but photo decomposing became weaker.

**Key words:** pig manure; chicken manure; oxytetracycline (OTC); soil; degradation; dynamics; mechanism investigation

土霉素 (oxytetracycline, OTC) 属于四环素类抗生素, 具有质优价廉、广谱性的特点, 在畜禽生产中应用广泛<sup>[1,2]</sup>. 一般有 60% ~ 90% 的抗生素以原形通过粪便和尿液排出体外<sup>[3-5]</sup>, 保持较强的生物学活性<sup>[6,7]</sup>, 并随有机肥的施用进入农田, 通过“生物链”传导, 对生态环境及动、植物和人类健康产生严重的不良影响<sup>[8-10]</sup>. 我国部分发达地区畜禽养殖业发展较迅速, 规模较大且粪便处理率较低, 大多数会未经处理进入土壤, 所以土壤抗生素污染更加不容忽视<sup>[11]</sup>. 因此研究随畜禽粪便进入土壤的抗生素在土壤中的留存与分解状况不但可以预示这类抗生素的环境风险, 而且可能影响作物的生长状况.

土壤中土霉素的主要来源为含有土霉素的畜禽粪便、污泥和废弃物的土地利用<sup>[12-14]</sup>. 目前国内外学者均指出在畜禽粪便中已经检测到了高含量的土霉素残留<sup>[15-18]</sup>, 土壤中高含量的抗生素也被发现<sup>[15,19-21]</sup>, 必将成为环境污染的潜在威胁<sup>[9]</sup>. 近年来, 已对土霉素在多种土壤中的吸附和解吸<sup>[22-25]</sup>, 及对土壤微生态环境<sup>[26,27]</sup> 和土壤生物学性质<sup>[11,28]</sup> 进行了初步探讨, 且研究了纯品土霉素在畜禽粪

收稿日期: 2010-12-23; 修订日期: 2011-03-23

基金项目: 国家自然科学基金项目 (40901259)

作者简介: 张健 (1982 ~), 女, 博士研究生, 主要研究方向为土壤肥力、土壤生态与环境, E-mail: tutu.55@163.com

\* 通讯联系人, E-mail: glz1960@163.com

便<sup>[29~31]</sup>或土壤<sup>[26,32]</sup>中的降解情况.但有关畜禽粪便中所含的土霉素进入土壤后降解的动态变化情况还鲜见报道.因此本实验通过室内模拟培养实验研究不同用量鸡粪与猪粪中所含土霉素进入土壤后的动态变化规律及变化差异,并探讨其变化的机制,以期为畜禽粪便的合理利用提供依据.

## 1 材料与方法

### 1.1 实验材料

供试土壤为典型棕壤,质地为壤土,采自沈阳天柱山田间实验区.其基本理化性状为:有机质  $19.92 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,全氮  $0.93 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,全磷  $0.52 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,碱解氮  $88.21 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,速效磷  $28.29 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,速效钾  $67.5 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,pH 6.3,阳离子交换量  $13.5 \text{ cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ .

供试鸡粪与猪粪均采自沈阳市附近一些大型集约化畜禽养殖场.鸡粪基本理化性状为:pH 7.03、有机质  $325.3 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,全氮  $34.21 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,C/N 9.51,全磷  $7.88 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,土霉素  $69.49 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ;猪粪基本理化性状为:pH 6.51,有机质  $394.4 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,全氮  $27.33 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,C/N 14.43,全磷  $16.46 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,土霉素  $127.06 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ .

### 1.2 实验设计

#### 1.2.1 不同畜禽粪便中土霉素在土壤中的动态变化

依据实际生产中每 kg 土中施用有机肥 15 g 左右,从低浓度到高浓度设定 4 个粪肥浓度.

实验共设置 9 个处理,除空白对照外,其余为每 kg 土中分别施入鸡粪 10、30、50、70 g,猪粪 10、30、50、70 g (分别用 C1%、C3%、C5%、C7%; P1%、P3%、P5%、P7% 表示).

实验采用室内模拟培养,根据实验设计分别将猪粪,鸡粪与供试土壤混拌均匀,置于室内,保持室温培养,在培养期内保持土壤含水量在 65% 左右,在培养的 0、5、10、20、30、40、50、60、90、120、150、180 d 采样,测定土霉素含量.实验采用完全随机排列设计,每个处理重复 3 次.

#### 1.2.2 土霉素含量减少的途径及原因分析

实验分 3 个处理,分别为灭菌避光处理、未灭菌避光处理、未灭菌光照处理.称取 3 份等量的土样,加入等量土霉素进行培养.灭菌处理需经过高温高压灭菌,避光处理置于恒温培养箱  $22.5^\circ\text{C}$  培养;光照处理置于恒温光照培养箱  $22.5^\circ\text{C}$  培养,昼/夜光照时间为 14 h/10 h.在培养期内每 5 d 取样,测定其 OTC 含量.

### 1.3 研究方法

#### 1.3.1 测定方法

采用高效液相色谱仪分析<sup>[30,33]</sup>.称取 2 g 土壤样品,加入提取液 4 mL,漩涡混匀器上  $2500 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$  混匀 1 min,  $25^\circ\text{C}$  超声 15 min,然后在  $4500 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$  的条件下离心 15 min,重复 2 次,集合 3 次上清液过微孔滤膜.用 6 mL 甲醇和 5 mL 提取液活化,通过固相萃取小柱,用甲醇洗脱固相萃取小柱,氮气吹干后,用 1 mL 甲醇定容,待测.OTC 对照品(纯度 88.2%)购于中国药品生物检定所.高效液相色谱(LC-2010-AHT),配 2487 紫外检测器,AgilentEclipseXDB-C8( $4.6 \times 150 \text{ mm}$ ,  $5 \mu\text{m}$ )色谱柱,进样量为  $20 \mu\text{L}$ ,流动相为  $0.01 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$  草酸:乙腈:甲醇体积比为 79:10.5:10.5,流速  $1.0 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$ ,紫外检测波长 268 nm.

#### 1.3.2 研究方法

变化速率指单位时间内单位质量样品分解土霉素的量.

$$\text{即 } v = \Delta y / \Delta t,$$

式中,  $v$  为相应时间段的平均变化速率 [ $\text{mg}\cdot(\text{kg}\cdot\text{d})^{-1}$ ],  $\Delta y$  为某段培养时间内减少量 ( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ),  $\Delta t$  为培养时间(d).

降解率指某个时间段内减少量占培养起始时含量的百分比.

$$\text{即 } B = \Delta y / A,$$

式中,  $\Delta y$  为某段培养时间内减少量 ( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ),  $A$  为培养起始时土霉素的含量 ( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ),  $B$  为相应时间段的降解率(%).

#### 1.3.3 数据分析

所有实验数据采用 Excel、SPSS 13.0 进行计算和统计分析.

## 2 结果与讨论

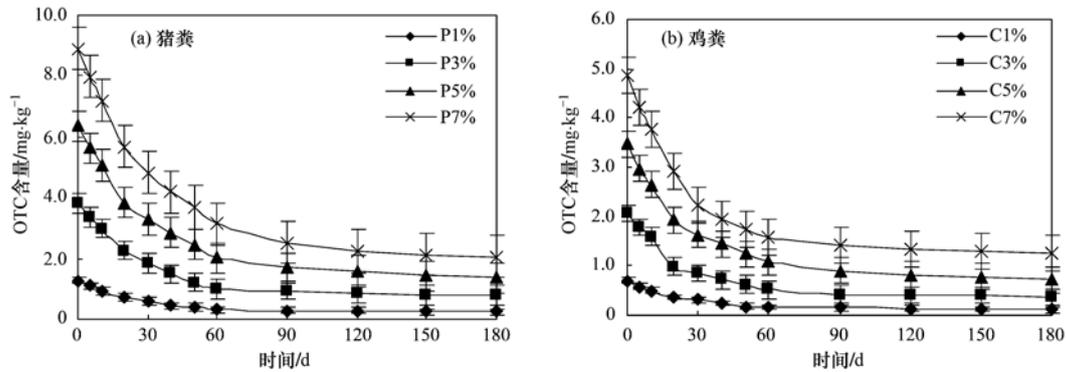
### 2.1 不同畜禽粪便中所含土霉素在土壤中的动态变化

如图 1 所示,不同用量畜禽粪便所含土霉素在土壤中含量的动态变化趋势基本一致,均表现为培养前期含量迅速下降,中后期逐步稳定.180d 后,鸡粪处理土壤的 OTC 含量小于猪粪处理.低用量处理在培养前期,含量变化已不明显,高用量处理则持续减少,但降幅有所减缓,90d 后变化基本不明显.猪粪处理 OTC 含量变化趋于稳定所需时间略高于鸡粪处理,且用量越高,变化规律越明显,尤其是高用量的猪粪处理,在培养期内均有变化.可见,畜禽粪便的用量越大,其所含 OTC 在土壤中降解达到平稳时所需的时间越长.鸡粪中 OTC 在土壤中含量的

变化幅度小于猪粪。

随畜禽粪便的施用会带入大量阳离子, 由于土霉素分子结构特性, 能够与阳离子通过络合作用形成 2:1 的复合物<sup>[22]</sup>, 从而改变土霉素的土壤环境行

为, 且有机质和离子类型会影响土霉素在土壤中的吸附<sup>[2,22,23]</sup>, 而鸡粪与猪粪的性质不同, 施入土壤后会使得土壤环境有所差别, 所以鸡粪与猪粪所含土霉素在土壤中的降解情况不同。



所有图表数据均为该处理减去空白对照的值, 下同

图 1 不同用量鸡粪与猪粪处理土壤中土霉素含量的动态变化

Fig. 1 Dynamics of concentration of OTC with different application doses of chicken and pig manures in soil

## 2.2 不同用量畜禽粪便处理的土壤中土霉素降解率和变化速率的研究

如表 1 所示, 鸡粪中 OTC 比猪粪更快进入降解期. 在培养的前期, 降解率快速上升, 10 d 时各处理 OTC 含量已减少了 10% 以上. 在培养中期, 各处理间差异均达到极显著水平. 180 d 时, C1% ~ C7% 和 P1% ~ P7% 的降解率范围分别为 73.92% ~ 84.06%、76.90% ~ 80.47%. 整个培养过程中, 鸡粪处理的降解率高于猪粪处理. 畜禽粪便施入量越

小, 其所含 OTC 在土壤中的降解率就越大, 降解进入稳定期所需时间也越短. 主要是由于低浓度的 OTC 对土壤微生物的抑制作用小于高浓度, 尤其是低浓度对真菌有促进作用<sup>[27]</sup>, 高浓度则产生抑制作用, 并且外源添加 OTC 会抑制土壤酶活性, 影响程度随 OTC 剂量的增加而增加<sup>[26]</sup>, 本实验高用量畜禽粪便的施用会带入土壤过多的 OTC, 导致浓度较高, 对其在土壤中的降解抑制效果更明显, 所以高用量处理中的降解率会小于低用量处理.

表 1 不同用量鸡粪与猪粪处理土壤中 OTC 降解率<sup>1)</sup>/%

Table 1 Changes of OTC degradation percentage with different application doses of chicken and pig manures in soil/%

处理	时间/d										
	5	10	20	30	40	50	60	90	120	150	180
C1%	15.75a ± 0.24	28.00a ± 0.56	46.72a ± 0.39	55.68a ± 0.03	65.00a ± 0.36	73.91a ± 0.26	76.81a ± 0.03	78.26b ± 0.56	81.16a ± 0.15	82.61a ± 0.05	84.06a ± 0.14
C3%	14.72ab ± 0.16	23.46ab ± 0.24	45.50ab ± 0.51	53.92bc ± 0.34	64.83ab ± 0.15	70.14b ± 0.38	75.48b ± 0.23	79.76a ± 0.26	80.29a ± 0.11	80.77ab ± 0.08	82.69b ± 0.28
C5%	14.32ab ± 0.17	23.83ab ± 0.25	44.21abc ± 0.47	52.75cd ± 0.42	58.41de ± 0.21	64.27c ± 0.33	68.80d ± 0.20	73.78d ± 0.19	76.37c ± 0.09	77.23d ± 0.36	79.54cd ± 0.35
C7%	13.50abc ± 0.37	22.25bc ± 0.08	40.10cd ± 0.20	54.33b ± 0.53	59.80ede ± 0.38	64.44c ± 0.56	67.76e ± 0.19	71.25e ± 0.46	72.48d ± 0.22	73.72e ± 0.26	73.92f ± 0.13
P1%	12.81bc ± 0.43	27.21a ± 0.37	42.95bcd ± 1.09	53.55bc ± 0.39	64.85ab ± 0.36	68.61b ± 0.47	75.10b ± 0.55	77.30b ± 0.19	78.28b ± 0.62	79.64bc ± 0.37	80.47c ± 0.34
P3%	11.70bc ± 0.39	21.70bc ± 0.29	40.67de ± 0.67	51.60d ± 0.26	60.90bcd ± 0.42	68.27b ± 0.38	73.81c ± 0.48	75.18c ± 0.06	78.26b ± 0.29	79.23bc ± 0.32	79.71c ± 0.57
P5%	11.65bc ± 0.25	20.41bc ± 0.68	39.63e ± 0.27	48.36e ± 0.24	55.21ef ± 0.20	61.29d ± 0.06	68.46de ± 0.22	73.31d ± 0.24	75.29c ± 0.17	77.76cd ± 0.13	78.78d ± 0.55
P7%	10.51c ± 0.13	19.47c ± 0.47	36.38f ± 0.63	45.87f ± 0.23	52.92f ± 0.36	58.67e ± 0.09	64.91f ± 0.25	71.74de ± 0.19	74.88c ± 0.25	76.20d ± 0.28	76.90e ± 0.28

1) 表中同列数据后相同小写字母分别表示差异显著性未达到  $P < 0.05$  水平

OTC 降解率与时间的线性关系可较好地用  $v = A + B \ln t$  回归方程拟合, 见表 2, 其中  $A$  反映了培养初期的降解率,  $B$  反映了降解率随时间降低的快慢趋势, 可以看出随着培养时间的延长 OTC 降解率随含量的增加而减少, 同一用量猪粪处理的 OTC 在土壤中的半衰期要大于鸡粪处理, 且半衰期随含量的增加而延长. 猪粪处理平均半衰期为 31.32 d, 而鸡

粪处理则需 26.98 d. 而匡光伟等<sup>[29]</sup> 得出不同初始浓度鸡粪中 OTC 的降解半衰期为  $(4.11 \pm 1.17)$  d. 可见, 不同条件下 OTC 的半衰期相差较大.

如图 2 所示, 随着培养时间的延长, 不同处理土壤中土霉素变化速率呈逐步下降趋势, 前 30 d OTC 变化速率基本保持较高的水平, 之后迅速下降. 尤其是培养前期猪粪处理明显保持较高的变化速率.

表 2 不同用量鸡粪与猪粪处理土壤中 OTC 降解率与培养时间( $\ln t$ )的回归方程

Table 2 Regression equations of OTC degradation percentage with incubation time after different application doses of pig and chicken manures in soil( $\ln t$ )

处理	拟合方程	$r$	半衰期/d
C1%	$v = -13.529 + 20.166 \ln t$	0.975 5	23.35
C3%	$v = -13.300 + 20.023 \ln t$	0.965 6	23.59
C5%	$v = -13.850 + 19.204 \ln t$	0.985 6	29.28
C7%	$v = -14.181 + 18.280 \ln t$	0.968 9	31.70
P1%	$v = -15.286 + 20.976 \ln t$	0.973 4	26.27
P3%	$v = -19.935 + 20.733 \ln t$	0.975 3	29.17
P5%	$v = -21.054 + 20.286 \ln t$	0.988 0	33.21
P7%	$v = -22.973 + 20.271 \ln t$	0.993 8	36.60

鸡粪处理的变化幅度较大. 这可能是由于抗性细菌会影响土壤微生物的群落结构, 抑制微生物对土霉素的降解作用, 而鸡粪中的某些成分有利于抗生素

抗性细菌的存活与扩散<sup>[34]</sup>, 因此施用鸡粪后土壤中的抗性细菌数量和比例均高于施用猪粪后的土壤, 所以对鸡粪变化速率的影响会较明显, 使得猪粪处理的变化幅度相对较大, 整个培养期内, 猪粪处理的变化速率大于鸡粪处理, 这主要与初始浓度有关, 由于猪粪中 OTC 的含量大于鸡粪, 所以其变化速率较大.

鸡粪与猪粪各处理初始变化速率最大, C1% ~ C7% 和 P1% ~ P7% 分别为 0.02 ~ 0.13  $\text{mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$  和 0.03 ~ 0.18  $\text{mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$ . 培养期间, 同种粪便不同用量处理在各培养时期的变化速率呈明显的规律, 畜禽粪使用量越大, 其 OTC 的变化速率也越大, 且差异达显著水平 ( $P < 0.05$ ), 各处理间表现均为: 7% > 5% > 3% > 1%. 可知, 在一定范围内, 施入土壤中粪肥越多, 所提供分解的底物储备量也越多, 其变化速率就越快.

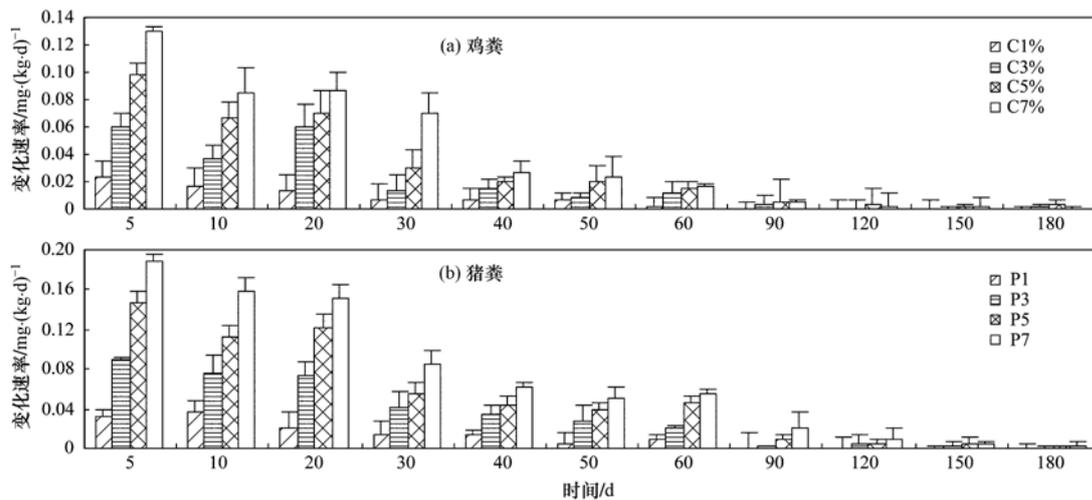


图 2 不同用量鸡粪与猪粪处理土壤中土霉素变化速率的动态变化

Fig. 2 Dynamics of degradation rate of OTC with different application doses of chicken and pig manures in soil

### 2.3 土霉素在土壤中含量减少途径的分析

由图 3 可以看出, 土霉素进入土壤 50 d 可分解 60.67%, 20 d 后减少率基本稳定, 经过避光处理后, 减少率明显下降, 显著低于光照处理. 在 50 d 时, 未灭菌避光处理的减少率比未灭菌光照处理降低了 11.15%, 说明光照会促进 OTC 在土壤中降解; 除去光照的因素, 灭菌避光处理的减少率比未灭菌避光处理降低了 1.85%, 说明微生物也能促进 OTC 在土壤中降解, 但作用不明显; 灭菌避光处理的减少率为 46.63%, 说明除微生物和光照降解作用外, 其他作用对土壤中 OTC 的作用最大.

如图 4 所示, 在本实验条件下, 在培养 50 d 时,

其他作用减少量占减少总量的 76.81%, 光降解占 20.03%, 微生物降解仅占 3.16%. 微生物降解量占减少总量的比例增加了 2.50%, 其他作用减少量的比例提高了 14.04%, 而光降解量的比例降低了 25.05%. 说明随着培养时间的延长, 土壤微生物降解作用略微增强, 而光降解逐渐减弱, 其他作用引起的土壤中 OTC 含量的减少作用也逐渐增强.

抗生素在环境中的降解一般包括 3 种降解方式: 微生物降解、表面光降解和化学水解. 本实验证明土壤微生物对土壤中 OTC 有降解作用, 但作用很小. 鲍艳宇<sup>[14]</sup>也得出土著微生物对 OTC 在土壤中的降解作用不显著. 张树清等<sup>[35]</sup>指出外源添加有益

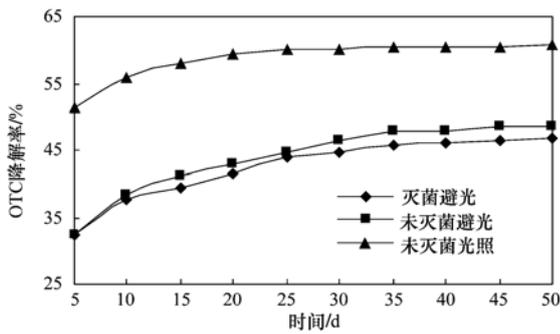


图3 不同条件下 OTC 在土壤中的降解状况

Fig. 3 Degradation of OTC in soil with various treatments

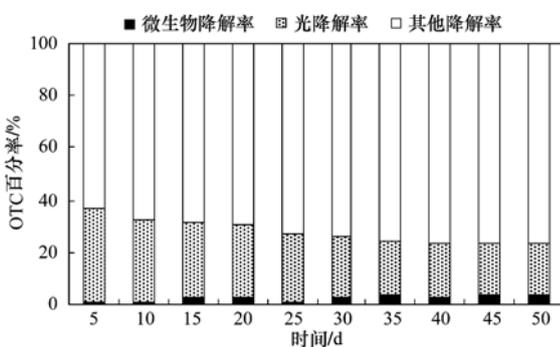


图4 微生物,光照和其他作用引起的含量减少占减少总量的百分比示意

Fig. 4 Percentage of microorganic degradation, photo degradation and other degradation contribute to total reduction

降解菌剂有助于抗生素药物残留的去除. 因此, 随畜禽粪便带入土壤的外源菌可能是促进畜禽粪便中 OTC 在土壤中降解的一个重要原因.

本实验亦说明光照在很大程度上促进了 OTC 在土壤中的降解, 其降解量占到减少总量的 20.03%, 前人也指出 OTC 对阳光敏感, 有光解特性<sup>[29,32]</sup>. 土壤中光降解可能是抗生素非生物学降解重要的途径<sup>[36]</sup>. 并且随着培养时间的延长, 微生物降解作用增强, 光解作用减弱. 虽然四环素类抗生素对微生物数量和土壤酶活性有一定的抑制作用, 但随着时间的延长, 抑制作用会逐渐减弱<sup>[37]</sup>, 微生物作用就会逐渐增强. 抗生素对土壤酶活性的影响也将逐渐减弱<sup>[11]</sup>, 但由于光照很难穿透土壤, 只能作用于土壤表面, 作用效果有限, 且与抗生素的理化性质有关<sup>[22]</sup>. 土霉素属于四环素类抗生素 TCs, 是由放线菌属产生的一类氢化并四苯环衍生物. TCs 母核由 A、B、C、D 4 个环组成, 主要官能团包括 C4 位的二甲氨基、C2 位的酰胺基、C10 位的酚羟基等, 在避光条件下这些基团破坏很少. 以往的兽药机制研

究也证明, TCs 不稳定的 A 环手性原子 C4 和 C 环 C6 的羟基易发生差向异构和降解反应<sup>[38]</sup>. 所以光照对 OTC 的降解虽有一定促进的作用, 但降解作用有限.

### 3 结论

(1) 鸡粪与猪粪中所含土霉素进入土壤后含量的动态变化均呈现出培养前期迅速下降, 后期逐渐平稳的趋势. 鸡粪中土霉素的变化幅度小于猪粪, 且高用量大于低用量. 畜禽粪便中土霉素对土壤影响主要发生在粪肥进入土壤的初期, 随着时间的增加, 影响逐渐减弱.

(2) 鸡粪处理土壤中土霉素比猪粪处理更快进入降解期, 等量鸡粪处理的降解率高于猪粪处理, 但降解速率小于猪粪处理. 180 d 时鸡粪中土霉素在土壤中的平均半衰期小于猪粪处理, 最终含量较低.

(3) 在一定范围内, 低用量处理的降解效果明显好于高用量处理, 猪粪与鸡粪中所含土霉素在土壤中的降解率随施入量的增加而减少, 高用量抑制其降解; 随培养时间的延长而增加, 可用  $v = A + B \ln t$  回归方程较好拟合 ( $r > 0.96$ ).

(4) 光照对土壤中土霉素有一定的降解作用, 而土壤微生物的降解作用很小. 随着时间的延长, 微生物降解作用略微增强, 光降解作用减弱.

### 参考文献:

- [1] Cheng G, Karthikeyan K G. Interaction of tetracycline with aluminum and iron hydrous oxides [J]. *Environmental Science and Technology*, 2005, **39**(8): 2660-2667.
- [2] 鲍艳宇, 周启星, 张浩. 阳离子类型对土霉素在 2 种土壤中吸附-解吸影响 [J]. *环境科学*, 2009, **30**(2): 551-556.
- [3] Ingerslev F, Halling-Sørensen B. Biodegradability of metronidazole, olaquinox, and tylosin and formation of tylosin degradation products in aerobic soil-manure slurries [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2001, **48**(3): 311-320.
- [4] Kümmerer K, Henninger A. Promoting resistance by the emission of antibiotics from hospitals and households into effluent [J]. *Clinical Microbiology and Infection*, 2003, **9**(12): 1203-1214.
- [5] Halling-Sørensen B, Nielsen S N, Lansky P F, et al. Occurrence, fate and effects of pharmaceutical substances in the environment; a review [J]. *Chemosphere*, 1998, **36**(2): 357-393.
- [6] Thiele-bruhn S. Pharmaceutical antibiotic compounds in soils: a review [J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2003, **166**(2): 145-167.
- [7] De Liguoro M, Cibin V, Capolongo F, et al. Use of oxytetracycline and tylosin in intensive calf farming: evaluation of

- transfer to manure and soil [J]. *Chemosphere*, 2003, **52**(1): 203-212.
- [ 8 ] Díaz-cruz M S, López De Alda M J, Barceló D. Environmental behavior and analysis of veterinary and human drugs in soils, sediments and sludge [J]. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 2003, **22**(6): 340-350.
- [ 9 ] 周启星, 罗义, 王美娥. 抗生素的环境残留、生态毒性及抗性基因污染 [J]. *生态毒理学报*, 2007, **2**(3): 243-251.
- [ 10 ] Jemba P K. The potential impact of veterinary and human therapeutic agents in manure and biosolids on plants grown on arable land: a review [J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2002, **1918**: 1-12.
- [ 11 ] 姚志鹏, 李兆君, 梁永超, 等. 土壤酶活性对土壤中土霉素的动态响应 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2009, **15**(3): 696-700.
- [ 12 ] Pankaj K, Rossman F G Jr, Diana S A. Investigating the molecular interactions of oxytetracycline in clay and organic matter: insights on factors affecting its mobility in soil [J]. *Environmental Science and Technology*, 2004, **38**(15): 4097-4105.
- [ 13 ] Halling-Sørensen B. Algal toxicity of antibacterial agents used in intensive farming [J]. *Chemosphere*, 2000, **40**(7): 731-739.
- [ 14 ] 鲍艳宇. 四环素类抗生素在土壤中的环境行为及生态毒性研究 [D]. 天津: 南开大学, 2008.
- [ 15 ] 王冉, 刘铁铮, 王恬. 抗生素在环境中的转归及其生态毒性 [J]. *生态学报*, 2006, **26**(1): 265-270.
- [ 16 ] 张慧敏, 章明奎, 顾国平. 浙北地区畜禽粪便和农田土壤中四环素类抗生素残留 [J]. *生态与农村环境学报*, 2008, **24**(3): 69-73.
- [ 17 ] De Liguoro M, Cibin V, Capolongo F, *et al.* Use of oxytetracycline and tylosin in intensive calf farming: evaluation of transfer to manure and soil [J]. *Chemosphere*, 2003, **52**(1): 203-212.
- [ 18 ] Hamscher G, Sczesny S, Höper H, *et al.* Determination of persistent tetracycline residues in soil fertilized with liquid manure by high-performance liquid chromatography with electrospray ionization tandem mass spectrometry [J]. *Analytical Chemistry*, 2002, **74**(7): 1509-1518.
- [ 19 ] 张树清, 张夫道, 刘秀梅, 等. 规模化养殖畜禽粪主要有害成分测定分析研究 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2005, **11**(6): 822-829.
- [ 20 ] 刘锋, 陶然, 应光国, 等. 抗生素的环境归宿与生态效应研究进展 [J]. *生态学报*, 2010, **30**(16): 4503-4519.
- [ 21 ] 李彦文, 莫测辉, 赵娜, 等. 菜地土壤中磺胺类和四环素类抗生素污染特征研究 [J]. *环境科学*, 2009, **30**(6): 1762-1766.
- [ 22 ] Oka H, Ito Y, Matsumoto H. Chromatographic analysis of tetracycline antibiotics in foods [J]. *Journal of Chromatography A*, 2000, **882**(1-2): 109-133.
- [ 23 ] 鲍艳宇, 周启星, 万莹, 等. 土壤有机质对土霉素在土壤中吸附-解吸的影响 [J]. *中国环境科学*, 2009, **29**(6): 651-655.
- [ 24 ] 鲍艳宇, 周启星, 万莹, 等. 3种四环素类抗生素在褐土上的吸附和解吸 [J]. *中国环境科学*, 2010, **30**(10): 1383-1388.
- [ 25 ] 万莹, 鲍艳宇, 周启星. 四环素在土壤中的吸附与解吸以及镉在其中的影响 [J]. *农业环境科学学报*, 2010, **29**(1): 85-90.
- [ 26 ] 姚志鹏. 土霉素的微生态效应及其在土壤环境中的降解特征研究 [D]. 北京: 中国农业科学院, 2008.
- [ 27 ] 汤玮婧, 杨清香. 土霉素对土壤微生物活性及群落的影响 [J]. *湖北农业科学*, 2009, **48**(1): 70-73.
- [ 28 ] 王丽平, 章明奎. 土霉素污染对土壤生物学性质影响的初步研究 [J]. *农业环境科学学报*, 2009, **28**(7): 1434-1438.
- [ 29 ] 匡光伟, 孙志良, 陈小军, 等. 四环素类抗菌药物在鸡粪中的降解研究 [J]. *农业环境科学学报*, 2007, **26**(5): 1784-1788.
- [ 30 ] 孙刚, 袁守军, 彭书传, 等. 固相萃取-高效液相色谱法测定畜禽粪便中的土霉素、金霉素和四环素 [J]. *环境化学*, 2010, **29**(4): 739-742.
- [ 31 ] 沈颖, 魏源送, 郑嘉熹, 等. 猪粪中四环素类抗生素残留物的生物降解 [J]. *过程工程学报*, 2009, **9**(5): 963-968.
- [ 32 ] 李玲玲, 黄利东, 霍嘉恒, 等. 土壤和堆肥中四环素类抗生素的检测方法优化及其在土壤中的降解研究 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2010, **16**(5): 1176-1182.
- [ 33 ] 胡献刚, 罗义, 周启星, 等. 固相萃取-高效液相色谱法测定畜牧粪便中13种抗生素药物残留 [J]. *分析化学*, 2008, **36**(9): 1162-1166.
- [ 34 ] Boles S, Alonso C, Pro J, *et al.* Toxicity of the antimicrobial oxytetracycline to soil organisms in a multi-species-soil system (MS·3) and influence of manure co-addition [J]. *Journal of Hazard Materials*, 2005, **122**(2): 233-241.
- [ 35 ] 张树清, 张夫道, 刘秀梅, 等. 高温堆肥对畜禽粪中抗生素降解和重金属钝化的作用 [J]. *中国农业科学*, 2006, **39**(2): 337-343.
- [ 36 ] Søeborg T, Ingerslev F, Halling-Sørensen B. Chemical stability of chlortetracycline and chlortetracycline degradation products and epimers in soil interstitial water [J]. *Chemosphere*, 2004, **57**(10): 1515-1524.
- [ 37 ] 汪勇, 林先贵, 王一明, 等. 长期施用粪肥对农田土壤中细菌四环素抗性水平的影响 [J]. *安徽农业科学*, 2008, **36**(14): 5944-5945, 5947.
- [ 38 ] 李俊锁, 邱月明, 王超. 兽药残留分析 [M]. 上海: 上海科学技术出版社, 2002.

## CONTENTS

Air Pollutant Emissions of Aircraft in China in Recent 30 Years .....	HE Ji-cheng ( 1 )
Study on the <i>in-situ</i> Measurement of Atmospheric CH <sub>4</sub> and CO by GC-FID Method at the Shangdianzi GAW Regional Station .....	WANG Wei, ZHOU Ling-xi, FANG Shuang-xi, <i>et al.</i> ( 8 )
Reconstructed Ambient Light Extinction Coefficient and Its Contribution Factors in Beijing in January, 2010 .....	ZHU Li-hua, TAO Jun, CHEN Zhong-ming, <i>et al.</i> ( 13 )
Atmospheric Deposition of Polychlorinated Naphthalenes in Dongjiang River Basin of Guangdong Province .....	WANG Yan, LI Jun, LIU Xiang, <i>et al.</i> ( 20 )
Metabolic Characteristics of Air Microbial Communities from Sandstorm Source Areas of the Taklamakan Desert .....	DUAN Wei-wei, LOU Kai, ZENG Jun, <i>et al.</i> ( 26 )
Mechanisms of UV Photodegradation on Performance of a Subsequent Biofilter Treating Gaseous Chlorobenzene .....	WANG Can, XI Jin-ying, HU Hong-ying, <i>et al.</i> ( 32 )
Distribution of Dissolved Organic Carbon in the Bohai Sea and Yellow Sea in Spring .....	DING Yan-yan, ZHANG Chuan-song, SHI Xiao-yong, <i>et al.</i> ( 37 )
Research on the Mercury Species in Jiaozhou Bay in Spring .....	XU Liao-qi, LIU Ru-hai, WANG Jin-yu, <i>et al.</i> ( 42 )
Geochemistry of Surface and Ground Water in the Lijiang Basin, Northwest Yunnan .....	PU Tao, HE Yuan-qing, ZHU Guo-feng, <i>et al.</i> ( 48 )
Variations in Depth and Chemistry of Groundwater in Interval of Water Delivery at the Lower Tarim River .....	CHEN Yong-jin, LI Wei-hong, DONG Jie, <i>et al.</i> ( 55 )
Simulation on Contamination Forecast and Control of Groundwater in a Certain Hazardous Waste Landfill .....	MA Zhi-fei, AN Da, JIANG Yong-hai, <i>et al.</i> ( 64 )
Research on Evaluation of Water Quality of Beijing Urban Stormwater Runoff .....	HOU Pei-qiang, REN Yu-fen, WANG Xiao-ke, <i>et al.</i> ( 71 )
Characterization and Source Apportionment of Pollutants in Urban Roadway Runoff in Chongqing .....	ZHANG Qian-qian, WANG Xiao-ke, HAO Li-ling, <i>et al.</i> ( 76 )
Applied Study of the Submerged Macrophytes Bed-Immobilized Bacteria in Drinking Water Restoration .....	CHEN Qi-chun, LI Zheng-kui, WANG Yi-chao, <i>et al.</i> ( 83 )
Catalytic Hydrodechlorination of 2,4-Dichlorophenol over Pd/TiO <sub>2</sub> .....	ZHANG Yin, SHAO Yun, CHEN Huan, <i>et al.</i> ( 88 )
Effects of pH Value on the Adsorption and Degradation of 2,4-DCP by Nanoscale Zero-Valent Iron .....	FENG Li, GE Xiao-peng, WANG Dong-sheng, <i>et al.</i> ( 94 )
Inactivation of the Chlorine-resistant Bacteria Isolated from the Drinking Water Distribution System .....	CHEN Yu-qiao, DUAN Xiao-di, LU Pin-pin, <i>et al.</i> ( 104 )
Risk Assessment of the Farmland and Water Contamination with the Livestock Manure in Anhui Province .....	SONG Da-ping, ZHUANG Da-fang, CHEN Wei ( 110 )
Analysis of Membrane Fouling Genesis in Nanofiltration Process for Advanced Treatment of Dyeing and Finishing Wastewater .....	CAO Xiao-bing, LI Tao, ZHOU Lü, <i>et al.</i> ( 117 )
Experimental Research on Combined Water and Air Backwashing Reactor Technology for Biological Activated Carbon .....	XIE Zhi-gang, QIU Xue-min, ZHAO Yan-ling ( 124 )
Impacts of pH and Surfactants on Adsorption Behaviors of Norfloxacin on Marine Sediments .....	PANG Hui-ling, YANG Gui-peng, GAO Xian-chi, <i>et al.</i> ( 129 )
Adsorption Characteristic and Form Distribution of Silicate in Lakes Sediments .....	LÜ Chang-wei, CUI Meng, GAO Ji-mei, <i>et al.</i> ( 135 )
Adsorption of Methylene Blue from Water by the Biochars Generated from Crop Residues .....	XU Ren-kou, ZHAO An-zhen, XIAO Shuang-cheng, <i>et al.</i> ( 142 )
Adsorption and Desorption of Dyes by Waste-Polymer-Derived Activated Carbons .....	LIAN Fei, LIU Chang, LI Guo-guang, <i>et al.</i> ( 147 )
Study on the Sorption Behavior of Tetracycline onto Activated Sludge .....	CHEN Rui-ping, ZHANG Li, YU Jie, <i>et al.</i> ( 156 )
<i>In situ</i> Experimental Research on Natural Attenuation of Oil Pollutants in a Gas Station .....	JIA Hui, WU Xiao-feng, HU Li-ming, <i>et al.</i> ( 163 )
Influence and Assessment of Biochar on the Bioavailability of Chlorobenzenes in Soil .....	SONG Yang, WANG Fang, YANG Xing-lun, <i>et al.</i> ( 169 )
Control for MUCT Process Operation Using Nitrate Concentration in the Secondary Anoxic Zone .....	WANG Xiao-ling, YIN Jun, GAO Shang ( 175 )
Modeling Formation of Aerobic Granule and Influence of Hydrodynamic Shear Forces on Granule Diameter .....	DONG Feng, ZHANG Han-min, YANG Feng-lin ( 181 )
Effect of Different Sludge Retention Time (SRT) on Municipal Sewage Sludge Bioleaching Continuous Plug Flow Reaction System .....	LIU Fen-wu, ZHOU Li-xiang, ZHOU Jun, <i>et al.</i> ( 191 )
Biological Phosphorus Removal in Intermittent Aerated Biological Filter .....	ZENG Long-yun, YANG Chun-ping, GUO Jun-yuan, <i>et al.</i> ( 197 )
Methane Production by Anaerobic Co-digestion of Chicken Manure and <i>Spartina alterniflora</i> Residue After Producing Methane .....	CHEN Guang-yin, CHANG Zhi-zhou, YE Xiao-mei, <i>et al.</i> ( 203 )
Uncertainty Analysis for Evaluating Methane Emissions from Municipal Solid Waste Landfill in Beijing .....	CHEN Cao-cao, LIU Chun-lan, LI Zheng, <i>et al.</i> ( 208 )
Electricity Generation of Surplus Sludge Microbial Fuel Cells Enhanced by Additional Enzyme .....	YANG Hui, LIU Zhi-hua, LI Xiao-ming, <i>et al.</i> ( 216 )
Construction of Electrochemiluminescence System for Harmful Algae Detection .....	ZHU Xia, ZHEN Yu, MI Tie-zhu, <i>et al.</i> ( 222 )
Mechanism of the Inhibitory Action of Allelochemical Dibutyl Phthalate on Algae <i>Gymnodinium breve</i> .....	BIE Cong-cong, LI Feng-min, WANG Yi-fei, <i>et al.</i> ( 228 )
Toxic Effects of Nano-TiO <sub>2</sub> on <i>Gymnodinium breve</i> .....	LI Feng-min, ZHAO Wei, LI Yuan-yuan, <i>et al.</i> ( 233 )
Spatial Distribution of Three Endocrine Disrupting Chemicals in Sediments of the Suzhou Creek and Their Environmental Risks .....	LI Yang, HU Xue-feng, OH Kokyo, <i>et al.</i> ( 239 )
Level, Distribution, and Source Identification of Polychlorinated Naphthalenes in Surface Agricultural Soils from an Electronic Waste Recycling Area .....	WANG Xue-tong, JIA Jin-pan, LI Yuan-cheng, <i>et al.</i> ( 247 )
Heavy Metal Pollution in Street Dusts from Different Functional Zones of Luoyang City and Its Potential Ecological Risk .....	LIU De-hong, WANG Fa-yuan, ZHOU Wen-li, <i>et al.</i> ( 253 )
Soil Contamination and Assessment of Heavy Metals of Xiangjiang River Basin .....	LIU Chun-zao, HUANG Yi-zong, LEI Ming, <i>et al.</i> ( 260 )
Characteristics of Heavy Metals in Soil Profile and Pore Water Around Hechi Antimony-Lead Smelter, Guangxi, China .....	XIANG Meng, ZHANG Guo-ping, LI Ling, <i>et al.</i> ( 266 )
Speciation Transformation and Behavior of Arsenic in Soils Under Anoxic Conditions .....	WU Xi, XU Li-ying, ZHANG Xue-xia, <i>et al.</i> ( 273 )
Remediation of Chromium(VI) Contaminated Soils Using Permeable Reactive Composite Electrodes Technology .....	FU Rong-bing, LIU Fang, MA Jin, <i>et al.</i> ( 280 )
Determination and Characterization on the Capacity of Humic Acid for the Reduction of Divalent Mercury .....	JIANG Tao, WEI Shi-qiang, LI Xue-mei, <i>et al.</i> ( 286 )
Effect of Zn ( II ) on Microbial Activity in Anaerobic Acid Mine Drainage Treatment System with Biomass as Carbon Source .....	LI Shao-jie, CHEN Tian-hu, ZHOU Yue-fei, <i>et al.</i> ( 293 )
Diversity of Culturable Butane-oxidizing Bacteria in Oil and Gas Field Soil .....	ZHANG Ying, LI Bao-zhen, YANG Jin-shui, <i>et al.</i> ( 299 )
Microbial Community Structure Analysis of Unexploited Oil and Gas Fields by PCR-DGGE .....	MAN Peng, QI Hong-yan, HU Qing, <i>et al.</i> ( 305 )
Community Diversity of Bacteria and Arbuscular Mycorrhizal Fungi in the Rhizosphere of Eight Plants in Liudaogou Watershed on the Loess Plateau China .....	FENG Ye, TANG Ming, CHEN Hui, <i>et al.</i> ( 314 )
Dynamics of Degradation of Oxytetracycline of Pig and Chicken Manures in Soil and Mechanism Investigation .....	ZHANG Jian, GUAN Lian-zhu, YAN Li ( 323 )
Influence of Impurities on Waste Plastics Pyrolysis: Products and Emissions .....	ZHAO Lei, WANG Zhong-hui, CHEN De-zhen, <i>et al.</i> ( 329 )

# 《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1月15日 33卷 第1期

## ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 33 No. 1 Jan. 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

国内外公开发刊