

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第34卷 第2期

Vol.34 No.2

2013

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

16 届亚运会期间广州城区 PM _{2.5} 化学组分特征及其对霾天气的影响	陶俊, 柴发合, 高健, 曹军骥, 刘随心, 张仁健 (409)
北京地区秋季雾霾天 PM _{2.5} 污染与气溶胶光学特征分析	赵秀娟, 蒲维维, 孟伟, 马志强, 董璠, 何迪 (416)
上海市秋季大气 VOCs 对二次有机气溶胶的生成贡献及来源研究	王倩, 陈长虹, 王红丽, 周敏, 楼晟荣, 乔利平, 黄成, 李莉, 苏雷燕, 牟莹莹, 陈宜然, 陈明华 (424)
杭州市大气超细颗粒物浓度谱季节性特征	谢小芳, 孙在, 付志民, 杨文俊, 林建忠 (434)
保定市大气气溶胶中正构烷烃的污染水平及来源识别	李杏茹, 杜熙强, 王英锋, 王跃思 (441)
春节期间西安城区碳气溶胶污染特征研究	周变红, 张承中, 王格慧 (448)
华东区域高山背景点 PM ₁₀ 和 PM _{2.5} 背景值及污染特征	苏彬彬, 刘心东, 陶俊 (455)
基于电子鼻土壤与地下水污染修复现场 TVOC 和恶臭的评估	田秀英, 蔡强, 刘锐, 张永明 (462)
积融雪控制下土壤大气间汞交换通量特征	张刚, 王宁, 艾建超, 张蕾, 杨净, 刘子琪 (468)
靖海湾重金属污染及铅稳定同位素溯源研究	徐林波, 高勤峰, 董双林, 刘佳, 傅秀娟 (476)
正构烷烃及单体碳同位素记录的石臼湖生态环境演变研究	欧杰, 王延华, 杨浩, 胡建芳, 陈霞, 邹军, 谢云 (484)
干旱区城市昌吉降雪及积雪中 PGEs 含量分布及其影响因素	刘玉燕, 刘浩峰, 张兰 (494)
降尘收集方法对降尘效率的影响	张正偲, 董治宝 (499)
海河流域水生生态功能一级二级分区	孙然好, 汲玉河, 尚林源, 张海萍, 陈利顶 (509)
长江中下游浅水湖泊水下辐照度漫射衰减特征研究	时志强, 张运林, 王明珠, 刘笑茵 (517)
内陆水体叶绿素反演模型普适性及其影响因素研究	黄昌春, 李云梅, 徐良将, 杨浩, 吕恒, 陈霞, 王延华 (525)
溶氧对富集培养的河口湿地表层沉积物氨氧化菌多样性及氨氧化速率的影响	邱昭政, 罗专溪, 赵艳玲, 颜昌宙 (532)
自然条件下盐城海滨湿地土壤水分/盐度空间分异及其与植被关系研究	张华兵, 刘红玉, 李玉凤, 安静, 薛星宇, 侯明行 (540)
淮河流域农业非点源污染空间特征解析及分类控制	周亮, 徐建刚, 孙东琪, 倪天华 (547)
高岚河不同降雨径流类型磷素输出特征	崔玉洁, 刘德富, 宋林旭, 陈玲, 肖尚斌, 向坤, 张涛 (555)
城市雨水径流水质演变过程监测与分析	董雯, 李怀恩, 李家科 (561)
复合人工湿地系统强化处理单元的运行特性与效果	任峰, 陆忆夏, 刘琴, 汤杨杨, 王世和, 高海鹰, 乔红杰, 王为进 (570)
给水管网中耐氯分枝杆菌的灭活特性及机制研究	郑琦, 陈超, 张晓健, 陆品品, 刘源源, 陈雨乔 (576)
1 株溶藻菌的部分生物学特性及溶鱼腥藻作用	李三华, 张奇亚 (583)
水生植物热解生物油中对肋骨藻抗氧化酶活性的影响	姚远, 李锋民, 李媛媛, 单时, 李杰, 王震宇 (589)
TiO ₂ 光催化联合技术降解苯酚机制及动力学	张轶, 黄若男, 王晓敏, 王齐, 丛燕青 (596)
皮革废水有机污染物生物降解特性研究	王勇, 李伟光, 杨力, 宿程远 (604)
链霉菌 FX645 对偶氮染料红 AR30 的降解机制研究	谢练武, 方继前, 郭亚平 (611)
一种负载型生物载体的制备及性能研究	杨基先, 曾红云, 周义, 邱珊, 马放, 王蕾, 肖大伟 (616)
基于污泥资源化利用的蛋白核小球藻 (<i>Chlorella pyrenoidosa</i>) 培养研究	嵇雯雯, 夏会龙, 方治国, 刘惠君 (622)
温和热处理对低有机质污泥厌氧消化性能的影响	陈汉龙, 严媛媛, 何群彪, 戴晓虎, 周琪 (629)
天然和水热合成针铁矿对有机物厌氧分解释放 CH ₄ 的影响	姚敦璠, 陈天虎, 王进, 周飞跃, 岳正波 (635)
蚀刻废液及其回收后生产的铜盐产品中 PCDD/Fs 含量水平及分布特征	青宪, 韩静磊, 温炎桑 (642)
基于特定场地污染概念模型的健康风险评估案例研究	钟茂生, 姜林, 姚珏君, 夏天翔, 朱笑盈, 韩丹, 张丽娜 (647)
区域地下水污染风险评价方法研究	杨彦, 于云江, 王宗庆, 李定龙, 孙宏伟 (653)
地下水有机污染源识别技术体系研究与示范	王晓红, 魏加华, 成志能, 刘培斌, 纪轶群, 张干 (662)
祁连山不同海拔土壤有机碳库及分解特征研究	朱凌宇, 潘剑君, 张威 (668)
黑土有机碳、氮及其活性对长期施肥的响应	骆坤, 胡荣桂, 张文菊, 周宝库, 徐明岗, 张敬业, 夏平 (676)
根茬连续还田对镉污染农田土壤中镉赋存形态和生物有效性的影响	张晶, 于玲玲, 辛木贞, 苏德纯 (685)
长期施肥措施下稻田土壤有机质稳定性研究	罗璐, 周萍, 童成立, 石辉, 吴金水, 黄铁平 (692)
外源 Cr(Ⅲ) 在我国 22 种典型土壤中的老化特征及关键影响因子研究	郑顺安, 郑向群, 李晓辰, 刘书田, 姚秀荣 (698)
某林丹生产企业搬迁遗留场地土壤中六六六的残留特征	潘峰, 王利利, 赵浩, 尤奇中, 刘林 (705)
大型炼锌厂周边土壤及蔬菜的汞污染评价及来源分析	刘芳, 王书肖, 吴清茹, 林海 (712)
天津成人头发指甲中有机氟污染物的残留特征	姚丹, 张鸿, 柴之芳, 沈金灿, 杨波, 王艳萍, 刘国卿 (718)
沉积物中雌激素及壬基酚、辛基酚、双酚 A 的测定	吴唯, 史江红, 陈庆彩, 张晖, 刘晓薇 (724)
动物饲料中砷、铜和锌调查及分析	姚丽贤, 黄连喜, 蒋宗勇, 何兆桓, 周昌敏, 李国良 (732)
氟虫双酰胺在水稻和稻田中的残留动态研究	王点点, 宋宁慧, 吴文铸, 由宗政, 何健, 石利利 (740)
2 株降解菲的植物内生细菌筛选及其降解特性	倪雪, 刘娟, 高彦征, 朱雪竹, 孙凯 (746)
嗜盐拟香味菌 Y6 降解硝基苯的特性研究	厉阗, 钱坤, 肖伟, 王进军, 邓新平 (753)
固定化条件对苯系物细胞传感器检测效果的影响	唐阔, 马安周, 于清, 邓雪梅, 吕迪, 庄国强 (760)
16S rDNA 克隆文库分析高含盐生物脱硫系统细菌多样性	刘卫国, 梁存珍, 杨金生, 王桂萍, 刘苗苗 (767)
氨氮浓度对 CANON 工艺功能微生物丰度和群落结构的影响	刘涛, 李冬, 曾辉平, 畅晓燕, 张杰 (773)
筒青霉 (<i>Penicillium simplicissimum</i>) 对木质纤维素的降解及相关酶活性特征	沈莹, 胡天觉, 曾光明, 黄丹莲, 尹璐, 刘杨, 吴娟娟, 刘晖 (781)
石油污染土壤微生物群落结构与分布特性研究	杨萌青, 李立明, 李川, 李广贺 (789)
土霉素在鸡粪好氧堆肥过程中的降解及其对相关参数的影响	王桂珍, 李兆君, 张树清, 马晓彤, 梁永超 (795)
生活垃圾填埋过程含水率变化研究	李睿, 刘建国, 薛玉伟, 张媛媛, 岳东北, 聂永丰 (804)
动物消化机制用于木质纤维素的厌氧消化	吴昊, 张盼月, 郭建斌, 吴永杰 (810)
《环境科学》征订启事 (447)	《环境科学》征稿简则 (493)
信息 (508, 588, 610, 731)	专辑征稿通知 (788)

土霉素在鸡粪好氧堆肥过程中的降解及其对相关参数的影响

王桂珍, 李兆君*, 张树清, 马晓彤, 梁永超

(中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 农业部植物营养与施肥重点实验室, 北京 100081)

摘要: 为了探明四环素类抗生素在鸡粪好氧堆肥过程中的降解及其对鸡粪好氧堆肥过程参数的影响, 采用室内好氧堆肥法, 以土霉素为四环素类抗生素模式化合物, 研究了鸡粪好氧堆肥过程中, 不同起始浓度土霉素在鸡粪好氧堆肥过程中的降解及其对堆体温度、pH、发芽指数等指标的影响。结果表明: ①土霉素在鸡粪堆肥初期(0~10 d)降解较快, 随后逐渐减缓。在堆肥开始0~10 d内, 添加浓度为 $25 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 处理组土霉素降解最快, 去除率达67.43%; 添加浓度为 $75 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 处理组土霉素降解最慢, 去除率仅为45.91%。土霉素在各堆肥处理中的降解均符合一级动力学方程, 其相关系数介于0.911 1~0.991 3。②土霉素对鸡粪堆肥过程具有一定的影响。土霉素处理在一定程度上降低了鸡粪堆肥堆体温度升高的速率, 缩短了堆肥高温期的时间。③高浓度($100 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)土霉素处理对鸡粪堆肥过程中pH等指标是有影响的, 堆肥第42 d时, 堆体pH较对照增加4.58%; 堆体TN、WSC分别较对照增加12.62%和49.06%; 堆体 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 较对照增加35.30%。④土霉素能够在一定程度上降低鸡粪堆肥堆体的腐熟度。当土霉素初始添加浓度低于 $50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时, 对腐熟度没有太大影响, 而当土霉素初始浓度 $> 50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 可以显著降低鸡粪堆肥产品的腐熟度, 主要表现为 $\text{NH}_4^+ - \text{N}/\text{NO}_3^- - \text{N} > 0.5$, $\text{GI} < 80\%$ 。结果表明, 尽管土霉素在鸡粪好氧堆肥中可以快速降解, 半衰期仅为1.79~4.88 d, 但当鸡粪中土霉素浓度高于 $50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 即会抑制堆肥过程的顺利进行。

关键词: 土霉素; 鸡粪; 好氧堆肥; 参数; 腐熟度

中图分类号: X713 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2013)02-0795-09

Degradation of Oxytetracycline in Chicken Feces Aerobic-Composting and Its Effects on Their Related Parameters

WANG Gui-zhen, LI Zhao-jun, ZHANG Shu-qing, MA Xiao-tong, LIANG Yong-chao

(Key Laboratory of Plant Nutrition and Fertilizer, Ministry of Agriculture, Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, China Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China)

Abstract: In order to illustrate the degradation of tetracyclines (TCs) and their influences on process parameters during the period of chicken feces aerobic-composting, the degradation of oxytetracycline (OTC), a kind of TCs and its effects on parameters during the period of chick feces aerobic-composting including temperature, pH, and germination index were investigated using the method of aerobic-composting. The contents of OTC decreased gradually with composting time. The degradation rate was high before 10 d, and then decreased gradually. The differences in OTC degradation among the OTC treatments were also found. The degradation rate of OTC was higher at the level of $25 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, than that of other levels. The degradation curve of OTC could be described by the first-order kinetic model, and the correlation coefficients ranged from 0.911 1 to 0.991 3. The impacts of OTC on chick feces composting were found. OTC could decrease the rising rate of composting temperature and make the high temperature ($\geq 50^\circ\text{C}$) period shorter than that of the control. The values of pH, TN, WSC, and the content of $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ of composting were 4.58%, 12.62%, 49.06%, and 35.30% higher than those of the control. The impacts of OTC on maturity of chicken feces composting was not found when the OTC addition contents were lower than $50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$. However, the strong impacts of OTC on maturity of chicken feces composting were found when the OTC addition contents were higher than $50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$. The rates of $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ to $\text{NO}_3^- - \text{N}$, and GI were much higher than 0.5 and lower than 80%, respectively. These results suggest that OTC have strong impacts on chicken feces composting when the contents of TOC was higher than $50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, although OTC have the short half-life period ranged from 1.79-4.88 d.

Key words: oxytetracycline (OTC); chicken feces; aerobic composting; parameters; maturity

近年来, 四环素类抗生素作为人畜共用的广谱性抗生素, 在世界范围内使用量巨大, 且人畜服用四环素类药物后, 很大一部分抗生素以母体或代谢物的形式随尿或粪便排出体外, 其含量约占总用药量的40%~90%^[1]。张树清^[2]测定分析了我国7个省、市、自治区的典型规模化养殖畜禽粪中四环素

类抗生素含量, 土霉素在鸡粪中的平均浓度为5.97

收稿日期: 2012-05-07; 修订日期: 2012-07-13

基金项目: 中国农业科学院院长基金项目(2013-9); 国家自然科学基金项目(40701163)

作者简介: 王桂珍(1988~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为农业环境污染的机制与修复技术, E-mail: wangguizhenxx@163.com

* 通讯联系人, E-mail: zjli@caas.ac.cn

$\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,最高达 $23.43 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,Kumar 等^[3]的研究也表明,抗生素在粪便中的残留是不容忽视的,粪便中的抗生素浓度最高可达 $200 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$.这些未经无害化处理的含有抗生素残留的粪便作为有机肥施于农田,会引起抗生素在土壤环境中累积.Hamscher 等^[4]研究发现,施用动物排泄物的表层土壤中,土霉素残留量高达 $32.3 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,这会对土壤中微生物的群落结构及微生物活性^[5]、耐药性^[6]以及植物的生长产生影响^[7~9].土壤中四环素含量达到 $1.0 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,即可显著抑制土壤脱氢酶和磷酸酶的活性^[10],俞道进等^[11]研究了土霉素残留对模型池塘生态系统代谢的影响, $100 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 用药能够造成系统不可逆性的破坏.由此可见,抗生素残留极易进入环境并对其中的生物产生不利影响.

好氧堆肥是在有氧条件下,好氧菌对畜禽粪便进行吸收、氧化、分解,是目前国内外常用和比较经济且行之有效的成熟的畜禽粪便处理方法^[12,13],在此过程中,微生物在一定程度上通过氧化、还原、水解等生物化学作用,利用微生物代谢过程分解和转化有机污染物.合适的碳氮比、含水率、pH 等因素是微生物快速有效分解利用有机污染物的前提^[14,15].但是随着畜禽粪便中抗生素残留量的增

加,抗生素残留势必会对参与堆肥过程的微生物生长繁殖产生抑制作用,对堆肥过程的物理化学性质产生一定的影响.Wu 等^[16]研究表明,畜禽粪便中残留的抗生素对堆肥过程中 pH 具有一定的影响.Selvam 等^[17]研究也表明,抗生素的添加会对堆肥初期总碳的变化产生一定的抑制作用.郭梦婷等^[18]研究了土霉素对猪粪堆肥过程的影响,然而目前关于土霉素等四环素类抗生素对鸡粪堆肥过程参数等方面的影响的系统性报道还较少,这在一定程度上影响了鸡粪等畜禽粪便的资源化利用.本研究旨在为含有抗生素残留的鸡粪等畜禽粪便资源化和合理农用提供一定的理论依据.

1 材料与方法

1.1 试验装置

堆肥试验在自行设计制造的室内温度-含氧量在线实时监控好氧堆肥系统(专利号:ZL201120027234.7)中完成.

1.2 试验材料

1.2.1 鸡粪

未经发酵的新鲜鸡粪,取自北京市大兴区留民营生态农场.鸡粪取回后风干,并进行基本理化性状及土霉素含量的测定,结果见表 1.

表 1 堆肥原料性质

Table 1 Selected properties of compost materials

堆肥材料	pH	含水量 /%	有机碳 /%	全氮 /%	C/N	土霉素(以干基计) / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$
鸡粪	8.05	27.75	25.25	2.26	11.17	3.98
麦秸	—	8.50	48.08	0.41	117.26	—

1.2.2 秸秆

调节堆肥反应物碳氮比的农作物秸秆为小麦秸秆,取自中国农业科学院农业资源与农业区划研究所廊坊试验基地,取回后将秸秆粉碎通过 1 cm 筛,分成两部分,一部分进一步粉碎过筛进行基本理化性质的测定,测定结果见表 1,另一部分用于土霉素的测定.

1.2.3 试验试剂

土霉素(oxytetracycline, OTC)购于美国默克公司,纯度 98.9%,试验过程中所用的其它试剂均为分析纯.

1.2.4 小麦

本研究发芽试验所采用的小麦品种为中麦 12 号,购于中国农业科学院作物科学研究所.

1.3 试验设计及实施

1.3.1 试验设计

设 5 个处理,分别为:①对照,土霉素添加浓度为 $0 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$;②OTC1,堆肥混合物中土霉素的添加浓度为 $25 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$;③OTC2,堆肥混合物中土霉素的添加浓度为 $50 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$;④OTC3,堆肥混合物中土霉素的添加浓度为 $75 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$;⑤OTC4,堆肥混合物中土霉素的添加浓度为 $100 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,每个处理重复 3 次.

1.3.2 试验实施

将适量的粉碎后的小麦秸秆与鸡粪均匀混合,配制成碳氮比为 20~25 的堆肥混合物(质量比为 1:2).将土霉素的水溶液与一定量的堆肥混合物进行充分混匀,制成土霉素含量分别为 0(对照)、25、50、75、 $100 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的堆肥处理混合物.采用蒸馏水调节上述各堆肥处理混合物含水率为 55%,然后

分装于堆肥发酵罐内,每罐装堆肥处理混合物 20.0 kg. 堆肥期间,不再对堆料的含水率进行调节,并采用时间继电器控制鼓风机,为堆体从底部进行间歇式供氧,通风量为 $0.735\text{ L}\cdot(\text{min}\cdot\text{kg})^{-1}$,当堆体温度超过 50°C 每隔 2 h 曝气 15 min,低于 50°C 每隔 4 h 曝气 15 min. 堆肥期间采用温度电极和氧气电极于堆体中部实时在线记录不同处理堆体温度和含氧量的变化,并采用公式[温度抑制率(%)=(对照堆体温度-处理堆体温度)/对照堆体温度 $\times 100$]计算相应的温度抑制率. 分别于堆肥的第 0、1、3、5、10、17、19、24、31、42 d 取样,进行 pH、水溶性物质、铵态氮、硝态氮、有机碳(TOC)、全氮(TN)、发芽指数等的测定. 取样时分别在堆体的上、中、下采集样品,然后将 3 个取样点的样品均匀混合为一个样品.

1.4 测定项目及方法

1.4.1 过程参数

有机碳采用重铬酸钾外源加热法测定;全氮采用(浓硫酸- H_2O_2 消煮)凯氏定氮法测定;含水率采用烘干法测定;pH 和电导率采用无 CO_2 水提取(1:10),电极法测定;水溶性物质采用 1:10 的水浸提,浸提液中的水溶性碳采用 TOC 分析仪测定;铵态氮采用靛酚蓝比色法测定;硝态氮采用酚二磺酸比色法测定^[19];土霉素测定采用文献[20,21]修改后的方法,MCL-Vaine- Na_2EDTA 缓冲液提取,草酸甲醇洗脱,美国安捷伦 1100 型高效液相色谱仪测定.

1.4.2 小麦发芽指数

小麦发芽试验^[22]:堆肥新鲜样品与水按 1:10 (质量比)比例混合振荡 1 h,浸提液在 $4\,500\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 下离心 20 min,上清液经滤纸过滤后待用. 把 2 张直径为 9 cm 的滤纸放入干净无菌的培养皿中,每个培养皿中均匀播入 20 粒饱满露白的小麦种子,用移液枪吸取 10 mL 上述堆肥滤液于培养皿中,同时以超纯水为对照,每个样品重复 3 次. 将所有的培养皿放置于 25°C 培养箱中进行暗培养. 每隔 24 h 记录一次

发芽情况,并计算堆肥浸提液的种子发芽指数^[23].

1.5 数据处理

不同堆肥时期,堆体土霉素含量数据用一级动力学方程 $c = c_0 e^{-Kt}$ 进行拟合,式中, c 为时间 $t(\text{d})$ 时残留的土霉素浓度($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$), c_0 为起始土霉素浓度($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$), K 为降解速率常数(d^{-1}), t 为时间(d). 根据公式 $T_{1/2} = 0.693/K$ 计算堆肥过程中土霉素的半衰期, $T_{1/2}$ 为半衰期(d).

试验所获得的其它数据采用 Microsoft Excel 2003 软件处理,统计检验采用 SPSS 16.0 软件处理,采用 Origin 8.0 软件做图.

2 结果与分析

2.1 土霉素在鸡粪堆肥过程中的降解

不同处理堆体土霉素含量变化如图 1 所示. 从中可知,各个处理堆体土霉素的降解情况是不同的. 在堆肥初期,土霉素降解较为明显,随着堆肥时间的延长,不同处理堆体土霉素残留的去除率均有很大程度的降低. 堆肥初期(0~10 d),其去除率的大小顺序为: $25\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1} > 50\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1} > 100\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1} > 75\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 堆肥处理组,各自的去除率分别为:67.43%、66.36%、62.12% 和 45.91%. 堆肥后期(24~42 d),各处理组土霉素降解效率均降低,25、50、75 和 $100\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 各处理组土霉素去除率分别为:21.35%、4.84%、1.68% 和 3.96%. 各处理组堆体土霉素降解均可用一级方程式进行拟合(表 2),相关系数介于 0.911 1~0.991 3. 在整个堆肥过程中,不同堆肥处理组土霉素的降解速率快慢的顺序为 $100\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1} > 50\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1} > 25\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1} > 75\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. 如 $75\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 堆肥处理组的降解半衰期为 4.88 d,而 $100\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 堆肥处理组的降解半衰期最低为 1.79 d.

2.2 土霉素对堆肥过程中工艺参数的影响

2.2.1 堆体温度

不同处理堆体温度变化如图2所示,从中可知,

表 2 堆肥过程中土霉素的降解参数和降解半衰期
Table 2 Degradation parameter and half-life period of OTC during the period of composting

土霉素添加水平 / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	降解动力方程	降解常数 K/d^{-1}	相关系数 R	半衰期 $T_{1/2}/\text{d}$
0	$c = 4.608\,9e^{-0.144\,41t} + 1.809\,1$	0.144 4	0.911 1	4.79
25	$c = 18.123\,2e^{-0.176\,3t} + 6.974\,7$	0.176 3	0.950 3	3.93
50	$c = 35.739\,4e^{-0.296\,5t} + 13.341\,2$	0.296 5	0.978 8	2.33
75	$c = 38.943\,8e^{-0.141\,9t} + 23.387\,4$	0.141 9	0.991 3	4.88
100	$c = 78.292\,1e^{-0.386\,2t} + 28.911\,3$	0.386 2	0.957 7	1.79

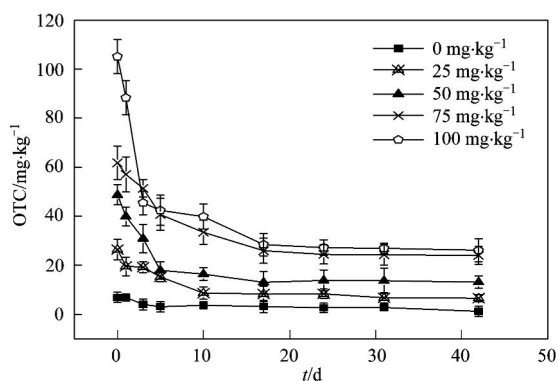


图1 不同添加浓度土霉素在鸡粪堆肥中的降解

Fig. 1 Degradation of OTC in chicken feces composting at the different added levels

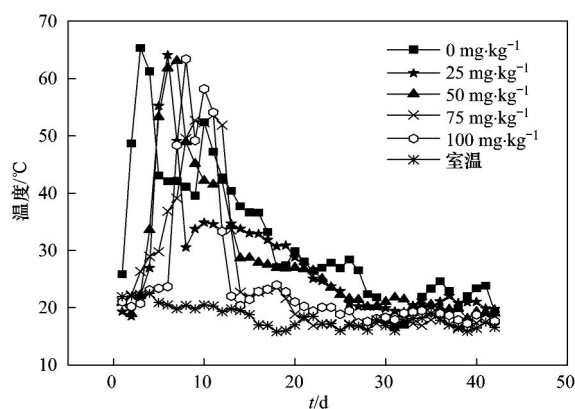


图2 土霉素对鸡粪堆肥温度的影响

Fig. 2 Effects of OTC on composting temperature

环境温度在整个堆肥过程中变化幅度较小,基本维持在20℃左右.添加土霉素处理堆体温度的变化是不同的.如未添加土霉素的对照处理堆体温度在第3 d即上升到了65.3℃,随后温度有所下降,于第10 d时再次升高,随后慢慢下降至室温.添加土霉素处理的堆体尽管温度也会上升至55℃以上,但是到达高温的时间有所延长,且没有第二次温度高峰的出现.添加土霉素浓度为75 mg·kg⁻¹处理的堆体到达最高温55.6℃的时间为堆肥的第10 d,与对照处理堆体相比,延后了7 d.土霉素明显促进了各处理堆体的温度下降速度,与未添加土霉素的对照处理堆体相比,土霉素添加浓度分别为25、50、75和100 mg·kg⁻¹处理堆体温度下降时间分别缩短7.1%、28.6%、71.4%和64.3%,差异显著.堆肥第20 d后,各土霉素处理堆体温度明显低于对照处理,如堆肥第27 d,土霉素添加浓度分别为25、50、75和100 mg·kg⁻¹处理堆体温度分别为20.2、21.4、16.9、17.3℃,较对照堆体温度26.5℃分别

降低23.7%、19.2%、36.3%和34.6%,差异显著.

2.2.2 堆体 pH

土霉素对鸡粪堆肥过程中堆体 pH 值的影响见图3.从中可知,在整个堆肥过程中,各处理组的堆肥堆体 pH 值均呈现先上升后逐渐降低的趋势,但不同处理的堆肥堆体 pH 值上升和下降的幅度不同.堆肥第1 d,未添加土霉素的对照处理,堆肥堆体 pH 值由初始的7.76迅速升高至9.05,而后在堆肥第5 d下降至8.39,随后又逐渐上升,在堆肥第10 d堆体 pH 值上升至8.90,而后堆体 pH 值于堆肥第17 d开始逐渐下降,最后稳定在8.29.土霉素处理的堆肥堆体 pH 值上升速度与对照处理堆体相比明显减缓,堆体 pH 值于堆肥第10 d才上升至最高值(8.86~9.04),然后逐渐降低,但是降低的速度明显缓于对照处理.在堆肥第42 d,浓度为100 mg·kg⁻¹的土霉素处理堆肥堆体 pH 值平均值为8.68,与对照处理堆肥堆体 pH 相比,升高4.58%,差异显著.

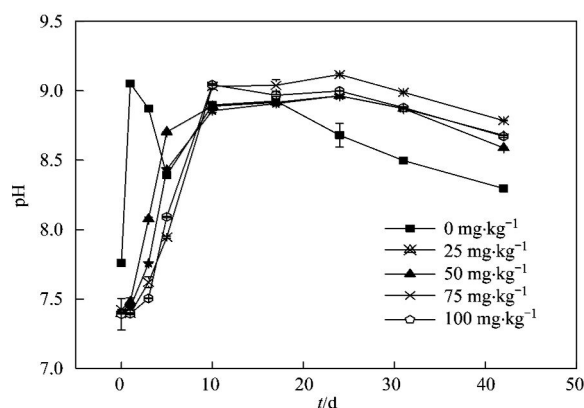


图3 土霉素对鸡粪堆肥过程中堆体 pH 的影响

Fig. 3 Effects of OTC on pH values in chicken feces composting

2.3 土霉素对堆肥过程中部分生化参数的影响

2.3.1 堆体总有机碳(TOC)、全氮(TN)

土霉素对鸡粪堆肥过程中堆体 TOC、TN 的影响见图4.由图4(a)可知,在整个堆肥过程中,随着堆体有机质不断分解,各处理鸡粪堆肥过程中堆体 TOC 值均呈逐渐降低的趋势,前期下降的速度快于后期.添加土霉素处理的鸡粪堆肥过程中堆体 TOC 含量下降速度明显缓于对照处理,且在堆肥第24 d后,堆体 TOC 含量明显高于对照处理(土霉素添加含量为25 mg·kg⁻¹处理除外).如在堆肥第3~10 d,5个处理堆体的 TOC 值出现了大幅度的降低.但是在堆肥的第17 d,土霉素处理组堆体 TOC 值下降速度变慢,堆体 TOC 含量明显高于对照处理.堆肥第24 d,土霉素添加浓度分别为50、75、100

$\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 处理堆体 TOC 含量分别为 33.27%、32.99% 和 35.26%, 较对照堆体 TOC 含量分别增加 7.01%、6.11% 和 13.41%, 差异均达显著水平。堆肥后期, 堆体 TOC 含量逐渐下降并保持在一个相对稳定的状态, 最终保持在 30%~40%。

由图 4(b) 可知, 在整个堆肥过程中, 各处理堆体 TN 含量均呈现逐渐降低的趋势, 在 3~10 d, 对照组和添加 $25 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的堆体 TN 出现较大幅度的降低, 分别降低至 $17.11 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 18.89

$\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 而添加 50、75、100 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的堆体 TN 含量在堆肥的第 10~24 d 才呈现较大幅度的降低, 分别降低至 18.7、18.93、18.55 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。堆肥后期, 各处理堆体 TN 含量均逐渐下降并保持稳定, 维持在 15~18 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 但是土霉素处理堆体 TN 含量明显高于对照。堆肥第 42 d 时, 各添加土霉素处理 (25、50、75 和 100 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) 鸡粪堆肥堆体 TN 含量分别较对照增加 3.87%、9.0%、9.45%、12.62%, 差异显著。

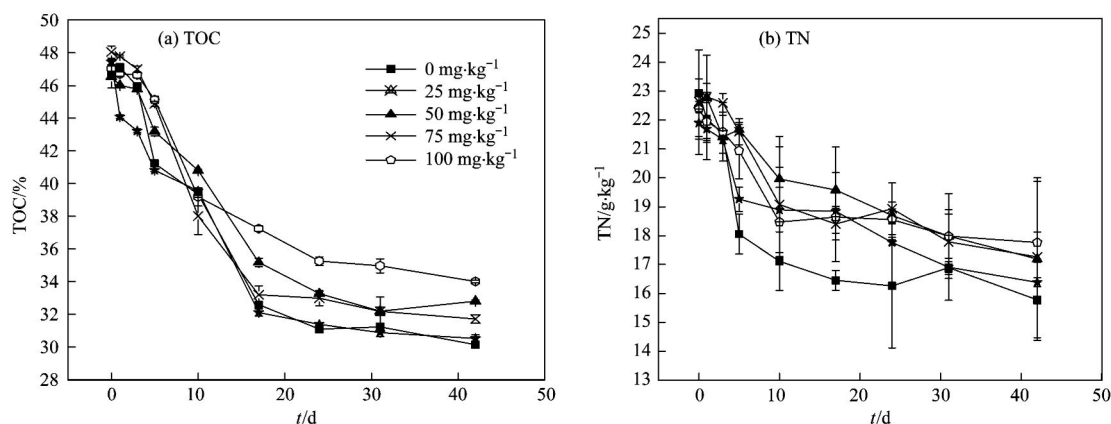


图 4 土霉素对鸡粪堆肥总有机碳 (TOC)、全氮 (TN) 的影响

Fig. 4 Effects of OTC on contents of TOC, TN in chicken feces composting

2.3.2 堆体水溶性有机碳 (WSC)

土霉素对鸡粪堆肥过程中堆体 WSC 含量的影响见图 5。从中可以看出, 在整个堆肥过程中, 各处理堆肥堆体 WSC 含量均呈逐渐降低的趋势。堆肥第 3 d, 25、50 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 处理堆肥堆体 WSC 含量迅速升高, 而其它 3 个处理鸡粪堆肥堆体 WSC 逐渐下降。堆肥第 5~10 d, 各个处理鸡粪堆肥堆体 WSC 含量组下降幅度较大, 与初始含量相比, 下降率分别为 43.62%、27.40%、4.8%、8.5% 和 31.0%, 差异显

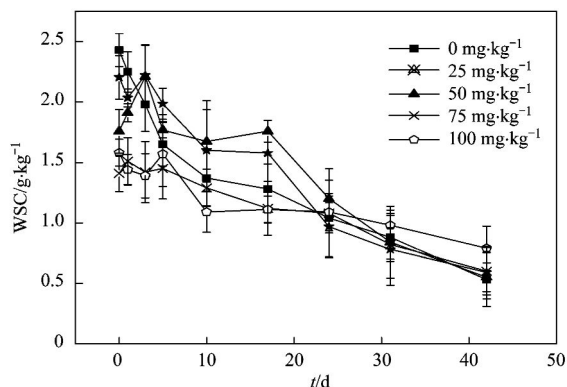


图 5 土霉素对鸡粪堆肥过程中堆体水溶性碳含量的影响

Fig. 5 Effects of OTC on contents of water soluble carbon (WSC) in chicken feces composting

著。堆肥第 42 d, 土霉素添加浓度为 100 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 鸡粪堆肥堆体 WSC 含量明显高于其它处理, 其中较对照处理增加 49.06%, 而其它土霉素处理与对照相比差异不显著。

2.3.3 土霉素对堆体 NH_4^+-N 和 NO_3^--N 的影响

土霉素对鸡粪堆肥过程中堆体 NH_4^+-N 和 NO_3^--N 的影响见图 6。由图 6(a) 可知, 在整个堆肥过程中, 对照组和添加土霉素处理组堆体 NH_4^+-N 均呈现先升高后逐渐降低的趋势, 如对照组和添加土霉素处理组在堆肥的 1~10 d 逐渐升高, 并达到最大值, 分别为 1498.15、1603.87、1476.51、1511.02 和 1429.01 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。随后对照组和各处理组呈现直线下降的趋势。堆肥第 24 d 时, 土霉素处理组堆肥堆体 NH_4^+-N 含量与堆体初始 NH_4^+-N 含量相比下降率是不同的。与对照组相比, 20、50 和 100 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 土霉素处理组堆肥堆体 NH_4^+-N 含量分别增加 18.06%、21.32% 和 27.79%, 差异显著。堆肥第 42 d, 75 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 100 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 土霉素处理组堆体的 NH_4^+-N 显著高于对照处理, 分别较对照处理增加 17.65% 和 35.30%, 差异显著。

由图 6(b) 可知,在整个堆肥过程中,水溶性 NO_3^- -N 总体呈逐渐升高的趋势,在堆肥开始后的 3~7 d 内上升较快,堆肥第 7 d 后,上升趋势变缓。值得注意的是,添加土霉素浓度为 $100 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 处理堆肥堆体在第 7~10 d 有轻微下降的趋势,在第 10 d 后,缓慢上升。在堆肥第 24 d,对照处理堆肥堆体 NO_3^- -N 含量高达 $1189.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,而 25、50、75、

$100 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 处理堆肥堆体 NO_3^- -N 仅为 989.99、895.35、693.6 和 $645.49 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,分别较对照降低 16.75%、24.71%、41.68% 和 45.72%,差异显著。尽管第 24 d 后,对照处理堆肥堆体 NO_3^- -N 有所下降,但是堆肥第 42 d 时,添加土霉素处理 ($75 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $100 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 堆肥堆体 NO_3^- -N 含量仍然高于对照处理。

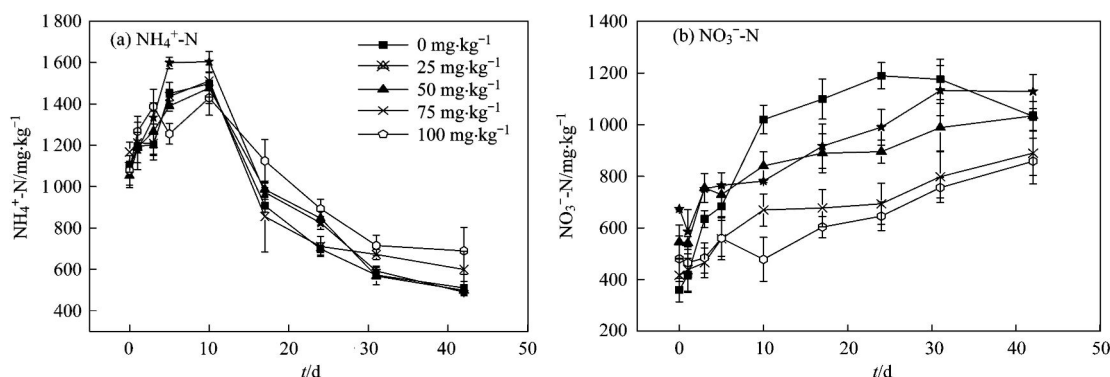


图 6 土霉素对鸡粪堆肥过程中堆体水溶性 NH_4^+ -N 和 NO_3^- -N 含量的影响

Fig. 6 Effects of OTC on contents of NH_4^+ -N, and NO_3^- -N in chicken feces composting

2.3.4 土霉素对堆体种子发芽指数 (GI) 的影响

土霉素对鸡粪堆肥过程中堆肥浸提液小麦种子发芽指数的影响见图 7。从中可知,在整个堆肥过程中,各个处理组的 GI 均呈现先降低而后逐渐上升的趋势,堆肥初期对照组和土霉素处理组的堆体浸提液生物毒性较强,GI 分别为 36.98% 和 1.93%~24.41%。对照组和土霉素处理组的 GI 在堆肥第 3 d 降到最低,分别为 20.14% 和 1.21%~17.57%。随后对照处理和土霉素处理堆肥堆体 GI 均逐渐上升,但上升率有所不同。堆肥第 10 d,与堆肥第 3 d 相

比,对照组以及 25、50、75 和 $100 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 处理组的 GI 上升率分别为 31.84%、36.54%、14.71%、20.29% 和 10.31%。堆肥第 17 d 后,添加 25 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 50 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 处理组的 GI 超过 50%,堆肥第 31 d,各组处理的 GI 均达到了 50%,堆肥第 42 d,对照组、25 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 50 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 处理组的 GI 达到了 80% 以上,而 75 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $100 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 处理组 GI 仅为 74.2% 和 59.4%。

3 讨论

随着培养时间的延长,在不同土霉素处理条件下,不管土霉素添加浓度高与低,土霉素在各组堆肥处理中的含量均逐渐减少,表明土霉素在堆肥中发生了降解。这与张树清^[2]的研究结果一致。本试验的研究结果表明(图 1 和表 2),无论在堆肥初期还是后期,土霉素在堆肥中的去除效果均是高浓度的处理组最差。究其原因可能是外源添加的土霉素量较多,对微生物产生了毒害作用抑制了堆肥中微生物的繁殖和活性,从而导致了降解能力的下降^[24,25]。

温度是堆肥能否顺利完成的重要因素,它制约着微生物的活性及有机质的分解速度,直接影响堆肥的腐殖化及有机污染物的降解程度。本研究结果表明,堆肥温度在不同时间内都上升到 50°C 以上

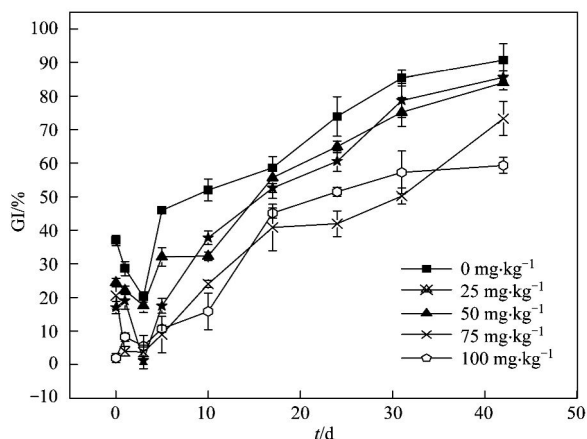


图 7 土霉素对鸡粪堆肥过程中堆肥浸提液小麦种子发芽指数的影响

Fig. 7 Effects of OTC on wheat seed germination potential in extract of chicken feces composting

(见图 2), 表明本试验堆肥是在顺利进行的. 土霉素对各组堆肥堆体(第 4 d)温度的升高有一定的抑制作用, 抑制率分别为 45.17% ~ 62.31%, 且土霉素处理高温期较对照缩短, 这与刘伟等^[15]的研究结果一致. 表明土霉素可能会对堆肥过程产生较强的不利影响, 改变了鸡粪堆肥中微生物的群落结构组成, 而且可能会进一步影响鸡粪堆肥中高温期对虫卵和病原菌的杀灭效果, 从而降低鸡粪堆肥物料的卫生品质^[26].

pH 值的变化是堆肥进行顺利与否的一个直观条件, 适宜的 pH 值是微生物发挥作用, 保留有效氮成分的前提, pH 值过高或过低都会影响堆肥的顺利进行. 在本研究中, 堆肥初期, 各堆肥处理组的 pH 值都接近中性, 对照中, 土霉素含量少, 降解也比较慢, 在堆肥初期, pH 值出现了与其它处理组不同的变化趋势. 随着堆肥过程的进行, 由于微生物利用有机物以及铵态氮和硝态氮之间的转化, 导致各组堆体 pH 值的升高(见图 3), 表明土霉素可能会影响堆肥过程中铵态氮的散失^[27]. 堆肥发酵由中温期进入高温期后, pH 值逐渐降低并在堆肥后期趋于稳定. 本研究结果表明, 土霉素处理各组堆肥堆体(第 17 d) pH 值的降低速率和强度均较小, 在堆肥第 42 d 时, 添加 75 mg·kg⁻¹ 的处理组 pH 值为 8.835, 未添加土霉素处理组的堆体 pH 值最后降低到 8.296, 表明土霉素的存在可能会在一定程度上加剧了鸡粪堆体 NH₃ 的挥发.

在堆肥发生的生化反应中, 碳是微生物生长和繁殖的重要因素, 微生物分解有机质并以 CO₂ 和 NH₃ 等形式散发掉, 全氮和全碳的绝对含量都会随着堆肥进程逐渐下降. 研究表明, 土霉素对堆肥 TN 在堆肥初期的降低有一定的影响(图 4), 添加土霉素浓度为 50、75、100 mg·kg⁻¹ 处理组的 TN 在堆肥初期的降低率为 4.84%、5.26%、4.6%, 明显低于对照组和添加 25 mg·kg⁻¹ 的堆肥处理. 添加 100 mg·kg⁻¹ 的堆肥处理对 TOC 和 TN 的影响最大, 且堆体 C/N 较对照处理增加 0.21%, 这可能是由于土霉素处理组堆体 pH 高于对照, 从而使堆体中 N 更多地以 NH₃ 的形式挥发, 使堆体全氮量相对减少的缘故. 水溶性有机碳(WSC)是堆肥中被微生物优先利用的碳源, 微生物不能直接利用固相成分, 需要通过微生物分泌胞外酶将堆料中的降解成分分解为水溶性之后才可利用^[28], 研究表明添加土霉素处理组与对照处理组的 WSC 变化趋势不一致(图 5), 可能是因为土霉素在堆肥初期影响了微生物的种类和数

量, 影响到堆肥中硝化细菌、氨化细菌等微生物的代谢活动, 导致微生物利用这些氮源的能力降低, 而后期土霉素逐渐降解(图 1), 减弱了对堆体 WSC 的影响^[29]. 堆肥过程中, 由于水溶性 NH₄⁺-N 一部分转化为 NH₃ 挥发掉, 一部分通过硝化作用转化为 NO₃⁻-N, 从而导致 NH₄⁺-N 含量在一定程度上减少和 NO₃⁻-N 含量在一定程度上增加. 研究表明, 土霉素对水溶性 NO₃⁻-N 含量的增高产生了一定的抑制作用, 抑制率分别为 23.35%、17.61%、34.37%、53.06%(图 6), 可能是由于土霉素的存在在一定程度上对堆肥过程中硝化细菌的活性产生影响的缘故. Beral 等^[30] 研究指出, 当堆肥中 NH₄⁺-N/NO₃⁻-N 的比值小于 0.5 时, 可认为堆肥已经基本腐熟, 本试验中, 对照组和低浓度土霉素处理组(25 mg·kg⁻¹ 和 50 mg·kg⁻¹) 堆体 NH₄⁺-N/NO₃⁻-N 在堆肥第 42 d 时, 分别从初始的 2.85、2.01 和 2.19 降低到了 0.49、0.43 和 0.48. 而高浓度土霉素处理组(75 和 100 mg·kg⁻¹) 堆体的 NH₄⁺-N/NO₃⁻-N 则仍高达 0.67 和 0.80, 表明高浓度土霉素尽管在堆肥前期降解较快, 半衰期较短, 但其后期在堆体中的含量仍然较高, 在一定程度上降低鸡粪堆肥的腐熟度.

用生物学方法测定堆肥浸提液的毒性是一种更加直接有效的判断堆肥腐熟度的方法^[31], Kirchmann 等^[32] 认为, 未腐熟的堆肥中可能含有挥发性脂肪酸和乙酸等对植物生长产生抑制作用的物质. Zucconi 等^[31] 认为当种子的发芽系数超过 50% 时, 可以认为堆肥已经基本腐熟. 钱学玲等^[33] 认为当 GI 达到 80% 时, 堆肥完全腐熟. 本研究种子发芽指数结果(见图 7)表明, 堆置 3 d 的堆肥浸提液呈现很强的生物毒性, 而后期生物毒性逐渐下降, 这与土霉素在堆肥初期降解较快有一定关系, 堆肥初期, 土霉素去除率较高, 经过高温期后, 堆肥浸提液的生物毒性有很大的降低, GI 均达到了 50%. 42 d 时, 对照组和添加 25、50 mg·kg⁻¹ 堆肥处理组的 GI 达到了 80% 以上, 这与其他学者研究一致^[2,34~38], 进一步表明堆肥在很大程度上可以降低土霉素的生物毒性效应. 但是值得注意的是, 添加 75 mg·kg⁻¹ 和 100 mg·kg⁻¹ 土霉素处理组 GI 仍仅为 74.2% 和 59.4%, 这可能是由于该处理组堆体中土霉素的含量仍相对较高的缘故.

4 结论

(1) 土霉素在鸡粪堆肥初期降解去除率明显, 最高的为 25 mg·kg⁻¹ 处理组, 去除率为 67.43%, 相

比而言, 75 mg·kg⁻¹ 堆肥处理组去除率最低, 为 45.91%。土霉素在各堆肥处理中的降解均符合一级动力学方程, 相关系数介于 0.911 1 ~ 0.991 3。

(2) 土霉素对鸡粪堆肥的顺利进行有一定的影响。土霉素处理在一定程度上降低了鸡粪堆肥堆体温度升高的速率, 缩短了堆肥高温期的时间。

(3) 高浓度 (100 mg·kg⁻¹) 土霉素处理对鸡粪堆肥过程中 pH 等指标是有影响的, 堆肥第 42 d 时, 堆体 pH 较对照增加 4.58%; 堆体 TN、WSC 分别较对照增加 12.62% 和 49.06%; 堆体 NH₄⁺-N 较对照增加 35.30%。

(4) 土霉素降低能够在一定程度上降低鸡粪堆肥堆体的腐熟度。当土霉素初始添加浓度低于 50 mg·kg⁻¹ 时, 对腐熟度的影响不大, 而当土霉素初始浓度 > 75 mg·kg⁻¹ 可以显著降低鸡粪堆肥产品的腐熟度, 主要表现为 NH₄⁺-N/NO₃⁻-N > 0.5, GI < 80%。

参考文献:

- [1] Kumar K, Gupta S C, Baidoo S K, *et al.* Antibiotic uptake by plants from soil fertilized with animal manure [J]. *Journal of Environmental Quality*, 2005, **34**(6): 2082-2085.
- [2] 张树清. 规模化养殖畜禽粪有害成分测定及其无害化处理效果[D]. 北京: 中国农业科学院, 2004.
- [3] Kumar K, Gupta S C, Chander Y, *et al.* Antibiotic use in agriculture and its impact on the terrestrial environment [J]. *Advances in Agronomy*, 2005, **87**: 1-54.
- [4] Hamscher G, Sczesny S, Abu-Qare A, *et al.* Substances with pharmacological effects including hormonally active substances in the environment: identification of tetracyclines in soil fertilized with animal slurry [J]. *Deutsche Tierärztliche Wochenschrift*, 2000, **107**(8): 332-334.
- [5] 姚建华, 牛德奎, 李兆君, 等. 抗生素土霉素对小麦根际土壤酶活性和微生物生物量的影响[J]. *中国农业科学*, 2010, **43**(4): 721-728.
- [6] Heuer H, Schmitt H, Smalla K. Antibiotic resistance gene spread due to manure application on agricultural fields [J]. *Current Opinion in Microbiology*, 2011, **14**(3): 236-243.
- [7] 解晓瑜, 张永清, 李兆君, 等. 土霉素对小麦毒性效应的品种间差异[J]. *生态毒理学报*, 2009, **4**(4): 577-583.
- [8] Li Z J, Xie X Y, Zhang S Q, *et al.* Negative effects of oxytetracycline on wheat (*Triticum aestivum* L.) growth, root activity, photosynthesis, and chlorophyll contents [J]. *Agricultural Sciences in China*, 2011, **10**(10): 1545-1553.
- [9] Li Z J, Xie X Y, Zhang S Q, *et al.* Wheat growth and photosynthesis as affected by oxytetracycline as a soil contaminant [J]. *Pedosphere*, 2011, **21**(2): 244-250.
- [10] Chi Z X, Liu R T, Yang B J, *et al.* Toxic interaction mechanism between oxytetracycline and bovine hemoglobin [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2010, **180**(1-3): 741-747.
- [11] 俞道进, 曾振灵, 陈杖榴. 土霉素残留对模型池塘生态系统代谢的影响[J]. *应用与环境生物学报*, 2006, **12**(4): 511-513.
- [12] Hu Z H, Liu Y L, Chen G W, *et al.* Characterization of organic matter degradation during composting of manure-straw mixtures spiked with tetracyclines [J]. *Bioresource Technology*, 2011, **102**(15): 7329-7334.
- [13] 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.
- [14] 牛俊玲, 崔宗均, 王丽莉, 等. 堆肥化过程中有机污染物生物降解的研究进展[J]. *中国生态农业学报*, 2006, **14**(1): 152-155.
- [15] 刘伟, 王慧, 陈小军, 等. 抗生素在环境中降解的研究进展[J]. *动物医学进展*, 2009, **30**(3): 89-94.
- [16] Wu X F, Wei Y S, Zheng J X, *et al.* The behavior of tetracyclines and their degradation products during swine manure composting [J]. *Bioresource Technology*, 2011, **102**(10): 5924-5931.
- [17] Selvam A, Zhao Z Y, Wong J W C. Composting of swine manure spiked with sulfadiazine, chlortetracycline and ciprofloxacin [J]. *Bioresource Technology*, 2012, doi: 10.1016/j.biortech.2011.12.073.
- [18] 郭梦婷, 邓友华, 冯小晏, 等. 土霉素残留对猪粪堆肥过程中理化性质的影响[J]. *环境污染与防治*, 2012, **34**(2): 50-54.
- [19] 中国科学院南京土壤研究所. 土壤理化分析[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1978. 1-250.
- [20] 沈颖, 魏源送, 郭睿, 等. 超高效液相色谱串联质谱检测猪粪中残留的四环素类抗生素[J]. *环境化学*, 2009, **28**(5): 747-752.
- [21] Shen Y, Wei Y S, Zheng J X, *et al.* Biodegradation of tetracycline antibiotics residues in swine manure [J]. *The Chinese Journal of Process Engineering*, 2009, **9**(5): 962-968.
- [22] Vaz-Moreira I, Silva M E, Manaia C M, *et al.* Diversity of bacterial isolates from commercial and homemade composts [J]. *Microbial Ecology*, 2008, **55**(4): 714-722.
- [23] Zucconi F, Forte M, Monac A, *et al.* Biological evaluation of compost maturity [J]. *Biocycle*, 1981, **22**(4): 27-29.
- [24] Arikian O, Mulbry W, Ingram D, *et al.* Minimally managed composting of beef manure at the pilot scale: effect of manure pile construction on pile temperature profiles and on the fate of oxytetracycline and chlortetracycline [J]. *Bioresource Technology*, 2009, **100**(19): 4447-4453.
- [25] Kong W D, Zhu Y G, Fu B J, *et al.* The veterinary antibiotic oxytetracycline and Cu influence functional diversity of the soil microbial community [J]. *Environmental Pollution*, 2006, **143**(1): 129-137.
- [26] GB7959-87, 中华人民共和国标准. 粪便无害化卫生标准[S].
- [27] Jiménez E I, García V P. Composting of domestic refuse and sewage sludge. I. Evolution of temperature, pH, C/N ratio and cation-exchange capacity [J]. *Resources, Conservation and*

- Recycling, 1991, **6**(1): 45-60.
- [28] 李承强, 魏源送, 樊耀波, 等. 不同填充料污泥好氧堆肥的性质变化及腐熟度[J]. 环境科学, 2001, **22**(3): 60-65.
- [29] Bernal M P, Alburquerque J A, Moral R. Composting of animal manures and chemical criteria for compost maturity assessment. A review[J]. Bioresource Technology, 2009, **100**(22): 5444-5453.
- [30] Beral M P, Paredes C, Sánchez-Monedero M A, *et al.* Maturity and stability parameters of composts prepared with a wide range of organic wastes[J]. Bioresource Technology, 1998, **63**(1): 91-99.
- [31] Zucconi F, Pera A, Forte M, *et al.* Evaluating toxicity of immature compost[J]. Biocycle, 1981, **22**(2): 54-57.
- [32] Kirchmann H, Widen P. Separately collected organic household wastes[J]. Swedish Journal of Agricultural Research, 1994, **24**(1): 3-12.
- [33] 钱学玲, 孙义, 李道棠. 模糊综合评价法判别堆肥腐熟度的研究[J]. 上海环境科学, 2001, **20**(2): 85-87, 103-104.
- [34] Doi A M, Stoskopf M K. The kinetics of oxytetracycline degradation in deionized water under varying temperature, pH, light, substrate, and organic matter[J]. Journal of Aquatic Animal Health, 2000, **12**(3): 246-253.
- [35] Dolliver H, Gupta S, Noll S. Antibiotic degradation during manure composting[J]. Journal of Environmental Quality, 2008, **37**(3): 245-1253.
- [36] 李国学, 李玉春, 李彦富. 固体废弃物堆肥化及堆肥添加剂研究进展[J]. 农业环境科学学报, 2003, **22**(2): 252-256.
- [37] Wang Q Q, Yates S R. Laboratory study of oxytetracycline degradation kinetics in animal manure and soil[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2008, **56**(5): 1683-1688.
- [38] Zhang S Q, Zhang F D, Liu X M, *et al.* Degradation of antibiotics and passivation of heavy metals during thermophilic composting process[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2006, **39**(2): 337-343.

CONTENTS

Characterization of Chemical Compositions in PM _{2.5} and Its Impact on Hazy Weather During 16 th Asian Games in Guangzhou	TAO Jun, CHAI Fa-he, GAO Jian, <i>et al.</i>	(409)
PM _{2.5} Pollution and Aerosol Optical Properties in Fog and Haze Days During Autumn and Winter in Beijing Area	ZHAO Xiu-juan, PU Wei-wei, MENG Wei, <i>et al.</i>	(416)
Forming Potential of Secondary Organic Aerosols and Sources Apportionment of VOCs in Autumn of Shanghai, China	WANG Qian, CHEN Chang-hong, WANG Hong-li, <i>et al.</i>	(424)
Study on Number Concentration Distribution of Atmospheric Ultrafine Particles in Hangzhou	XIE Xiao-fang, SUN Zai, FU Zhi-min, <i>et al.</i>	(434)
Pollution Characteristics and Source Identification of Atmospheric Particulate Matters <i>n</i> -Alkanes in Baoding City	LI Xing-ru, DU Xi-qiang, WANG Ying-feng, <i>et al.</i>	(441)
Study on Pollution Characteristics of Carbonaceous Aerosols in Xi'an City During the Spring Festival	ZHOU Bian-hong, ZHANG Cheng-zhong, WANG Ge-hui	(448)
Characteristics of PM ₁₀ and PM _{2.5} Concentrations in Mountain Background Region of East China	SU Bin-bin, LIU Xin-dong, TAO Jun	(455)
Assessment of TVOC and Odor in the Remediation Site of Contaminated Soil and Groundwater Using Electronic Nose	TIAN Xiu-ying, CAI Qiang, LIU Rui, <i>et al.</i>	(462)
Characteristics of Mercury Exchange Flux Between Soil and Atmosphere Under the Snow Retention and Snow Melting Control	ZHANG Gang, WANG Ning, AI Jian-chao, <i>et al.</i>	(468)
Study on Heavy Metal Contaminations and the Sources of Pb Pollution in Jinghai Bay Using the Stable Isotope Technique	XU Lin-bo, GAO Qin-feng, DONG Shuang-lin, <i>et al.</i>	(476)
Eco-environmental Evolution Inferred from <i>n</i> -Alkanes and $\delta^{13}\text{C}$ Records in the Sediments of Shijiu Lake	OU Jie, WANG Yan-hua, YANG Hao, <i>et al.</i>	(484)
Distribution of PGEs Contents and Its Factors in Snowfall and Snow Cover over the Arid Region in Changji City	LIU Yu-yan, LIU Hao-feng, ZHANG Lan	(494)
Effect of Dust Deposition Collection Methods on Collection Efficiency	ZHANG Zheng-cai, DONG Zhi-bao	(499)
Regionalization of the Freshwater Eco-regions in the Haihe River Basin of China	SUN Ran-hao, JI Yu-he, SHANG Lin-yuan, <i>et al.</i>	(509)
Characteristics of Diffuse Attenuation Coefficient of Underwater Irradiance in the Lakes in the Middle and Lower Reaches of Yangtze River	SHI Zhi-qiang, ZHANG Yun-lin, WANG Ming-zhu, <i>et al.</i>	(517)
Study on Influencing Factors and Universality of Chlorophyll-a Retrieval Model in Inland Water Body	HUANG Chang-chun, LI Yun-mei, XU Liang-jing, <i>et al.</i>	(525)
Effect of Dissolved Oxygen on Diversity of Ammonia-Oxidizing Microorganisms in Enrichment Culture from Estuarine Wetland Surface Sediments and Ammonia-oxidizing Rate	QIU Zhao-zheng, LUO Zhuan-xi, ZHAO Yan-ling, <i>et al.</i>	(532)
Spatial Variation of Soil Moisture/Salinity and the Relationship with Vegetation Under Natural Conditions in Yancheng Coastal Wetland	ZHANG Hua-bing, LIU Hong-yu, LI Yu-feng, <i>et al.</i>	(540)
Spatial Heterogeneity and Classified Control of Agricultural Non-Point Source Pollution in Huaihe River Basin	ZHOU Liang, XU Jian-gang, SUN Dong-qi, <i>et al.</i>	(547)
Phosphorus Output Characteristics Under Different Rainfall-Runoffs in Gaolan River	CUI Yu-jie, LIU De-fu, SONG Lin-xu, <i>et al.</i>	(555)
Monitoring and Analysis on Evolution Process of Rainfall Runoff Water Quality in Urban Area	DONG Wen, LI Huai-en, LI Jia-ke	(561)
Characteristics and Contribution of the Strengthening Units of Composite Constructed Wetland for Treating Urban Sewage	REN Feng, LU Yi-xia, LIU Qin, <i>et al.</i>	(570)
Inactivation of <i>Mycobacteria mucogenicum</i> in Drinking Water: Chlorine Resistance and Mechanism Analysis	ZHENG Qi, CHEN Chao, ZHANG Xiao-jian, <i>et al.</i>	(576)
Partial Biological Characteristics and Algicidal Activity of an Algicidal Bacterium	LI San-hua, ZHANG Qi-ya	(583)
Effects of Macrophytes Pyrolysis Bio-oil on <i>Skeletonema costatum</i> Antioxidant Enzyme Activities	YAO Yuan, LI Feng-min, LI Yuan-yuan, <i>et al.</i>	(589)
Mechanism and Kinetics of Phenol Degradation by TiO ₂ Photocatalytic Combined Technologies	ZHANG Yi, HUANG Ruo-nan, WANG Xiao-min, <i>et al.</i>	(596)
Biodegradation Characteristics of Organic Pollutants Contained in Tannery Wastewater	WANG Yong, LI Wei-guang, YANG Li, <i>et al.</i>	(604)
Microbial Degradation Mechanism of Disperse Azo Dye Red 30 by <i>Streptomyces</i> sp. FX645	XIE Lian-wu, FANG Ji-qian, GUO Ya-ping	(611)
Study on Preparation and Performance of a Biological Carrier with Tourmaline	YANG Ji-xian, ZENG Hong-yun, ZHOU Yi, <i>et al.</i>	(616)
Study on the <i>Chlorella pyrenoidosa</i> Cultivation Technology Based on the Excess Sludge Utilization	JI Wen-wen, XIA Hui-long, FANG Zhi-guo, <i>et al.</i>	(622)
Effects of Mild Thermal Pretreatment on Anaerobic Digestibility of Sludge with Low Organic Content	CHEN Han-long, YAN Yuan-yuan, HE Qun-biao, <i>et al.</i>	(629)
Effect of Natural and Hydrothermal Synthetic Goethite on the Release of Methane in the Anaerobic Decomposition Process of Organic Matter	YAO Dun-fan, CHEN Tian-hu, WANG Jin, <i>et al.</i>	(635)
Concentrations and Distribution Characteristics of PCDD/Fs in Spent Etching Solution and Its Copper Salt Recycling Products	QING Xian, HAN Jing-lei, WEN Yan-shen	(642)
Case Study on Health Risk Assessment Based on Site-Specific Conceptual Model	ZHONG Mao-sheng, JIANG Lin, YAO Jue-jun, <i>et al.</i>	(647)
Study on the Risk Assessment Method of Regional Groundwater Pollution	YANG Yan, YU Yun-jiang, WANG Zong-qing, <i>et al.</i>	(653)
Groundwater Organic Pollution Source Identification Technology System Research and Application	WANG Xiao-hong, WEI Jia-hua, CHENG Zhi-neng, <i>et al.</i>	(662)
Study on Soil Organic Carbon Pools and Turnover Characteristics Along an Elevation Gradient in Qilian Mountain	ZHU Ling-yu, PAN Jian-jun, ZHANG Wei	(668)
Response of Black Soil Organic Carbon, Nitrogen and Its Availability to Long-term Fertilization	LUO Kun, HU Rong-gui, ZHANG Wen-ju, <i>et al.</i>	(676)
Phytoavailability and Chemical Speciation of Cadmium in Different Cd-Contaminated Soils with Crop Root Return	ZHANG Jing, YU Ling-ling, XIN Shu-zhen, <i>et al.</i>	(685)
Study on Mechanism of SOM Stabilization of Paddy Soils Under Long-term Fertilizations	LUO Lu, ZHOU Ping, TONG Cheng-li, <i>et al.</i>	(692)
Aging Process of Cr(III) in 22 Typical Soils of China and Influence Factors Analysis	ZHENG Shun-an, ZHENG Xiang-qun, LI Xiao-zheng, <i>et al.</i>	(698)
Residual Characteristics of HCHs in Soils of a Former Lindane Production Enterprise	PAN Feng, WANG Li-li, ZHAO Hao, <i>et al.</i>	(705)
Evaluation and Source Analysis of the Mercury Pollution in Soils and Vegetables Around a Large-scale Zinc Smelting Plant	LIU Fang, WANG Shu-xiao, WU Qing-ru, <i>et al.</i>	(712)
Residue of Organic Fluorine Pollutants in Hair and Nails Collected from Tianjin	YAO Dan, ZHANG Hong, CHAI Zhi-fang, <i>et al.</i>	(718)
Analysis of Estrogens, Nonylphenol, 4-tert-Octylphenol and Bisphenol A in the Sediments	WU Wei, SHI Jiang-hong, CHEN Qing-cai, <i>et al.</i>	(724)
Investigation of As, Cu and Zn Species and Concentrations in Animal Feeds	YAO Li-xian, HUANG Lian-xi, JIANG Zong-yong, <i>et al.</i>	(732)
Residue Dynamics of Flubendiamide in Paddy Field	WANG Dian-dian, SONG Ning-hui, WU Wen-zhu, <i>et al.</i>	(740)
Isolation of Two Endophytic Phenanthrene-Degrading Strains and Their Degradation Capacity	NI Xue, LIU Juan, GAO Yan-zheng, <i>et al.</i>	(746)
Biodegradation of Nitrobenzene by a Halophilic <i>Myroides odoratimimus</i> Strain Y6	LI Tian, QIAN Kun, XIAO Wei, <i>et al.</i>	(753)
Effect of Immobilization on Biosensor for Benzene Derivates Detection	TANG Kuo, MA An-zhou, YU Qing, <i>et al.</i>	(760)
Investigation of Bacterial Diversity in the Biological Desulfurization Reactor for Treating High Salinity Wastewater by the 16S rDNA Cloning Method	LIU Wei-guo, LIANG Cun-zhen, YANG Jin-sheng, <i>et al.</i>	(767)
Assessment of the Effect of Influent NH ₄ ⁺ -N Concentration on the Abundance and Community Structure of Functional Bacteria in CANON Process	LIU Tao, LI Dong, ZENG Hui-ping, <i>et al.</i>	(773)
Biodegradation of Lignocellulose by <i>Penicillium simplicissimum</i> and Characters of Lignocellulolytic Enzymes	SHEN Ying, HU Tian-jue, ZENG Guang-ming, <i>et al.</i>	(781)
Microbial Community Structure and Distribution Characteristics in Oil Contaminated Soil	YANG Meng-qing, LI Li-ming, LI Chuan, <i>et al.</i>	(789)
Degradation of Oxytetracycline in Chicken Feces Aerobic-Composting and Its Effects on Their Related Parameters	WANG Gui-zhen, LI Zhao-jun, ZHANG Shu-qing, <i>et al.</i>	(795)
Research of Moisture Content Variation in MSW Landfill	LI Rui, LIU Jian-guo, XUE Yu-wei, <i>et al.</i>	(804)
Anaerobic Digestion of Lignocellulosic Biomass with Animal Digestion Mechanisms	WU Hao, ZHANG Pan-yue, GUO Jian-ben, <i>et al.</i>	(810)

《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)

2013年2月15日 34卷 第2期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 34 No. 2 Feb. 15, 2013

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: 90.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行