

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第8期

Vol.36 No.8

2015

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

基于16S rRNA 基因测序法分析北京霾污染过程中 PM _{2.5} 和 PM ₁₀ 细菌群落特征	王步英, 郎继东, 张丽娜, 方剑火, 曹晨, 郝吉明, 朱昕, 田埂, 蒋靖坤 (2727)
北京城区冬季降尘微量元素分布特征及来源分析	熊秋林, 赵文吉, 郭道宇, 陈凡涛, 束同同, 郑晓霞, 赵文慧 (2735)
北京市典型餐饮企业油烟中醛酮类化合物污染特征	程婧晨, 崔彤, 何万清, 聂磊, 王军玲, 潘涛 (2743)
基于实际道路交通流信息的北京市机动车排放特征	樊守彬, 田灵娣, 张东旭, 曲松 (2750)
夏季珠江三角洲地区 PM _{2.5} 化学组分特征及其对大气能见度的影响	杨毅红, 瞿群, 刘随心, 李雄, 钟佩仪, 陶俊 (2758)
隧道工人的 PM ₁₀ 职业暴露特征调查分析及其健康风险评价	向华丽, 杨俊, 仇珍珍, 雷万雄, 曾婷婷, 兰志财 (2768)
基于在线监测的江苏省大型固定燃煤源排放清单及其时空分布特征	张英杰, 孔少飞, 汤莉莉, 赵天良, 韩永翔, 于红霞 (2775)
柴达木盆地东部降水氢氧同位素特征与水汽来源	朱建佳, 陈辉, 巩国丽 (2784)
长江口-浙闽沿岸沉积色素的分布特征及其指示意义	李栋, 姚鹏, 赵彬, 王金鹏, 潘慧慧 (2791)
“引江济太”过程中长江-望虞河-贡湖氮、磷输入特征研究	潘晓雪, 马迎群, 秦延文, 邹华 (2800)
重庆市典型城镇区地表径流污染特征	王龙涛, 段丙政, 赵建伟, 华玉妹, 朱端卫 (2809)
调水调沙对黄河下游颗粒有机碳运输的影响	张婷婷, 姚鹏, 王金鹏, 潘慧慧, 高立蒙, 赵彬, 李栋 (2817)
青藏高原冰川区可溶性有机碳含量和来源研究	严芳萍, 康世昌, 陈鹏飞, 柏建坤, 李洋, 胡召富, 李潮流 (2827)
岩溶区地下水补给型水库表层无机碳时空变化特征及影响因素	李建鸿, 蒲俊兵, 袁道先, 刘文, 肖琼, 于爽, 张陶, 莫雪, 孙平安, 潘谋成 (2833)
室内模拟不同因子对岩溶作用与碳循环的影响	赵瑞一, 吕现福, 段逸凡 (2843)
新乡市地表水体 HCHs 和 DDTs 的分布特征及生态风险评价	冯精兰, 余浩, 刘书卉, 刘梦琳, 孙剑辉 (2849)
青木关地下河系统中不同含水介质下正构烷烃对比研究	梁作兵, 孙玉川, 王尊波, 江泽利, 廖昱, 谢正兰, 张媚 (2857)
三峡库区长寿湖水体不同形态汞的空间分布特征	白薇扬, 张成, 赵锋, 唐振亚, 王定勇 (2863)
燃煤电厂周围渔业养殖行为对水生生态环境中汞形态变化的影响	梁鹏, 王远娜, 尤琼智, 郭芳, 高雪飞, 何杉杉 (2870)
运用硫同位素、氮氧同位素示踪厘清湖地下河硫酸盐、硝酸盐来源	李瑞, 肖琼, 刘文, 郭芳, 潘谋成, 于爽 (2877)
藻华聚集的生态效应: 对凤眼莲叶绿素和光合作用的影响	刘国锋, 何俊, 杨轶中, 韩士群 (2887)
DOM 对被动采样技术的影响与应用	于尚云, 周岩梅 (2895)
蛋白质对 PVDF 超滤膜污染行为的界面微观作用力解析	王旭东, 周森, 孟晓荣, 王磊, 黄丹曦, 夏四清 (2900)
水环境中碳纳米管对沙丁胺醇降解的影响	汪祺, 韩佳芮, 魏博凡, 周磊, 张亚, 杨曦 (2906)
β -In ₂ S ₃ 的制备及其太阳光下降解土霉素	艾翠玲, 周丹丹, 张嵘嵘, 邵享文, 雷英杰 (2911)
排水管道沉淀物氮释放特性的研究	陈红, 卓琼芳, 许振成, 王劲松, 魏清伟 (2918)
生物膜 CANON 反应器中沉积物影响及其成因分析	付昆明, 王会芳, 左早荣, 仇付国 (2926)
ABR-MBR 一体化工艺节能降耗措施优化研究	吴鹏, 陆爽君, 徐乐中, 刘捷, 沈耀良 (2934)
两个 CANON 污水处理系统中氨氧化古菌的丰度和多样性研究	高景峰, 李婷, 张树军, 樊晓燕, 潘凯玲, 马谦, 袁亚林 (2939)
ABR 耦合 CSTR 一体化工艺好氧颗粒污泥形成机制及其除污效能研究	巫恺澄, 吴鹏, 徐乐中, 李月寒, 沈耀良 (2947)
珠江三角洲地区土壤有机氯农药分布特征及风险评价	窦磊, 杨国义 (2954)
广西都安县耕地土壤重金属污染风险评价	吴洋, 杨军, 周小勇, 雷梅, 高定, 乔鹏伟, 杜国栋 (2964)
开封市公园地表灰尘重金属污染及健康风险	段海静, 蔡晓强, 阮心玲, 全致琦, 马建华 (2972)
我国西南地区氮饱和马尾松林土壤和植物 ¹⁵ N 自然丰度对长期氮施加的响应	刘文静, 康荣华, 张婷, 朱婧, 段雷 (2981)
黄土高原纬度梯度上的植物与土壤碳、氮、磷化学计量学特征	李婷, 邓强, 袁志友, 焦峰 (2988)
开顶式气室原位研究水稻根系对大气汞浓度升高的响应	陈剑, 王章玮, 张晓山, 秦普丰, 陆海军 (2997)
接种丛枝菌根真菌对蜈蚣草吸收砷的影响	郑文君, 王明元 (3004)
水稻种植对黑土微生物生物量和碳源代谢功能的影响	赵志瑞, 崔丙健, 侯彦林, 刘上千, 王岩 (3011)
固定化菌剂载体材料腐解产物对污染土壤中芘解吸的影响	全冬丽, 双生晴, 李晓军, 邓万荣, 赵然然, 贾春云, 巩宗强 (3018)
零价铁和碱激发矿渣稳定/固定化处理铬渣研究	陈忠林, 李金春子, 王斌远, 樊磊涛, 沈吉敏 (3026)
Fe ³⁺ 负载凹凸棒土 (Fe/ATP) 结构表征及其稳定化修复镉 (Cd) 机制研究	杨蓉, 李鸿博, 周永莉, 陈静, 王琳玲, 陆晓华 (3032)
原位生物修复提高多环芳烃污染土壤农作安全性	焦海华, 潘建刚, 徐圣君, 白志辉, 王栋, 黄占斌 (3038)
镉-八氯代二苯并呋喃复合污染土壤中紫茉莉对镉的修复能力	张杏丽, 邹威, 周启星 (3045)
不同水分条件对蜈蚣草修复砷污染土壤的影响	刘秋辛, 阎秀兰, 廖晓勇, 林龙勇, 杨静 (3056)
磷矿粉和腐熟水稻秸秆对土壤铅污染的钝化	汤帆, 胡红青, 苏小娟, 付庆灵, 朱俊 (3062)
洛克沙肿在青菜及土壤中的残留及降解特性	邵婷, 姚春霞, 沈源源, 张玉洁, 苏楠楠, 周守标 (3068)
3 种典型有机污染物对 2 种水生生物的急性毒性及安全评价	杨扬, 李雅洁, 崔益斌, 李梅 (3074)
石油污染物对海底微生物燃料电池性能的影响及加速降解效应	孟瑶, 付玉彬, 梁生康, 陈伟, 柳昭慧 (3080)
Cu-Mn-Ce/ 分子筛催化剂吸附甲苯后的微波原位再生及床层温度分布探究	虎雪姣, 卜龙利, 梁欣欣, 孟海龙 (3086)
热处理对猪粪高固厌氧消化产甲烷能力的影响	胡玉瑛, 吴静, 王士峰, 曹知平, 王凯军, 左剑恶 (3094)
磷石膏对麦田 CO ₂ 排放和小麦产量的影响及其经济环境效益分析	李季, 吴洪生, 高志球, 尚小厦, 郑培慧, 印进, Kakpa Didier, 任迁琪, Ogou Katchele Faustin, 陈素云, 徐亚, 姚童言, 李炜, 钱景珊, 马世杰 (3099)
全氟和多氟烷基化合物的环境风险评估研究现状、不确定性与趋势分析	郝薛文, 李力, 王杰, 曹燕, 刘建国 (3106)
《环境科学》征订启事 (2757)	
《环境科学》征稿简则 (2767)	
信息 (2734, 2783, 3073, 3079)	

热处理对猪粪高固厌氧消化产甲烷能力的影响

胡玉瑛, 吴静*, 王士峰, 曹知平, 王凯军, 左剑恶

(清华大学环境学院, 环境模拟与污染控制国家重点联合实验室, 北京 100084)

摘要: 畜禽粪便属于有机物含量高、卫生风险大的污染物。本研究探寻不同热处理时间下, 猪粪(含固率 27.6%)不稀释直接进行 70℃ 热处理的情况及热处理对中温高固厌氧消化的影响。结果表明, 热处理能够去除猪粪的部分有机物, 并能明显提高高固厌氧消化的产甲烷能力和产甲烷速率。热处理时间为 1、2、3 和 4 d 时, 热处理对猪粪的 VS 去除率分别为 15.1%、15.5%、17.8%、20.0%, 甲烷产率(以 $\text{CH}_4/\text{VS}_{\text{add}}$ 计)分别为 284.4、296.3、309.2、264.4 $\text{mL}\cdot\text{g}^{-1}$, 相比原粪的甲烷产率分别提高 49.7%、55.9%、62.7%、39.2%。热处理时间为 3 d 时, 猪粪的甲烷产率最高。热处理对猪粪产甲烷的促进效果显著, 能耗适中, 并能够起到巴氏消毒的作用, 具有较好的工程价值。

关键词: 热处理; 高固; 猪粪; 甲烷; 巴氏消毒

中图分类号: X713 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)08-3094-05 DOI: 10.13227/j.hjxx.2015.08.050

Impact of Thermal Treatment on Biogas Production by Anaerobic Digestion of High-solid-content Swine Manure

HU Yu-ying, WU Jing*, WANG Shi-feng, CAO Zhi-ping, WANG Kai-jun, ZUO Jian-e

(State Key Joint Laboratory of Environment Simulation and Pollution Control, School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Livestock manure is a kind of waste with high organic content and sanitation risk. In order to investigate the impact of thermal treatment on the anaerobic digestion of high-solid-content swine manure, 70℃ thermal treatment was conducted to treat raw manure (solid content 27.6%) without any dilution. The results indicated that thermal treatment could reduce the organic matters and improve the performance of anaerobic digestion. When the thermal treatment time was 1d, 2d, 3d, 4d, the VS removal rates were 15.1%, 15.5%, 17.8% and 20.0%, respectively. The methane production rates ($\text{CH}_4/\text{VS}_{\text{add}}$) were 284.4, 296.3, 309.2 and 264.4 $\text{mL}\cdot\text{g}^{-1}$, which was enhanced by 49.7%, 55.9%, 62.7% and 39.2%, respectively. The highest methane production rate occurred when the thermal treatment time was 3d. The thermal treatment had an efficient impact on promoting the performance of methane production rate with a suitable energy consumption. On the other hand, thermal treatment could act as pasteurization. This showed that thermal treatment would be of great practical importance.

Key words: thermal treatment; high-solid-content; swine manure; methane; pasteurization

中国是世界畜禽养殖规模最大的国家之一^[1]。畜禽粪便产量大, 且呈快速上升趋势^[2]。早在 1980 年, 我国畜禽粪便的年产量已达到 14.0 亿 t; 2003 年, 超过工业固体废弃物的产量, 成为环境的主要污染源之一^[3]; 2011 年达到 21.2 亿 t; 预计在 2020 年将达到 28.7 亿 t; 2030 年将达到 37.4 亿 t^[4]。畜禽粪便属于高有机物、高氨氮、高含固率的污染^[5], 还散发恶臭, 严重影响了空气质量。此外, 畜禽粪便中存在大量的病原菌和寄生虫卵, 对人类健康和环境安全构成很大的潜在危害^[6]。

粪便的主要处理方法有干燥法、焚烧法、堆肥和厌氧消化等^[7], 其中, 厌氧消化能够在降解有机物的同时回收沼气^[8], 且能降低恶臭、灭活部分病原菌和寄生虫卵, 是一种绿色、经济的处理方式^[9,10]。传统的厌氧消化含固率 1%~5%, 是常用的粪便处理工艺^[11,12], 存在着反应器体积大、加热

能耗高、大量沼液难处理等问题^[13]。高固厌氧消化(含固率 8%~20%)是新兴的厌氧消化工艺, 能够较好地弥补传统厌氧消化的不足, 但甲烷产率较低。Møller 等^[11]研究表明, 含固率 4.6% 猪粪厌氧消化的甲烷产率(以 $\text{CH}_4/\text{VS}_{\text{add}}$ 计)为 320 $\text{mL}\cdot\text{g}^{-1}$, 而含固率 10% 的厌氧消化的甲烷产率(以 $\text{CH}_4/\text{VS}_{\text{add}}$ 计)仅为 203 $\text{mL}\cdot\text{g}^{-1}$ 。Andara 等^[12]的研究表明, 当猪粪含固率为 11% 时, 其甲烷产率(以 $\text{CH}_4/\text{VS}_{\text{add}}$ 计)仅为 176 $\text{mL}\cdot\text{g}^{-1}$ 。热处理能够有效提高粪便的厌氧产甲烷能力^[14~16], Carrère 等^[14]将 70℃、80℃ 热处理后的粪便厌氧消化, 甲烷产率分别提高了 70%、89%。有研究

收稿日期: 2015-01-25; 修订日期: 2015-03-19

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2014ZX07114001); 国家自然科学基金项目(91334112); 教育部创新团队发展计划项目

作者简介: 胡玉瑛(1992~), 女, 博士研究生, 主要研究方向为厌氧生物处理, E-mail: hu_yy13@mails.tsinghua.edu.cn

* 通讯联系人, E-mail: wu_jing@mail.tsinghua.edu.cn

表明^[15],热处理能够提高有机物的去除率,减少粪便中的病原菌,并且提高产甲烷能力.与此同时,有机物质在 70℃ 条件下停留 30 min 即能够满足美国环保署 (United States Environmental Protection Agency, USEPA)40 CFR Part 503^[17]规定的巴氏消毒的要求,大大降低沼液和沼渣的农用风险.

本研究为探寻热处理对猪粪高固厌氧消化产甲烷能力的影响,对猪粪原粪(含固率 27.6%)直接进行 70℃ 热处理,然后进行反应器内含固率为 8% 的中温生物化学产甲烷潜能测定试验 (biochemical methane potential test, BMP test). 相比于传统工艺,

原粪直接进行 70℃ 热处理后高固厌氧消化的工艺缩小了反应器体积、减少了能耗.目前对猪粪进行含固率 20% 以上的热处理的报道十分鲜见.

1 材料与方法

1.1 试验材料

本试验所用猪粪取自北京大兴区某养殖场,总固体 (total solid, TS) 为 276 g·L⁻¹,挥发性固体 (volatile solid, VS) 为 225 g·L⁻¹,VS/TS 为 81.5% (表 1). 厌氧接种污泥取自大兴区某沼气站厌氧反应器,TS 为 132 g·L⁻¹,VS/TS 为 59.8%.

表 1 试验用猪粪的成分
Table 1 Composition of the test swine manure

TS /g·L ⁻¹	VS/TS /%	氨氮 /mg·L ⁻¹	SCOD /mg·L ⁻¹	C(TS) /%	H(TS) /%	O(TS) /%	N(TS) /%	C/N
276	81.5	2 724	66 755	38.75	6.32	32.10	3.56	10.88

1.2 试验方法

原粪置于 10 个 500 mL 密封反应器中,在水浴摇床中进行温度为 70℃、热处理时间分别为 0、1、2、3、4 d 的热处理,水浴摇床的转速为 80 r·min⁻¹. 此后,进行含固率为 8% 的 BMP 试验,以比较热处理时间对猪粪高固厌氧消化产甲烷能力的影响. 热处理后的 80 g 粪便与种泥以 1:1 (以原粪 VS g: g 计)混合,置于 500 mL 密封反应器中. 用去离子水稀释粪便与种泥的混合物至含固率 8% 左右,在 35℃ ±2℃ 的水浴锅中进行中温 BMP 试验,搅拌转速为 80 r·min⁻¹. 样品的产气通过 3 mol·L⁻¹氢氧化钠溶液吸收 CO₂ 后,收集计数. 另设只接种种泥的空白对照组. 每组试验设置两个平行,最终数据取两者平均值. 待所有产气停止后,结束试验.

1.3 分析方法

TS、VS 采用重量法测量. 样品以 10 000 r·min⁻¹高速离心 10 min 后,取悬浮液过滤测量溶解性化学需氧量 (soluble chemical oxygen demand, SCOD) 和氨氮. 化学需氧量 (chemical oxygen demand, COD) 采用快速消解分光光度法 (兰州连华环保科技有限公司, 5B-1B) 测量. 氨氮采用水杨酸法测量. C、H、O、N 采用元素分析仪 (意大利 Eurovector 公司, EA3000) 测量. 本试验使用碧普全自动甲烷潜势测试系统 (automatic methane potential test system, AMPTS, Bioprocess Control, 瑞典) 进行 BMP 试验.

1.4 甲烷产率与产甲烷速率

甲烷产率为单位质量有机物产生甲烷的体积,

见式(1),主要用于表征有机物转化成甲烷的能力.

甲烷产率 = $\frac{V_{CH_4} - V_{种泥,CH_4}}{m \times VS_{原粪}}$ (1)

式中,甲烷产率(以 CH₄/VS_{add} 计),mL·g⁻¹; V_{CH₄},粪便的累积甲烷产量,mL; V_{种泥,CH₄},种泥的累积甲烷产量,mL; m,猪粪质量,kg; VS_{原粪},原粪 VS, g·kg⁻¹.

产甲烷速率为单位时间的甲烷产量,见式(2),主要用来表征有机物产甲烷的快慢.

产甲烷速率 = $\frac{V_{CH_4,t_1} - V_{CH_4,t_2}}{t_1 - t_2}$ (2)

式中,产甲烷速率(以 CH₄ 计),mL·h⁻¹; t₁、t₂,产气时间,h. 本研究中 t₁ - t₂ 取 6 h; V_{CH₄,t₁}、V_{CH₄,t₂}, t₁、t₂ 时刻的甲烷累积产量,mL;

2 结果与讨论

2.1 热处理

2.1.1 TS 和 VS

TS 和 VS 与热处理时间关系见图 1. 从中可知,随着热处理时间的增加,粪便的 TS、VS 逐渐下降,VS 的下降幅度大于 TS,这是由于 VS 更容易降解. 这表明,粪便的有机物含量随着热处理时间的增加而降低. 热处理第 1 d 时,TS、VS 下降速度最快.

2.1.2 SCOD

SCOD 与热处理时间的关系见图 2. 随着热处理时间的增加,SCOD 浓度下降. 热处理时间为 1、2、3、4 d 时,SCOD 浓度分别减少了 16.7%、

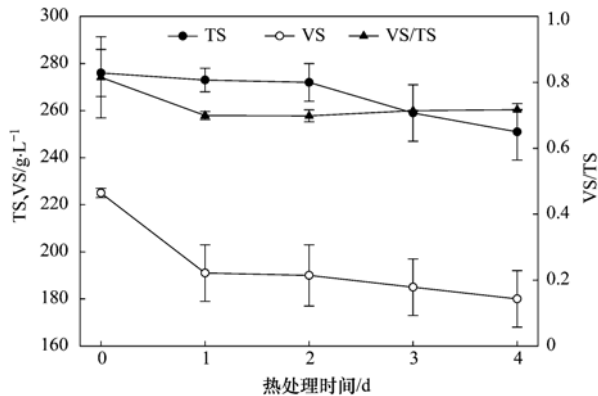


图1 TS、VS与热处理时间的关系

Fig. 1 Relationships between TS and VS and thermal treatment time

16.8%、16.6%、45.9%。SCOD 浓度在第 1 d 和第 4 d 下降较快;而第 2 d 和第 3 d 变化则不明显。热处理过程中,固体有机物的水解能够产生溶解性有机物,而同时,微生物又消耗溶解性有机物。虽然 TS 和 VS 在热处理第 1 d 水解下降速度较快(图 1),此时 SCOD 浓度仍然在减少,这表明有机物的消耗现象是十分明显的。

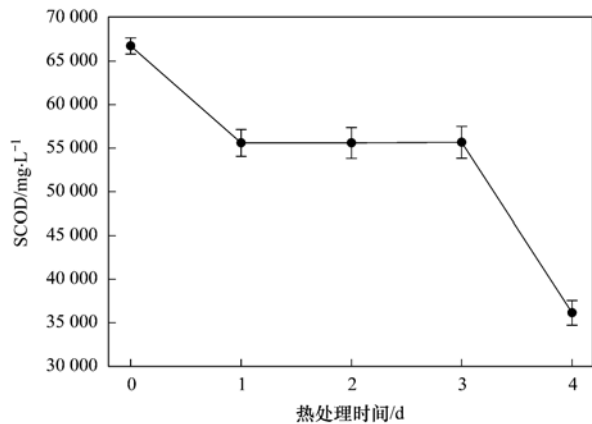


图2 SCOD与热处理时间的关系

Fig. 2 Relationship between SCOD and thermal treatment time

2.1.3 氨氮

氨氮是抑制粪便厌氧消化的关键因素之一,高固厌氧消化过程中氨氮抑制的风险尤为严重。热处理 0、1、2、3、4 d 后,猪粪的氨氮浓度分别为 2 723、3 032、3 025、3 284 和 3 241 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$,见图 3。本试验中,热处理后猪粪的氨氮浓度均低于 Niu 等^[18]研究中抑制粪便厌氧产气的氨氮浓度 5 000 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以及 Krylova 等^[19]研究中的 8 000 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。通常而言,蛋白质的水解速率较低,且其在粪便中含量较高,质量分数占干重的 50% 以上^[20,21]。氨氮浓度的上升间接显示,热处理能够促进粪便内的蛋白

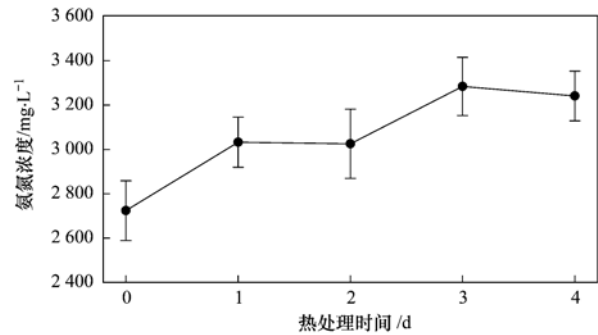


图3 氨氮浓度与热处理时间的关系

Fig. 3 Relationship between ammonia nitrogen concentration and thermal treatment time

质等含氮有机物发生水解,有利于厌氧消化。

2.2 热处理对粪便的产甲烷能力的影响

2.2.1 甲烷产率

甲烷产率是评价有机物转化为能源的重要指标。不同热处理时间的甲烷产率见图 4,从中可知热处理时间为 0、1、2、3、4 d 时,猪粪的甲烷产率(以 $\text{CH}_4/\text{VS}_{\text{add}}$ 计)分别为 190.0、284.4、296.3、309.2、264.4 $\text{mL} \cdot \text{g}^{-1}$,热处理后粪便的甲烷产率较原粪分别提高 49.7%、55.9%、62.7%、39.2%,这表明,热处理能够提高猪粪的甲烷产率。热处理时间为 3 d 时猪粪的甲烷产率最高。

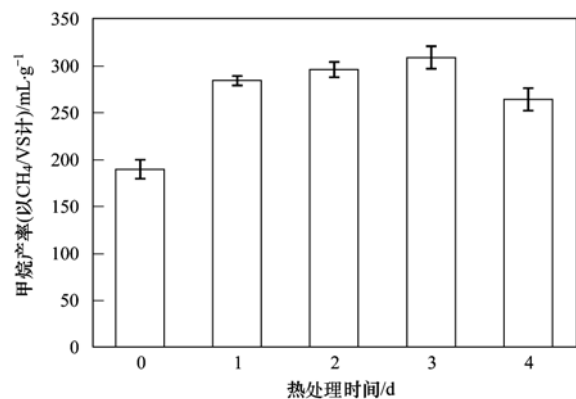


图4 甲烷产率与热处理时间的关系

Fig. 4 Relationship between methane production rate and thermal treatment time

2.2.2 产甲烷速率

热处理除了增加甲烷产量外,也能够改变猪粪的产甲烷速率。各个猪粪样品产甲烷速率见图 5。从中可知,热处理时间为 1、2 和 3 d 的粪便产甲烷速率均高于原粪,这表明在合适的热处理时间下,热处理能够提高粪便的产甲烷速率。而热处理 4 d 的粪便产甲烷速率在厌氧消化初期低于原粪,约 170 h 后高于原粪,且累积产气量更高。这表明经过 4 d

热处理后,一部分容易降解的有机物在热处理中被消耗掉,导致其初期产甲烷速率下降,但热处理也促进一部分难降解有机物的分解,使得热处理时间为 4 d 的粪便甲烷产量高于原粪的甲烷产量。

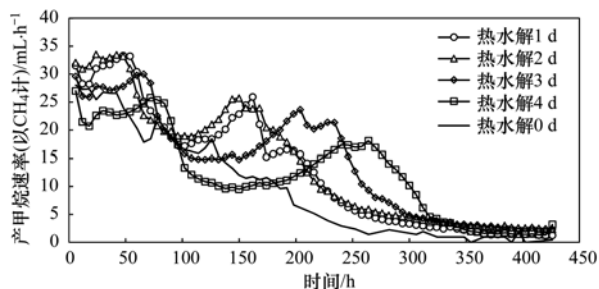


图5 产甲烷速率曲线

Fig. 5 Curves of methane generation rate

3 讨论

尽管热处理去除了粪便中部分有机物,但其能够促进粪便中蛋白质等含氮有机物水解为氨氮等小分子物质,加快粪便中固体有机物溶解、大分子有机物水解为小分子物质的过程,尤其促进了粪便中一些难以降解有机物的转化,有利于甲烷产率的大幅提高。

本研究中,热处理后粪便高固厌氧消化的甲烷产率(以 $\text{CH}_4/\text{VS}_{\text{add}}$ 计)达到 $264.4 \sim 309.2 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1}$,明显高于未经处理的粪便以及文献中直接进行高固厌氧消化猪粪的甲烷产率。例如,在 Møller 等^[11]研究中,进料含固率为 10% 猪粪的甲烷产率(以 $\text{CH}_4/\text{VS}_{\text{add}}$ 计)为 $203 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1}$; 在 Andara 等^[12]研究中,进料含固率为 11% 猪粪甲烷产率(以 $\text{CH}_4/\text{VS}_{\text{add}}$ 计)为 $176 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1}$ 。

尽管热处理在一定程度上增加了能耗,但由于含固率(27.6%)很高,且高固厌氧消化的能耗相比低固厌氧消化大大减少,与低固厌氧消化相比,“热处理 + 高固厌氧消化”总体能耗反而较低;而与直接高固厌氧消化相比,所产生额外的沼气热能能够弥补热处理所需的能耗;同时热处理能够满足 EPA 巴氏消毒的要求^[17]。相比于传统中温消化,该工艺沼液、沼渣少,且农用的卫生风险更低^[22~26]。

4 结论

(1) 热处理过程中,SCOD、TS、VS 的下降明显,这表明热处理能够去除粪便中部分有机物。氨氮浓度上升间接反映了粪便中蛋白质等有机氮的水解。

(2) 猪粪原粪经过热处理时间为 1、2、3、4 d 的热处理后,再进行含固率为 8% 的高固厌氧中温消化,其甲烷产率(以 $\text{CH}_4/\text{VS}_{\text{add}}$ 计)分别为 284.4、296.3、309.2、264.4 $\text{mL} \cdot \text{g}^{-1}$,相较于原粪的甲烷产率($190.03 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1}$,以 $\text{CH}_4/\text{VS}_{\text{add}}$ 计)分别提高了 49.7%、55.9%、62.7%、39.2%。

(3) 当热处理时间为 3 d 时,猪粪甲烷产率最高。

参考文献:

- [1] Zhang W Q, Lang Q Q, Wu S B, *et al.* Anaerobic digestion characteristics of pig manures depending on various growth stages and initial substrate concentrations in a scaled pig farm in Southern China [J]. *Bioresource Technology*, 2014, **156**: 63-69.
- [2] Molinuevo-Salces B, González-Fernández C, Gómez X, *et al.* Vegetable processing wastes addition to improve swine manure anaerobic digestion: Evaluation in terms of methane yield and SEM characterization [J]. *Applied Energy*, 2012, **91**(1): 36-42.
- [3] 王方浩, 马文奇, 窦争霞, 等. 中国畜禽粪便产生量估算及环境效应 [J]. *中国环境科学*, 2006, **26**(5): 614-617.
- [4] 朱宁, 马骥. 中国畜禽粪便产生量的变动特征及未来发展展望 [J]. *农业生产展望*, 2014, (1): 46-48, 74.
- [5] Jiménez J, Guardia-Pueblab Y, Cisneros-Ortiz M E, *et al.* Optimization of the specific methanogenic activity during the anaerobic co-digestion of pig manure and rice straw, using industrial clay residues as inorganic additive [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2015, **259**: 703-714.
- [6] Yin D X, Liu W, Zhai N N, *et al.* Anaerobic digestion of pig and dairy manure under photo-dark fermentation condition [J]. *Bioresource Technology*, 2014, **166**: 373-380.
- [7] 程绍明, 马杨晖, 姜雄晖. 我国畜禽粪便处理利用现状及展望 [J]. *农机化研究*, 2009, (2): 222-224.
- [8] 童子林, 刘元璐, 胡真虎, 等. 四环素类抗生素污染畜禽粪便的厌氧消化特征 [J]. *环境科学*, 2012, **33**(3): 1028-1032.
- [9] Kougiass P G, Kotsopoulou T A, Martzopoulou G G. Effect of feedstock composition and organic loading rate during the mesophilic co-digestion of olive mill wastewater and swine manure [J]. *Renewable Energy*, 2014, **69**: 202-207.
- [10] Massé D I, Gilbert Y, Saady N M C, *et al.* Low-temperature anaerobic digestion of swine manure in a plug-flow reactor [J]. *Environmental Technology*, 2013, **34**(18): 2617-2624.
- [11] Møller H B, Nielsen A M, Nakakubo R, *et al.* Process performance of biogas digesters incorporating pre-separated manure [J]. *Livestock Science*, 2007, **112**(3): 217-223.
- [12] Andara R A, Esteban L J. Kinetic study of the anaerobic digestion of the solid fraction of piggery slurries [J]. *Biomass and Bioenergy*, 1999, **17**(5): 435-443.
- [13] 王广启, 吴静, 左剑恶, 等. 城市污泥高固体浓度厌氧消化的研究进展 [J]. *中国沼气*, 2013, **32**(6): 9-12.

- [14] Carrère H, Bruno S, Nicolas B. Improving pig manure conversion into biogas by thermal and thermo-chemical pretreatments [J]. *Bioresource Technology*, 2009, **100** (15): 3690-3694.
- [15] Ruiz-Espinoza J E, Méndez-Contreras J M, Alvarado-Lassman A, *et al.* Effect of low temperature thermal pre-treatment on the solubilization of organic matter, pathogen inactivation and mesophilic anaerobic digestion of poultry sludge [J]. *Journal of Environmental Science and Health Part A-Toxic/Hazardous Substances and Environmental Engineering*, 2012, **47** (12): 1795-1802.
- [16] Guo J B, Dong R J, Clemens J, *et al.* Thermal modelling of the completely stirred anaerobic reactor treating pig manure at low range of mesophilic conditions [J]. *Journal of Environmental Management*, 2013, **127**: 18-22.
- [17] CFR Part 503, The standards for the use and disposal of sewage sludge [S].
- [18] Niu Q G, Qia W O, Qiang H, *et al.* Mesophilic methane fermentation of chicken manure at a wide range of ammonia concentration: Stability, inhibition and recovery [J]. *Bioresource Technology*, 2013, **137** (11): 358-367.
- [19] Krylova N I, Khabiboulline R E, Naumova R P, *et al.* The influence of ammonium and methods for removal during the anaerobic treatment of poultry manure [J]. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 1997, **70** (1): 99-105.
- [20] Miao H F, Wang S Q, Zhao M X, *et al.* Codigestion of Taihu blue algae with swine manure for biogas production [J]. *Energy Conversion and Management*, 2014, **77**: 643-649.
- [21] Zhang C M, Li J H, Liu C, *et al.* Alkaline pretreatment for enhancement of biogas production from banana stem and swine manure by anaerobic codigestion [J]. *Bioresource Technology*, 2013, **149**: 353-358.
- [22] Harikishan S, Sung S. Cattle waste treatment and Class A biosolid production using temperature-phased anaerobic digester [J]. *Advances in Environmental Research*, 2003, **7** (3): 701-706.
- [23] Elving J, Vinnerås B, Albiñá A, *et al.* Thermal treatment for pathogen inactivation as a risk mitigation strategy for safe recycling of organic waste in agriculture [J]. *Journal of Environmental Science and Health Part B Pesticides Food Contaminants and Agricultural Wastes*, 2014, **49** (9): 679-689.
- [24] Singh R, Kim J, Shepherd M W, *et al.* Determining thermal inactivation of *Escherichia coli* O157: H7 in Fresh Compost by Simulating Early Phases of the Composting Process [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2011, **77** (12): 4126-4135.
- [25] Kifle G K, Bhattarai S, Kim S H, *et al.* Anaerobic digestion of Chinese cabbage waste silage with swine manure for biogas production: batch and continuous study [J]. *Environmental Technology*, 2014, **35** (21): 2708-2717.
- [26] Varel V H, Wells J E, Shelver W L, *et al.* Effect of anaerobic digestion temperature on odour, coliforms and chlortetracycline in swine manure or monensin in cattle manure [J]. *Journal of Applied Microbiology*, 2012, **112** (4): 705-715.

CONTENTS

Characterizing Beijing's Airborne Bacterial Communities in PM _{2.5} and PM ₁₀ Samples During Haze Pollution Episodes Using 16S rRNA Gene Analysis Method	WANG Bu-ying, LANG Ji-dong, ZHANG Li-na, <i>et al.</i> (2727)
Distribution Characteristics and Source Analysis of Dustfall Trace Elements During Winter in Beijing	XIONG Qiu-lin, ZHAO Wen-ji, GUO Xiao-yu, <i>et al.</i> (2735)
Pollution Characteristics of Aldehydes and Ketones Compounds in the Exhaust of Beijing Typical Restaurants	CHENG Jing-chen, CUI Tong, HE Wan-qing, <i>et al.</i> (2743)
Emission Characteristics of Vehicle Exhaust in Beijing Based on Actual Traffic Flow Information	FAN Shou-bin, TIAN Ling-di, ZHANG Dong-xu, <i>et al.</i> (2750)
Chemical Compositions in PM _{2.5} and Its Impact on Visibility in Summer in Pearl River Delta, China	YANG Yi-hong, QU Qun, LIU Sui-xin, <i>et al.</i> (2758)
Health Risk Assessment of Tunnel Workers Based on the Investigation and Analysis of Occupational Exposure to PM ₁₀	XIANG Hua-li, YANG Jun, QIU Zhen-zhen, <i>et al.</i> (2768)
Analysis on Emission Inventory and Temporal-Spatial Characteristics of Pollutants from Key Coal-Fired Stationary Sources in Jiangsu Province by On-Line Monitoring Data	ZHANG Ying-jie, KONG Shao-fei, TANG Li-li, <i>et al.</i> (2775)
Hydrogen and Oxygen Isotopic Compositions of Precipitation and Its Water Vapor Sources in Eastern Qaidam Basin	ZHU Jian-jia, CHEN Hui, GONG Guo-li (2784)
Distribution Characteristics of Sedimentary Pigments in the Changjiang Estuary and Zhe-Min Coast and Its Implications	LI Dong, YAO Peng, ZHAO Bin, <i>et al.</i> (2791)
Nutrients Input Characteristics of the Yangtze River and Wangyu River During the "Water Transfers on Lake Taihu from the Yangtze River"	PAN Xiao-xue, MA Ying-qun, QIN Yan-wen, <i>et al.</i> (2800)
Pollution Characteristics of Surface Runoff of Typical Town in Chongqing City	WANG Long-tao, DUAN Bing-zheng, ZHAO Jian-wei, <i>et al.</i> (2809)
Effect of Water and Sediment Regulation on the Transport of Particulate Organic Carbon in the Lower Yellow River	ZHANG Ting-ting, YAO Peng, WANG Jin-peng, <i>et al.</i> (2817)
Concentration and Source of Dissolved Organic Carbon in Snowpits of the Tibetan Plateau	YAN Fang-ping, KANG Shi-chang, CHEN Peng-fei, <i>et al.</i> (2827)
Variations of Inorganic Carbon and Its Impact Factors in Surface-Layer Waters in a Groundwater-Fed Reservoir in Karst Area, SW China	LI Jian-hong, PU Jun-bing, YUAN Dao-xian, <i>et al.</i> (2833)
Modeling the Influencing Factors of Karstification and Karst Carbon Cycle in Laboratory	ZHAO Rui-yi, LÜ Xian-fu, DUAN Yi-fan (2843)
Distribution Characteristics and Ecological Risk Assessment of HCHs and DDTs in Surface Water Bodies in Xinxiang	FENG Jing-lan, YU Hao, LIU Shu-hui, <i>et al.</i> (2849)
Comparison Study of the Alkanes in Different Aquifer Medium Under Qingmuguan Underground System	LIANG Zuo-bing, SUN Yu-chuan, WANG Zun-bo, <i>et al.</i> (2857)
Spatial Distribution Characteristics of Different Species Mercury in Water Body of Changshou Lake in Three Gorges Reservoir Region	BAI Wei-yang, ZHANG Cheng, ZHAO Zheng, <i>et al.</i> (2863)
Influence of Marine Aquaculture Around Coal Power Plant on Mercury Species Change in Aquatic Ecological Environment	LIANG Peng, WANG Yuan-na, YOU Qiong-zhi, <i>et al.</i> (2870)
Using $\delta^{34}\text{S}\text{-SO}_4^{2-}$ and $\delta^{15}\text{N}\text{-NO}_3^-$, $\delta^{18}\text{O}\text{-NO}_3^-$ to Trace the Sources of Sulfur and Nitrate in Lihu Lake Underground Water, Guangxi, China	Li Rui, XIAO Qiong, LIU Wen, <i>et al.</i> (2877)
Ecological Effects of Algae Blooms Cluster: The Impact on Chlorophyll and Photosynthesis of the Water Hyacinth	LIU Guo-feng, HE Jun, YANG Yi-zhong, <i>et al.</i> (2887)
Influence of Natural Dissolved Organic Matter on the Passive Sampling Technique and Its Application	YU Shang-yun, ZHOU Yan-mei (2895)
Adhesion Force Analysis of Protein Fouling of PVDF Ultrafiltration Membrane Using Atomic Force Microscope	WANG Xu-dong, ZHOU Miao, MENG Xiao-rong, <i>et al.</i> (2900)
Influence of CNTs on Photodegradation of Salbutamol in Water Environment	WANG Qi, HAN Jia-rui, WEI Bo-fan, <i>et al.</i> (2906)
Preparation of $\beta\text{-In}_2\text{S}_3$ and Catalytic Degradation of Oxytetracycline Under Solar Light Irradiation	AI Cui-ling, ZHOU Dan-dan, ZHANG Rong-rong, <i>et al.</i> (2911)
Nitrogen Release Performance of Sediments in Drainage Pipeline	CHEN Hong, ZHUO Qiong-fang, XU Zhen-cheng, <i>et al.</i> (2918)
Analysis of Precipitation Formation in Biofilm CANON Reactor and Its Effect on Nitrogen Removal	FU Kun-ming, WANG Hui-fang, ZUO Zao-rong, <i>et al.</i> (2926)
Optimization of Energy Saving Measures with ABR-MBR Integrated Process	WU Peng, LU Shuang-jun, XU Yue-zhong, <i>et al.</i> (2934)
Abundance and Community Composition of Ammonia-Oxidizing Archaea in Two Completely Autotrophic Nitrogen Removal over Nitrite Systems	GAO Jing-feng, LI Ting, ZHANG Shu-jun, <i>et al.</i> (2939)
Formation Mechanism of Aerobic Granular Sludge and Removal Efficiencies in Integrated ABR-CSTR Reactor	WU Kai-cheng, WU Peng, XU Yue-zhong, <i>et al.</i> (2947)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Organochlorine Pesticides in Surface Soil of Pearl River Delta Economic Zone	DOU Lei, YANG Guo-yi (2954)
Risk Assessment of Heavy Metal Contamination in Farmland Soil in Du'an Autonomous County of Guangxi Zhuang Autonomous Region, China	WU Yang, YANG Jun, ZHOU Xiao-yong, <i>et al.</i> (2964)
Assessment of Heavy Metal Pollution and Its Health Risk of Surface Dusts from Parks of Kaifeng, China	DUAN Hai-jing, CAI Xiao-qiang, RUAN Xin-ling, <i>et al.</i> (2972)
Responses of Soil and Plant ^{15}N Natural Abundance to Long-term N Addition in an N-Saturated <i>Pinus massoniana</i> Forest in Southwest China	LIU Wen-jing, KANG Rong-hua, ZHANG Ting, <i>et al.</i> (2981)
Latitudinal Changes in Plant Stoichiometric and Soil C, N, P Stoichiometry in Loess Plateau	LI Ting, DENG Qiang, YUAN Zhi-You, <i>et al.</i> (2988)
Open-top Chamber for <i>in situ</i> Research on Response of Mercury Enrichment in Rice to the Rising Gaseous Elemental Mercury in the Atmosphere	CHEN Jian, WANG Zhang-wei, ZHANG Xiao-shan, <i>et al.</i> (2997)
Influence of Uranium in <i>Pteris vittata</i> L. Inoculated by Arbuscular Mycorrhizal Fungus	ZHENG Wen-jun, WANG Ming-yuan (3004)
Impact on the Microbial Biomass and Metabolic Function of Carbon Source by Black Soil During Rice Cultivation	ZHAO Zhi-rui, CUI Bing-jian, HOU Yan-lin, <i>et al.</i> (3011)
Effect of Decomposing Products of Immobilized Carriers on Desorption of Pyrene in Contaminated Soil	TONG Dong-li, SHUANG Sheng-qing, LI Xiao-jun, <i>et al.</i> (3018)
Solidification/Stabilization of Chromite Ore Processing Residue (COPR) Using Zero-Valent Iron and Lime-Activated Ground Granulated Blast Furnace Slag	CHEN Zhong-lin, LI Jin-chunzi, WANG Bin-yuan, <i>et al.</i> (3026)
Stabilization of Cadmium Contaminated Soils by Ferric Ion Modified Attapulgite (Fe/ATP): Characterizations and Stabilization Mechanism	YANG Rong, LI Hong-bo, ZHOU Yong-li, <i>et al.</i> (3032)
Improving Agricultural Safety of Soils Contaminated with Polycyclic Aromatic Hydrocarbons by In Situ Bioremediation	JIAO Hai-hua, PAN Jian-gang, XU Sheng-jun, <i>et al.</i> (3038)
Competence of Cd Phytoremediation in Cd-OCDF Co-contaminated Soil Using <i>Mirabilis jalapa</i> L.	ZHANG Xing-li, ZOU Wei, ZHOU Qi-xing (3045)
Effects of Soil Moisture on Phytoremediation of As-Contaminated Soils Using As-Hyperaccumulator <i>Pteris vittata</i> L.	LIU Qiu-xin, YAN Xiu-lan, LIAO Xiao-yong, <i>et al.</i> (3056)
Effects of Phosphate Rock and Decomposed Rice Straw Application on Lead Immobilization in a Contaminated Soil	TANG Fan, HU Hong-qing, SU Xiao-juan, <i>et al.</i> (3062)
Residue and Degradation of Roxarsone in the System of Soil-Vegetable	SHAO Ting, YAO Chun-xia, SHEN Yuan-yuan, <i>et al.</i> (3068)
Acute Toxicity and Safety Assessment of Three Typical Organic Pollutants to Two Aquatic Organisms	YANG Yang, LI Ya-jie, CUI Yi-bin, <i>et al.</i> (3074)
Effects of Oil Pollutants on the Performance of Marine Benthonic Microbial Fuel Cells and Its Acceleration of Degradation	MENG Yao, FU Yu-bin, LIANG Sheng-kang, <i>et al.</i> (3080)
Microwave In-situ Regeneration of Cu-Mn-Ce/ZSM Catalyst Adsorbed Toluene and Distribution of Bed Temperature	HU Xue-jiao, BO Long-li, LIANG Xin-xin, <i>et al.</i> (3086)
Impact of Thermal Treatment on Biogas Production by Anaerobic Digestion of High-solid-content Swine Manure	HU Yu-ying, WU Jing, WANG Shi-feng, <i>et al.</i> (3094)
Impact of Phosphogypsum Wastes on the Wheat Growth and CO ₂ Emissions and Evaluation of Economic-environmental Benefit	LI Ji, WU Hong-sheng, GAO Zhi-qiu, <i>et al.</i> (3099)
Status Quo, Uncertainties and Trends Analysis of Environmental Risk Assessment for PFASs	HAO Xue-wen, LI Li, WANG Jie, <i>et al.</i> (3106)

《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 刘 毅 汤鸿霄 孟 伟 周宗灿 林金明
欧阳自远 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2015年8月15日 第36卷 第8期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 8 Aug. 15, 2015

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	欧阳自远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行