

我国沼气产业发展历程及前景

曾伟民¹, 曹馨予², 曲晓雷³, 刘广尧⁴, 朱坤杰³ (1. 生物冶金教育部重点实验室, 湖南长沙 410083; 2. 中南大学生物工程系, 湖南长沙 410083; 3. 中南大学材料院, 湖南长沙 410083; 4. 中南大学机电院, 湖南长沙 410083)

摘要 沼气产业是以沼气发酵产生的沼气、沼液、沼渣等为纽带而发展起来的一系列相关的产业。首先简介了沼气微生物的发酵机理, 然后概述了我国沼气产业的发展历史: 初始发展阶段、技术成熟阶段、快速发展阶段和建管并重阶段, 最后阐述了我国沼气产业存在的机遇和挑战。我国沼气产业工艺技术相对落后、发展战略定位低、经济效益差、法律政策体系不够健全、社会化服务建设滞后等, 但我国是一个资源、人口大国, 随着国家政策的倾斜以及环保、清洁能源等方面的迫切需求, 我国沼气产业前景广阔。

关键词 沼气产业; 发酵机理; 发展历程; 机遇与挑战

中图分类号 S216.4 **文献标识码** A **文章编号** 0517-6611(2013)05-02214-04

History and Prospect on China's Biogas Industry

ZENG Wei-min et al (Biological Metallurgy Key Laboratory of the Ministry of Education, Changsha, Hunan 410083)

Abstract Biogas industry refers to a series of industries which are developed from the products of biogas fermentation like biogas, biogas slurry and biogas dregs. At the beginning, this article makes some brief introduction to the mechanism of biogas fermentation with microorganisms. And then a summary of China's gas industry development history is given, including the initial stage, the technology maturation stage, the rapidly-developing stage and efficiently-administrating-and-constructing stage. At last, it is about the opportunities and challenges to face, for example, the under-developed production technology, low development strategy, poor economic returns, and imperfect policy of law and social service system. Despite those unfavorable factors, China has a broad prospect for its abundant resources and a large number of populations, especially with the help of national policy and people's need for environmental energy.

Key words Biogas industry; Fermentation mechanism; Development history; Opportunities and challenge

沼气作为一种天然、无污染的可再生能源, 和薪柴、秸秆等传统的生物质能及煤、石油等化石燃料比起来, 它兼具二者之优点, 并且弥补了后两者的不足。特别是在当前传统能源短缺、国家社会经济发展迫切需要充足能源支撑的大环境下, 沼气发挥着不可替代的作用。

从对生物资源的利用和废弃物的处理上来看, 沼气产业使有机垃圾如畜禽粪便、剩饭剩菜等得到充分利用, 使它们在完全厌氧的条件下经发酵产生可被利用的气体燃料。附带产生的沼渣和沼液还是很好的有机肥料, 对于改善土壤质量、提高农作物产量、杀灭病虫害等方面也有着显著的作用^[1]。沼气使有限的农业资源得到了多层次、高效的利用^[2], 使生态系统产生的能量更多地流向对人类有益的部分。从解决能源短缺、开发新能源来看, 沼气的利用很好地满足了农村居民日常生活供电取暖、做饭燃气等需求, 克服了农村本身能源不足的缺陷。进一步发展沼气产业, 实现沼气等产品的商品化并投放市场, 摆脱局限于农村地区的瓶颈, 迈向更广大的城区, 将极有可能成为石油、天然气等化石燃料的替代品^[3]。从拉动内需、促进国民经济增长方面来看, 以沼气为依托而发展起来的产业链有机地将林业、渔业、牧业、养殖业结合起来, 形成了一个动态的、联系密切的生产网络^[2], 收获生态效益的同时, 经济效益也得到提升。

早在 20 世纪 20 年代, 沼气就在我国兴起了, 到现在已有近百年的历史。从最初的单一为寺庙、商店照明到现在的

多层次、多方面地延伸到农村城镇居民生活中, 从寥寥可数的使用人群到现在的在政府扶持、农村居民广泛接受, 沼气产业从无到有地发展起来。在这近百年里, 沼气产业的发展几起几落, 曲折前进, 现在已逐渐趋于成熟。为了推动沼气产业的发展、更好控制发酵过程、提高沼气产量, 了解产生沼气的原理及沼气微生物的相互作用机制很有必要^[4-5]。

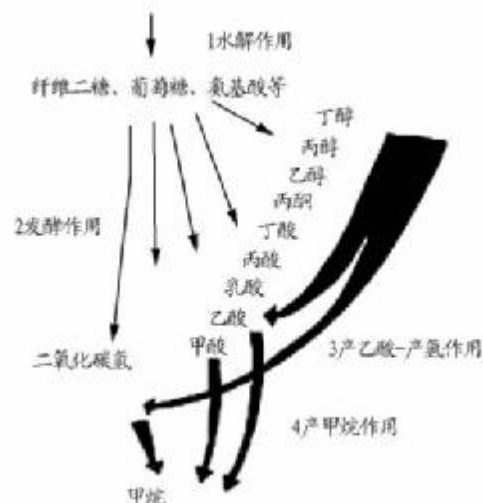


图1 降解有机质产生沼气的几个阶段

1 沼气产业的微生物发酵机理

在严格控制厌氧的条件下, 经过一系列微生物的作用, 最终把有机物转化成以甲烷、二氧化碳为主的沼气, 该过程叫做沼气发酵, 又名厌氧消化。参与沼气发酵的五大微生物类群分别是发酵性细菌、产氢产乙酸菌、耗氢产乙酸菌、食氢产甲烷菌、食乙酸产甲烷菌^[6]。该过程^[7]主要可以分成 3 个阶段: 水解阶段、产酸阶段、产甲烷阶段(图 1)。

1.1 水解阶段 原料经过预处理, 其主要成分是一些复杂

基金项目 国家自然科学基金青年科学基金项目(31200382); 中央高校基本科研业务费青年教师助推项目(1177-721500273); 中南大学大学生创新训练项目(CLI2142)。

作者简介 曾伟民(1982-), 男, 湖南长沙人, 副教授, 博士, 从事高效、清洁能源的开发及利用研究, E-mail: zengweimin1024@gmail.com。

收稿日期 2013-01-24

的有机物大分子,如蛋白质、多糖、脂类等。这些分子不能被细胞吸收,必须要在胞外经发酵性细菌的水解变成小分子的肽、氨基酸、单糖、脂肪酸等,才能参与下一步的反应^[8]。

1.2 产酸阶段 除了水解有机物,发酵性细菌还起到产生有机酸、产生氢的作用。上述可溶性小分子被发酵性细菌吸收进入细胞,经发酵作用将它们转化为乙酸、丙酸、丁酸等脂肪酸和醇类及一定量的氢、二氧化碳。有机酸和醇类中除甲酸、乙酸和甲醇外,其他均不能为产甲烷菌所利用。产氢产乙酸菌和耗氢产乙酸菌可以把发酵性细菌产生的有机酸和醇类转化为乙酸、二氧化碳等。利用放射性同位素标记的底物研究还表明,在厌氧消化器中 70% 以上的甲烷是由乙酸裂解形成的^[9]。

1.3 产甲烷阶段 经过前面两个阶段的作用,底物基本上被转化为乙酸、甲酸、甲醇等。产甲烷菌则进一步将其转化成甲烷、二氧化碳,还会有少量的氢等。这是整个厌氧消化过程的最后一步。

在整个发酵体系中,各个类群的细菌并不是相互割裂、彼此独立的,它们相互依赖共同完成发酵过程。产甲烷细菌和非产甲烷细菌通过互营联合实现甲烷的高效产生^[10-11],如布莱恩试验就证明了奥氏甲烷杆菌是产氢产乙酸的 S 菌株和一种产甲烷菌互营联合菌互营联合体。非产甲烷细菌为产甲烷细菌提供生长和产甲烷所需的基质,创造适宜的氧化还原条件,并清除有毒物质;产甲烷菌为产酸细菌清除代谢废物,解除反馈抑制,创造热力学上的有利条件,产酸菌得以正常生长存在,并且两类细菌共同维持环境中适宜的 pH^[7]。

2 我国沼气产业的发展历史

我国沼气应用始于 20 世纪 20 年代,在近百年的发展历史中,大致划分为以下 4 个大的发展阶段。

2.1 初始发展阶段 20 世纪 20 年代末至 80 年代初为沼气建设初始而曲折的发展阶段。60 年代初期,按照毛泽东主席关于“沼气又能点灯,又能做饭,又能作肥料,要大力发展,要好好推广”的指示以及国务院批转农业部等部委《关于当前农村沼气建设中几个问题的报告》的精神,各地大力推进沼气建设。快速建造的大量农村沼气池,为缓解当时农村烧柴短缺压力发挥了积极作用。但是由于当时技术不成熟、管理不到位、建设成本较高和服务跟不上等原因,沼气发展的势头没有保持住,曾经出现了两次较大的回落,导致不少户用沼气池和沼气工程在短期内报废,每年的报废量远大于新建量。在国家大力支持下,70 年代初我国的沼气用户快速发展到 600 多万户,但运行很短时间后多数报废;70 年代中期各地再次掀起发展沼气热潮,短短几年时间便累计发展了 700 多万户,但由于多数是土法上马,没能持久运行,在 80 年代初又回落到 400 万户以内,降到了低谷^[7]。这种“两起两落”的发展经历,严重挫伤了农民建池以及各级政府投入的积极性。

2.2 技术成熟阶段 20 世纪 80 年代至 2000 年为沼气技术成熟阶段。其间,在各级政府的大力支持和科研人员的共同

努力下,沼气工艺不断完善,综合效益开始显现,影响逐步扩大。这一阶段,我国沼气技术获得重大突破,研究推广了多种沼气池类型,开发出安全、方便、实用的进出料装置,采用了混凝土浇筑施工工艺,制定了一系列沼气池建设国家标准。同时,将沼气技术与农业生产技术结合起来,形成了以南方“猪-沼气-果”和北方“四位一体”为代表的农村户用沼气发展模式^[1-2]。到 2000 年底,全国农村户用沼气池达 980 万户。同时,畜禽养殖场大中型沼气示范工程建设开始起步。

2.3 快速发展阶段 2001~2006 年为沼气快速发展阶段。这一阶段,中央领导同志多次视察沼气工作,并做出重要指示。党的十六届五中全会将“大力普及农村沼气,积极发展适合农村特点的清洁能源”写入《中共中央关于制定国民经济和社会发展第十一个五年规划的建议》。国家对沼气建设的投资力度逐步加大,仅中央便投资 61.2 亿元专项用于沼气建设与发展,支持户用沼气池建设 1 327 万户,各类沼气工程建设 4 258 处。到 2006 年底,全国户用沼气累计达到 2 200 万户,建成养殖场大中型沼气工程 5 278 处和生活污水净化沼气池 13 万多处,年产沼气近 90 亿 m³。

2.4 建管并重阶段 2007 年以来,农村沼气建设进入建管并重的健康发展阶段。为了加强沼气建设规范管理,农业部和国家发展改革委先后共同印发了《全国农村沼气服务体系建设方案》和《关于进一步加强农村沼气建设管理的意见》,提出了“强化前期工作、明确管理责任、加快建设进度、严格资金管理、加强质量监管”等具体要求。各地在项目实施过程中,坚持项目行政领导责任制和法人责任制;坚持就业准入制度,实行持证上岗,积极开展沼气生产工职业技能培训和鉴定工作;坚持建设标准和技术标准,规范建设;坚持招标投标制度,对主要建筑材料和关键设备实行公开招标、集中采购;坚持项目公示制度等。这些举措极大地促进了农村沼气的健康快速发展。

3 我国沼气产业目前存在的挑战与机遇

尽管当前沼气产业正处在一个高速发展的阶段,受到了各级政府和人民群众的欢迎,但是在其发展过程中也面临着不少问题和障碍。

3.1 工艺技术落后,效率普遍不高 与发达国家比较,我国的沼气产业的工艺技术相对而言还是很成熟^[12]。从沼气发酵的原料上来讲,畜禽粪便、秸秆废料仍占据主要部分,以能源作物作为发酵的原料、鼓励种植能源作物的意识还不是很强^[13]。从沼气池的结构来讲,我国采用的大部分还是水压浮罩式发酵罐,和几十年前比起来没有太大的改进。从对沼气池的管理和控制来讲,沼气产气率受搅拌和温度的影响比较大^[14],有明显的季节差异性,不能稳定地产气,而且机械化和自动的程度明显不够。

3.2 发展战略定位低,经济效益差 我国的沼气工程以解决畜禽粪便、生活污水等的环境污染问题为主要目的^[15],而没有把开拓沼气市场、把沼气发展成可以和天然气、石油地位相当的燃料商品当作战略目标,定位比较低。而且,单纯

为了环保不追求经济收益行不通。欧洲国家如瑞典早在2006年就建成世界最大沼气工程,沼气不仅仅用于供热和发电,而且更多地是用作汽车燃料^[16]。在政府投入资金时就发展,没有政府扶持补贴就停滞^[12],相关企业的积极性不高^[12-13]、自主独立性不强,最终的结果是经济效益差。

3.3 法律和政策体系不够健全和完善 尽管沼气在我国的应用已有近百年的历史了,但是相关政策法规的制定步伐比较滞后。目前存在的一些关于沼气发展的法律偏向于建议性,执行起来不具有强制性,许多企业不愿意投入经费和技术进行沼气的开发。缺乏完善的法律保障,不利于沼气事业的蓬勃发展。

3.4 社会化服务建设滞后^[12] 一个地区沼气池修建好后,该地区没有可以提供切实帮助的服务站点及专业技术人员。将沼气除杂净化后并入天然气管道的一系列后续措施如收费问题、服务问题等还没有得到解决。我国还没有建立起来完善的社会服务体系,这些都将影响沼气产业化发展。

挑战与机遇并存。我国是一个资源大国和人口大国,有着发展沼气产业的天然优势。有机垃圾如农作物秸秆和人畜粪便在2003年总量就相当于该年度我国标准煤产量160 300万t的11.42%^[17]。如果将其利用起来,将大大减少石油、天然气等化石燃料的使用。如果要发展能源作物作为发酵原料,我国的耕地、林地、草地上生长的各类生物质都是可以得到充分利用的^[18]。改革开放以来,我国经济快速发展,随之而来的各种工业废气物及生活污水都可以作为产沼气的原料。而且,随着天然气等化石燃料的供应紧张,对环保型能源的呼声日益高涨,沼气的优越性彰显无疑,一旦沼气被商品化生产,市场前景广阔。

4 我国沼气产业的发展目标

随着我国对能源需求及能源安全的要求日益增高,开发各类清洁能源,减少对化石能源的依赖具有重要意义。因此,针对我国国情,发展具有中国特色的沼气产业势在必行。

4.1 使沼气工程终端产品面向市场 改进沼气设备,并加强对沼气工艺技术的研究,提高产气率,为沼气市场化打下基础。加强对沼气、沼气发电市场化的引导,制定相关购买、管理政策,推动其商品化。不应该仅仅只把初产品低价卖给农户,而应该进一步扩展其市场空间。对沼气进一步进行提纯和加工,可以使沼气并入天然气管道进入城乡居民家庭中成为生活用气,也可以使其成为车用燃气,部分代替天然气的使用。对于沼肥和沼液,需要加强对其成分配比与肥效价值之间关系的研究,使沼肥和沼液获得最大肥效,并且要对其进行深加工,使其成为便于运输、高成效、成本低、效果好的高新技术产品。

4.2 促进沼气工程的规模化、产业化发展 改善之前沼气零散、不集中的情况,使沼气跳出农村、农户,形成一定规模,向产业化迈步^[19]。第一,对于小型沼气池,可以对其进行物业式管理,即建立一个服务良好的沼气的管理公司,对沼气池定期进行检查、维修、保养,并对其进行技术上的指导。沼气用户还可以将用不完的沼气以低价卖给公司,公司对其进行

进一步商品化加工,销售市场。第二,对于产沼气相对来说稍微比较集中的村落,可以采用对原料集体处理的方式,使产气量更稳定,然后以相应的鼓励政策低价出售给居民。第三,对于大型养殖场、大型农场、城市居民垃圾处理中心等^[20],可以进行沼气发电,然后对周围居民进行供电。鼓励热电联产^[13],发电余热给沼气工程厌氧消化装置进行保温、增温。

4.3 全面建设服务体系 坚持2007年4月农业部和国家发改委联合下发的《全国农村沼气服务体系建设方案(试行)》,坚持“政府引导、多元参与、方式多样”和“服务专业化、管理物业化”的原则。参考沼气成功应用的发达国家的经验,在政府的引导下,逐步开展起服务建设工作,使其朝专业化发展。

4.4 要加快制订和执行经济激励政策 在沼气产业还未迈向稳定成熟前,政府相关政策的引导和鼓励很重要。这些政策涉及沼气及其产品价格的制定、补贴、税收、市场管理、沼气发电入网等。以实惠合理的价格将其推入市场,疏通并完善沼气产品的市场流通环节,营造良好的市场环境,让它能够适应市场,并具有一定的竞争力。给积极推行、使用沼气的用户以及企业经济补贴,吸收他们积极参与和投入,让他们获得盈利。完善相关法律政策,为沼气发电入网提供有力的制度保障。

5 结语

沼气产业是一门环保、经济的新能源产业,它多层次、高效益地利用了生物质能,不仅可以解决环保问题,更可以创造良好的经济效益,是一项人与自然和谐共处的项目。面对我国资源紧张、环境污染严重的现状,沼气产业的兴起与发展为我国送来了福音。纵观沼气在我国发展的历史,它的发展是曲折前进,但又呈现良好发展趋势和前景的。如果将沼气产业和人相比,那么他正处于青年阶段,稍显稚气,但又朝气蓬勃、充满希望和干劲。今后努力的方向是使沼气真正在我国产业化、规模化发展起来,走出中国特色道路。

参考文献

- [1] 房苏清,席建峰,王祥会. 沼气产业在我国的发展前景展望[J]. 中国园艺文摘,2008,24(2):9-10.
- [2] 陈豫,胡伟,张培栋. 沼气产业在循环农业中的作用和地位[J]. 安徽农业科学,2012,40(10):6145-6147.
- [3] 程序,郑恒受,梁近光,等. 开发产业沼气实现生物天然气对天然气的替代——有机废弃物厌氧处理从“从环保主导”向“能源-环保双赢”的转型[J]. 中国工程科学,2011,13(2):29-34.
- [4] 冯孝善,俞秀娥,钱泽澍. 沼气发酵前期各细菌生理群的研究[J]. 浙江农业大学学报,1982,8(1):55-63.
- [5] 闵晓梅,孟庆翔. 白腐真菌处理秸秆的研究[J]. 饲料研究,2000(9):7-9.
- [6] 张无敌,刘志华,宋洪川. 沼气发酵过程中几种水解酶活性的变化规律研究[J]. 新能源,1999,21(2):21-24.
- [7] 贾振航. 新农村可再生能源实用技术手册[M]. 北京:化学工业出版社,2009.
- [8] 任南琪,王爱杰. 厌氧生物技术原理与应用[M]. 北京:化学工业出版社,2004.
- [9] 蒙杰,王敦球. 沼气发酵微生物菌群的研究现状[J]. 广西农学报,2007,22(4):46-49.
- [10] STAMS A J M. Metabolic interactions between anaerobic bacterial in methanogenic environments[J]. Antonine Van Leeuwenhoek, 1994, 66: 271-294.

- [11] XIU Z D, STAMS A J M. Evidence for H₂ and formate formation during syntrophic butyrate and propionate degradation [J]. *Anaerobe*, 1995, 1: 35-39.
- [12] 李景明, 薛梅. 中国沼气产业发展的回顾与展望 [J]. *可再生能源*, 2010, 28(3): 1-5.
- [13] 张莉敏. 德国沼气产业发展现状及对我国的启示 [J]. *中国农垦*, 2011(12): 40-42.
- [14] 王书宝, 张国栋, 曹曼. 欧洲大型沼气技术国产化方法探讨 [J]. *中国沼气*, 2009, 27(2): 42-44.
- [15] 王仲颖, 高虎, 秦世平, 等. 中国工业化规模化沼气开发战略 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2009.
- [16] 邓良伟, 陈子爱. 欧洲沼气工程发展现状 [J]. *中国沼气*, 2007, 25(5): 23-31.
- [17] 冯永忠, 杨世琦, 任广鑫, 等. 双重背景下发展沼气产业的机遇和挑战 [J]. *中国沼气*, 2004, 23(3): 32-33, 42.
- [18] 程序, 朱万斌, 谢光辉. 论农业生物能源和能源作物 [J]. *自然资源学报*, 2009, 24(5): 842-848.
- [19] 国家环境保护总局自然生态保护司. 全国规模化畜禽养殖业污染情况调查及防治对策 [M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [20] 方淑荣. 我国农村沼气产业化发展的制约因素及对策 [J]. *农机化研究*, 2012, 32(2): 216-219.
- [21] 郝玉莲, 张胜英, 杨立新. 大力发展沼气建设开创生态农业新路 [J]. *内蒙古农业科技*, 2011(1): 10-11.
- [22] 董照锋, 马榜芳, 吴亚锋, 等. 山区养殖场大中型沼气工程发展问题调查研究 [J]. *湖南农业科学*, 2012(21): 121-124.

(上接第 2066 页)

有机碳、全氮和有效氮与土壤类型、利用方式均存在密切关系。

不同土壤形成条件、成土过程、土体结构和土壤肥力综合作用下形成不同土壤类型。因此,不同区域土壤主要类型往往差异很大,不同土壤类型对养分含量的影响也较大。该研究表明,鸡街镇主要农田土壤类型土壤养分含量和 pH 之间均具有一定的差异性,表现为石灰性土 > 新积土 > 黄壤 > 水稻土 > 红壤,水稻土 pH 呈微碱性,红壤、黄壤呈微酸性,新积土和石灰性土呈中性。云南土壤以红壤和水稻土最多,红壤广泛分布于坡耕山地,多数属于雨养旱地,耕作相对粗放,水土流失较严重。因此,红壤肥力在不同土壤类型中表现最低。水稻土是受人为活动影响最大的土壤类型,是在水旱交替下形成的特殊土壤,广泛分布于坝区、河谷和低山丘陵。尤其是近年来,随着蔬菜等经济作物的发展,水改旱地逐渐增多,因此水稻土肥力比红壤高,土地利用较大。在研究区域内还有一定面积的新积土、石灰性土和黄壤分布,肥力普遍高于水稻土和红壤。

农田土壤利用方式主要表现为不同作物和种植模式。李菡等^[6]研究表明,不同种植模式对土壤肥力质量的影响显著,总的趋势为设施蔬菜高于露天蔬菜,菜田模式高于粮田模式。高金权等^[7]研究表明,土壤肥力状况总体表现出菜园 > 麦-玉-苕轮作。这与该研究有一定的相似性,即土壤养分含量一般表现为蔬菜 > 水稻、玉米等粮食作物,蔬菜-蔬菜轮作 > 水稻-蔬菜轮作 > 水稻、玉米等粮食作物轮作。主要原因是在不同种植模式下不同作物对养分的需求和人为施肥量的差异,导致农田土壤肥力质量具有很大的差异。

土壤质地作为土壤最基本的物理性状,是土壤肥力质量不可忽视的重要因素。姚军等^[8-9]研究表明,不同质地类型土壤与其有效养分含量之间存在显著的相关性,质地越黏重,土壤有效养分含量越高。杨荣生^[10]研究表明,在云南曲

靖植烟土壤上,从轻壤到重壤过渡,土壤有机质、全氮和有效氮含量逐渐增加,但与磷钾含量的关系不明确。该研究表明,砂壤土、轻壤土及中壤土肥力相当,而重壤土肥力相对较低。因此,土壤质地对土壤养分含量影响的研究结果不一致,有待进一步研究。所以,不同典型种植模式、土壤类型和土壤质地的土壤养分含量状况均有一定的差异性。在推荐施肥中,要充分考虑种植模式、种植作物、土壤类型和土壤质地对土壤肥力质量的综合影响,因地制宜确定最佳施肥量,实现土壤肥力质量的逐步提升和土壤利用的可持续性发展。

参考文献

- [1] 郑立臣, 宇万太, 马强, 等. 农田土壤肥力综合评价研究进展 [J]. *生态学杂志*, 2004, 23(5): 156-161.
- [2] 骆东奇, 自洁, 谢德体. 论土壤肥力评价指标和方法 [J]. *土壤与环境*, 2002, 11(2): 202-205.
- [3] 章明奎, 徐建民. 利用方式和土壤类型对土壤肥力质量指标的影响 [J]. *浙江大学学报: 农业与生命科学版*, 2002, 28(3): 277-282.
- [4] 肖青青. 个旧鸡街农作物食品安全现状及整治技术 [D]. 昆明: 昆明理工大学, 2010.
- [5] 鲍士旦. 土壤化学分析 [M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [6] 李菡, 孙爱清, 郭恒俊. 农田不同种植模式与土壤质量的关系 [J]. *应用生态学报*, 2010, 21(2): 365-372.
- [7] 高金权, 张贞. 南方山地丘陵区不同种植模式对土壤肥力的影响 [J]. *安徽农业科学*, 2012, 40(31): 15222-15224, 15230.
- [8] 姚军, 张有山. 土壤质地类型与其基础肥力相关性 [J]. *北京农业科学*, 1998, 16(4): 33-34.
- [9] 张小琴, 郭晔红. 临泽县不同土壤类型肥力分析 [J]. *甘肃农业科技*, 2002, 27(2): 9-11, 26.
- [10] 杨荣生. 曲靖市植烟土壤分析与评价 [M]. 北京: 科学出版社, 2012.
- [11] 杨甲华, 张杨珠, 高菊生, 等. 红壤丘岗地区不同种植模式下土壤肥力状况的研究 [J]. *湖南农业科学*, 2012(3): 41-45.
- [12] 徐波, 朱雪梅, 刘倩, 等. 川中丘陵区不同土地利用方式下土壤养分特征研究——以中国科学院盐亭紫色土农业生态试验站小流域为例 [J]. *西南农业学报*, 2011(2): 663-668.
- [13] LIU X L, JIA L L, HAN B W, et al. Effects of different nutrient management systems and cultivation methods on crop yield and soil fertility [J]. *Agricultural Science & Technology*, 2011, 12(11): 1674-1679.
- [14] 周波, 高云华, 张池, 等. 华南赤红壤地区 4 种不同耕作模式对土壤肥力属性的影响 [J]. *华北农学报*, 2012(S1): 315-319.