

附件一

编号：_____

绿苗计划申请表（学术研究）

单 位： 复旦大学

项目名称： 利用微藻提升沼气品位的机理研究
和工艺研发

项目负责人： 颜诚

申请日期： 2012 年 10 月

单位	复旦大学	项目负责人	颜诚	联系电话	13764061224	
专业	环境科学	年(班)级	2011 级博士	E-mail	yancheng622@126.com	
项目名称: 利用微藻提升沼气品位的机理研究和工艺研发				经费预算	3 万元	
项目参加者	姓名	所在学院	专业	年(班)级	联系电话	E-mail
	王东	环境科学与工程系	环境科学	2012 级硕士	18202156407	08300740020@fudan.edu.cn
	黄威	环境科学与工程系	环境科学	2012 级博士	13179665820	yixinghd6@163.com
	李纪华	环境科学与工程系	环境科学	2012 级博士	18817395017	xiaoli1987@163.com
	张丽	环境科学与工程系	环境科学	2012 级硕士	15216841210	Zhangli890313@163.com
起止时间	2012 年 10 月至 2013 年 4 月					
<p>一、 立项依据 (项目的背景及意义):</p> <p>1. 研究的背景</p> <p>随着我国能源结构的调整, 沼气生物质能以其经济效益显著、资源丰富、生态效益好等优点成为我国能源布局规划的重要组成部分。我国农村户用沼气发展迅速, 每年大量的资金投入使得我国已经成为世界上最大的户用沼气生产国和消费国。沼气事业在农村地区的大力发展有可能解决长期困扰我国的农业秸秆焚烧产生的空气污染问题和畜禽养殖产生的粪便所引起的水污染问题, 同时针对化石燃料燃烧产生的全球气候变暖问题也有积极的意义。但是由于现有发酵工艺不合理等问题, 现阶段农村沼气事业的发展遇到了极大的阻力和瓶颈, 其主要表现在所产沼气品位低下, CO_2 含量过高而 CH_4 含量过低, 使得所产沼气难以在农村实际生产生活中发挥效用。而对于能够解决以上问题的沼气品位提升技术的研发却相对落后, 现阶段还难以找到处理效果好、经济实用性高的沼气品位提升技术。究其根本原因, 还是在于缺乏对于沼气品位提升相关工艺的科学原理和其所涉及到的有关机理的科学问题的研究。</p> <p>针对以上问题, 本研究项目将探索一种可以切实有效提升厌氧发酵所产</p>						

沼气品位的方法。本课题将重点研究微藻吸收沼气中 CO_2 的内在机理，以及最佳吸收效果的实现条件。然后利用微藻极高的光合作用效率和生长速率，以微藻来吸收原沼气中的 CO_2 以提高其有效成分 CH_4 的含量，提升原沼气的品位。具体方法是以原沼气中 CO_2 作为微藻生长所需的碳源，而以发酵产生的沼液作为培养基质，以此在有效提升沼气品位的同时也净化了高负荷污染物沼液，实现其资源化利用。对于在此过程中增殖的微藻，则可以进行混合厌氧发酵，产生沼气。以上各个步骤相互紧密联系：在提升沼气品位的同时又减排了温室气体 CO_2 ，原先焚烧处理的秸秆现在则可以进行资源化循环利用发酵产沼气；利用发酵产生的沼液作为微藻的培养基质，不仅高效地促进了微藻的生长繁殖，还处理了高负荷污染物沼液，避免了其对环境的污染；增殖的微藻又回到混合厌氧发酵体系，避免了微藻对水体环境的威胁和生物质能资源的浪费。

本课题所要解决的科学问题就是探究利用微藻来提升沼气品位的反应机理，分析提升过程中的各种工艺参数的优化及其对反应机理的影响，以期达到最好的沼气品位提升效果。具体说来，本研究课题所涉及的科学领域、国内外达到的水平以及存在的主要问题如下所述，本课题所涉及的科学领域主要是节能环保领域中的资源循环利用方面，具体指：利用微藻提高沼气品位的机理研究和工艺研发。厌氧发酵所产沼气的主要组成是含量在40~75%的 CH_4 和15~60%的 CO_2 ；其他次要成分包括：5~10%的水，0.005~2%的 H_2S ，0~0.02%的硅氧烷类化合物，0~0.6%的卤代烃类化合物，0~1%的 NH_3 ，0~1%的 O_2 ，0~0.6%的 CO ，以及0~2%的 N_2 。水的存在会影响沼气的燃烧效果； H_2S 因为其燃烧后会产生 SO_2 污染物，不仅会严重污染环境、危害人类的呼吸系统，还会腐蚀发酵设备。由于水和 H_2S 在沼气中的含量在次要成分中较高，所以国内对于沼气品位的提升现阶段的研究主要集中在水和 H_2S 的去除上。

但是由于 CO_2 含量过高才是 CH_4 含量偏低，沼气品位低下的主要原因，所以不管 H_2S 的去除效果如何，沼气品位较低的问题一直得不到有效的解决。

现在研究的脱除 CO_2 以提高沼气品位的方法较多，主要包括：采用各种溶剂的化学吸收法、物理法、碱洗法、膜分离法、低温分离法和固定床吸附法。吸收法最普遍采用的溶剂主要包括胺基溶剂和热碳酸钾溶剂。但是胺基溶剂吸收工艺容易产生吸收液起泡的问题；而热碳酸钾溶剂的吸收则需要吸收大量热量，能源消耗较大。物理法主要包括物理吸收法和气体液化压力控制法。可以采用甲醇作为吸收剂，在再生段 CH_4 从物理溶剂中闪蒸出来，贫溶剂用泵打回吸收塔，而此方法的缺点是吸收效率较低。气体液化压力控制法是首先将压力控制在低于 CH_4 水合物生成的压力下，使得 CO_2 生成水合物，然后 CH_4 从沼气中就可以分离出来了，此方法的缺点是操作复杂，设备建造和维护费用较高，不适宜农村地区使用。碱洗法是以石灰水溶液吸收 CO_2 生成碳酸钙沉淀，从而去除沼气中的 CO_2 ，但是实际生产中需要消耗大量的氢氧化钙，且生成的碳酸钙不能回收利用，它的废弃不仅是资源的浪费，更是对环境造成潜在的威胁。膜分离法是利用一种高分子聚合物薄膜材料，依靠气体在膜中的溶解度不同和扩散速率差异，来选择“过滤”进料气组分达到分离的目的。但是由于气体分离效率受膜材料、气体组成、压差、分离系数以及温度等多种因素的影响，且对原沼气的清洁度要求价高，而膜组件又价格昂贵，因此气体膜分离法一般难以在实际工程中加以应用。另外还有低温分离法和固定床吸附法，但他们的设备昂贵，对于生产人员科学技术水平要求较高，且技术不够成熟，目前还是很难适应大中型沼气工程的投资和效益要求。

以上各种方法虽然都有一定的研究基础，但他们共同缺点就是在提升沼气品位的操作过程中没有体现出物资源化循环利用的思想，或者没有考虑到

工艺在实际应用中的经济效益。吸收法、碱洗法和膜分离法所使用的溶剂和膜如果被直接废弃，会对环境造成二次污染；而如果回收利用使其再生，也难保证再生回收过程不会对环境造成危害。低温分离法和固定床吸附法则存在着经济效益较差的问题，其会造成处理装置难以为继，最终导致整个厌氧发酵系统前功尽弃，各种本应进入发酵处理的农村固废则会因为没有最终处理和处置的去处而排放到自然环境中，造成环境的污染。

利用微藻吸收沼气中的 CO_2 以提高沼气品位的方法也曾有国内学者涉及过，但往往是仅以专利申请的方式表现非常初步的设想，研究内容贫乏而零散，缺乏研究的具体成果和合理的支撑依据；缺少机理研究和工艺研发，没有数据说明其拥有稳定高效和切实可行的品位提升效果；研究没有连续性，在申请专利后缺乏后续的研究成果的持续报道。欧阳平凯等人在2008年通过专利申请提出了一种沼气发酵和自养型淡水微藻培养的耦合方法，但是他们的研究缺乏对于光生物反应器、沼液培养基和微藻藻种的系统性分析，而对微藻性质的变化规律、工艺安全性评价则更是根本没有涉及。李东等人在2006年提出了二氧化碳零排放型有机废弃物资源化利用的方法，但是仅仅停留在了设想上，内容非常简单，缺少对于光生物反应器光源光照操作方案和策略的分析以及对于接种藻种 CO_2 和 CH_4 耐受度分析，对于微藻光合色素组成等性质的变化规律的研究以及工艺安全性评价也都没有提及。以上两人的研究没有实际中试实验的数据支撑，难以说明他们的技术设想具有可行性和经济实用性。另一方面，曾在本计划申请人所在的课题组工作过的杨世关博士后和李继红博士也在2010年就利用微藻吸收沼气中 CO_2 的工艺申请了专利。其中涉及到了沼液养藻和微藻厌氧发酵产沼气的內容，但是由于研究年限的限制，他们对于光生物反应器的人工光源和光质光强的操作策略、沼液培养基的预处理条件和起始参数以及微藻藻种的鉴定、选择和性质检测都没

有涉及。特别是研究缺乏系统性，没有对于微藻提升沼气品位机理的研究，工艺参数也存在很多随机性，设想的技术方案缺乏经济实用性和安全性分析评价，总的来讲还都是研究的初级阶段，要想取得实际的成果则还有待于后续的研究。国外对于利用微藻吸收CO₂的研究则主要是针对如何减少大气中温室气体CO₂，或者以某种富含CO₂的污染物气体为强化碳源从而促进微藻生长来净化污水的，他们的研究内容和成果并不涉及具体的如何利用微藻来提高沼气品位的机理分析和工艺研发。

本研究项目将利用沼液作为微藻生长的营养基质，这样就在利用微藻提升沼气品位的同时，也可以附带达到净化沼液的目的。现有沼液净化技术主要是利用现有的污水处理厂来处理稀释过的沼液，此方法因为沼液的高污染负荷而需要极大的稀释量，最终会增加污水处理厂的运转负荷；且沼液中可能含有多种对于污水处理厂微生物菌群不利的生物化学元素，所以其对污水处理厂的安全稳定运行会有一些的副作用。且从沼液产地到集中处理地所修建的管网又增加了处理技术的生产成本。原位处理沼液的方法并不多见，主要原因是适用于农村地区的廉价的污水处理设施，如渗滤塘和蚯蚓生态滤池等，都是针对低污染负荷生活污水的，他们对于高负荷的沼液很难有较好的处理效果。关于土层渗灌和直接将沼液作为肥料施放到农作物上的研究也有开展过，但是其处理效果和农作物安全性还有待考证，特别是人们对于此种开放式的处理方法所带来的感官上的不快还很难在短时间内消除。在现阶段，融合了一定资源化循环利用思想的沼液处理技术也有一定的发展，包括利用沼液来养殖各种水生植物，如水芹菜、凤眼莲和各种藻类，利用他们的生长来摄取沼液中的营养元素，从而达到沼液净化的目的。但是此种方法仅仅停留在针对沼液本身的处理阶段，增殖后的水生植物的去向和利用方法还没有涉及到。增殖的水生植物如果不找到合适的处理或和处置的方法，则不

仅是生物质资源的浪费，还会造成二次污染，甚至于水体水化的发生。

国内现有的农村固体废弃物资源化循环利用还停留在针对单一固废的处理和利用上，对于同时涉及到农业秸秆和畜禽粪便的研究并不多。且各个循环利用和资源化的研究成果还没有发展形成体系，有的研究还处于理论构建或者实践的初级阶段，还没有形成真正的产业规模。国外对于此的研究都是针对当地农业生产情况而言的，具有较强的地域性。Li等在法国Rennes实验成功了生态循环农场，Converti等也在意大利Genoa顺利进行了沼气大规模利用的案例研究。但是由于各国农业产业结构和社会经济发展的不同，使得在国外比较成功的生态农场和沼气利用案例对于我国的情况并不适用。因为中国的国情不同于世界上任何一个国家，而我国又是一个农业大国，所以我国的农业状况也同世界上其他国家都有所区别的，特别是畜禽粪便和农业秸秆的产生形式。因此我们必须基于中国特色的农业生产状况，来设计我们自己的沼气品位提升工艺，通过探究其品位提升的机理来建立具有中国特色的“农村固体废弃物资源化循环利用体系”。

2. 研究的意义

(1) 促进农村沼气事业的发展

近年来随着世界能源危机的加剧、国家能源结构战略性调整的开展以及“三农问题”日益得到重视，我国农村沼气事业继20世纪70年代以来又迎来发展的高峰时期。国家虽然每年将大量的资金都投入到沼气事业中，但是由于厌氧发酵所产沼气因为CO₂含量过高而品位低下，严重影响了其实际应用。我国农村地区现有沼气装置大量被废弃，或者无法发挥设计的效益，使得现阶段我国沼气事业的发展遇到了严重的瓶颈。如果不研究出一种可以切实提升沼气品位的方法，则我国对于沼气事业的投入就有付诸东流的危险。本研究课题所述的一种利用微藻提升厌氧发酵所产沼气品位方法有极大的潜力

可以很好的解决上述问题，从而突破沼气事业发展的瓶颈，激活现有的厌氧发酵装置，促进沼气事业在农村地区的长足发展，同时也为大大缓解我国能源的紧缺做出贡献。

(2) 解决沼液的污染问题

导致沼气事业在农村地区发展遭遇瓶颈的另外一个重要原因就是厌氧发酵在处理秸秆和畜禽粪便等污染物时又产生了新的污染物沼液。沼液含有大量的氮、磷、钾等营养元素，且因为发酵菌的分解而结构相对较为简单，极易被植物所吸收。农村地区由于受到社会、人文和经济等多方面因素的制约，沼液经常得不到有效处理而被直接排放到自然环境中，从而对水体造成了极为严重的污染。本研究将沼液作为微藻的培养基质，这样就变废为宝将沼液资源化利用，在避免其污染环境的同时也为微藻找到了合适的培养基质营养源。

(3) 实现农业固体废弃物的资源化循环利用

由于厌氧发酵所产沼气品位低下，实际使用效果不理想，农村地区广大发酵装置使用率极低。同时我国每年农业秸秆总产量约为6.4亿吨，畜禽粪便产量约 41.2亿吨，这些本应进入发酵装置的生物质资源由于得不到有效利用在造成了巨大浪费的同时也产生了极为严重的环境问题。农业秸秆被直接焚烧，所产生的烟雾已影响了飞机起降、车辆行驶，造成空气质量的大幅下降，严重危害农村地区已经周边城市人民群众的身体健康。畜禽粪便直接排入环境，由于其N和P等营养物质丰富，造成了水体环境的富营养化；且未经处理的畜禽粪便中含有大量致病的有害病菌，在自然放置状态下还能释放出 NH_3 、 H_2S 等有害气体，如果得不到及时有效的处理将对人们的正常生产和生活造成巨大的影响。本研究课题所述的提高沼气品位的方法可以极大的提升现有厌氧发酵产沼气装置的使用率，为农业秸秆和畜禽粪便等农村固

体废弃物找到合理的资源化利用途径。

(4) 减缓温室效应

沼气中的主要成分 CO_2 和 CH_4 都是主要的温室效应气体，尤其是 CH_4 ，其温室效应作用是 CO_2 的21倍。农村固废在未进入厌氧发酵装置资源化利用的情况下，其秸秆的燃烧或者是畜禽粪便的遗弃，都会使得其所含的碳元素转化为温室气体而释放计入大气，加剧全球气候变暖。正在运行的发酵装置，如果因为沼气品位低下而放弃沼气的收集工作而任其随意排放，则不但会大量排出温室气体，且还会有发生火灾甚至爆炸的危险。如果可以有效利用本研究所述的沼气品位提升技术，则可以解决以上温室气体排放的问题，使得我国可以更好的履行《京都议定书》的义务；同时也为实现我国自己制定的《中国21世纪议程—中国21世纪人口、环境与发展白皮书》提供有力的技术保障。

(5) 创造良好的生态环境和社会效益

由化石能源的过度利用带来的环境污染和全球气候变暖问题正日益突出，而人类赖以生存的化石能源却正在迅速减少，沼气的开发则可以帮助解决以上两个问题。我国是能源消耗大国，同时也是碳排放量大国，加强沼气的开发和利用是我国经济社会发展的必由之路。激活现有沼气发酵装置利用的潜能，可以减少传统化石的使用，从而减少我国碳排放量；同时自主研发提升沼气品位的技术也可以增强我国的能源安全，使得我国经济社会朝着可持续发展和生态环境良性循环的方向前进。我们还可以预料到，本技术通过重新启动农村沼气事业的发展，可以拓展新的经济发展和就业领域，成为促进农民增收的重要渠道之一。农村固体废弃物如果都能通过厌氧发酵得到有效的处理，则农村地区的环境面貌就会得到很大的改善，对农村社会的发展也有积极的意义。我国有很好的沼气利用基础，农村地区存在着大量的沼

气发酵装置，而当下我国沼气事业发展的最大瓶颈就是沼气品位低下的问题。因此，通过研究本项目所述的利用微藻提升沼气品位的机理，而开发出一套可以切实有效提升我国沼气品位的实用工艺技术，是一项极具挑战性和现实意义的课题。

二、项目主要研究内容

本课题所要解决的科学问题就是探究利用微藻来提升沼气品位的反应机理，分析提升过程中的各种工艺参数的优化及其对反应机理的影响，以期达到最好的沼气品位提升效果。本研究项目有待解决的主要科学问题和研究内容主要包括以下六个方面：

(1) 光照条件的影响

微藻在快速繁殖过程中表现出了极高的光合作用固碳能力，沼气中的 CO_2 被微藻吸收后就使得沼气中 CH_4 含量显著升高，沼气品位得以提升。微藻的生长速率和光合作用固碳能力则主要是受光照条件控制的，所以我们需要研究各种光照条件的变化对于微藻吸收 CO_2 能力的影响效果，由此来探究

出反应器最优的运行条件，并且着重分析产生上述影响效果原因。光照条件的变化具体包括：所采用人工光源光质的选择和配比、光照强度的调配、以及微藻生长时间序列上光质和光照强度同时变化的综合影响效果。

（2）沼液培养基性质的影响

本研究项目中，沼液是微藻生长的营养基质，其性质的变化对于微藻固定沼气中CO₂的效果具有显著的影响。所以我们需要研究沼液性质变化对于微藻的各种影响因素及其效果，由此探究微藻在沼液中接种率和接种方法，以及接种前沼液的各种物理化学性质和预处理条件的最优值，并且着重分析由沼液性质变化而产生的微藻固碳能力变化的原因。

（3）微藻性质的影响

沼气中CO₂固定的直接作用者是微藻，其性质是沼气品位提升能否达到预期效果的关键。所以本项目拟对多种已知的纯藻种和野生藻种进行对比实验，研究在上述光照条件和沼液培养基性质变化过程中微藻的对应变化情况，并且重点研究这些变化产生的原因。我们拟检测所选取微藻的数量、形态、物质组成（特别是光合色素的种类和活性）、以及固碳能力的变化情况，由此分析出微藻吸收CO₂提升沼气品位的内在机理，以期最终选择出在沼气环境中CO₂吸收能力强，适宜进行沼气品位提升的藻种。

（4）安全性分析

本研究项目中的微藻会在吸收CO₂的光合作用过程中不可避免的产生O₂，其和沼气中可燃性气体CH₄相混合，在一定条件下有爆炸的潜在隐患。所以我们需要评估整个沼气品位提升方案的安全性，特别是经过品位提升后的混合气体中各组分的含量；同时结合“（3）微藻性质的影响”中的研究内容，探究减少藻类固定CO₂过程中产O₂的机理和方法，最终达到增强此沼气品位提升方法安全性的目地。

(5) 资源化循环利用体系的建立

在解决以上4个科学技术问题的基础上，本研究课题将会进一步深化研究内容。我们不仅仅关注于厌氧发酵所产沼气本身的品位，而是从研究微藻吸收沼气中CO₂的机理出发，通过对于沼液养藻和微藻混合厌氧发酵的研究和分析，以期最终建立一个以利用微藻提升沼气品位为核心，囊括厌氧发酵所产沼气、沼液以及沼渣的“农村固体废弃物资源化循环利用体系”（示意图1）。这是一个闭合的系统，它的能量输入是光能，主要输出是高品位沼气，另包括部分固体农肥；其基本没有污染物的排出，这样就避免了提升沼气品位的同时产生二次污染。但是要维持以上循环体系的运行，需要研究和分析其中各种物料的平衡状况：微藻培养基质沼液的量与达到规定品位提升效果而所需微藻的量、原沼气中CO₂的量与微藻生长所需CO₂的量、“光生物反应器”中微藻增殖的量与混合厌氧发酵所能消纳的微藻的量。

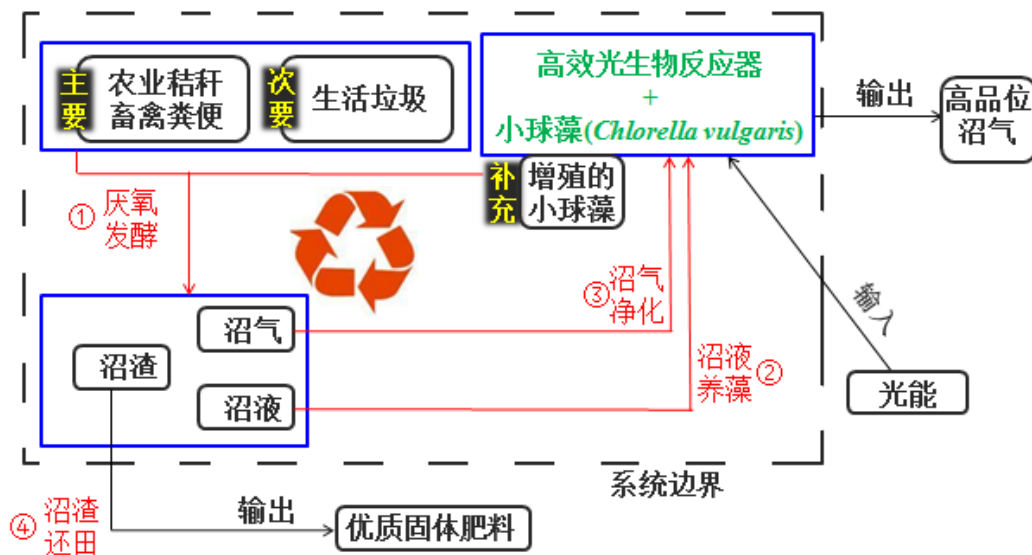


示意图1 农村固体废弃物资源化循环利用体系示意图

(6) 经济实用性分析

本研究项目的成果会最终应用到我国的农村地区，所以要考虑到本工艺方法的经济实用性。利用微藻提升沼气品位的工艺中所需要消耗的能量主要

是用以维持微藻快速生长繁殖以最大限度吸收CO₂的人工光源，其光质和光强的性质对于微藻的生长是最为重要影响因素。所以我们拟从微藻吸收沼气中CO₂的机理入手，通过检测和分析对比不同人工光源条件下微藻的物理和化学变化，特别是其光合色素的种类和活性以及固碳能力的变化，以制定出最佳的光照策略。其主要内容包括光质的选择和光照强度的调配，主要目标是在保证微藻最大限度吸收沼气中CO₂的基础上降低光能消耗，以实现本研究项目的最佳经济效益。

三、项目实施方案和可行性分析：

1. 实施方案

本课题项目拟研究利用微藻提升沼气品位的机理，并开发出其实际应用的工艺。我们利用微藻来吸收原沼气中的CO₂，提高原沼气中CH₄的含量，提升沼气品位；而此时微藻的培养基质是厌氧发酵所产沼液，因此可以实现沼液的资源化利用。再结合微藻厌氧发酵，我们将以微藻提升沼气品位为核心，升华整个科研项目的内涵，构建一个闭合的“农村固体废弃物资源化循环利用体系”（示意图1），其没有污染物的排出，只有光能输入和高品位沼气能以及部分沼渣肥料的输出。

我们拟采用的实验方案是室内模拟实验和室外中试实验的相结合：首先在实验室内进行机理研究，探究人工光源的最优光质和光照强度及其组合策略、接种微藻的检测分析与选择、沼液培养基的调配以及高品位沼气安全性能的验证；然后进行室外中试实验，建立小型的农场以模拟拥有各种农村固体废弃

物的环境，研究在实际应用中利用微藻提升沼气品位工艺的实际效果，分析各种物料平衡关系以及系统维持运行的条件；最后把室内和室外实验的结果相结合，通过对于微藻提升沼气品位机理的再次分析，改进各种工艺参数，并对整个研究进行经济实用性分析，找到本工艺技术的最优操作策略和方案。

具体的实验方案分列如下：

(1) 光照条件的研究

- a. 反应器光照结构的研究
- b. 反应人工光源的光质、光强和光暗比的选择对比研究
- c. 反应器的光照操作调配方案和最优策略的研究

(2) 沼液培养基的研究

- a. 沼液培养基接种前起始温度、pH值、溶解氧和氧化还原电位的最适合值研究
- b. 微藻在沼液中的接种率和接种方法的研究
- c. 沼液培养基的预处理方法研究
- d. 沼液培养基可能的营养物质调配方案研究

(3) 接种藻种的研究

- a. 常见纯种藻种的光合作用效率和净污能力对比筛选研究
- b. 部分野生藻种的光合作用效率和净污能力对比筛选研究
- c. 筛选藻种的CO₂和CH₄耐受度研究

(4) 微藻性质变化规律研究

微藻提升沼气品位的机理在于检测和分析在上述（1）（2）（3）所涉及的影响因素变化过程中微藻性质变化规律的研究。

- a. 微藻数量变化的研究

- b. 微藻形态变化的研究
- c. 微藻物质组成变化的研究
- d. 微藻光合色素种类和活性的分析对比研究
- e. 微藻固碳性能的研究

(5) 工艺安全性评价的研究

结合“（4）微藻性质变化的研究”结果探究和分析减少沼气品位提升工艺的不安全性因素。

- a. CH_4 和 O_2 混合条件的安全性评价研究
- b. 微藻光合作用产 O_2 和呼吸作用吸收 O_2 的平衡性研究

(6) 中试模拟农场的研究

a. 物料平衡性研究

- ① 微藻培养基质沼液所能支持的微藻的量与达到规定品位提升效果而所需微藻的量的物料平衡性研究
- ② 原沼气中 CO_2 的量与微藻生长所需 CO_2 的量的物料平衡性研究
- ③ 沼气品位提升过程中微藻增殖的量与混合厌氧发酵所能消纳的微藻的量的物料平衡性研究

- b. 沼气品位提升效果的实地分析与验证
- c. 提升沼气品位机理的再次分析
- d. 利用微藻提升沼气品位工艺的参数改进

(7) 经济实用性的研究

- a. 光照条件的经济实用性分析
- b. 沼液培养基的经济实用性分析
- c. 接种藻种的经济实用性分析
- d. 工艺过程中所产高品位沼气和光能输入的经济实用性对比分析

e. 中试模拟农场整体运行方式的经济实用性分析

实施方案的进度安排如下：

(1) 2012年10月至11月

全部完成关于光照条件的各项研究，具体包括：光照反应器的最优结构和材料的研究，人工光源的光质、光强和光暗比的选择对比研究，沼气通入方式的研究，操作温度和搅拌方法的研究，最终得出整个反应器的光照操作调配方案和最优操作策略。同时基于藻种接种率和接种方法的研究结果来完成常见纯种藻种和部分野生藻种的光合作用效率和净污能力对比筛选研究，得出最优藻种的选配。最后根据已得到的结果来研究沼液培养基接种前起始温度、pH值、溶解氧和氧化还原电位的最适合值，最后得到沼液培养基的预处理方法。此阶段最终还要进行阶段性试验数据的处理并发表相关论文，申请专利。

(2) 2012年12月

此阶段是本项目课题的关键核心部分，我们要进行筛选藻种的CO₂和CH₄耐受度的研究，检验其对于沼气品位提升的效果，同时附带监测沼液的净化情况。重点研究利用微藻提升沼气品位的机理，检测和分析在光照条件、沼液培养基和接种藻种的各项影响因素变化过程中微藻性质的变化。具体包括微藻数量、形态和物质组成的变化的研究，其中又以微藻光合色素种类和活性的分析对比研究为核心，以微藻固碳性能的研究为重点。最后根据前面的研究结果进行沼液培养基可能的营养物质调配方案的研究，以期得到最好的微藻提升沼气品位的培养条件。此阶段还要进行阶段性试验数据的处理并发表相关论文，申请专利。

(3) 2013年1月至2月

完成CH₄和O₂混合条件的安全性评价研究和微藻光合作用产O₂和呼吸作

用吸收O₂的平衡性研究，最终确定所述沼气品位提升方法的安全有效性。此阶段最终还要进行阶段性试验数据的处理并发表相关论文和申请专利，并且与国内外知名大学和相关研究机构开展学术交流。

(4) 2013年3月

全部完成中试模拟农场的研究，具体包括：利用微藻提升沼气品位效果的实地分析与验证、微藻培养基质沼液所能支持的微藻的量与达到规定品位提升效果而所需微藻的量的物料平衡性研究、原沼气中CO₂的量与微藻生长所需CO₂的量的物料平衡性研究、微藻增殖的量与混合厌氧发酵所能消纳的微藻的量的物料平衡性研究。同时根据现场中试实验的结果对已经在实验室中研究出的关于提升沼气品位机理的成果进行再次的分析，对工艺参数进行改进和合理的调整，以期达到最好的中试实验效果，为以后本项工艺技术在我国农村地区的广泛应用奠定坚实的基础。此阶段最终还要进行阶段性试验数据的处理并发表相关论文和申请专利，并且与国内外知名大学相关研究机构开展学术交流。

(5) 2013年4月

在中试实验完成的基础上，首先进行利用微藻提升沼气品位工艺的具体技术的经济实用性分析：光照条件、沼液培养基质和接种藻种的经济实用性分析。然后进行工艺过程中所产高品位沼气和光能输入的经济性对比分析和中试模拟农场整体运行方式的经济性分析。此阶段最终进行所有试验数据的汇总和处理，并发表相关论文和申请专利，并且与国内外知名大学相关研究机构开展学术交流，并且最后完成项目结题所必须的各项工作的。

3.可行性分析

(1) 相关研究成果

国外对于利用微藻减少大气中温室气体CO₂和以CO₂为强化碳源从而促

进微藻生长来净化污水的研究可知，在采取一定技术手段的前提下，微藻确实具有很强的CO₂固定能力，且有可能利用这种能力来减少沼气中CO₂含量以提升沼气品位。具体的利用微藻吸收沼气中的CO₂以提高沼气品位的方法已经有国内学者以专利申请的方式提出过。他们提出了沼气发酵和自养型淡水微藻耦合培养的设想，甚至于更进一步的CO₂零排放型有机废弃物资源化利用。虽然他们对于本研究课题的内容只是浅尝辄止，并没有探究微藻得以提升沼气品位的机理和工艺参数，但是他们的实践行为则证明了此技术方法具有一定的可行性和合理性。国内外对于提升沼气品位的化学吸收法、物理法、碱洗法、膜分离法、低温分离法和固定床吸附法等的研究较多，他们则在沼气品位检测技术和安全性评价方法以及经济实用性分析原则等方面对本研究课题有很好的借鉴意义。

国内外对于利用现有的污水处理厂来处理稀释过的沼液，或者渗滤塘和蚯蚓生态滤池等原位处理技术，以及土层渗灌和直接农田灌溉来处理原沼液的研究较多。他们在微藻种属鉴定、微藻性质变化的检测和检验、污染物监测以及经济实用性分析等方面的研究成果，都为我们研究课题提供了极具价值的参考依据。国外对于生态农场建立和维护以及固废循环体系的技术流程都已经基本成熟，很多学者都已经发表了一定数量的研究性论文，积累了丰富的相关资料。这对本研究课题借鉴国外经验来分析解决我们国内的农村问题是有帮助的。

（2）现已经完成的本课题部分研究工作

本计划申请人所在的课题组对于利用微藻吸收CO₂以及沼气品位提升的相关研究已经开展了多年，提出了很多极具价值的研究思想和方法，并且已经进行了大量的研究，取得了很多的实验成果，积累了丰富的研究经验。课题组基本完成了常见纯种藻种的光合作用效率和净污能力对比筛选研究；沼

液培养基接种前起始温度、pH值、溶解氧和氧化还原电位的最适值以及预处理方法的研究。同时还在购置的光照培养箱中就人工光源的光质、光强和光暗比的选择进行了研究，初步完成了光照操作调配方案和最优策略的规划。课题组还成功将整个工艺技术路线相互串联，各种研究思想和方法融会贯通，多次获得了将甲烷含量提升到85%以上的实验结果。这些都为本项目所述的利用微藻提升沼气品位机理的研究提供了极好的先决条件，为研究的全面开展奠定了坚实的基础，为完实现课题目标提供了有力的保障。

对于利用微藻提升沼气品位的研究本课题组拥有雄厚的研究基础。杨世关博士后和李继红博士在本课题组工作期间曾于2008年提出过将沼液养藻和微藻厌氧发酵产沼气相结合的研究方向，并且对于利用微藻高效的光合固碳能力来吸收沼气中的CO₂以提升沼气中CH₄的含量而进行了简单的探索性实验，并且申请了国内专利。虽然他们对于利用微藻提升沼气品位的研究因为时间受限而仅仅停留在初步的设想阶段，但是对于光生物反应器的人工光源和光质光强的操作策略、沼液培养基的预处理条件和起始参数以及微藻藻种的鉴定、选择和性质检测都提出了有意义的研究建议。在随后的两年中，课题组又不断对本研究项目的计划和内容进行充实和完善。基于此，在购置的光照培养箱中，我们选取小球藻 (*Chlorella vulgaris*) 初步完成了光合作用效率和净污能力对比的研究，对于沼液培养基接种前起始温度、pH值、溶解氧和氧化还原电位的最适值以及预处理方法也有了部分实验结果。通过对光照培养箱的改造，我们采用LED人工光源，对光质、光强和光暗比的选择进行了先期实验，对光照操作调配方案和最优策略有了初步的实验结论。结果表明：固定的“光生物反应器”运行条件是选用小球藻(*Chlorella Vulgaris*)、培养温度25摄氏度、pH=6.5、光暗比为12h:12h。光照操作调配方案的结果是：对于小球藻在任何生长阶段的增殖速率而言，其LED光质排序都为红色>白

色>黄色>紫色>蓝色>绿色（图3）；对于小球藻在任何生长阶段的净污能力而言，其LED光质排序都为红色>黄色>白色>蓝色>紫色>绿色（图4-6）。所以综合考虑，得出LED光质排序为红色>白色>黄色>蓝色>紫色>绿色。决定采用LED红色光作为人工光源。对于小球藻在任何生长阶段的光照强度对于增殖速率的影响而言，其LED光强度的最优策略是0—48h—96h—144h—240h四个阶段，各阶段依次采用光照强度800Lux、1200Lux、1600Lux和2000Lux（图7）；对于小球藻在任何生长阶段的光照强度对于净污能力的影响而言，其LED光强度的最优策略是0—48h—96h—144h三个阶段，各阶段依次采用光照强度800Lux、1200Lux和1600Lux（图8-10）。所以综合考虑，得出初步确定的最优策略是采用LED红色光，将光照强度则是分为0—48h—96h—144h三个阶段，各阶段依次采用光照强度800Lux、1200Lux和1600Lux，此最优光照策略比保持光照强度不变的方法节能约40%（图11）。最后结果表明小球藻干重密度最高峰可达316.67 mg/L，沼液COD、TN和TP的去除率分别可以达到92.34%、80.24%和89.50%。然后我们初步设计，采用改造后的市场常见的CPP薄膜真空收纳袋（36L）作为光照反应器，其中沼液浓度以TP 11.21mg/L和TN 562.5mg/L左右为标准调配，接种小球藻和沼液体积比为1:2，藻种密度为干重180mg/L，沼液和接种小球藻混合液18L，60%CH₄和40%CO₂混合气体17L作为模拟沼气。最后经过约240h的反应，沼气品位提升到CH₄含量85.6%。虽然品位提升的机理还没有进一步分析，工艺流程也没有达到最优化最稳定的条件，但是此结果证明我们前期的研究设想是合理的，利用微藻提升沼气品位的方法是切实可行的。这些初步研究成果也得到了国内外同行的认可，受邀参加了《东亚研究型大学联盟（AEARU）》于2012年3月29日至30日在台湾大学举行的2012 AEARU 4th Energy and Environmental Workshop。

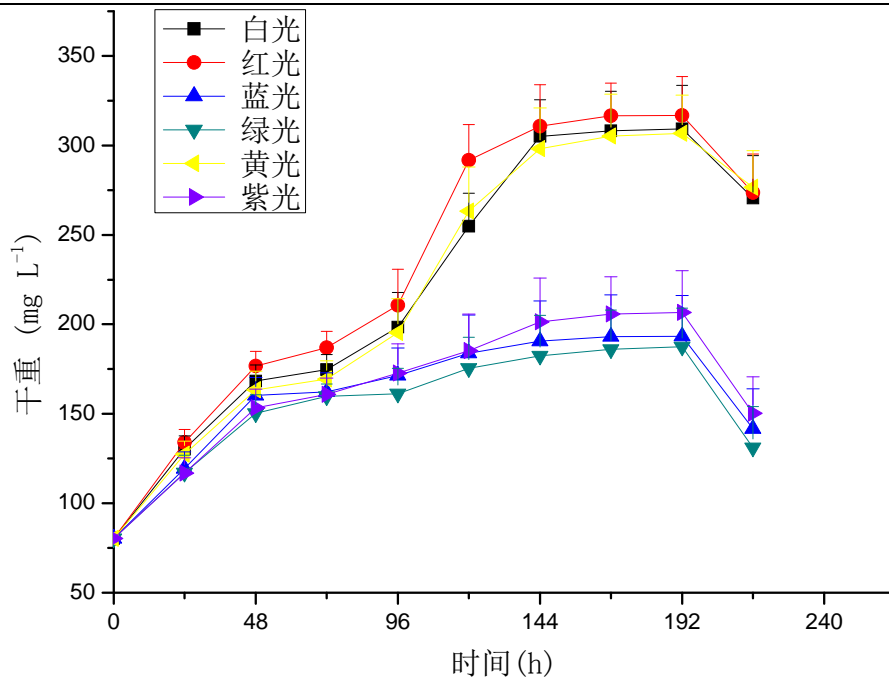


图3 不同光质条件下小球藻的干重变化

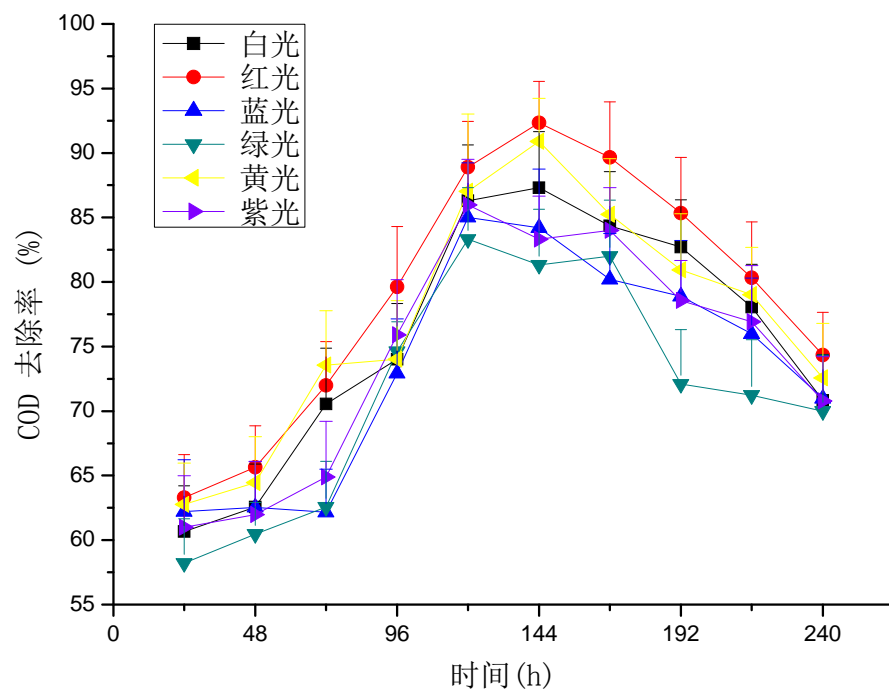


图4 不同光质条件下小球藻对于沼液的COD去除率的变化

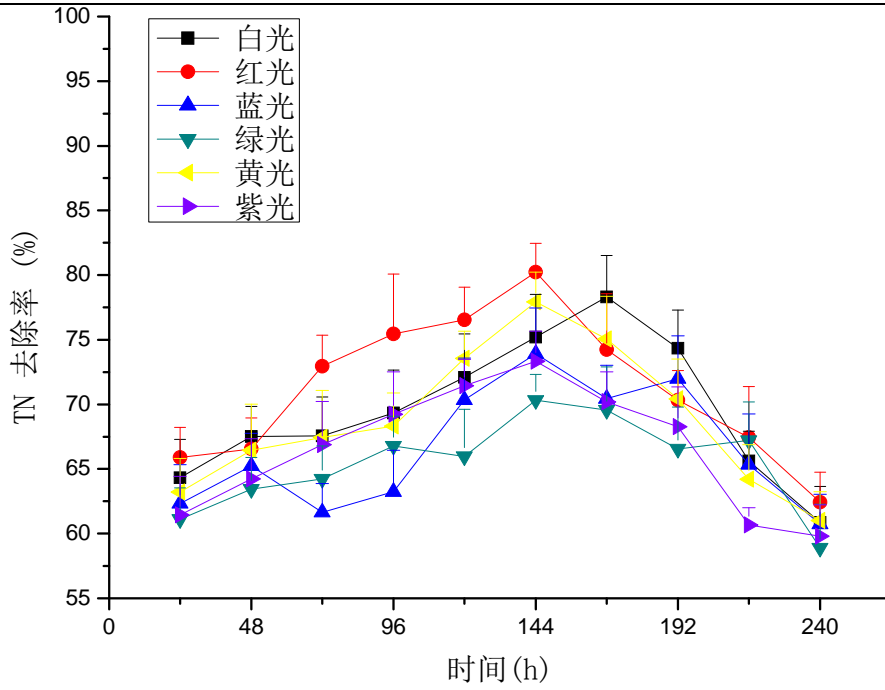


图5 不同光质条件下小球藻对于沼液的TN去除率的变化

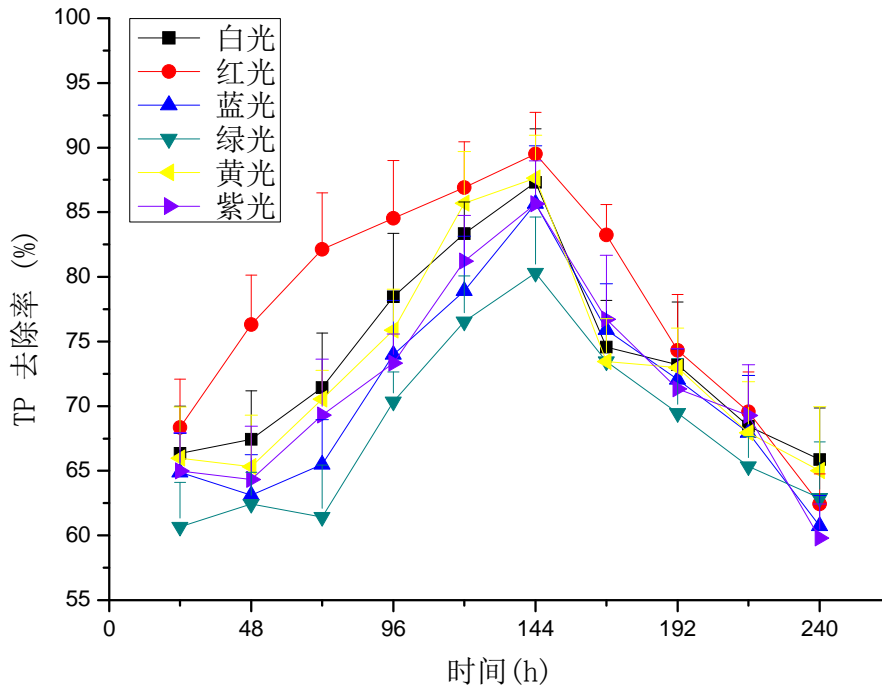


图6 不同光质条件下小球藻对于沼液的TP去除率的变化

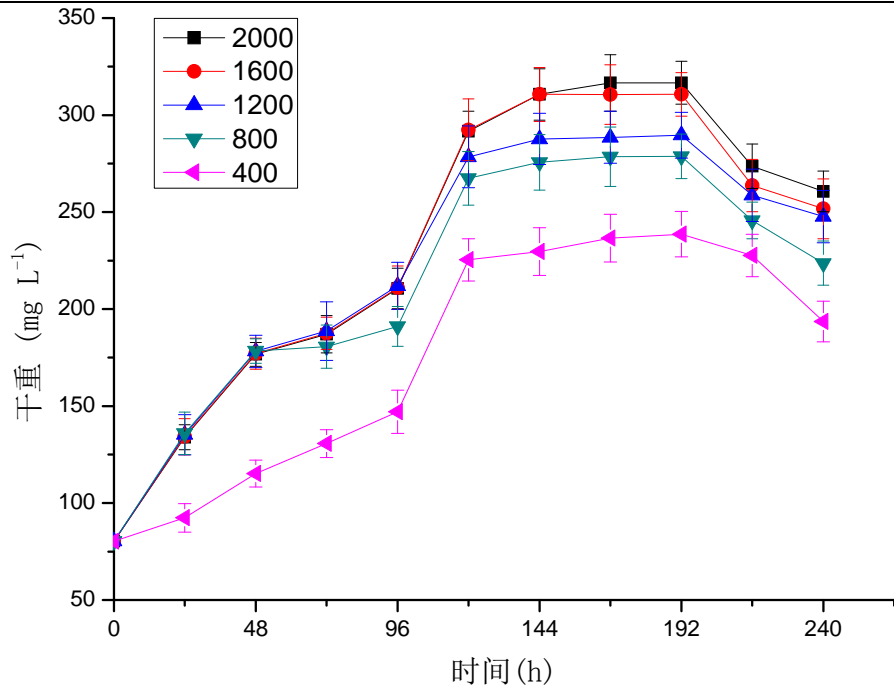


图7 不同光强度条件下小球藻的干重变化

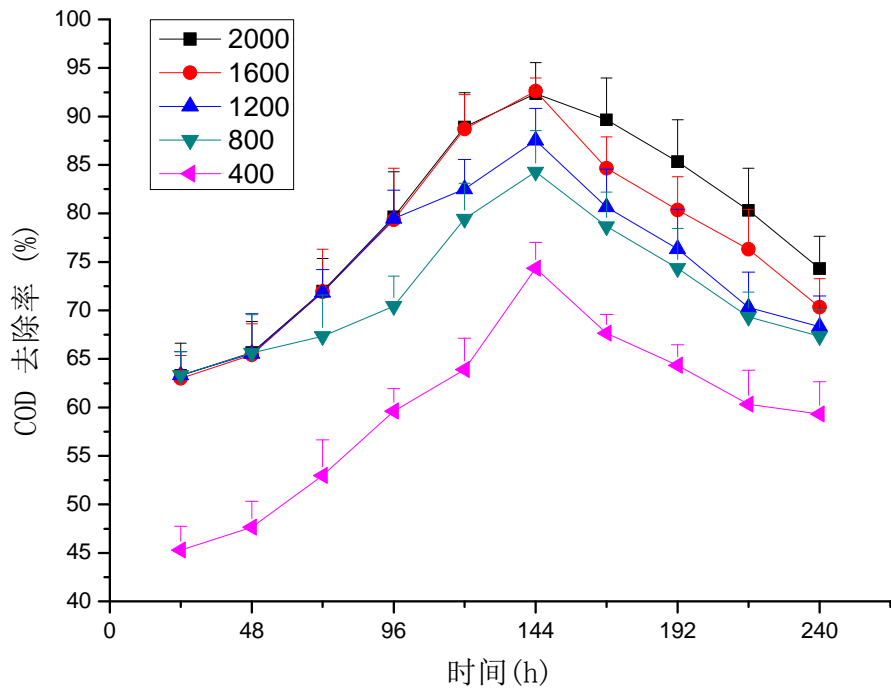


图8 不同光强度条件下小球藻对于沼液的COD去除率的变化

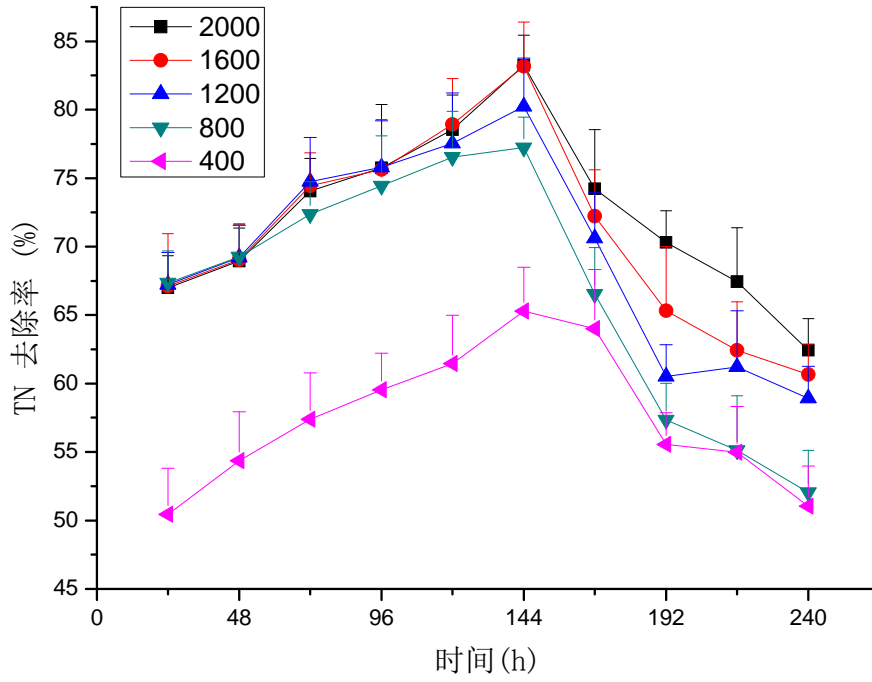


图9 不同光强度条件下小球藻对于沼液的TN去除率的变化

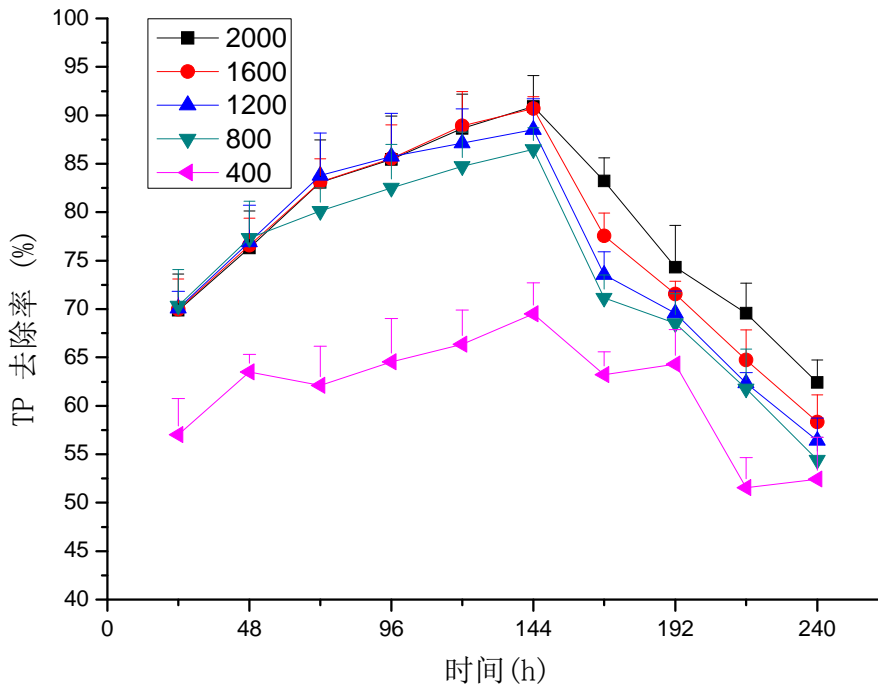


图10 不同光强度条件下小球藻对于沼液的TP去除率的变化

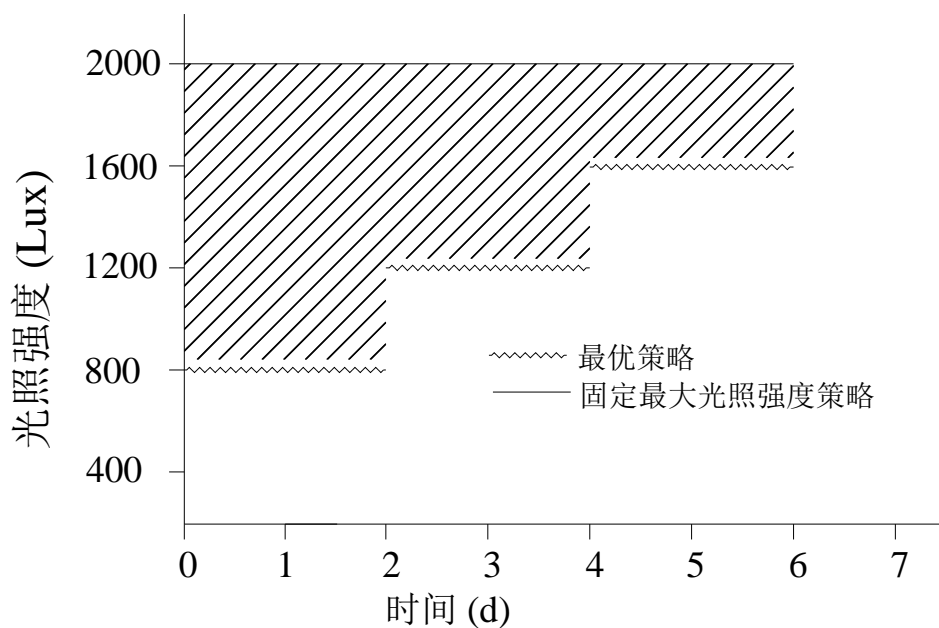


图11 最优策略节能效果

(3) 本计划申请人所在的课题组的科研实力

本课题组成员在CO₂吸收和减排、利用生物资源技术降解污染物以及农村固体废弃物资源化利用和循环经济等研究领域已经获得了很多研究成果，在相关国际权威环境类期刊杂志发表论文20余篇，并参加过多次国际学术研讨会和研究生交流培训项目。在生物资源技术等研究领域曾获得过国家科技重大专项课题、国家和省部级基金等的资助。

(4) 科研思想的合理性

农村固体废弃物混合厌氧发酵工艺在我国农村地区，特别是苏南地区，具有非常广泛的应用，已建成的装置很多，具有普遍性。但是由于沼气品位低下，发酵装置的实际使用效果并不理想。这样就造成了很多装置的闲置和浪费，原本应该经过厌氧发酵处理的秸秆和畜禽粪便等也被焚烧或者直接排放，不仅严重污染了环境，也浪费了生物质能资源。如果本研究项目所述的技术方法得以付诸实践的话，则有望一举扭转现在农村固体废弃物资源化利用的不利局面。

从技术层面上来说，虽然国外已经有了一些较为成熟的沼气品位提升的技术，但是由于经济条件状况和工艺手段的限制，他们并不都适合在我国农村地区大规模的推广。中国的国情不同于世界上任何一个国家，我国是一个发展中国家，又是一个农业大国，所以我国的农业状况也同世界上其他国家都有所不同。这就要求我们必须基于中国特色的农业生产现状来探究我们自己的沼气品位提升技术。以课题组的研究基础和实力，通过本申请所述的研究内容和计划，能够开发出一种切实有效的提升厌氧发酵所产沼气的品位的方法，并通过研究其提升过程的机理，最终设计出一套经济高效的工艺流程。在沼气品位提升得以实现的基础上，我们再结合沼液养藻和微藻厌氧发酵，则可以进而构建一个“农村固体废弃物资源化循环利用体系”，为我国农村固体废弃物的处理和处置方法的变革以及废弃物资源化循环利用的思想进步做出重大贡献。

四、创新点简介

本课题将系统性的研究利用微藻提升沼气品位的机理，并且通过分析提升过程中微藻性质的变化，最终开发出一种可以切实可行的能激活现有农村厌氧发酵装置的提升沼气品位的方法。其在提升沼气品位的同时还可以实现沼液的资源化利用，并且通过对于微藻提升沼气品位机理的研究，可以进一步构建一个“农村固体废弃物资源化循环利用体系”。本研究集社会、经济和生态效益为一体，既提供了高品位生物质能源沼气，又净化了高负荷污染物沼液。

本项目拟采用具有极高光合作用效率和生长速率的微藻来吸收原沼气中的 CO_2 ，提高可燃成分 CH_4 的含量，以提升沼气的品位。此方法的理论科学依据是：微藻以其独特的细胞结构和光合色素种类等因素，具有高于其他

植物40%以上的光合作用效率，因此其对于碳源CO₂的固定能力也是极强的。利用此特性的研究已经存在，但都是为了提取藻类中的油脂或者蛋白质等物质，且其中所涉及到的藻类吸收CO₂的内容也并非研究的重点，取得的效果也不够理想。本研究课题的独到之处则在于我们是专门主攻如何利用微藻快速生长时对于CO₂的超高固定能力，通过检测和分析微藻的数量、形态、物质组成（特别是光合色素的种类和活性）以及固碳能力等参数的变化机理，确定出最优的工艺技术参数，最终达到切实有效提升沼气品位的目地。

本研究项目的创新之处包括：

（1）沼液养藻提升沼气品位

本研究项目提升沼气品位所用微藻的培养基质是发酵产物沼液，这样不仅为微藻的生长繁殖找到了合适的营养基质，且还可以同时实现沼液的净化和资源化利用。沼液不仅含有丰富的氮磷钾等大量元素和锌等微量元素，而且含有17种氨基酸、活性酶等。这些营养元素基本上是以速效养分形式存在的，因此沼液的速效营养能力强，养分可利用率高，是多元的速效复合肥料，能迅速被微藻吸收利用。且沼气发酵过程中微生物的复杂代谢产生一些具有生物活性的物质，因此沼液中氨基酸、植物激素(乙酸、细胞分裂素和赤霉素等)和B族维生素类(B1、B2、BS、B6、B11和B12等)等含量丰富，他们也都可促进藻类的生长发育。

（2）微藻混合厌氧发酵产沼气

本项利用微藻提升沼气品位后，增殖的微藻不会作为废弃物排放，而是作为混合厌氧发酵的原料得以资源化循环利用，微藻中有机物质含量丰富，进行厌氧发酵产沼气切实可行。

（3）农村固体废弃物资源化循环利用体系

本研究项目的主要目的是解决农村沼气装置产气品位低下的问题，图片

限制农村固废厌氧发酵产沼气的限制性瓶颈。因此，沼气品位提升工艺及其引申出来沼液养藻和微藻厌氧混合发酵技术，这三者则可以一起构成“农村固体废弃物资源化循环利用体系”（示意图1），它在提升沼气品位时并没有产生新的污染物，体系的能量输入是光能，主要输出是高品位沼气，也包括部分可以供给农田的沼渣生物质肥料。

五、预期目标及成果形式：

1. 预期目标

拟实现的宏观目标：

（1）激活现有农村厌氧发酵设施

本研究所提的提升沼气品位的工艺如果得以实现，将重新激活现有的农村厌氧发酵设施。我国从上个世纪 70 年代开始就在农村地区大力发展有机废弃物厌氧发酵生产沼气的实践工作，进入新世纪以来考虑到国家能源结构调整以及农业废弃物环境污染的问题，我国对于沼气事业的投入更是逐年增加，据统2010的数据统计，我国已经成为世界上最大的户用沼气生产国和消费国。但是由于我国畜牧业和种植业结构的调整，使得发酵装置不能适应新的发酵原料；同时受限于村户用沼气发酵装置操作人员的技术水平，我国这些对于农村沼气事业的现有投入都没有有效的解决沼气品位低下的问题，我国沼气事业的发展面临着严重的瓶颈。如果本研究的沼气品位提升技术得以应用，将会为广大农村地区的现有沼气发酵设施带来新的发展契机，避免沼气事业前期投入的付诸东流。

（2）盘活现有沼气发电企业

本研究课题开发的沼气品位提升技术的核心是由微藻和高效光生物反应器所组成的“生物净化反应器”（示意图1），其存在也可以不依赖于农村的厌氧发酵设施，而可以广泛的应用到所有需要提升沼气品位的领域。我国利用沼气发电的建设起步于上世纪90年代，沼气来源极为广泛，包括：固废厌氧发酵、垃圾填埋产气、混合发酵等。但是所产沼气品位普遍较低，严重影响了电力生产的正常进行，沼气发电企业难以为继。如果使用了本研究项目的沼气品位提升技术，有效提高沼气中 CH_4 的含量，则可以盘活现有的沼气发电企业，为他们带来巨大的经济效益。

（3）处理高负荷污染物

本研究项目所涉及的原沼气中 CO_2 的吸收对象是微藻，其以极高的繁殖速率和营养物质吸收能力可以实现对高负荷污染物沼液的净化。但它又不仅仅只针对沼液，其他高负荷的污染物，如猪粪、牛粪和养虾废水等，也都可以使用本技术加以去除。同时在此过程中增殖的微藻会被回收利用作为混合厌氧发酵的原料来生产沼气，而不会排放到自然水体中造成二次污染，这样就避免了在处理一种污染物的同时而产生了新的污染物。

（4）建立生态示范农场

在研究微藻提升沼气品位的机理和相关工艺研发的基础上，本项目可以利用“农村固体废弃物资源化循环利用体系”（示意图1）来建立一个生态示范农场。其主要内容包括：农场中种植农作物，饲养牲畜；以农业秸秆和畜禽粪便为主要原料，辅以“生物净化反应器”中增殖的微藻进行厌氧发酵产沼气；产生的沼气通入到“生物净化反应器”中作为微藻生长的碳源，所产生的沼液则作为微藻的培养基质得以资源化利用，产生的沼渣还可以还田作为优质固体肥料。此生态农场采用了本研究课题所述的“资源化循环利用体系”的原理，避免了二次污染问题。其以光能为系统输入，在生产农业产品的同时

也输出高品位的沼气。此示范农场可以作为今后资源化循环利用的典范，开展各种实验和研究，为我国农业可持续发展提供宝贵的资料数据和范例。

拟达到的技术指标：

(1) 沼气品位提升

通过探究利用微藻提升沼气品位的机理，使得混合厌氧发酵所产沼气品位大幅度提升，沼气中 CH_4 含量稳定达到或者超过85%。

(2) 沼液净化

厌氧发酵所产沼液作为微藻提升沼气品位时的培养基质，污染物得到大幅度削减，出水指标达到城镇污水处理厂污染物排放标准（GB18918-2002）。

(3) 工艺技术成熟

通过中试模拟农场研究的安全性和经济实用性评价结果对沼气品位提升机理进行再次的分析，最终得到工艺参数的合理改进和调整，研发出成熟的技术体系。

2. 提交成果形式

(1) 按时向“2012年绿苗计划”管理机构递交年度进展报告及项目总结报告

(2) 申请国内技术发明专利2-3项，申请国际技术发明专利1-2项

(3) “中国科技论文在线”上发表论文3篇，SCI环境类国际期刊杂志($\text{IF} \geq 3.0$)发表相关论文2篇以上

(4) 建设1个示范工程

六、项目经费预算计划（明细表）：

1. 材料费：

Whatman GF/C 玻璃纤维滤纸 50 盒，合计 1 万元；中科院水生所淡水藻种库 FACHB 购买藻种 3 种各 10 套，合计 0.6 万元；其它实验器材合计 0.4 万元。

2. 资料费：

实验数据记录、打印、装订，合计 0.1 万元；论文发表编辑费、版面费、英文 SCI 论文润色费，合计 0.5 万元。

3. 加工费：

无

4. 检测费：

小球藻类型、数量和干重检测，合计 0.1 万元；沼液污染物指标检测，合计 0.1 万元。

5. 交通费：

从发酵工厂取样沼液，合计 0.2 万元。

经费合计：3 万元

推荐意见：

推荐人签字

年 月 日

学校意见：

学校公章

负责人签字：

年 月 日

联合国环境规划署-同济大学环境与可持续发展意见

公章

负责人签字：

年 月 日

基金委员会专家委员会意见：

公章

负责人签字：

年 月 日

六、项目经费预算计划(明细表):

1. 材料费:

Whatman GF/C 玻璃纤维滤纸 50 盒, 合计 1 万元; 中科院水生所淡水藻种库 FACIB 购买藻种 3 种各 10 套, 合计 0.6 万元; 其它实验器材合计 0.4 万元。

2. 资料费:

实验数据记录、打印、装订, 合计 0.1 万元; 论文发表编辑费、版面费、英文 SCI 论文润色费, 合计 0.3 万元。

3. 加工费:

无

4. 检测费:

小球藻类型、数量和十重检测, 合计 0.1 万元; 沼液污染物指标检测, 合计 0.1 万元。

5. 交通费:

从发源工厂取样沼液, 合计 0.2 万元。

经费合计: 2 万元

推荐意见:

同意推荐。

推荐人签字:

郑正

2012年9月11日

学校意见:

同意

学校公章

负责人签字:

刘毅

2012年9月11日

联合国环境规划署-同济大学环境与可持续发展意见

公章

负责人签字:

年 月 日

基金会委员会专家委员会意见:

公章

负责人签字:

年 月 日