

甲烷转换因子在沼气项目碳减排过程中的应用研究

曾 锦^{1,2}, 鲁 艺¹, 徐 锐^{1*}, 孙 蓉¹, 刘 莹¹, 曾维庆³, 岳志强³, 周 鹰⁴

(1. 云南师范大学能源与环境科学学院, 昆明 650500; 2. 江苏省农业科学院农业设施与装备研究所, 南京 210014; 3. 玉溪市农业环境保护和农村能源工作站, 云南 玉溪 653100; 4. 九溪镇规划建设和环境保护中心, 云南 玉溪 652604)

摘 要: 本研究结合国际应对气候变化的大背景, 满足国内生态文明建设及自主减排的需求, 通过明确沼气项目的减排机制, 对甲烷转换因子及其应用案例作了介绍, 指出了甲烷转换因子的重要性以及地区缺省甲烷转换因子在核算碳减排量过程中的局限性, 为进一步探究典型沼气发酵生态系统甲烷转换因子计算模型的建立奠定了基础。

关键词: 气候变化; 沼气; 甲烷转换因子; 碳减排

中图分类号: S216.4

文献标识码: A

文章编号: 2096-5877(2022)04-0130-06

Application Research of Methane Conversion Factor in Carbon Emission Reduction of the Biogas Projects

ZENG Jin^{1,2}, LU Yi¹, XU Rui^{1*}, SUN Rong¹, LIU Ying¹, ZENG Weiqing³, YUE Zhiqiang³, ZHOU Ying⁴

(1. School of Energy and Environmental Science, Yunnan Normal University, Kunming 650500; 2. Institute of Agricultural Facilities and Equipment, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014; 3. Yuxi Agricultural Environmental Protection and Rural Energy Workstation, Yuxi 653100; 4. Jiuxi Town Environmental Planning & Construction and Environmental Protection Center, Yuxi 652604, China)

Abstract: Combined with the background of international response to climate change, this study meets the needs of domestic ecological civilization construction and independent emission reduction. By defining the emission reduction mechanism of biogas projects, this study introduces the methane conversion factor and its application cases, and points out the importance of methane conversion factor and the limitations of the default methane conversion factor in the process of accounting carbon emission reduction, which laid the foundation for further exploration of the establishment of methane conversion factor calculation model for biogas fermentation.

Key words: Climate change; Biogas; Methane conversion factor; Carbon emission reduction

2016年据相关部门统计,每年在中国产生38亿吨的畜禽粪污量,但是它们的综合利用率却不到60%^[1],可见畜禽养殖废弃物在我国并没有得到广泛有效利用。畜禽养殖废弃物如果得不到妥善处理,可能会对周边环境造成严重污染,排放出大量的温室气体^[2-3],其中的痕量气体CH₄对全球变暖的贡献率达22%,仅次于CO₂^[4],但它的温室效应是CO₂的25倍^[5]。2016年12月,在习近平总书记主持召开的中央财经领导小组第十四次会议中强调:加快推进畜禽养殖废弃物处理和资

源化,关系6亿多农村居民生产生活环境,关系农村能源革命,关系能不能不断改善土壤地力、治理好农业面源污染,是一件利国利民利长远的大好事。要坚持政府支持、企业主体、市场化运作的方针,以沼气和生物天然气为主要处理方向,以就地就近用于农村能源和农用有机肥为主要使用方向,力争在“十三五”时期,基本解决大规模畜禽养殖场粪污处理和资源化问题^[6]。在提高农业产量、增加农民收入的同时,如何做好生态环境的保护,已经成为制约农业可持续发展的重要瓶颈,而沼气建设作为解决农村环境问题、农村能源问题的重要途径,一直以来备受国家领导人的重视。在现阶段,中国统筹推进“五位一体”的总体布局下,国家把生态文明建设摆在至关重要的战略位置,而农村是生态文明建设的主阵地^[7],因此农村沼气建设也必将在快速发展的新时代发

收稿日期: 2019-12-16

基金项目: 国家自然科学基金(41561108); 云南省中青年学术和技术带头人后备人才项目(2017HB019)

作者简介: 曾 锦(1993-),男,研究实习员,硕士,主要研究方向为农业生物环境与能源工程。

通讯作者: 徐 锐,男,博士,教授, E-mail: ecowatch_xr@163.com

挥不可或缺的作用。据调查,截至2016年底,全国户用沼气池已达4 160多万个,拥有11.3万处各种类型的沼气工程,年生产沼气约145亿立方米^[8],可见我国沼气建设项目在碳减排市场上具有很大的潜力。

发展沼气建设项目既能够加快畜禽养殖废弃物的资源化利用,保护好农村的生活环境,同时也能够减少温室气体排放,符合国际碳减排趋势。而在沼气项目减排量的核准过程中,涉及方法学的建立与运用,选择合适的方法学、优化减排量核心指标对准确掌握项目实际减排量具有示范意义。针对以沼气项目为载体的新方法学的开发是一项系统工程,需要明确粪便管理方式(如厌氧条件、水力滞留时间、发酵周期等)、年度气温变化情况、粪便特性等相关数据,然后依据特定情境下的减排量公式进行计算,再结合实地排放通量监测数据进行校正。而在减排量计算过程涉及的众多指标中,尤以甲烷转化因子(Methane Conversion Factor, MCF)最为关键,且建立过程极为复杂。因为MCF的计算过程受到众多因素的影响,例如气候条件、储存时间、滞留期、粪便特性等10余项指标^[9],而且除了基本模型计算外,仍需要实地监测,同时根据管理操作方式(Management & Design Practices, MDP)进行校正。因此,MCF值在多数发展中国家是缺省的,而在政府间气候变化专门委员会(IPCC)的评估报告以及《2006年IPCC国家温室气体清单指南》中,所采用粪便管理系统的MCF值大多以经验值或估算值为主,且仅以粪便管理系统的类别和年平均温度作为粗略的划分标准,与项目实地MCF值存在较大偏差。因此,本研究结合国际应对气候变化的大背景,满足国内生态文明建设及自主减排的需求,通过明确沼气项目的减排机制,对甲烷转换因子及其应用案例作了介绍,为进一步探究典型沼气发酵生态系统甲烷转换因子计算模型的建立奠定基础。

1 国际碳减排的发展

1988年12月6日联合国大会《为今世后代保护全球气候》的决议指出:“气候变化是人类共同关切之事项,因为气候是维持地球上生命的关键条件^[10]。”自工业革命以来,人类的经济得到了飞跃式发展,与此同时因人类大量使用化石燃料,过度排放了CO₂、CH₄等温室气体,最终导致全球气候变暖。据分析:人类如果继续任由全球气温

升高,保守估计全球每年因气候变化带来的危害相当于损失5%的全球国内生产总值(Gross Domestic Product, GDP),如果将更为广泛的风险因素再做进一步考虑,这一数字可能升至20%^[11]。地球的自然生态系统和人类的社会经济均因全球气候变暖受到了不同程度的影响^[12-13],海平面上升、冰川融化、极端天气频发、粮食减产等一一牵动着世界各国人民的心,气候变化问题甚至还影响着世界的地缘政治格局^[14],现已成为国际上关注的重点议题,因此相关国际组织于1998年组建了IPCC以应对全球气候变暖^[15]。相关研究表明,近百年全球气候变暖的主要原因是人为温室气体过度排放的结果^[16]。越来越多的国家和地区加入《联合国气候变化框架公约》《京都议定书》和《巴黎协定》三大国际公约,推动国际碳减排已成为大势所趋,争取实现将全球气候升温限制在2℃以内的范围^[17]。在经历了多年的发展已经日趋成熟的国际碳市场上,迄今为止已经发展出CDM(Clean Development Mechanism)、GS(Gold Standard)和国内的PS(Panda Standard)等多种交易平台和标准^[18]。碳金融机制的引入为国际碳汇市场注入了稳定而有活力的可持续发展力,在一定程度上加快推动了世界各国减排的进程。

2 沼气项目的减排机制

2.1 沼气发酵原理

沼气发酵技术属于厌氧消化技术中的一种^[19],即在厌氧的条件下,满足一定的酸碱度和温度等条件,利用厌氧微生物消化分解沼气池内的有机物质,从而产生沼气的过程。沼气的主要成分是CH₄和CO₂,还含有少量的CO、H₂S、N₂等气体^[20]。沼气发酵是一个极其复杂的过程,依靠多种菌群协同共生代谢^[21],关于沼气发酵过程的阶段划分有二阶段学说、三阶段学说和四阶段学说,其中三阶段学说得到了学术界的普遍认可和运用。沼气发酵的三阶段学说包括水解阶段(第一阶段),产酸阶段(第二阶段),产甲烷阶段(第三阶段),具体代谢过程如图1所示。微生物菌群在沼气发酵过程中扮演着举足轻重的角色,它们在一定程度上影响着沼气发酵的效率。

2.2 沼气项目减排效果

以沼气项目为载体的温室气体减排主要体现在碳减排效应上,一般沼气项目被认为具有直接减排效果和间接减排效果。畜禽粪便及其他有机废弃物如果未经任何处理直接暴露在空气中,经

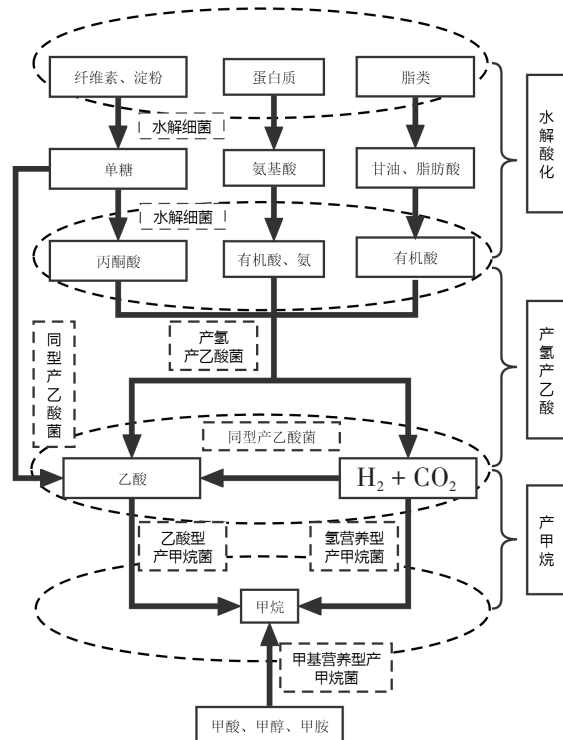


图1 沼气发酵代谢过程图

微生物的消耗分解会产生大量甲烷,这些甲烷无法收集直接排放到大气中,在一定程度上加剧了温室效应。如果这些有机废弃物通过沼气发酵技术处理再经过沼气项目收集利用,可以直接减少CH₄的排放量,减缓温室效应,即所述的沼气项目的直接减排效果;产生的沼气具有作燃料或发电等多种利用方式,减少了薪柴、煤炭的使用,进而减少了温室气体的排放,起到了能源替代效果,即所述的沼气项目的间接减排效果。现阶段,被广泛使用的户用沼气池在实际使用过程中,会因输气管道或池体的破损等发生沼气泄露,同时因户用沼气池的进料口和出料口都与外界空气直接接触,所以仍存在进料液面和出料液面会逸散出小部分甲烷气体,而这一部分往往因技术的限制被相关研究者所忽视,因此在核算户用沼气池实际减排量时往往会存在较大偏差。

2.3 沼气项目减排方法

杨艳丽等^[22]利用复合回归模型模拟预测了中国沼气产业对减排CO₂的贡献作用;王明新、陈绍晴等^[23-24]利用生命周期分析(Life cycle analysis, LCA)的评价方法对户用沼气模式进行了减排清单和节能减排的相关分析;麦文隽等^[25]采用投入产出-生命周期模型(EIO-LCA),对户用沼气池整个生命周期的完全碳排放量进行评估;曾国揆等^[26]探讨了沼气技术的减排效果与沼气CDM项

目的合格性,魏成金等^[27]结合清洁发展机制估算了农村户用沼气的减排量。沼气项目的减排量因使用的计算模型或评价方法不同,存在着大同小异的现象,近年来随着清洁发展机制的引入与运用,越来越多受国际认可的方法学被确立,开发沼气项目成为CDM项目,经核实的碳减排量(CER)更具准确性和参考性。沼气项目的减排量核准过程如图2所示。

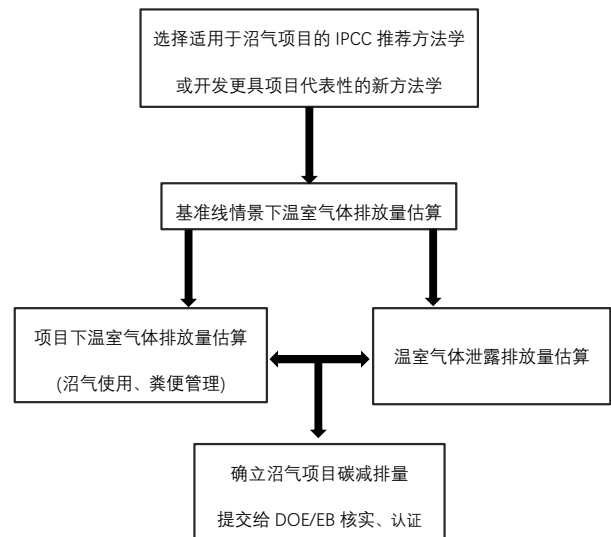


图2 沼气项目碳减排评估的思路和方法

3 甲烷转换因子及其应用

3.1 甲烷转换因子

甲烷转换因子(Methane Conversion Factor, MCF)是指有机质中总能量转化为CH₄的百分比,是温室气体排放量计算的重要参数。目前,针对粪便管理类项目碳排放量计算所采用的MCF值主要有两个来源^[28]:一是通过实地测量CH₄生产量、CH₄使用量、CH₄燃烧量、动静态下的总CH₄产量和总碳含量等监测指标,结合数学计算过程和特定情境描述(如温度、海拔、气压、发酵)而获得的;二是在无测量条件的情况下(大多数发展中国家),参考水分含量、环境温度、pH等相似管理情境下源于专家或文献的公开值,具有较强的随意性和估值性。研究表明MCF值会受到温度、滞留时间、管理方式等非生物因子的影响,而针对沼气发酵系统的MCF值可能会受到原料类型、发酵罐型、发酵浓度以及沼气建设规模等影响^[29-30]。而所有非生物因子影响的实质是能够导致不同代谢途径的产CH₄贡献率发生改变。因此,除环境和管理等外部因素外,MCF变化的实质则是由微生物主导的“差异型”产CH₄贡献率造成的。不同

的CH₄生成途径对CH₄生成量的相对贡献率会因生物因子、非生物因子及其协同作用的不同而发生较大变化,继而影响CH₄排放通量^[28-29]。虽然非生物因子导致微生物群落功能差异,并最终导致产CH₄能力和排放通量的差异已经成为共识,但多数理论仍停留在定性概括的层面,对产CH₄相对贡献率与CH₄产生能力和排放通量的相关性和具体作用方面的研究仍然比较匮乏。甲烷转换因子的微观变化主要通过宏观的甲烷排放通量的变化来体现,因此对微生物群落分布、甲烷转化途径与甲烷排放通量的关系研究将有助于揭示MCF变化规律。根据《2006年IPCC国家温室气体清单指南》第10章(牲畜和粪便管理过程中的排放)表10.17关于无氧发酵池MCF值的计算方法^[30],其计算公式为:

$$MCF = \frac{(CH_4\text{生产量} - CH_4\text{使用量} - CH_4\text{燃烧量}) + \left(\frac{MCF_{\text{存储}}}{100} \times B_0 \times VS_{\text{存储}} \times 0.67 \right)}{B_0 \times VS_{\text{存储}} \times 0.67} \times 100 \quad (1)$$

其中,CH₄生产量为发酵池中的甲烷产量(kgCH₄);CH₄使用量为用作能量的甲烷量(kgCH₄);CH₄燃烧量为喷焰燃烧甲烷量(kgCH₄);MCF_{存储}为已发酵的粪便存放池中排放的甲烷(%);B₀为粪便的最大甲烷生产能力(m³CH₄/kgVS排泄物);VS_{存储}为包括密封存放气体时,发酵前存储的VS排泄量(kgVS);当包括密封顶时,MCF_{存储}=0;MCF_{存储}=液体存储的MCF值。

因为沼气项目具有密封顶,故该系统的MCF_{存储}=0,因此沼气发酵生态系统甲烷转换因子计算公式可以简化为:

$$MCF = \frac{CH_4\text{生产量} - CH_4\text{使用量} - CH_4\text{燃烧量}}{B_0 \times VS_{\text{存储}} \times 0.67} \times 100 \quad (2)$$

又因为针对典型沼气发酵生态系统进料口、出料口均有不同程度的甲烷泄漏,因此CH₄生产量不仅包括发酵间的CH₄产量,而且包括进料口、出料口的CH₄泄漏量。因此,在后续的研究中,可尝试利用常规技术和静态箱技术相结合的方法,以特定畜禽的粪便为原料,长期监测沼气项目的进料口甲烷排放通量、出料口甲烷排放通量和总的甲烷排放通量,再结合生物因子和非生物因子对沼气项目甲烷排放通量的影响,进一步优化典型沼气发酵生态系统甲烷转换因子的计算模型,可直接计算出监测地区沼气项目的MCF值,为部分地区缺省MCF值提供了参考。

3.2 应用案例

天津蓟州区大巨各庄主要利用厌氧消化产沼气技术来处理农村畜禽粪便,卢学强等^[31]根据IPCC的相关报告以及CDM执行理事会(EB)批准的整合方法学AM006(粪便管理系统温室气体减排)和AM0016(封闭性动物饲养操作中改良的动物粪便管理系统温室气体减排),分析了天津蓟县大巨各庄农村畜禽粪便CDM项目温室气体减排的核算方法、额外性和经济效益,据估算该项目实施后,每年可以减少温室气体排放约为1 296.19 t CO₂e,每年可以获益9.84万元。项目首先设置基准线情景,然后确定项目边界,最终通过选择合适的CDM方法学核算项目的温室气体减排量。该项目所选用方法学的CH₄排放公式为:

$$E_{CH_4} = GWP_{CH_4} \times MCF \times D_{CH_4} \times \frac{365}{100} \times \sum_{population} (VS_{population} \times B_{0population} \times N_{population}) \quad (3)$$

其中,E_{CH₄}为给定年份y粪便的CH₄排放量(t CO₂e);GWP_{CH₄}为CH₄全球升温潜能批准值(取值21);MCF为粪便管理系统中的甲烷转换因子(%);D_{CH₄}为在温度20℃、一个标准大气压的情况下CH₄的密度(取值为6.7×10⁻⁴ t/m³);VS_{population}为某一给定类型牲畜群中,每头牲畜每日挥发性固体排泄量,以干物重计(kg干物质重/头·天);B_{0population}为某一给定类型牲畜群中,牲畜粪便的理论产甲烷量(m³CH₄/kg干物重);N_{population}为某一给定类型牲畜群中年均存栏量(头)。

目前没有公开出版中国特定的与甲烷排放相关的参数,该项目所采用的MCF值主要来源于《2006年IPCC国家温室气体清单指南》,对不同牲畜种类粪便采取厌氧发酵的管理方式,MCF值均取10%,这样取值既缺乏代表性又具有局限性,不能准确地反映当地不同粪便不同管理方式对MCF值的影响,最终影响项目减排量的精准性。

山东民和集约化养鸡场原采用开放式厌氧氧化塘处理鸡粪,现转变成利用密闭式厌氧沼气反应器处理,厌氧消化产生的沼气主要用来发电上网。李玉娥等^[32]以山东民和集约化养鸡场为例,利用《联合国气候变化框架公约》EB批准的方法学ACM0010(粪便管理系统减少温室气体排放整合方法学)分析了沼气项目处理鸡场粪污和沼气发电CDM项目对减少温室气体排放的潜力及其经济效益。据估算项目每年可减排84 666 t CO₂e温室气体,减排效益达到593万元/年,同时每年

售电可获利767万元。该项目在确定基线情景下CH₄排放时,利用公式(4)计算:

$$BE_{CH_4} = GWP_{CH_4} \times D_{CH_4} \times \sum_{LT} MCF \times B_{0,LT} \times \frac{N_{LT} \times VS_{LT,y} \times MS\%_{lagoon}}{\dots\dots\dots} \quad (4)$$

其中, BE_{CH_4} 为在 y 年基线情况下 CH₄ 的排放量 (tCO₂e); GWP_{CH_4} 为 CH₄ 全球升温潜能批准值 (取值 21); D_{CH_4} 为在温度 20 °C、一个标准大气压的情况下 CH₄ 的密度 (取值为 6.7×10^{-4} t/m³); MCF 为基线情景下粪便管理方式的甲烷转换因子 (%); $B_{0,LT}$ 为蛋鸡和肉鸡粪便中挥发性固体甲烷生产潜力 [m³ CH₄/(kg·VS·dm)]; $VS_{LT,y}$ 为蛋鸡和肉鸡每年产生的挥发性固体 [kg/(dm·a)]; N_{LT} 为蛋鸡和肉鸡的存栏量 (只); $MS\%_{lagoon}$ 为粪便管理采用氧化塘方式的比例 (%)。

由于该规模化养鸡场 CDM 项目没有公开发表的 MCF 参数,因此参照《2006 年 IPCC 国家温室气体清单指南》的方法,根据当地温度,选取了基线情景下粪便管理方式的 MCF 值为 70%。

综上所述,MCF 被广泛运用于 CDM 项目中,而从项目采用方法学的计算和分析中,不难看出 MCF 在其中起到的关键性作用,我国各地区的 MCF 值仍然比较缺失,而 IPCC 提供方法学所采用的 MCF 值又难以和我国的实际情况相吻合,不能切实满足情景的需要,会造成项目评估存在较大偏差,因此提出适合中国国情的 MCF 值将具有很好的实用价值。

4 结论与建议

节能减排应对气候变化既迫在眉睫又势在必行,通过碳汇交易促进开发 CDM 项目,而 MCF 在核算沼气项目的碳减排量过程中起到关键性作用,如果继续使用缺省的 MCF 值核算项目减排量将影响精准性,使项目评估存在较大偏差。因此,在厘清 MCF 建立原则的基础上,未来可结合沼气项目的甲烷排放通量监测,分析甲烷转换途径和沼气项目内部微生物群落的变化,以典型沼气发酵生态系统为载体研究并建立甲烷转换因子计算模型,为《中国国家排放指南》中缺省的中国地区 MCF 相关数据库的建立提供参考,同时也将为沼气类碳金融项目新方法学的开发、修正和规模化,产业结构调整项目碳减排量的精确计算提供必要的理论依据和方法学基础。

参考文献:

[1] 关于推进农业废弃物资源化利用试点的方案[J]. 湖南畜牧

兽医,2016(6):45-47.

- [2] 张玉海,涂岳,陈苏,等.我国畜禽粪便肥料化利用现状与发展趋势[J]. 东北农业科学,2019,44(5):53-57.
- [3] 许文志,欧阳平,罗付香,等.中国畜禽粪污处理利用现状及对策探讨[J]. 中国农学通报,2017,33(23):106-112.
- [4] Lelieveld J, Crutzen P J, Dentener F J. Changing concentration, lifetime and climate forcing of atmospheric methane[J]. Tellus B: Chemical and Physical Meteorology, 1998, 50(2): 23.
- [5] 寇永珍. 草海高原湿地湖滨带甲烷产生与氧化潜力研究[D]. 贵阳:贵州师范大学,2015.
- [6] 禾日. 全面推进畜禽养殖废弃物资源化工作[J]. 中国畜牧业,2017(7):30-31.
- [7] 中共中央 国务院关于加快推进生态文明建设的意见[J]. 中国环保产业,2015(6):4-10.
- [8] 李景明,李冰峰,徐文勇. 中国沼气产业发展的政策影响分析[J]. 中国沼气,2018,36(5):3-10.
- [9] Joseph Mangino, Deborah Bartram, Amy Brazy. Development of a methane conversion factor to estimate emissions from animal wastelagoons[EB/OL]. [2022-07-27]. <https://www3.epa.gov/ttnchie1/conference/ei11/ammonia/mangino.pdf>.
- [10] 李威. 从《京都议定书》到《巴黎协定》:气候国际法的改革与发展[J]. 上海对外经贸大学学报,2016,23(5):62-73,84.
- [11] Stern N H. The Economics of Climate Change: The Stern Review[J]. American Economic Review, 2007, 98(2): 1-37.
- [12] 王献溥. 全球气候变暖对生态系统和生物多样性的影响及主要对策(一)[J]. 生态与农村环境学报,1992,8(2):1-6.
- [13] 吕妍. 气候变化对我国生态系统和经济社会的影响综述[J]. 装备制造与教育,2012,3(3):50-52.
- [14] 王文涛,刘燕华,于宏源. 全球气候变化与能源安全的地缘政治[J]. 地理学报,2014,69(9):1259-1267.
- [15] 思柯. 气候变化的情景分析[J]. 世界科学,2016(2):1.
- [16] 秦大河. 气候变化科学与人类可持续发展[J]. 地理科学进展,2014,33(7):874-883.
- [17] 金丽娅.《巴黎协定》定下硬指标:全球升温控制在 2 °C 内[J]. 中国慈善家,2016(5):26-27.
- [18] 党锋,毕于运,刘研萍,等. 欧洲大中型沼气工程现状分析及对我国的启示[J]. 中国沼气,2014,32(1):79-89.
- [19] 王殿龙,吴波,艾平,等. 两步预处理对厌氧消化产酸纤维酶解和沼气发酵的影响[J]. 农业机械学报,2018,49(3):322-327.
- [20] 厉亚辉,邱惠珍,俞建龙,等. 生物能源沼气发电热电联产项目中沼气成分检测方法的探讨[J]. 低温与特气,2015,33(4):37-40.
- [21] 李秋敏,吴燕,董明华,等. 云南热带户用沼气池的原核生物群落结构研究[J]. 微生物学通报,2015,42(1):54-63.
- [22] 杨艳丽,李光全,张培栋. 中国沼气产业对减排 CO₂ 的模拟与预测[J]. 农业工程学报,2013,29(15):1-9.
- [23] 王明新,夏训峰,柴育红,等. 农村户用沼气工程生命周期节能减排效益[J]. 农业工程学报,2010,26(11):245-250.
- [24] 陈绍晴,宋丹,杨谨,等. 户用沼气模式生命周期减排清单与环境效益分析[J]. 中国人口·资源与环境,2012,22(8):76-83.
- [25] 麦文隽,李丽丽,栾胜基. 农村户用沼气池碳减排效果评估

- [J]. 干旱区资源与环境, 2018, 32(2): 75-80.
- [26] 曾国揆, 胡 觉, 王秀菊, 等. 沼气技术的减排效果与 CDM 项目合格性探讨[J]. 能源工程, 2006(5): 36-38.
- [27] 魏成金, 刘 谨, 郭军洋, 等. 农村户用沼气清洁发展机制项目减排量估算[J]. 广东农业科学, 2013, 40(18): 231-233.
- [28] 曾 锦. 典型沼气发酵生态系统甲烷转换因子计算模型的建立与研究[D]. 昆明: 云南师范大学, 2020.
- [29] 王明星, 李 晶, 郑循华. 稻田甲烷排放及产生、转化、输送机理[J]. 大气科学, 1998, 22(4): 600-612.
- [30] 政府间气候变化专门委员会. 2006 年 IPCC 国家温室气体清单指南[M]. 日本: 日本全球环境战略研究所(IGES), 2006: 10.47.
- [31] 卢学强, 马建立, 邓小文, 等. 农村畜禽粪便 CDM 项目温室气体减排的核算方法学研究[M]. 石家庄: 河北人民出版社, 2009: 555-560.
- [32] 李玉娥, 董红敏, 万运帆, 等. 规模化养鸡场 CDM 项目减排及经济效益估算[J]. 农业工程学报, 2009, 25(1): 194-198.

(责任编辑: 刘洪霞)

- (上接第 91 页) to dietary iron deprivation in rat duodenum[J]. AJP Gastrointestinal & Liver Physiology, 2005, 288(5): 964-971.
- [7] 梁楚婷, 郭炜骅, 谭 理, 等. 低氧诱导因子-1: 细胞适应氧供应改变的关键蛋白[J]. 生物化学与生物物理进展, 2019, 46(11): 1041-1049.
- [8] 张鹏华, 陈兰英. 低氧诱导因子-1 的转录活性调控及其信号传导[J]. 生物化学与生物物理进展, 2002, 29(6): 863-867.
- [9] 孙 云, 关广聚. 促红细胞生成素的研究新进展[J]. 国外医学(内科学分册), 2004, 31(9): 385-387.
- [10] 于秀燕, 马宝新, 李跃荣, 等. 促红细胞生成素对重要系统保护作用的研究进展[J]. 海南医学院学报, 2019, 25(19): 82-86.
- [11] Hershko C. Pathogenesis and management of iron toxicity in thalassemia[J]. Annals of the New York Academy of Sciences, 2010, 1202: 1-9.
- [12] Chevon M. A site-specific mechanism for free radical induced biological damage: the essential role of redox-active transition metals[J]. Free Radical Biology & Medicine, 1988, 5(1): 27-37.
- [13] Schmittgen T D, Livak J K. Analyzing real-time PCR data by the comparative CT method[J]. Nature Protocols, 2008, 3(6): 1101-1108.
- [14] Paranee Y, Noppawan P M, Urai C, et al. Iron distribution and histopathological study of the effects of deferoxamine and deferiprone in the kidneys of iron overloaded β -thalassemic mice[J]. Experimental and Toxicologic Pathology, 2016, 68(8): 427-434.
- [15] 李红霞. HCP1 在肝细胞血红素转运中的作用及影响因素研究[D]. 上海: 第二军医大学, 2014.
- [16] Hardee M E, Arcasoy M O, Blackwell K L, et al. Erythropoietin biology in cancer[J]. Clinical Cancer Research, 2006, 12(2): 332-339.
- [17] Ferrara N, Gerber H P, LeCouter J. The biology of VEGF and its receptors[J]. Nature Medicine, 2003, 9(6): 669-676.
- [18] Turu M M, Slevin M, Matou S, et al. C-reactive protein exerts angiogenic effects on vascular endothelial cells and modulates associated signalling pathways and gene expression[J]. BMC Cell Biology, 2008, 9(1): 47.
- [19] Yano K, Liaw P C, Mullington J M, et al. Vascular endothelial growth factor is an important determinant of sepsis morbidity and mortality[J]. Journal of Experimental Medicine, 2006, 203(6): 1447-1458.

(责任编辑: 刘洪霞)