

甜高粱乙醇全生命周期温室气体排放

高 慧, 胡山鹰*, 李有润, 陈定江, 朱 兵

(清华大学化学工程系生态工业研究中心, 北京 100084)

摘 要: 甜高粱是中国发展非粮乙醇的重要原料之一。为研究中国不同地区发展甜高粱乙醇的温室气体 (greenhouse gas, GHG) 排放表现并识别出影响温室气体排放量的主要环节, 选取黑龙江东部、新疆中部、山东北部和海南 4 个典型地区的甜高粱液态发酵制乙醇生产系统为研究对象, 设计 3 种不同的副产物利用情景, 以生命周期分析方法计算并比较了乙醇在全生命周期内的温室气体排放量。研究结果表明: 1) 在不考虑副产物利用的基准情景下, 甜高粱乙醇全生命周期 GHG 排放量为同等热值汽油的 66%~77%; 2) 原料种植阶段是影响甜高粱乙醇全生命周期 GHG 排放量的主要阶段, 柴油、灌溉用电和农用氮肥是种植阶段 GHG 的主要排放环节; 3) 对茎秆废渣实施再利用可降低甜高粱乙醇全生命周期 GHG 排放量, 废渣燃烧为乙醇生产供能或以废渣为原料生产饲料可使甜高粱乙醇全生命周期 GHG 排放量降低 50%~64%。该文为甜高粱乙醇规模化生产相关政策的制定提供参考。

关键词: 温室气体, 生命周期, 燃料, 乙醇, 甜高粱

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2012.01.032

中图分类号: TQ920.8

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2012)-01-0178-06

高 慧, 胡山鹰, 李有润, 等. 甜高粱乙醇全生命周期温室气体排放[J]. 农业工程学报, 2012, 28(1): 178-183.

Gao Hui, Hu Shanying, Li Yourun, et al. Greenhouse gas emission of sweet sorghum ethanol in life-cycle[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(1): 178-183. (in Chinese with English abstract)

0 引 言

在中国, 汽车等交通工具与人们生活紧密相连, 其生产和销售随生活水平的提高而快速增长, 车用燃油供应逐渐紧张, 交通领域已成为继工业之后的第二大石油消费领域^[1]。发展燃料乙醇等交通替代燃料对中国未来的能源安全和经济发展至关重要。由于耕地资源有限、保障粮食安全的压力较大, 以粮食为原料生产大宗能源产品不可行, 发展交通替代燃料需要以“不与人争粮、不与粮争地”为原则。在多种非粮原料中, 甜高粱由于具备种植易、适应范围广、抗逆性强、光合效率高、综合利用价值高等多重优势, 成为近年来最受关注的燃料乙醇生产原料之一^[2]。

从交通燃料的全生命周期来看, 机动车行驶过程中发动机消耗燃料所排放的温室气体 (greenhouse gas, GHG) 仅占整个碳排放总量的一部分^[3], 其余相当大的部分都源自燃料的生产环节。在中国发展替代燃料、缓解交通环境压力, 要了解并尽可能减少燃料生产环节的温室气体排放。对以甜高粱为原料生产的燃料乙醇而言, 生产环节包括农田阶段的原料种植、收集和运输和工业生产阶段的乙醇炼制, 这些环节需要消耗多种能源和资源, 都有温室气体排放。中国地域辽阔, 气候地理环境

多样, 发展甜高粱乙醇的条件各异, 因此有必要对不同地区燃料乙醇在其全生命周期内的温室气体排放情况进行分析。

本文选取中国黑龙江东部、新疆中部、山东北部和海南 4 个典型区域, 分别代表东北荒地、西北半干旱地区、沿海地区盐碱地、南方边际性土地 4 种典型的非耕地, 对甜高粱液态法制乙醇的生产系统进行全生命周期温室气体排放分析, 在此基础上设计 2 种副产物再利用方案, 并同基准生产情景的温室气体排放情况进行比较, 为甜高粱乙醇规模化生产相关政策的制定提供参考。

1 研究方法

1.1 研究对象、系统边界及功能单位

选取黑龙江东部、新疆中部、山东北部和海南 4 个典型区域甜高粱液态发酵生产系统为研究对象, 以 100 000t/a 的生产系统为例进行研究, 研究基准年为 2008 和 2009 年。甜高粱乙醇全生命周期包括原料种植、原料收运、乙醇生产、乙醇分配和消费 4 个主要阶段, 各阶段的主要生产活动、主产品和副产品以及温室气体的吸收和排放情况如表 1 所示。

本文的计算边界为: 在甜高粱乙醇全生命周期中, 生产和消费甜高粱乙醇所带来的直接和间接的温室气体排放量, 如图 1 所示。为了使不同研究的结果具备可比性, 道路交通领域针对车用燃料开展的生命周期分析研究需要引入功能单位这一概念。本文以“1 kg 甜高粱乙醇燃料”为单位。

在甜高粱乙醇的全生命周期, 系统的温室气体排放有 5 个来源: 第一, 4 个阶段生产活动中多种能源和物资

收稿日期: 2011-02-23 修订日期: 2011-11-12

基金项目: 国家科技支撑计划课题 (2006BAC02A15)

作者简介: 高 慧 (1982-), 女, 内蒙古包头人, 博士研究生。北京 清华大学化学工程系生态工业研究中心, 100084。

*通信作者: 胡山鹰 (1965-), 男, 江西上饶人, 教授、博士、博士生导师。北京 清华大学化学工程系生态工业研究中心, 100084。Email:

hxr-dce@mail.tsinghua.edu.cn

的生产及消费，包括煤炭、化肥、天然气、电力、柴油等；第二，原料种植阶段土壤在耕作及施用化肥过程中的温室气体释放，主要是施用氮肥导致的 N_2O 释放；第三，在乙醇生产过程中甜高粱糖分发酵产生 CO_2 ；第四，燃料乙醇产品在消费过程中燃烧释放 CO_2 ；第五，甜高粱作物纤维中所含的碳最终将以 CO_2 的形式释放到环境中。系统的温室气体吸收仅发生在原料种植阶段，即作物生长过程中吸收空气中的 CO_2 进行自身有

机质积累。甜高粱茎秆所含糖分是生产燃料乙醇的主要成分，糖分在发酵过程中分解为乙醇和 CO_2 。因此，对乙醇生产原料而言，种植阶段吸收的 CO_2 和发酵产生的 CO_2 、燃料乙醇消费时所释放的 CO_2 及甜高粱作物纤维中碳的最终释放可相互抵消，即图 1 中 GHG 吸收和 GHG 排放源③、④、⑤可相互抵消。因此，计算甜高粱乙醇全生命周期的温室气体排放，仅需考虑系统温室气体排放的前两个来源，即图 1 中 GHG 排放中的①和②。

表 1 甜高粱乙醇全生命周期的温室气体排放过程
Table 1 Greenhouse gas emission process of sweet sorghum ethanol in life-cycle

生产阶段	主要生产活动	产品	温室气体吸收	温室气体排放
原料种植	包括翻耕准备、播种、田间管理(包括灌溉、施肥、除草、杀虫等)、收割等；4个区域的甜高粱种植集中度*均按 0.1 计算；在海南一年可种植两季；在其他 3 个地区一年种植一季。	主产品是甜高粱茎秆，即燃料乙醇的生产原料；同时副产甜高粱籽粒，可作粮食。	甜高粱在生长过程中通过光合作用吸收空气中的二氧化碳积累自身有机质及生物质能。	土壤的温室气体排放；化肥、农药、柴油等物资的生产和消费。
原料收运	甜高粱茎秆收集及从农田运输至燃料乙醇生产工厂。	无	无	运输卡车消耗柴油。
乙醇生产	甜高粱茎秆预处理、发酵制乙醇、蒸馏、脱水、改性，最终产出燃料乙醇产品。	主产品是燃料乙醇；另外副产茎秆废渣。	无	工厂生产过程中消耗煤炭、水、电力等资源；发酵过程产生 CO_2 。
乙醇分配和消费	燃料乙醇产品从工厂运输至分销部门，完成同汽油的掺混，继而销往加油站，乙醇汽油最终作为机动车燃料出售并消费。	无	无	运输卡车消耗柴油；乙醇产品消费过程中燃烧产生 CO_2 。

种植集中度*：单位面积土地上有效种植某种作物的比例。

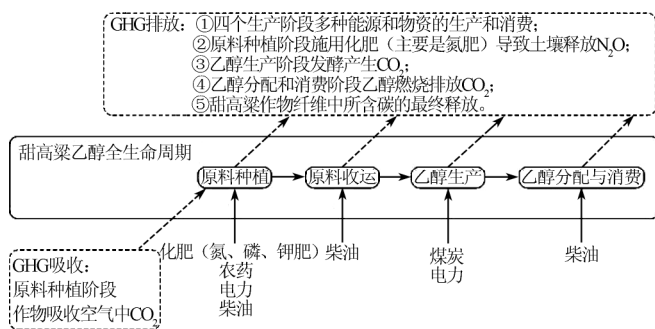


图 1 甜高粱乙醇全生命周期简图

Fig.1 Schematic of life cycle of sweet sorghum ethanol production

在生物质液体燃料生产过程中，有几项温室气体排放只会导致排放总量的微量增加^[4]，因此，为了便于计算，将以下 3 项排放排除在本文计算边界之外：第一，与在原料种植、乙醇生产，或原料和产品运输过程中所使用装备(例如拖拉机、发酵罐、卡车等)的制造相关的温室气体排放；第二，生产甜高粱乙醇所必需的添加剂和催化剂在其本身生产过程中所产生的温室气体排放；第三，涉及人工劳动力所产生的温室气体排放。

1.2 乙醇生产阶段情景描述

在乙醇生产阶段，根据副产的甜高粱茎秆预处理废渣(主要成分是茎秆所含的纤维素和木质素)利用途径，设计 3 种情景进行讨论，如图 2 所示。情景 1 为基准情景，在系统生产甜高粱乙醇的同时，不考虑对副产物进行处理和利用。情景 2 在情景 1 的基础上，对废渣进行燃烧利用、为乙醇生产提供能量，可替代部分煤炭，从

而减少燃煤产生的 CO_2 。情景 3 在情景 1 的基础上，将一半废渣及田间废弃物进行燃烧利用，将另一半废渣用于生产饲料出售。

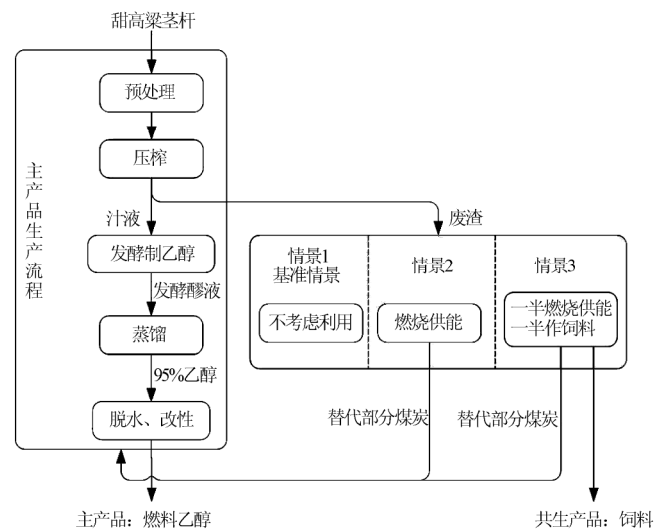


图 2 乙醇生产阶段的 3 种副产物利用情景

Fig.2 Three bagasse utilization scenarios of ethanol production

1.3 参加计算的温室气体种类

根据联合国政府间气候变化委员会(intergovernmental panel on climate change, IPCC)规定，目前被确定为温室气体的有二氧化碳 CO_2 、甲烷 CH_4 、氧化亚氮 N_2O 、氢氟碳化物 HFCs、全氟化碳 PFCs 和六氟化硫 SF_6 ，其中与车用燃料有关的是前三种^[3-5]。因此本文计算的温室气体包括 CO_2 、 CH_4 和 N_2O 。

IPCC 在 1996 年提出了全球增温潜势 (global warming potential, GWP) 的概念, 为不同温室气体的排放对气候变化所产生的影响提供一个量度。本文采用 IPCC 在 2006 年为国家 GHG 清单编制在其报告指南中发布的各种 GHG 在 100 a 间的全球增温潜势, 如表 2 所示。各种终端能源或农用物资的 GHG 排放因子 EF 由 3 种温室气体排放量 E 计算得出, 单位是二氧化碳当量, 如式 (1) 所示。

$$EF = E_{CO_2} + 25 \times E_{CH_4} + 298 \times E_{N_2O} \quad (1)$$

表 2 3 种温室气体全球增温潜势^[4]
Table 2 GWP of three GHGs^[4]

气体名称	化学分子式	全球增温潜势
二氧化碳	CO ₂	1
甲烷	CH ₄	25
氧化亚氮	N ₂ O	298

1.4 计算模型

定义甜高粱乙醇全生命周期内温室气体排放总量为 GHG_{LC} 。甜高粱乙醇全生命周期分为 4 个主要阶段 ($j=1 \sim 4$), 每个阶段都需要消耗各类能源或农化资料等物资 ($i=1 \sim 7$), 其中原料种植阶段还有农田施用氮肥导致的 N₂O 排放。在生产阶段 j , 由生产消费物资 i 导致的温室气体排放量由 i 对应的 GHG 排放因子 EF 及消费量 $S_{i,j}$ 单位计算得出, 如式 (2) 所示。

$$GHG_{LC} = \sum_{j=1}^4 GHG_{LC,j} = \sum_{j=1}^4 \left(\sum_{i=1}^7 EF_i \times S_{i,j} + GHG_{N_2O,j} \right) \quad (2)$$

式中 $i=1 \sim 7$ 分别表示原煤、氮肥、磷肥、钾肥、天然气、电力、柴油; $j=1 \sim 4$ 分别为原料种植阶段、原料收运阶段、乙醇生产阶段、乙醇分配与消费阶段; $GHG_{N_2O,j}$ 是施用氮肥导致的 N₂O 排放量。

在原料种植阶段即当 $j=1$ 时, $GHG_{N_2O,1}$ 根据原料种植阶段的氮肥投入强度 (即氮肥消费量 $S_{2,1}$) 和氮肥的 N₂O 转化效应系数 NE_{NF} ^[15] 计算得出, 如式 (3) 所示。在原料收运、乙醇生产和乙醇分配消费阶段, 没有农田 N₂O 释放, 即 $GHG_{N_2O,2,3,4} = 0$ 。

$$GHG_{N_2O,1} = NE_{NF} \times S_{2,1} \quad (3)$$

1.5 联产过程和共生产品的处理

甜高粱液态发酵制乙醇是一个多联产的生产过程, 即产出的产品不止一种。除了产出主产品燃料乙醇之外, 在原料种植阶段有甜高粱籽粒产出, 在乙醇生产阶段有茎秆预处理废渣产出。在情景 2 中和情景 3 中对茎秆预处理废渣进行再利用, 为乙醇生产过程提供能源或生产副产品饲料。在这些联产过程中, 各种资源、能源的输入是统一、不可分割的, 各种废弃物和污染物 (包括 GHG) 的排放也是伴随整个过程的。因此, 需要选择某种分配方法让各种产品分担相关生产过程的所有输入和输出。

国际标准化组织在生命周期评价 ISO14040 系列标准中没有针对多联产过程中多种产品的分摊方法给出明确规定^[6-7]。根据权威学者及研究机构的经验和建

议, 可用于燃料生命周期研究的主要分配方法包括重量法、能值法、市场价值法、过程能量投入法和产品替代法, 其中产品替代法最能反映实际共生产品的分配^[3,8-9]。产品替代法的基本思路是: 由于某个过程产生副产品, 会导致原本专门生产该产品的过程减少产量, 相应减少原料、资源和能源的投入及污染物和废弃物的排放。

在本研究中, 乙醇生产阶段情景 2 和情景 3 下以副产的甜高粱茎秆废渣为生产过程燃烧供能、替代了部分煤炭, 或以茎秆废渣生产饲料将对品质相当的其他饲料形成替代, 可选择产品替代法进行不同情景下乙醇生产阶段主产品和共生产品的 GHG 排放分配, 如式 (4) 所示。

$$GHG_{EtOH,3} = GHG_{LC,3} - GHG_{residuals} - GHG_{feed} \quad (4)$$

式中, $GHG_{LC,3}$ 是乙醇生产阶段的 GHG 排放量, $GHG_{EtOH,3}$ 是在乙醇生产阶段分摊至主产品乙醇的 GHG 排放量, $GHG_{residuals}$ 和 GHG_{feed} 分别是分摊至茎秆废渣和饲料的 GHG 排放量。

在原料种植阶段, 虽然副产的甜高粱籽粒可作粮食用途, 但由于籽粒产量较高, 与相同面积土地所生产的小麦、玉米等其他主要粮食作物的产量相当, 若采用产品替代法, 结果将使种植阶段物质能量输入及 GHG 排放中的大部分分摊至副产品上。另外, 在中国的实际农业生产中, 高粱类整体属于次要的农作物品种, 种植面积和总产量都很小, 其中甜高粱目前还没有实现规模化种植, 在这种情况下考虑“专门”生产甜高粱籽粒缺乏实际意义, 因此本研究在原料种植阶段采取价值法进行主产品和副产品的 GHG 排放分配, 如式 (5) 所示。

$$GHG_{EtOH,1} = GHG_{LC,1} \times \frac{B_{stalk}}{B_{stalk} + B_{grain}} \quad (5)$$

式中, $GHG_{LC,1}$ 是原料种植阶段的 GHG 排放量, $GHG_{EtOH,1}$ 是原料种植阶段分摊至主产品乙醇的 GHG 排放量, B_{stalk} 和 B_{grain} 分别是种植阶段甜高粱茎秆和籽粒的销售收入。

1.6 数据

本研究主要通过文献调研、专家访谈和实地调研方式获取与甜高粱乙醇生产有关的数据, 在此基础上计算各个区域的结果。其中, 原料种植阶段各种农用物资的使用量采用 4 个区域农业生产平均值, 相关数据主要来自国内的统计年鉴^[10-11]、文献值^[12-13]和咨询报告^[14]; 在原料收运阶段, 为了计算简便, 假设甜高粱种植地为圆形, 乙醇厂位于圆心处, 原料的平均运输距离即圆面上所有点到圆心的平均距离; 在乙醇生产阶段, 工业生产相关数据主要来自专家访谈和企业实地调研。各项物资的 GHG 排放因子参考国内文献值^[3,15]; 在乙醇分配和消费阶段, 假设燃料乙醇产品从工厂运输至油品分销部门的距离是 80 km。除此之外, 还有部分基础数据属于常数或全国的平均数据。将计算所需的基础数据汇总, 如表 3 和表 4 所示, 其中表 3 是 4 个区域农业、运输和工业生产相关数据, 表 4 是常数及全国平均数据。

表 3 4 个区域甜高粱乙醇全生命周期 GHG 排放量计算基础数据

Table 3 Basic data for calculation of life cycle GHG emission of sweet sorghum production in four regions

4 个区域生产相关数据	茎秆需求率 (t·t ⁻¹ ·EtOH ⁻¹)	茎秆需求总量 (t·a ⁻¹)	茎秆的农田产量 (t·hm ⁻²)	籽粒的农田产量 (t·hm ⁻²)	种植季 (季·a ⁻¹)	实际种植面积 (hm ²)	种植集中度	茎秆汁液平均 锤度 [*] Bx	氮肥施用量 (kg·hm ⁻²)	磷肥施用量 (kg·hm ⁻²)	钾肥施用量 (kg·hm ⁻²)	柴油消费量 (L·hm ⁻²)	电力消费量 (kWh·hm ⁻²)	茎秆平均运输距离 (km)	乙醇生产煤耗/t
黑龙江东部	16	1600000	52.5	3.5	1	30500	0.1	16	45.8	27.3	15.8	220	15	20.8	80000
新疆中部	13	1300000	67.4	8.5	1	19300	0.1	20	126.9	67.7	13.0	220	60	16.5	72000
山东北部	14.5	1450000	59.9	3.3	1	24200	0.1	18	211.4	63.2	54.0	220	15	18.5	72000
海南	13	1300000	67.7	2.8	2	9600	0.1	20	131.1	30.5	70.1	220	0	8.2	72000

* 锤度，也称更正锤度，是在 20℃ 条件下用 Brix 比重锤度计测得的纯蔗糖溶液中的蔗糖重量百分率。对不纯的蔗糖溶液则表示用比重法测得的干固物的重量百分率。纯蔗糖溶液的锤度与真干固物相等。不纯的蔗糖溶液，其锤度近似于真干固物重量百分率，通常比干固物百分率略大^[2]。

表 4 甜高粱乙醇全生命周期 GHG 排放量计算中的其他基础数据

Table 4 Other basic data for calculation of life cycle GHG emission of sweet sorghum production in four regions

常数及全国平均数据	乙醇运输平均距离/km	茎秆销售价格 (元·t ⁻¹)	籽粒销售价格 (元·t ⁻¹)	氮肥							运输油耗 (L·(t·km ⁻¹))	柴油密度 (kg·L ⁻¹)	甜高粱茎秆纤维素和木质素含量/%	茎秆废渣(纤维素和木质素)能量 (MJ·t ⁻¹)	茎秆废渣(纤维素和木质素)能量 (MJ·t ⁻¹)	煤炭能量因子 (MJ·t ⁻¹)	替代普通饲料平均电耗 (kWh·t ⁻¹)
				氮肥排放因子 (¹⁵ S)/(克 CO ₂ 当量·千克 N ₂ O·乙醇 ⁻¹)	N ₂ O 转化系数 (¹⁵ S)/(克 CO ₂ 当量·千克 N ₂ O·乙醇 ⁻¹)	磷肥排放因子 (¹⁵ S)/(克 CO ₂ 当量·千克 N ₂ O·乙醇 ⁻¹)	钾肥排放因子 (¹⁵ S)/(克 CO ₂ 当量·千克 N ₂ O·乙醇 ⁻¹)	柴油排放因子 (¹⁵ S)/(克 CO ₂ 当量·千克 N ₂ O·乙醇 ⁻¹)	煤炭排放因子 (¹⁵ S)/(克 CO ₂ 当量·千克 N ₂ O·乙醇 ⁻¹)	电力排放因子 (¹⁵ S)/(克 CO ₂ 当量·千克 N ₂ O·乙醇 ⁻¹)							
80	150	1500	5148	15.8	587	811	4372.5	2103.9	1071.7	0.05	0.85	15	1466.7	14653	20934	33	38.0

* 锤度，也称更正锤度，是在 20℃ 条件下用 Brix 比重锤度计测得的纯蔗糖溶液中的蔗糖重量百分率。对不纯的蔗糖溶液则表示用比重法测得的干固物的重量百分率。纯蔗糖溶液的锤度与真干固物相等。不纯的蔗糖溶液，其锤度近似于真干固物重量百分率，通常比干固物百分率略大^[2]。

2 研究结果

2.1 基准情景的温室气体排放

在基准情景即情景 1 下，4 个区域甜高粱乙醇在全生命周期内的 GHG 排放量如表 5 所示。原料种植和乙醇生产阶段是 GHG 排放的最主要环节。

4 个区域甜高粱乙醇原料种植阶段的温室气体排放量差异较大，其余 3 个阶段排放量较为接近。在原料种植阶段，温室气体排放源复杂，将 4 个地区的排放情况进行比较可知农用机械所用柴油、灌溉用电和氮肥的生产及施用是种植过程中 GHG 排放的主要来源，这几个环节的 GHG 排放量占原料种植阶段的 95% 以上。在中国各类终端能源中，若以同等热值对应的 GHG 排放量计算，电力的排放因子最高^[15]，灌溉用电对原料种植阶段的 GHG 排放量贡献较

大。新疆中部由于气候干燥，在甜高粱生长期降雨量不能满足作物的生长需求，一般需要 4 次左右灌溉，电力消费导致的 GHG 排放量较大；在山东北部和黑龙江东部，在多数年份自然降雨可以满足作物生长要求，在少数干旱的年份需要 1~2 次灌溉；海南等南方省份降雨充沛，甜高粱生长期不需要灌溉。在各种化肥中，氮肥在生产过程中能耗最高、对应的 GHG 排放因子最大，同时氮肥在施用过程中导致土壤释放 N₂O，因此氮肥用量也是影响原料种植阶段 GHG 排放量的重要因素。根据统计数据，山东化肥施用强度属于全国较高水平^[10]，氮肥生产和施用带来的 GHG 排放量显著高于其他几个区域。考虑到实际上山东的土壤品质、各主要的农作物品种的亩产量与其他省份相比没有显著差异^[10]，可以认为山东省农业生产中化肥施用量过大、农田管理不尽合理。

表 5 基准情景下 4 个区域甜高粱乙醇全生命周期温室气体排放量

Table 5 Greenhouse gas emission amount of sweet sorghum ethanol of life cycle in four regions under baseline scenario condition

温室气体排放环节	原料种植(未分配)	氮肥	土壤释放 N ₂ O	磷肥	钾肥	柴油	电力	原料种植-分配至茎秆	原料收运阶段排放	乙醇生产阶段排放	煤炭	乙醇分配和消费阶段	甜高粱乙醇温室气体总排放量
黑龙江东部	403.6	71.8	65.7	4.9	3.9	252.3	4.9	243.2	62.5	1683.1	1683.1	4.7	1993.5
新疆中部	423.1	126.1	115.3	7.7	2.0	159.7	12.4	186.8	40.4	1514.8	1514.8	4.7	1746.7
山东北部	728.0	263.4	240.9	9.0	10.6	200.2	3.9	471.4	50.5	1514.8	1514.8	4.7	1769.9
海南	421.2	129.5	118.5	3.4	10.9	158.8	0	230.2	20.1	1514.8	1514.8	4.7	1769.9

2.2 3 个情景下的温室气体排放

将 4 个区域在 3 个情景下的温室气体排放量计算结果汇总, 并和同等热值的 90#汽油进行 GHG 排放量的比较, 如表 6 所示。可得出如下结论:

第一, 与同等热值 90#汽油在其全生命周期内的 GHG 排放量相比, 4 个区域、3 个情景下的甜高粱乙醇全生命周期 GHG 排放量更少, 甜高粱乙醇减排表现较好。

第二, 在基准情景(情景 1)下, 甜高粱乙醇全生命周期 GHG 排放量从小到大的排序为新疆中部<海南<黑龙江东部<山东北部, 由于各区域在乙醇生产阶段的能耗差异较小, GHG 排放量差异主要由原料种植阶段决定, 柴油、灌溉用电和农用氮肥是种植阶段 GHG 的主要排放环节。在情景 2 和 3 下, 这一排序为海南<黑龙江东部

<山东北部<新疆中部, 原料种植阶段副产的茎秆废渣在乙醇生产阶段进行再利用, 可以替代煤炭、减少燃煤产生的 CO₂ 排放, 各区域甜高粱乙醇全生命周期 GHG 排放量的差异由原料种植阶段和乙醇生产阶段决定。

第三, 4 个区域在 3 个情景下的同一区域 GHG 排放量从小到大的排序是情景 2<情景 3<情景 1。对茎秆实施再利用可以减少甜高粱乙醇生产的 GHG 排放。同情景 1 相比, 情景 2 和情景 3 的 GHG 排放量减少幅度为 50%~64%。其中燃烧废渣为乙醇生产供能的 GHG 减排表现优于以废渣为原料生产饲料。

在实际的生产过程中, 甜高粱乙醇是多种种植周期的工业化生产, 大量废渣必须进行资源化利用, 因此实际生产的碳排放表现将优于基准情景。

表 6 4 个区域 3 种情景下甜高粱乙醇全生命周期温室气体排放量及与相同热值汽油的比较情况

Fig.6 Life cycle GHG emission of sweet sorghum of four regions in three scenarios and preparation with gasoline of same heat value

情景	情景 1		情景 2		比情景 1 排放量降低的比例	情景 3		比情景 1 排放量降低的比例
	排放量(克 CO ₂ 当量/千克乙醇)	占同等热值汽油 GHG 排放量的百分数	排放量(克 CO ₂ 当量/千克乙醇)	占同等热值汽油 GHG 排放量的百分数		排放量(克 CO ₂ 当量/千克乙醇)	占同等热值汽油 GHG 排放量的百分数	
黑龙江东部	1993.5	75%	949.8	27%	64%	1092.0	33%	57%
新疆中部	1746.7	66%	1133.2	27%	59%	1249.5	31%	52%
山东北部	2041.4	77%	1083.5	34%	56%	1213.2	39%	50%
海南	1769.9	67%	759.2	28%	58%	875.5	32%	52%

3 结论和讨论

本文计算了 3 种副产物再利用情景下黑龙江东部、新疆中部、山东北部和海南 4 个区域 10 万 t/a 甜高粱乙醇生产系统的全生命周期 GHG 排放情况。计算结果表明:

1) 在不考虑副产物再利用的基准情景下, 黑龙江东部、新疆中部、山东北部和海南的甜高粱乙醇全生命周期 GHG 排放量分别为 1993.5、1746.7、2041.4 和 1769.9 克 CO₂ 当量/千克乙醇, 占同等热值 90#汽油全生命周期 GHG 排放量的百分比分别为 75%、66%、77%、67%。

2) 在基准情景下, 4 个区域甜高粱乙醇全生命周期 GHG 排放量的差异主要由原料种植阶段 GHG 排放量导致。

3) 3 个情景 GHG 排放量从小到大排序是情景 2<情景 3<情景 1, 在乙醇生产过程中对茎秆废渣实施再利用可使全生命周期 GHG 排放量降低 50%~64%。

当前, 甜高粱是中国发展非粮乙醇的重要原料之一。甜高粱乙醇规模化生产的可行性受多种因素影响, 例如乙醇的能量产出效率、经济效益和 GHG 排放表现以及农业和工业生产过程中的技术问题。甜高粱可以在中国除少数高寒地区以外的其他多数地区种植, 本研究选取的 4 个区域代表了中国几种典型的气候地理条件和农业耕作水平。不同地区的甜高粱乙醇的能量效率、经济效益和 GHG 排放表现有所差异, 除此之外, 在各地的实践生产中还需要综合考虑其他多方面因素, 如气象灾害、农业发展水平及当地的生物质液体燃料需求量等, 根据实际情况制定生产方案。

[参 考 文 献]

- [1] 中国能源统计年鉴 2008[M]. 北京: 中国统计出版社, 2008.
- [2] 卢庆善. 甜高粱[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2008: 17-21.
- [3] 张阿玲, 申威, 韩维建, 等. 车用替代燃料生命周期分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2008: 15-16.
- [4] Department of Transport, United Kingdom. Renewable Transport Fuel Obligation[R]. London, UK, 2008.
- [5] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories[R]. Japan: IGES, 2006.
- [6] ISO 14040: 2006, Environmental management-Life cycle assessment-Principles and framework[S].
- [7] ISO 14044: 2006, Environmental management-Life cycle assessment-Requirements and Guidelines[S].
- [8] Gnansounou E, Dauriat A, Villegas J, et al. Life cycle assessment of biofuels: energy and greenhouse gas balances[J]. *Bioresource Technology*, 2009(100): 4919-4930.
- [9] United States Department of Agriculture(USDA). Agriculture Economics Report No. 813: The Energy Balance of Corn Ethanol: An Update[R]. Washington D.C., US: 2002.
- [10] 中国农业年鉴 2008[M]. 北京: 中国农业出版社, 2008.
- [11] 中国化肥工业年鉴 2006[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2007.
- [12] 王亚静, 毕于运. 新疆发展甜高粱液体燃料的可行性分析[J]. *华中农业大学学报: 社会科学版*, 2008, 77(5): 24-28. Wang Yajing, Bi Yuyun. Feasibility analysis on developing sweet sorghum liquid fuel in Xinjiang[J]. *J Huazhong*

- Agricultural Univ: Social Science, 2008, 77(5): 24–28. (in Chinese with English abstract)
- [13] 张纪鹏, 姜慧, 霍炜. 农作物乙醇燃料的综合效益分析[J]. 农业工程学报, 2008, 24(2): 299–303.
Zhang Jipeng, Jiang Hui, Huo Wei. Analysis of the comprehensive benefits of grain alcohol fuel[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2008, 24(2): 299–303. (in Chinese with English abstract)
- [14] E4tech. Carbon Reporting within the Renewable Transport Fuel Obligation-Methodology[R]. London, UK: 2007.
- [15] 欧训民. 中国道路交通部门能源消费和 GHG 排放全生命周期分析[D]. 北京: 清华大学, 2010.
Ou Xunmin. Life Cycle Energy Use for and GHG Emissions from the Road Transport Sector in China[D]. Tsinghua University, 2010.

Greenhouse gas emission of sweet sorghum ethanol in life-cycle

Gao Hui, Hu Shanying^{*}, Li Yourun, Chen Dingjiang, Zhu Bing

(Center for Industrial Ecology, Department of Chemical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Sweet sorghum acts as one of the most promising crops for non-food bioethanol industry in China. In this study, four regions around China, namely East Heilongjiang, Central Xinjiang, North Shandong and Hainan are chosen to calculate the greenhouse gas(GHG) emission of sweet sorghum ethanol production and identify the main factors of the emission. Three scenarios for the sorghum bagasse byproduct re-use are designed for the calculation. The results show that 1) life cycle GHG emission of the four regions in the baseline scenario was 66%-77% that of 90# gasoline with the same heat value; 2) crop planting was a most important section affecting the life cycle GHG emission and the utilizations of diesel, electricity and N fertilizer in agricultural production were the main emission factors; 3) the utilization of bagasse byproduct can reduce life cycle GHG emission of sweet sorghum ethanol by 50%-64%. It can provide a reference for establishment of relative policy of sweet sorghum ethanol mass procluctim.

Key words: greenhouse gases, life cycle, fuels, ethanol, sweat sorghum