

# 生物质燃料土地利用变化对环境的影响研究

李学琴<sup>1,2</sup>, 王志伟<sup>3</sup>, 刘鹏<sup>1</sup>, 雷廷宙<sup>1\*</sup>, 吴幼青<sup>2</sup>, 呼和涛力<sup>1</sup>, 杨树华<sup>4</sup>

(1. 常州大学城乡矿山研究院, 江苏常州 213164; 2. 华东理工大学资源与环境工程学院能源化工系, 上海 200237; 3. 河南工业大学环境工程学院, 河南郑州 450001; 4. 河南省科学院, 河南郑州 450008)

**摘要** 为了研究生物质燃料土地利用变化对环境的影响, 首先, 对我国近年来农作物的种植面积、农产品产量、土地利用变化及类型进行分析, 其次, 以玉米秸秆清洁水解制备乙酰丙酸乙酯为例, 探究其生产和使用过程中对环境的影响。结果表明, 我国农业作物资源潜力及储量巨大, 为生物质燃料的生产提供了丰富的原料保证, 是农业固碳的主要途径, 具有很好的土壤碳汇作用。同时, 以玉米、小麦、水稻为主要农作物的种植结构且种植土地类型为耕地时, 1 g 玉米秸秆产生 0.124 g 乙酰丙酸乙酯作为燃料使用时的排碳量和固碳量分别为 0.28、1.10 g CO<sub>2</sub>, 加上玉米秸秆收集、运输及转化为乙酰丙酸乙酯的过程中温室气体的排放量; 生物质的生产和使用在一定程度上有望实现碳平衡, 这为生物质燃料的额外需求所引起的土地利用变化对环境影响的评估提供了理论支撑。

**关键词** 生物质; 液体燃料; 土地利用变化; 环境影响

中图分类号 X24 文献标识码 A

文章编号 0517-6611(2023)08-0048-05

doi: 10.3969/j.issn.0517-6611.2023.08.012



开放科学(资源服务)标识码(OSID):

## Study on the Effect of Land Use Change of Biomass Fuel on Environment

LI Xue-qin<sup>1,2</sup>, WANG Zhi-wei<sup>3</sup>, LIU Peng<sup>1</sup> et al (1. Institute of Urban and Rural Mining, Changzhou University, Changzhou, Jiangsu 213164; 2. Department of Chemical Engineering for Energy Resources, School of Resources and Environmental Engineering, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237; 3. School of Environmental Engineering, Henan University of Technology, Zhengzhou, Henan 450001)

**Abstract** In order to study the effect of land use change of biomass fuel on the environment, firstly, the planting area of crops, agricultural product output, land use change and types in China in recent years were analyzed. Secondly, the impact of its production and use on the environment was explored by taking the clean hydrolysis of corn straw to prepare ethyl levulinate as an example. The results showed that China's agricultural crop resources had huge potential and reserves, which provided abundant raw material guarantee for the production of biomass liquid fuel, was the main way of agricultural carbon fixation, and had a good role in soil carbon sequestration. When the planting structure of corn, wheat and rice was cultivated land, the carbon emission and carbon sequestration of 0.124 g ethyl levulinate produced by 1 g corn straw as fuel were 0.28 g and 1.10 g CO<sub>2</sub>, respectively, plus the greenhouse gas emissions in the process of collection, transportation and conversion of corn straw to ethyl acetopropionate. The production and use of biomass fuel is expected to achieve carbon balance to a certain extent, which provides theoretical support for the assessment of the environmental impact of land use changes caused by the additional demand for biomass liquid fuel.

**Key words** Biomass; Liquid fuels; Land use change; Environmental influence

2022 年国家发展和改革委员会发布了《关于完善能源绿色低碳转型体制机制和政策措施的意见》, 提出推行先进生物液体燃料, 支持生物燃料乙醇等清洁燃料接入油气管网, 加快研发纤维素等非粮生物燃料乙醇、生物航空煤油等先进可再生能源燃料关键技术及产业化示范<sup>[1]</sup>。加拿大 2022 年《生物燃料报告》也制定了可再生和低碳燃料发展的政策<sup>[2]</sup>, 西班牙能源部认为先进生物燃料和其他非粮生物燃料是目前最广泛地用于重型车辆和航空等领域的可再生能源<sup>[3]</sup>。由此可见, 生物质燃料是未来降低航空排放、实现化石能源替代最直接、最有效的手段。我国从 2001 年开始先后建立了乙醇生产试点企业并实行补贴政策, 2005 年开始相继出台了《关于燃料乙醇亏损补贴政策的通知》《中华人民共和国可再生能源法》《可再生能源中长期发展规划》等, 2008 年以来陆续出台了“十一五”“十二五”“十三五”和“十四五”《可再生能源发展规划》《关于发展生物能源和生物化工财税扶持政策的实施意见》《生物燃料乙醇弹性补贴财政财务管理

办法》等政策性文件, 明确规定了“不与人争粮、不与粮争地”的原则, 促进了生物燃料在可再生能源发展、资源节约和环境保护、应对全球气候变化等方面作出的积极贡献。

生物燃料引起的土地利用变化主要体现在能源作物取代粮食作物<sup>[4-5]</sup>, 或原料的额外需求导致其他地方的土地利用结构发生变化<sup>[6]</sup>, 这在国际上被定义为直接土地利用变化(direct land-use change, DLUC)和间接土地利用变化(indirect land-use change, ILUC)。与 DLUC 相比, ILUC 是在生物能源作物取代其他作物时, 触发某个地方的土地(草地或林地等)转换成农田进而对环境排放造成影响<sup>[7-11]</sup>。在最初的研究中, 研究者仅仅考虑了生物燃料的原料面积是否有所增加<sup>[6, 12-13]</sup>; Hill 等<sup>[14-15]</sup>研究表明生物燃料可有效降低温室气体(greenhouse gas, GHG)的排放, 如玉米生产乙醇可减少 12% 的 GHG 排放。Fargione 等<sup>[4]</sup>研究表明以粮食作物为原料生产生物质燃料及其使用过程排放出了更高的 GHG, 而利用农林剩余物生产生物质燃料时减少了 GHG 的排放。另外, 一些研究在比较生物质燃料对环境的影响时表明 DLUC 和 ILUC 系数的估算是排放量变化的主要来源<sup>[16]</sup>。尽管大多数的研究结果之间有很大差异, 但一些国内外学者研究的重点依然偏重于生物质燃料引起的间接土地利用变化<sup>[17-19]</sup>。

**基金项目** 2020 年民用飞机专项科研项目“航空替代燃料可持续评价”(MJ-2020-D-09)。

**作者简介** 李学琴(1989—), 女, 甘肃白银人, 博士研究生, 研究方向: 生物质热解。\* 通信作者, 研究员, 博士生导师, 从事生物质能源与材料方面的研究。

**收稿日期** 2022-05-16

Taheripour 等<sup>[20-22]</sup>采用最新数据及模型评估了美国燃料乙醇扩张对全球的影响,结果表明土地利用的排放量下降了 18%。但由于全球经济的挑战及生物质燃料生产对环境影响的差异等因素的影响,导致了生物质燃料应用的可变性和间接土地利用变化的不确定性,使生物质燃料在缓解气候变化潜力方面存在很大争议<sup>[23]</sup>。截至目前,国际上将土地利用变化的分析纳入生命周期评估中的研究很少<sup>[24]</sup>;而我国生物质燃料的土地利用变化对环境的影响研究目前仍处于空白。所以,掌握间接土地利用变化对理解生物质燃料的生产和使用相对于化石燃料是否增加了 GHG 排放至关重要。因此,该研究以国内外文献为理论基础,借助历史数据,通过统计分析法对我国近年来农作物的种植面积、农产品产量、土地利用变化及类型进行分析,计算了我国农林作物资源潜力及储量,进一步分析土壤碳汇与农业碳汇的关系;以玉米秸秆清洁水解制备乙酰丙酸乙酯为实例,分析了生物质燃料间接土地利用变化对环境的影响,以期为我国生物质燃料土地利用变化的评估提供基础数据和理论参考。

## 1 估算方法及数据来源

### 1.1 估算方法

生物质燃料土地利用变化的评估方法主要包括统计分析法、模型分析法、生命周期评估法。统计分析法是为了确定生物质燃料生产率与土地利用变化之间可能的关系,从统计学的角度收集和分析不同来源的历史数据进行分析<sup>[5,20]</sup>。生命周期评估(life cycle assessment, LCA)是通过能源和物质消耗、环境排放进行量化,进而评估能量、物质利用对环境的影响,最终寻求改善产品或工艺的途径<sup>[25-27]</sup>。模型分析法是测量 DLUC 和 ILUC 最常用方法<sup>[25]</sup>,主要分为经济模型和确定性模型<sup>[3,28-30]</sup>;由于不同模型的复杂性和可变性,土地利用变化很少被纳入 LCA 的研究中<sup>[31]</sup>。国外大多数研究者认为经济模型的分析更加准确贴切<sup>[31-32]</sup>,但由于我国在生物质燃料与土地利用变化的研究处于空白且目前还没有找到适合我国国情的经济模型。因此,该研究采用统计分析法,以干物质光合作用平衡式( $6CO_2 + 12H_2O \rightarrow C_6H_{12}O_6 + 6H_2O + 6O_2$ )以及农业碳汇的计算方法为依托<sup>[33-34]</sup>,按单位面积农作物收获的干物重(以  $C_6H_{12}O_6$  计)估算单位面积农用地年吸碳量与制氧量,利用刘晓永等<sup>[35-38]</sup>研究中农作物秸秆资源的草谷比和折算系数<sup>[37,39-42]</sup>估算生物质资源储量,进而初步探究生物质燃料间接土地利用变化对环境的影响。

### 1.2 数据来源

数据主要来源于《国家统计年鉴》《中国环境统计年鉴》《中国可再生能源发展报告》《中国能源大数据报告》《中国能源发展报告》《中国能源统计年鉴》《中国生态环境公报》等关于生物资源、农产品产量、生物质燃料、土地结构、环境污染程度等方面的统计数据。玉米秸秆在收集及预处理过程中的温室气体排放如表 1 所示,其转化为乙酰丙酸乙酯的年消耗的玉米秸秆量和收集半径见文献[25];以 3 000 t 玉米秸秆清洁水解制备 372 t 乙酰丙酸乙酯的系统为例,水解过程产生蒸汽锅炉的热量由锅炉燃烧装置提供,该装置燃烧效率为 90%,该生产过程中涉及的排放因子见

文献[25]。

表 1 玉米秸秆收集、运输及预处理过程中的气体排放<sup>[25]</sup>

Table 1 Gases emissions during the collection, transportation and pre-treatment of corn stalks

气体排放 Gas emission	收集过程 Collection process	预处理过程 Pretreatment process
N <sub>2</sub> O	0.001 3	0.000 2
CH <sub>4</sub>	0.002 7	0.000 4
CO <sub>2</sub>	48.053 0	66.184 7
VOC	0.055 4	0.000 9
CO	0.307 6	0.007 5
NO <sub>x</sub>	0.184 5	0.170 2
PM <sub>10</sub>	0.026 8	0.007 5
SO <sub>2</sub>	0.010 4	2.046 3

## 2 结果与分析

### 2.1 生物质资源量及燃料密度

根据农产品产量及农作物草谷比估算我国近 11 年秸秆类生物质资源量(图 1),由图 1 可知,近年来我国生物质资源量逐年增加,截至 2020 年生物质资源量达到  $10.98 \times 10^8$  t,生物质资源潜力巨大。以我国农作物大省之一河南省为例,从图 2 可看出,近年来农作物秸秆产量的分布呈现由西北向东南逐渐增加的趋势,在其他省份秸秆产量的分布均有不同程度的分布差异,这主要与农业种植结构、地域面积、土地状况和区域气候条件等多重因素相关<sup>[36]</sup>。从不同生物质原料及其燃料的能量密度(图 3)可以看出,玉米秸秆热解制备生物油(O4)的能量密度最高,是原料玉米秸秆能量密度的 3 倍左右;与之相近的是秸秆残渣和木材废弃物热解制备生物油(O5 和 O6)。由此可见,巨大的生物质资源量为生产高密度、高效率的生物质燃料提供了保证。



图 1 2010—2020 年生物质资源量和资源潜力

Fig.1 Biomass resources and resource potential from 2010 to 2020

### 2.2 我国农林业固碳情况分析

以干物质光合作用平衡式( $6CO_2 + 12H_2O \rightarrow C_6H_{12}O_6 + 6H_2O + 6O_2$ )估算了近年来我国农业固碳情况。经计算,2015 年我国主要农作物吸收  $CO_2$  大约 117 812.8 万 t,释放  $O_2$  大约为 85 682.0 万 t。由于生物质燃料的使用及对环境气候的关注,我国农作物固碳、制氧量逐年增加;从 2020 年我国不同农作物固碳制氧情况(表 2)可以看出,2020 年我国不同农作物固碳量达到 262 794.1 万 t,释放  $O_2$  达到 191 122.9 万 t,表明 2020 年我国 167 487 万  $hm^2$  农

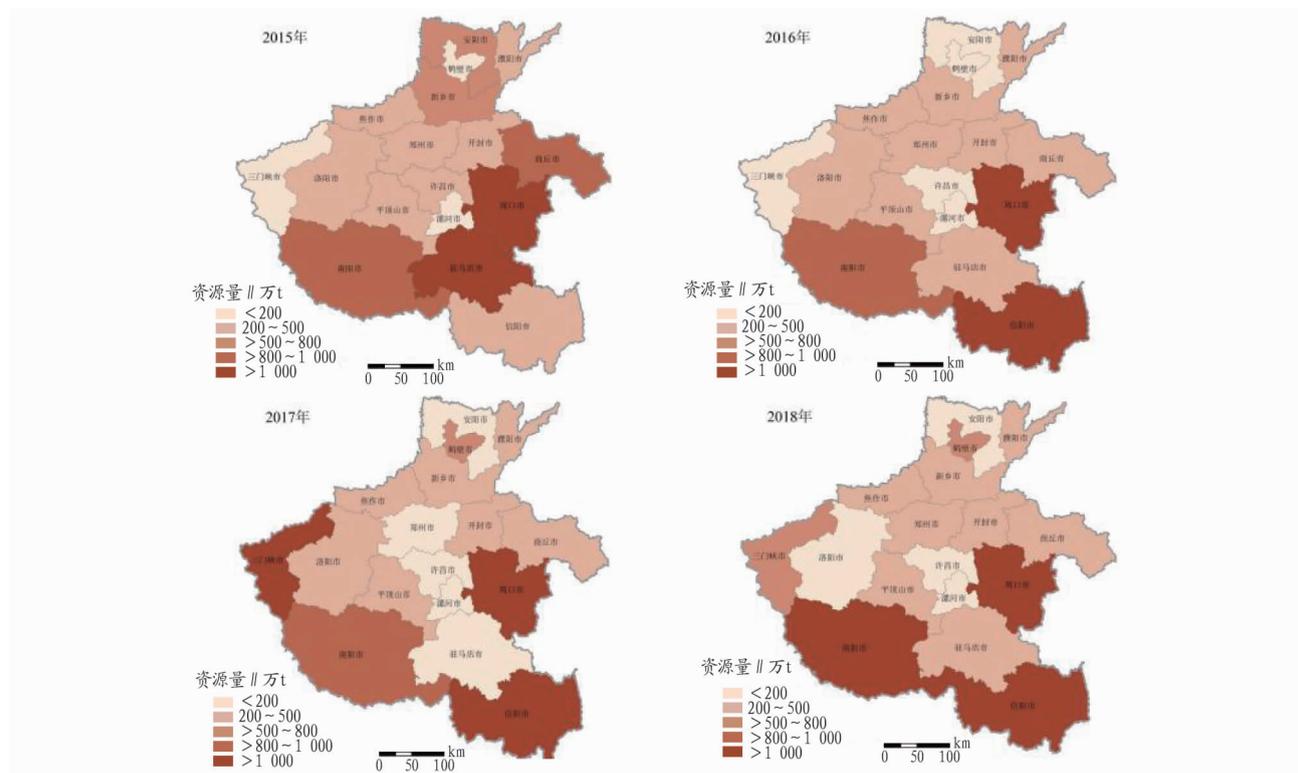
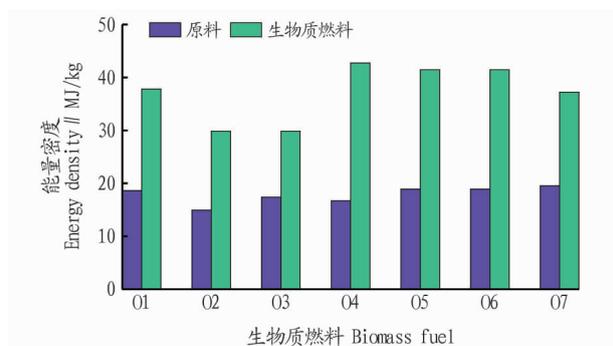


图2 2015—2018年河南省秸秆分布情况

Fig.2 Straw distribution in Henan Province from 2015 to 2018



注: O1.大豆制生物柴油; O2.玉米制乙醇; O3.柳树制乙醇; O4.玉米秸秆热解油; O5.秸秆残渣热解油; O6.木材废弃物热解油; O7.藻类制生物柴油。

Note: O1. Soybean based biodiesel; O2. Ethanol production from corn; O3. Ethanol production from willow trees; O4. Corn straw pyrolysis oil; O5. Straw residue pyrolysis oil; O6. Pyrolysis oil from wood waste; O7. Producing biodiesel from algae.

图3 生物质原料及其燃料的能量密度<sup>[43]</sup>

Fig.3 Energy density of biomass raw materials and their fuels

用土地面积种植农林作物共固 CO<sub>2</sub> 为 262 794.1 万 t; 同时, 玉米在固碳制氧方面具有明显的效果, 其中固碳量为 103 223.3 万 t, 释放 O<sub>2</sub> 为 75 071.5 万 t, 单位土地面积的固碳量为 25.0 万 t/(hm<sup>2</sup>·a); 其次为水稻、小麦, 表明玉米秸秆、小麦秸秆、水稻秸秆等农作物资源是生产生物质燃料原料的主要来源, 在固碳制氧中起主要作用。

由表 2 可估算出 2020 年主要农作物吸收 CO<sub>2</sub> 量分别占全部作物固碳量的比重, 如图 4 所示。玉米秸秆的吸碳量约

占全部 10 种农林作物吸碳总量的 1/3, 其次为水稻、小麦、麻类、油料等。因此, 在不影响其他作物种植面积的情况下, 确保种植玉米、水稻、小麦的土地面积且保持这种种植结构, 既保证了足够的粮食产量, 又为生物质燃料的生产提供了原料保证; 不仅避免了能源作物与粮食作物竞争土地, 也确保了粮食安全和环境效益; 同时, 也避免了农林资源的浪费, 增加了土地的固碳量。根据《中国产品全生命周期温室气体排放系数集(2022)》可知, 我国所有省份的生物质炭、土壤有机质碳排放均为负数<sup>[44]</sup>, 说明土壤固碳数量巨大。结合表 2 和图 4, 约 80% 以上的碳贮存在种植玉米、水稻、小麦等农作物土壤中且种植这 3 种农作物土壤的单位面积总固碳量为 63.6 万 t/(hm<sup>2</sup>·a), 平均值为 21.2 万 t/(hm<sup>2</sup>·a), 表明农作物种植的耕地能起到一定的固碳作用。

**2.3 间接土地利用变化与农林固碳的关系分析** 从我国主要农作物种植面积变化趋势(图 5)来看, 1980 年以前我国农作物种植面积呈缓慢下降趋势, 1980—2000 年总体上出现缓慢上升趋势, 2000 年以后我国农作物面积变化趋势较为明显, 其中玉米种植面积出现大幅度的上升且明显高于其他农作物。2005 年以前, 水稻和小麦的种植面积位居第一、第二; 2005 年以后玉米种植面积位居第一, 水稻、小麦分别位居第二和第三, 说明玉米、水稻、小麦始终是我国主要粮食作物和农作物秸秆来源, 这也导致了农作物单位面积固碳量的增加, 这与图 4 的分析结果一致。结合 2000 年以来我国土地利用的变化情况(图 6), 2000—2008 年耕地面积减少了近 5.1%, 林地面积增加了 3.2%。从 2009 年开始耕地面积大幅度增加, 占总用地的 20.9%。截至 2019 年, 耕地与林地面积

占总农业用地面积的 51.3%,这其中有很大部分耕地用于种植玉米、水稻、小麦等粮食作物。由于粮食作物的价格有限,虽然大量种植粮食作物不利于农民收入的增加,但在一定程度

上解决了粮食安全问题,为解决化石能源短缺及环境污染的可再生能源提供了原料,对生态环境保护和可持续发展是极有利的。

表 2 2020 年我国不同农作物固碳制氧情况

Table 2 Carbon fixation and oxygen production of different crops of China in 2020

农作物种类 Crop type	资源量 Resource 万 t	干物质总量 Total dry matter//万 t	可吸收 CO <sub>2</sub> Absorbable CO <sub>2</sub> //万 t	总释放 O <sub>2</sub> Total released O <sub>2</sub> //万 t	单位面积吸收 CO <sub>2</sub> CO <sub>2</sub> absorption per unit area 万 t/(hm <sup>2</sup> ·a)	单位面积释放 O <sub>2</sub> O <sub>2</sub> release per unit area 万 t/(hm <sup>2</sup> ·a)
水稻 Rice	21 186.0	42 372.0	62 145.6	45 196.8	20.7	15.0
小麦 Wheat	15 170.7	28 596.1	41 940.9	30 502.5	17.9	13.0
玉米 Corn	44 313.1	70 379.6	103 223.3	75 071.5	25.0	18.2
豆类 Beans	3 705.8	5 993.3	8 790.1	6 392.8	7.6	5.5
薯类 Tuber	2 987.4	5 974.8	8 763.0	6 373.1	12.2	8.8
棉花 Cotton	1 773.0	2 364.0	3 467.2	2 521.6	10.9	8.0
花生 Peanut	2 699.0	4 498.3	6 597.4	4 798.1	—	—
油菜籽 Rapeseed	3 090.8	4 495.7	6 593.7	4 795.4	10.2	7.4
芝麻 Sesame	91.4	137.1	201.1	146.2	—	—
麻类 Hemp	42.3	67.2	98.6	71.7	14.3	10.4
甘蔗 Sugarcane	1 729.9	12 542.0	18 395.0	13 378.2	117.3	85.3
甜菜 Beet	119.8	1 318.2	1 933.4	1 406.1	0.9	0.7
烟叶 Tobacco	226.2	439.6	644.8	468.9	6.4	4.6
合计 Total	97 135.4	179 177.9	262 794.1	191 122.9	23.7	16.1

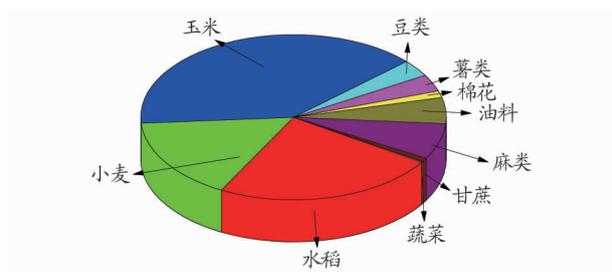


图 4 2020 年我国主要农林作物固碳量所占比重

Fig.4 Proportion of carbon fixation of major agricultural and forestry crops of China in 2020

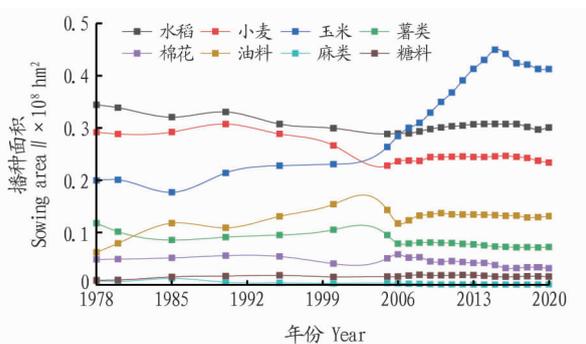


图 5 1978—2020 年我国农作物种植面积情况

Fig.5 Crop planting area in China from 1978 to 2020

2.4 生物质酯类燃料间接土地利用变化的影响 以种植面积最大的农作物玉米秸秆为例,通过清洁水解制备生物质酯类燃料乙酰丙酸乙酯,探究其生产过程对环境的影响。以 3 000 t 干玉米秸秆为例,所得的乙酰丙酸乙酯 372 t 及其他副产物,所得主副产品的产量及转化率如图 7 所示。根据燃料的热值及密度,柴油热值为 35.53 MJ/L,乙酰丙酸乙酯混合燃料热值为 35.49 MJ/L,则消耗单位体积混合燃料的排放 VOC、CO、NO<sub>x</sub>、PM<sub>10</sub>、SO<sub>2</sub> 分别为 2.24、25.88、7.96、1.87、

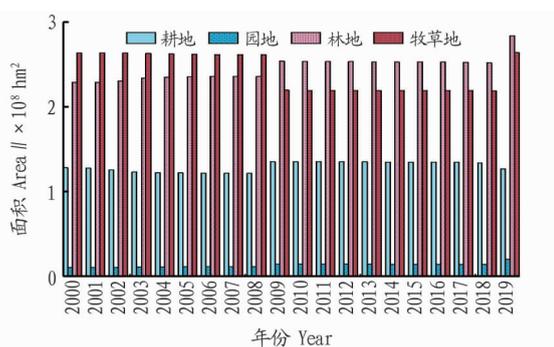


图 6 2000—2019 年我国土地利用情况

Fig.6 Land use in China from 2000 to 2019

0.28 g/L,排放总温室气体量为 2 312.48 g/L<sup>[25]</sup>。由此可估算 1 g 乙酰丙酸乙酯在使用过程中温室气体排放量为 2.28 g CO<sub>2</sub>。因此,当 1 g 玉米秸秆产生 0.124 g 乙酰丙酸乙酯并用于燃料使用时,温室气体排放量为 0.28 g CO<sub>2</sub>。由表 2 可知,我国 2020 年玉米秸秆产量为 70 379.6 万 t,共固碳量为 103 223.3 万 t,故而计算出 1 g 玉米秸秆能固 1.10 g CO<sub>2</sub>。结合玉米秸秆在收集、运输及转化过程中温室气体的排放量<sup>[25]</sup>,玉米秸秆制乙酰丙酸乙酯及其使用起到了很好的固碳作用,相对于化石能源不仅减少了温室气体的排放,而且也实现了资源的高效利用。同时,土地利用变化机制的出现,在一定程度上促进了生物质燃料的生产和使用。因此,生物质清洁水解制备乙酰丙酸乙酯是未来液体燃料领域发展的方向之一。

因此,能源作物实施前的土地利用类型决定了生物质燃料的生产和使用是否减少了碳排放<sup>[6,13-14]</sup>。所以,在当前种植模式下,保证以玉米、小麦、水稻为主要农作物的种植结构且种植土地类型为耕地,生物质燃料的生产和使用有望实现碳平衡。但该研究中由于缺乏 DLUC 和 ILUC 的系数、环境

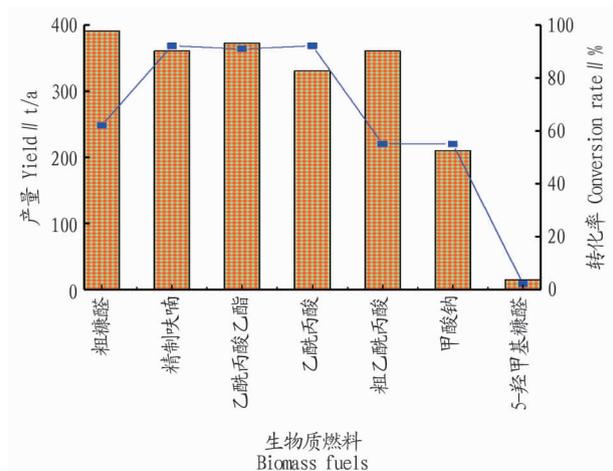


图7 主副产品的产量及转化率

Fig.7 Yield and conversion rate of main and byproducts

影响的差异以及考虑土地利用变化效应时遇到多因素限制,很难准确地对生物质燃料引起的间接土地利用变化进行直接研究<sup>[17-19]</sup>。

### 3 结论与讨论

本研究通过统计分析法对我国近年来农作物的种植面积、农产品产量、土地利用变化及类型进行分析,结果表明我国农作物资源潜力及储量巨大,为生产高密度、高能量的生物质酯类燃料提供了足够的原料。在我国主要农作物种植结构中,玉米、水稻、小麦的种植面积、产量较大,是我国农林业固碳的主要途径,与土壤碳汇量密切相关。玉米秸秆清洁水解制备乙酰丙酸乙酯的工艺实例表明,乙酰丙酸乙酯的生产及其使用在一定程度上实现了碳平衡,避免了能源作物种植带来的间接土地利用变化的影响。结合我国土地利用特征,鉴于玉米、水稻、小麦的固碳作用,建议采取严格的耕地保护制度,维持主要农作物的耕地面积,提高农作物资源的能源化利用率,对实现生物质资源的高效利用及生物质燃料的发展有重要的现实意义,为评估我国生物质燃料土地利用变化提供参考。

### 参考文献

- [1] 国家发展改革委,国家能源局.国家发展改革委 国家能源局关于完善能源绿色低碳转型体制机制和政策措施的意见[EB/OL].(2022-02-11)[2022-11-05].<https://baijiahao.baidu.com/s?id=1724415902405290542&wfr=spider&for=pc>.
- [2] INC.N R.Biofuels in Canada 2021[R].2021.
- [3] DE ANDRADE JUNIOR M A U,WATSON J E M,WILLIAMS B A ,et al. How to halve the carbon and biodiversity impacts of biofuel-driven land-use change in Brazil[J].Biological conservation,2021,260:1-11.
- [4] FARGIONE J,HILL J,TILMAN D ,et al.Land clearing and the biofuel carbon debt[J].Science,2008,319(5867):1235-1238.
- [5] SEARCHINGER T,HEIMLICH R,HOUGHTON R A ,et al.Use of U.S. croplands for biofuels increases greenhouse gases through emissions from land-use change[J].Science,2008,319(5867):1238-1240.
- [6] COMMUNITIES C O T E.Biofuels progress report:Report on the progress made in the use of biofuels and other renewable fuels in the member states of the European Union[R].2006.
- [7] BARR M R,VOLPE R,KANDIYOTI R.Liquid biofuels from food crops in transportation-A balance sheet of outcomes[J/OL].Chemical engineering science;X,2021,10[2021-11-15].<https://doi.org/10.1016/j.cesx.2021.100090>.
- [8] SCHILS R L,ERIKSEN J,LEDGARD S F ,et al.Strategies to mitigate nitrous oxide emissions from herbivore production systems[J].Animal,2013,

- 7(S1):29-40.
- [9] JOHANSSON R,MEYER S,WHISTANCE J ,et al.Greenhouse gas emission reduction and cost from the United States biofuels mandate[J/OL].Renewable and sustainable energy reviews,2020,119[2021-11-15].<https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109513>.
- [10] DUMORTIER J,DOKOOHAKI H,LOBEID A ,et al.Global land-use and carbon emission implications from biochar application to cropland in the United States[J].Journal of cleaner production,2020,258:1-10.
- [11] KRETSCHMER B,PETERSON S.Integrating bioenergy into computable general equilibrium models-A survey[J].Energy economics,2010,32(3):673-686.
- [12] FARRELL A E,PLEVIN R J,TURNER B T ,et al.Ethanol can contribute to energy and environmental goals[J].Science,2006,311(5760):506-508.
- [13] LOBEID A,MOREIRA M M R,DE LIMA C Z ,et al.Implications of biofuel production on direct and indirect land use change:Evidence from Brazil[M]//DEBNATH D,BABU S C.Biofuels,bioenergy and food security.Amsterdam:Elsevier,2019:125-143.
- [14] HILL J,NELSON E,TILMAN D ,et al.Environmental,economic,and energetic costs and benefits of biodiesel and ethanol biofuels[J].Proceedings of the national academy of sciences,2006,103(30):11206-11210.
- [15] WANG M,WU M,HUO H.Life-cycle energy and greenhouse gas emission impacts of different corn ethanol plant types[J].Environmental research letters,2007,2(2):1-13.
- [16] HERTEL T W,GOLUB A A,JONES A D ,et al.Effects of US maize ethanol on global land use and greenhouse gas emissions:Estimating market-mediated responses[J].BioScience,2010,60(3):223-231.
- [17] FINKBEINER M.Indirect land use change-Help beyond the hype? [J].Biomass and bioenergy,2014,62:218-221.
- [18] AHLGREN S,DI LUCIA L.Indirect land use changes of biofuel production-a review of modelling efforts and policy developments in the European Union[J].Biotechnology for biofuels,2014,7(1):1-10.
- [19] DIAS L C,PIMENTA F M,SANTOS A B ,et al.Patterns of land use,extensification,and intensification of Brazilian agriculture[J].Global change biology,2016,22(8):2887-2903.
- [20] TAHERIPOUR F,TYNER W.Biofuels and land use change:Applying recent evidence to model estimates [J].Applied sciences,2013,3(1):14-38.
- [21] DUMORTIER J,HAYES D J,CARRIQUIRY M ,et al.Sensitivity of carbon emission estimates from indirect land-use change[J].Applied economic perspectives and policy,2011,33(3):428-448.
- [22] TAHERIPOUR F,ZHAO X,TYNER W E.The impact of considering land intensification and updated data on biofuels land use change and emissions estimates[J].Biotechnology for biofuels,2017,10:1-16.
- [23] DI LUCIA L,AHLGREN S,ERICSSON K.The dilemma of indirect land-use changes in EU biofuel policy-An empirical study of policy-making in the context of scientific uncertainty[J].Environmental science & policy,2012,16:9-19.
- [24] ROMIJN H A.Land clearing and greenhouse gas emissions from Jatropha biofuels on African Miombo Woodlands[J].Energy policy,2011,39(10):5751-5762.
- [25] 王志伟.生物质基乙酰丙酸乙酯混合燃料动力学性能研究[D].郑州:河南农业大学,2013.
- [26] WANG Z W,LIU X,BURRA K G ,et al.Towards enhanced catalytic reactivity in CO<sub>2</sub>-assisted gasification of polypropylene[J].Fuel,2021,284:1-9.
- [27] POLICELLA M,WANG Z W,BURRA K G ,et al.Characteristics of syngas from pyrolysis and CO<sub>2</sub>-assisted gasification of waste tires[J].Applied energy,2019,254:1-11.
- [28] HUMALISTO N H.Climate policy integration and governing indirect land-use changes-Actors in the EU's biofuel policy-formulation[J].Land use policy,2015,45:150-158.
- [29] MALINS C,PLEVIN R,EDWARDS R.How robust are reductions in modeled estimates from GTAP-BIO of the indirect land use change induced by conventional biofuels? [J].Journal of cleaner production,2020,258:1-12.
- [30] BROCH A,HOEKMAN S K,UNNASCH S A.A review of variability in indirect land use change assessment and modeling in biofuel policy[J].Environmental science & policy,2013,29:147-157.
- [31] BEN AOUN W,GABRIELLE B,GAGNEPAIN B.The importance of land use change in the environmental balance of biofuels[J].OCL,2013,20(5):1-12.

沙打旺 (*A. adsurgens*) 的地上生物量。放牧家畜的选择性采食与草地植物的高度和盖度密切相关<sup>[20]</sup>, 蒙古冰草 (*A. mongolicum*)、达乌里胡枝子 (*L. davurica*) 与沙打旺 (*A. adsurgens*) 的“上繁草型”结构, 可能更有利于放牧家畜采食。汪诗平<sup>[15]</sup>、王旭等<sup>[21]</sup>研究表明, 放牧家畜对豆科 (*Leguminosae*)、菊科 (*Compositae*) 等杂类草的喜食程度高于禾本科 (*Poaceae*) 植物。与前人研究结果一致, 在原生植被区域放牧初期家畜喜食牛枝子 (*L. potaninii*), 对蒙古冰草 (*A. mongolicum*) 不喜食, 放牧后期放牧家畜对二者均喜食。牛枝子 (*L. potaninii*) 属于低矮植物 (高度 < 5 cm), 具有典型的“匍匐型”特征, 该特征能有效躲避放牧家畜的采食。该研究也发现夏季放牧与夏秋放牧未显著影响牛枝子 (*L. potaninii*) 地上生物量。

退化草原补播改良已成为我国天然草原修复的关键措施之一<sup>[16]</sup>。在草原补播实践过程中, 补播草种的选择是决定草原改良是否成功的关键环节。该研究发现, 夏季放牧与夏秋放牧均不利于“上繁草”型豆科植物达乌里胡枝子 (*L. davurica*) 与沙打旺 (*A. adsurgens*) 的生长。然而, 牛枝子 (*L. potaninii*) 枝条匍匐生长, 本身具有的“避牧型”特征能够有效缓解放牧的不利影响。因此, 荒漠草原放牧草地补播改良实践过程中, 宜多采用牛枝子 (*L. potaninii*) 等“避牧型”豆科牧草品种。

#### 4 结论

夏季放牧与夏秋放牧都显著降低补播改良荒漠草原植物群落地上生物量与物种丰富度。夏季放牧后, 草原地上生物量与物种丰富度能够一定程度的恢复。荒漠草原放牧草地, 不宜补播“上繁型”豆科牧草达乌里胡枝子 (*L. davurica*) 与沙打旺 (*A. adsurgens*)。在荒漠草原, 乡土牧草牛枝子 (*L. potaninii*) 能有效抵抗夏季放牧与夏秋放牧的不利影响。综上所述, 与夏秋放牧相比, 夏季放牧可作为补播改良草原较优放牧模式。在后续补播改良荒漠草原放牧利用试验中, 应进一步关注补播“避牧型”豆科植物对放牧家畜的季节性响应过程, 为温性荒漠草原适应性管理与合理利用提供一定科学依据。

(上接第 52 页)

[32] REINHARD J, ZAH R. Consequential life cycle assessment of the environmental impacts of an increased rapemethylester (RME) production in Switzerland [J]. *Biomass and bioenergy*, 2011, 35(6): 2361–2373.

[33] 黄锦法, 曹志洪, 石艳平, 等. 浙江嘉兴平原土地利用变化对农林固碳生态功能的影响分析 [J]. *农业环境与发展*, 2013, 30(4): 19–23.

[34] 韩冰, 王效科, 逯非, 等. 中国农田土壤生态系统固碳现状和潜力 [J]. *生态学报*, 2008, 28(2): 612–619.

[35] 刘晓永, 李书田. 中国秸秆养分资源及还田的时空分布特征 [J]. *农业工程学报*, 2017, 33(21): 1–19.

[36] 朱建春, 李荣华, 杨香云, 等. 近 30 年来中国农作物秸秆资源量的时空分布 [J]. *西北农林科技大学学报 (自然科学版)*, 2012, 40(4): 139–145.

[37] 朱纯明. 河南省秸秆生物质资源量测算 [J]. *现代农业科技*, 2011(7): 292–294.

#### 参考文献

- [1] 岳丽楠, 师尚礼, 祁娟, 等. 免耕补播对北方退化草地生产力及营养品质的影响 [J]. *草地学报*, 2021, 29(11): 2583–2590.
- [2] 王占军, 蒋齐, 吴旭东, 等. 不同干扰方式对宁夏荒漠草原土壤水分与植被群落的影响 [J]. *黑龙江畜牧兽医*, 2020(24): 103–107.
- [3] 吴宛萍, 马红彬, 陆琪, 等. 补播对宁夏荒漠草原植物群落及土壤理化性状的影响 [J]. *草业科学*, 2020, 37(10): 1959–1969.
- [4] 郭艳菊, 马晓静, 许爱云, 等. 宁夏东部风沙区沙化草地土壤水分和植被的空间特征 [J]. *生态学报*, 2022, 42(4): 1571–1581.
- [5] MSADDEK J, TLILI A, MOUNINI M, et al. Community diversity, functional traits and adaptation of *Stipa tenacissima* L. under different grazing regimes in a North African arid montane rangeland [J]. *African journal of range & forage science*, 2021, 38(1): 122–129.
- [6] 任继周, 王钦, 牟新待, 等. 草原生产流程及草原季节畜牧业 [J]. *中国农业科学*, 1978, 11(2): 87–92.
- [7] 包秀霞, 廉勇, 易津, 等. 放牧方式对小针茅荒漠草原植物群落多样性的影响 [J]. *安徽农业科学*, 2014, 42(3): 783–785, 805.
- [8] 刘进娣, 马红彬, 周瑶, 等. 轮牧时间对荒漠草原土壤种子库特性的影响 [J]. *应用生态学报*, 2021, 32(7): 2378–2388.
- [9] 白正, 李艳龙, 石椿瑛, 等. 季节放牧对典型草原植物群落不同生长季特征的影响 [J]. *中国草地学报*, 2020, 42(2): 67–75.
- [10] 张浩, 蔡金宏, 罗建川, 等. 休牧对无芒雀麦改良草甸草原牧草生长速率及现存量与营养品质的影响 [J]. *草原与草坪*, 2020, 40(1): 1–10.
- [11] 张晓玲, 徐田伟, 谭攀柱, 等. 季节放牧对高寒草原植被群落和生物量的影响 [J]. *西北农业学报*, 2019, 28(10): 1576–1582.
- [12] 买小虎, 张玉娟, 张英俊, 等. 季节性放牧调控对草地植被的影响 [J]. *西北农业学报*, 2014, 23(3): 24–30.
- [13] WAN H W, BAI Y F, HOOPER D U, et al. Selective grazing and seasonal precipitation play key roles in shaping plant community structure of semi-arid grasslands [J]. *Landscape ecology*, 2015, 30(9): 1767–1782.
- [14] 林斐. 典型草原不同放牧强度及放牧方式下牛羊食性选择研究 [D]. 呼和浩特: 内蒙古大学, 2017.
- [15] 汪诗平. 不同放牧季节绵羊的食性及食物多样性与草地植物多样性的关系 [J]. *生态学报*, 2000, 20(6): 951–957.
- [16] ZHANG Y J, HUANG D, BADGERY W B, et al. Reduced grazing pressure delivers production and environmental benefits for the typical steppe of north china [J]. *Scientific reports*, 2015, 5: 1–11.
- [17] 张浩. 短期休牧对无芒雀麦改良草地植被和家畜生产的影响机制 [D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2019.
- [18] GRIME J P. Benefits of plant diversity to ecosystems: Immediate, filter and founder effects [J]. *Journal of ecology*, 1998, 86(6): 902–910.
- [19] REN H Y, SCHÖNBACH P, WAN H W, et al. Effects of grazing intensity and environmental factors on species composition and diversity in typical steppe of Inner Mongolia, China [J]. *PLoS One*, 2012, 7(12): 1–10.
- [20] CHEN W Q, WANG X Y, ZHANG Y J, et al. Effects of the vertical and horizontal availability of food resources: The diet selection of sheep grazing on natural grassland [J]. *The journal of agricultural science*, 2015, 153(2): 322–334.
- [21] 王旭, 王德利, 刘颖, 等. 不同放牧率下绵羊的采食量与食性选择研究 [J]. *东北师大学报 (自然科学版)*, 2002, 34(1): 36–40.
- [38] 张福春, 朱志辉. 中国作物的收获指数 [J]. *中国农业科学*, 1990, 23(2): 83–87.
- [39] 崔明, 赵立欣, 田宜水, 等. 中国主要农作物秸秆资源能源化利用分析评价 [J]. *农业工程学报*, 2008, 24(12): 291–296.
- [40] 王海东, 李翠霞. 黑龙江省秸秆类生物质能源储量测度 [J]. *生态经济*, 2009, 25(11): 128–130, 144.
- [41] 丁文斌, 王雅鹏, 徐勇. 生物质能源材料: 主要农作物秸秆产量潜力分析 [J]. *中国人口·资源与环境*, 2007, 17(5): 84–89.
- [42] 中国农业部/美国能源部项目专家组. 中国生物质资源可获得性评价 [M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1998.
- [43] LIU W G, XU J M, XIE X F, et al. A new integrated framework to estimate the climate change impacts of biomass utilization for biofuel in life cycle assessment [J]. *Journal of cleaner production*, 2020, 267: 1–10.
- [44] 中国城市温室气体工作组. 中国产品全生命周期温室气体排放系数集 (2022) [M]. 北京: 中国环境出版集团, 2022.