

# 作物秸秆生物质原料可持续利用模式探究

侯新村, 范希峰, 朱毅, 岳跃森, 武菊英

(北京市农林科学院北京草业与环境研究发展中心/农业部都市农业(北方)重点实验室, 北京100097)

**摘要:** 为阐明作物秸秆作为生物质原料的可持续利用潜力, 基于可持续发展理论, 构建了以生物质原料可持续生产和供应系统为基础的生物质产业可持续发展模式。在此基础上, 构建了作物秸秆生物质原料可持续利用模式, 并分析了中国作物秸秆生物质原料可持续利用潜力。在中国现代生物质产业发展过程中, 需要控制作物秸秆生物质原料利用比例整体上不超过25%, 即使部分适宜规模化开发利用地区亦不应该超过35%; 生物质产业发展应该兼顾生物质原料需要与传统利用方式需要之间的平衡, 尤其是要满足作物主产品可持续生产的需要。

## 0引言

可持续发展一般是指自然、社会、经济的协调统一发展<sup>[1]</sup>, 具有极为丰富的内涵<sup>[2]</sup>。可持续发展理论源于人类对自身生存与社会发展以及与之相关的资源、环境、能源、粮食等问题的逐步认识与不断思考<sup>[2-4]</sup>, 由世界环境与发展委员会于1987年在《我们共同的未来》<sup>[5]</sup>

一书中系统论述: 可持续发展是既满足当代人的需要, 又不对后代人满足其需要的能力构成危害的发展。这一论述强调了可持续发展理论的时间维内容, 在此基础上, 中国学者补充了其空间维内容: 既满足本部门的需要, 又不危害全球满足需要能力的发展<sup>[6]</sup>

; 既满足本地人口的需要, 又不危害全球人口满足其需要能力的发展<sup>[6]</sup>

; 在满足人类需要的同时, 不危害其他物种满足其需要的能力的发展<sup>[2]</sup>

。可持续发展理论的实质在于科学认识和调控人与自然、人与人之间的关系。可持续发展理论已经成为21世纪“自然—社会—经济”复杂巨系统的运行规则<sup>[3]</sup>

, 同时, 作为科学思想与研究方法, 可持续发展理论广泛应用于农业科学<sup>[7-16]</sup>、能源科学<sup>[17-22]</sup>等诸多科学研究领域。

在传统石化资源日益匮乏、环境污染问题日趋严重的今天, 现代生物质产业可持续发展关乎经济可持续发展与社会可持续发展, 与全球可持续发展息息相关<sup>[23]</sup>

。在全球生物质产业发展过程中, 国际可持续生物燃料圆桌会议于2008年发布了《生物燃料可持续生产国际准则》, 对生物燃料可持续生产进行了原则性的规范<sup>[24]</sup>

, 旨在促进全球生物质产业发展。国内外学者亦针对生物质原料<sup>[23,25-26]</sup>与生物质能源<sup>[27-29]</sup>的可持续性开展了相关研究工作。

生物质原料可持续生产和供应是生物质产业发展的基础<sup>[23]</sup>

。木质纤维素是纤维

素、半纤维素、木质素的统称, 是全球最为丰富的可再生资源和生物质原料<sup>[30-33]</sup>

, 有望成为未来大农业生产的重要组成部分<sup>[34]</sup>

。木质纤维素生物质原料分为草本类与木本类2类, 主要来源于木质纤维素植物与农林废弃物, 木质纤维素植物主要包括木质纤维素木本植物与木质纤维素草本植物2类<sup>[35-40]</sup>

, 农林废弃物则主要包括作物秸秆、林业废弃物、农林产品加工副产物等<sup>[31,33,41-42]</sup>。

作物秸秆是优质的木质纤维素生物质原料, 是现代生物质产业可持续发展的重要原料来源。然而, 作为重要的生物资源, 作物秸秆的传统利用方式依然长期存在, 以保证农林业和相关工业产业发展、维护资源可持续利用和环境可持续性。在生物质产业发展过程中, 对作物秸秆进行开发利用满足生物质原料需要的同时, 应该保证作物秸秆传统利用方式的需要, 现代生物质产业的可持续发展不宜影响作物秸秆传统利用方式的需要。本研究拟基于可持续发展理论构建生物质产业可持续发展模式, 进而构建作物秸秆生物质原料可持续利用模式, 旨在阐明作物秸秆作为生物质原料的可持续利用潜力, 明确兼顾作物秸秆生物质原料需要与传统利用方式需要之间平衡的必要性。

## 1 生物质产业可持续发展模式

[23]

，相应地，生物质产业可持续发展模式由生物质原料可持续生产和供应系统、生物质原料可持续收集储存运输系统、生物质能源与生物基产品可持续生产和利用系统3个部分构成（图1）。

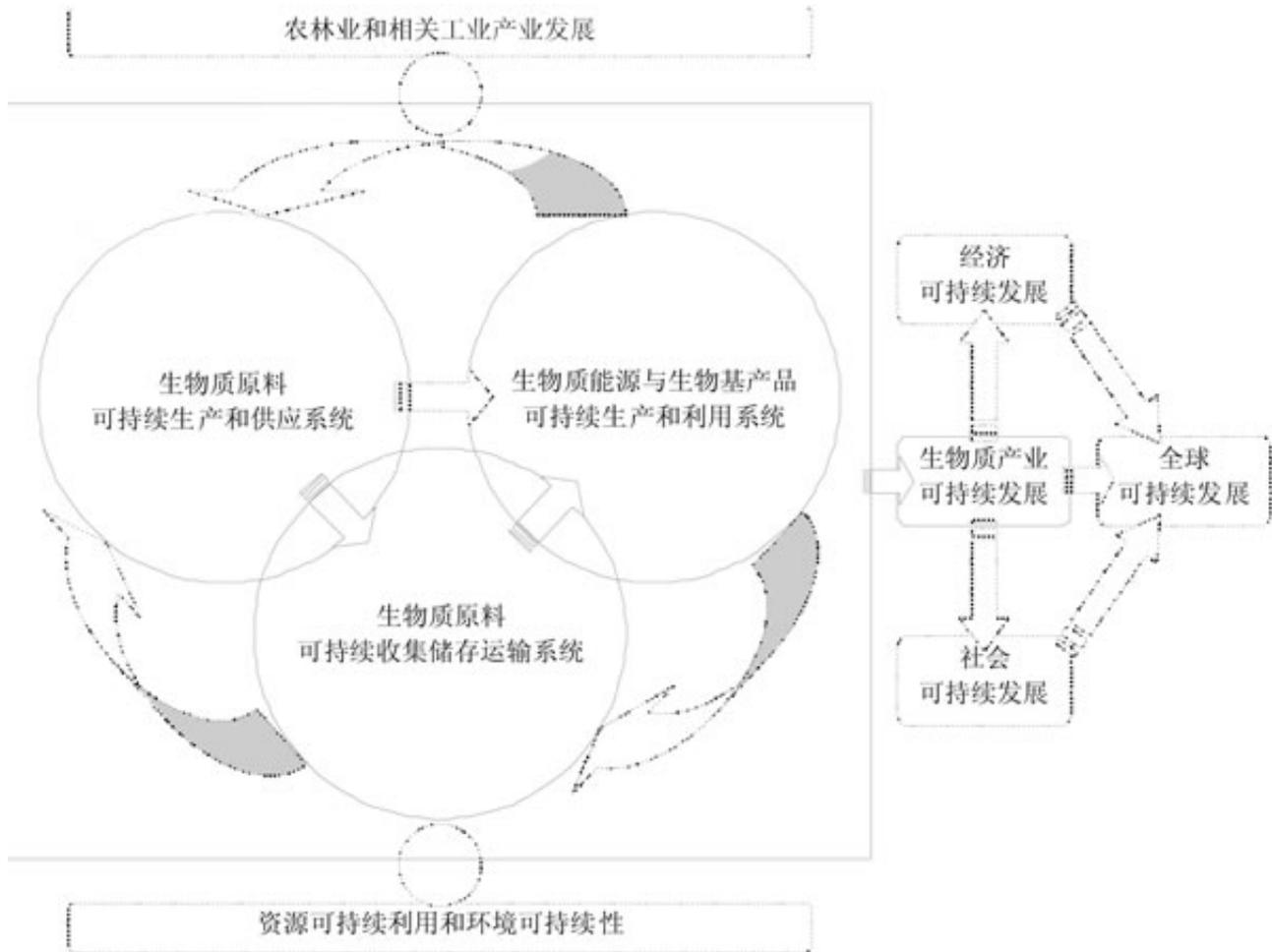


图1 生物质产业可持续发展模式

生物质原料可持续生产和供应系统包括生物质原料的生长发育或生产过程以及收获过程，是生物质产业可持续发展模式的基础，决定着后面2个系统以及生物质产业的可持续性；生物质原料可持续收集储存运输系统包括生物质原料的收集、储存和运输过程以及必要的预处理过程，是连接前后2个系统的纽带和保持生物质产业可持续性的关键；生物质能源与生物基产品可持续生产和利用系统包括固体、液体、气体等不同形态生物质能源与生物基产品的生产和利用过程，是前面2个系统以及生物质产业可持续发展的基本目标。

生物质产业可持续发展模式的基本要求是，通过构建生物质原料可持续生产模式、生物质原料可持续收集储存运输模式、生物质能源与生物基产品可持续生产和利用模式，应用相关关键技术，促进现代生物质产业链与各系统之间的相互联系与相互促进，共同保持协调统一的可持续性，同时不危害农林业和相关工业产业发展、资源可持续利用和环境可持续性。其中，生物质原料可持续生产模式是指，基于可持续发展理论，在保证生物质原料满足农林业和相关工业产业发展需要、资源可持续利用和环境可持续性需要的同时，满足现代生物质产业发展对生物质原料的需要。

生物质产业可持续发展模式的实质是，基于可持续发展理论，科学认识和调控现代生物质产业发展与农林业和相关工业产业发展、资源可持续利用和环境可持续性之间的关系，既要满足现代生物质产业链以及各系统可持续发展的需要，又不对农林业和相关工业产业发展需要、资源可持续利用和环境可持续性构成危害，旨在促进生物质产业可持续发展，为经济可持续发展与社会可持续发展乃至全球可持续发展发挥积极作用。

## 2作物秸秆作为生物质原料的主要生物质品质与资源潜力

### 2.1主要生物质品质

#### 作物秸秆一

一般为传统农业收获作物主产

品（包括作物籽实和其他主产品）以后残留的茎、叶等副产品<sup>[43-44]</sup>

，亦包括玉米芯、稻壳、甘蔗渣、花生壳等作物主产品加工过程中的剩余物，与木质纤维素草本植物同属于草本类木质纤维素生物质原料。

玉米秸秆、水稻秸秆、小麦秸秆等3种作物秸秆<sup>[30,45]</sup>与柳枝稷<sup>[37]</sup>、芦竹<sup>[37]</sup>、荻<sup>[37]</sup>、杂交狼尾草<sup>[40]</sup>等4种木质纤维素草本植物的主要生物质品质比较如表1所示。

表1 作物秸秆与木质纤维素草本植物的主要生物质品质

生物质原料	木质纤维素生物质含量/%			热值(kJ/kg)	灰分含量/%	灰熔融性/℃			
	纤维素	半纤维素	木质素			变形温度	软化温度	半球温度	流动温度
玉米秸秆	37.10	24.20	18.20	16.92	5.20	1040.00	1220.00	1230.00	1260.00
水稻秸秆	36.00	19.60	24.00	14.65	6.30	1010.00	1130.00	1240.00	1250.00
小麦秸秆	44.50	24.30	21.30	15.13	3.10	950.00	980.00	1040.00	1080.00
柳枝稷	39.80	24.12	5.84	17.98	3.58	1200.83	1222.08	1235.92	1287.67
芦竹	35.68	27.23	8.12	18.29	4.79	1127.50	1167.00	1194.50	1224.25
荻	39.38	25.42	6.60	18.03	3.56	1136.58	1181.83	1196.25	1246.50
杂交狼尾草	36.15	21.01	8.92	17.02	9.26	942.00	980.75	1010.25	1054.75

#### 2.1.1木质纤维素生物质含量

（1）纤维素含量。3种作物秸秆中，以小麦秸秆最高，玉米秸秆次之，水稻秸秆最低；小麦秸秆高于4种木质纤维素草本植物；玉米秸秆低于柳枝稷和荻，高于芦竹和杂交狼尾草；水稻秸秆低于柳枝稷、荻和杂交狼尾草，高于芦竹。

（2）半纤维素含量。3种作物秸秆中，以小麦秸秆最高，玉米秸秆次之但是与小麦秸秆接近，水稻秸秆最低；小麦秸秆和玉米秸秆低于芦竹和荻，高于柳枝稷和杂交狼尾草；水稻秸秆低于4种木质纤维素草本植物。

（3）木质素含量。3种作物秸秆中，以水稻秸秆最高，小麦秸秆次之，玉米秸秆最低；3种作物秸秆高于4种木质纤维素草本植物。

（4）木质纤维素含量（其数值等于纤维素、半纤维素、木质素含量之和）。玉米秸秆、水稻秸秆、小麦秸秆分别为79.50%、79.60%、90.10%，小麦秸秆最高，水稻秸秆次之，玉米秸秆最低但是与水稻秸秆接近；柳枝稷、芦竹、荻、杂交狼尾草的木质纤维素含量分别为69.76%、71.03%、71.40%、66.08%，3种作物秸秆高于4种木质纤维素草本植物。

2.1.2热值3种作物秸秆中，以玉米秸秆最高，小麦秸秆次之，水稻秸秆最低；3种作物秸秆低于4种木质纤维素草本植物，但是玉米秸秆与杂交狼尾草接近。

#### 2.1.3灰分含量和灰熔融性

（1）灰分含量。3种作物秸秆中，以小麦秸秆最低，玉米秸秆次之，水稻秸秆最高；小麦秸秆低于4种木质纤维素草本植物；玉米秸秆和水稻秸秆低于杂交狼尾草，高于柳枝稷、芦竹和荻。生物质原料的灰熔融性以变形温度、软化温度、半球温度、流动温度表征<sup>[43]</sup>。

（2）变形温度。3种作物秸秆中，以玉米秸秆最高，水稻秸秆次之，小麦秸秆最低；3作物秸秆低于柳枝稷、芦竹和荻，高于杂交狼尾草。

(3) 软化温度。3种作物秸秆中，以玉米秸秆最高，水稻秸秆次之，小麦秸秆最低；玉米秸秆低于柳枝稷，高于芦竹、荻和杂交狼尾草；水稻秸秆低于柳枝稷、芦竹和荻，高于杂交狼尾草；小麦秸秆低于4种木质纤维素草本植物，但是与杂交狼尾草接近。

(4) 半球温度。3种作物秸秆中，以水稻秸秆最高，玉米秸秆次之，小麦秸秆最低；水稻秸秆高于4种木质纤维素草本植物；玉米秸秆低于柳枝稷，高于芦竹、荻和杂交狼尾草；小麦秸秆低于柳枝稷、芦竹和荻，高于杂交狼尾草。

(5) 流动温度。3种作物秸秆中，以玉米秸秆最高，水稻秸秆次之，小麦秸秆最低；玉米秸秆和水稻秸秆低于柳枝稷，高于芦竹、荻和杂交狼尾草；小麦秸秆低于柳枝稷、芦竹和荻，高于杂交狼尾草。

作物秸秆的主要生物质品质与木质纤维素草本植物之间有一定的差异，但是，总体来说，二者的生物质品质接近，作物秸秆是优质的木质纤维素生物质原料。

## 2.2 资源潜力

全球作物秸秆资源极为丰富，玉米秸秆、大麦秸秆、燕麦秸秆、水稻秸秆、小麦秸秆、甜高粱秸秆、甘蔗渣等7种主要作物秸秆每年的可收集资源总量约为1.5Pg，其中，可收集资源量最多的3种作物秸秆是水稻秸秆(731.3Tg)、小麦秸秆(354.4Tg)、玉米秸秆(203.6Tg)<sup>[46]</sup>。

理论上，全球作物秸秆可以转化生产生物乙醇442.0GL，可以替代317.7GL汽油，约相当于当前全球汽油年消耗量的28.8%<sup>[46]</sup>。作物秸秆作为生物质原料的资源潜力巨大。

### 关于中国作物秸秆

资源潜力，不同年份有差异，不同

学者的研究结论亦有不同，2009年为7.48亿t<sup>[47]</sup>，2014年为8.97亿t<sup>[48]</sup>

。同时，全国作物秸秆资源分布差异亦较大，以河南最为丰富，紧随其后的为黑龙江、山东、河北、安徽、吉林和江苏<sup>[48]</sup>。

## 3 作物秸秆生物质原料可持续利用模式的主要内容

作物秸秆是以生产作物主产品为主要目标的传统农业的副产品，其生产过程是基于耕地的。在农业生态系统管理中开展环境整治、推行轮作休耕、实施种养结合、优化系统结构的基本目标在于实现农业生态系统可持续发展、促进作物主产品可持续生产<sup>[16]</sup>

，而不是作物秸秆可持续生产与利用。作物秸秆生物质原料可持续利用（图2）是指在保证作物主产品可持续生产的前提下，实现有效收集与生物质原料的科学供应；其基本要求是在可持续农业耕作管理条件下从田间收集最大可能数量的作物秸秆资源，在此基础上，科学调控作物秸秆生物质原料需要与肥料还田、传统农村生活能源、饲料原料、工业原料、食用菌基料等传统利用方式需要之间的适宜比例；其技术关键在于科学分析作物秸秆理论资源量、可收集资源量、作物秸秆生物质原料与传统利用方式之间的适宜比例，尤其是保证可持续农业耕作管理所需要的作物秸秆还田比例，旨在阐明作物秸秆生物质原料以及传统利用方式的可持续利用潜力。作物秸秆理论资源量是指收获成熟作物主产品以后的植株生物量，可由作物产量与草谷比系数相乘得到<sup>[47]</sup>

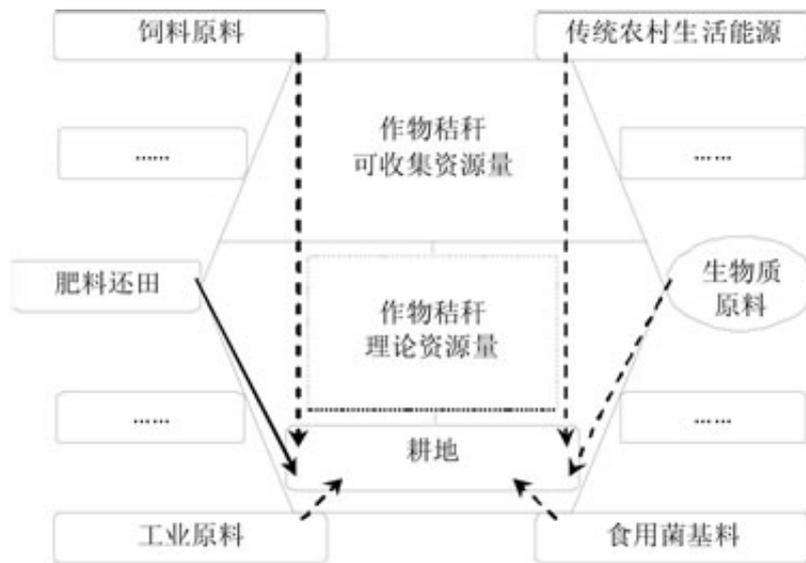
；作物秸秆可

收集资源量是指在可持续农

业耕作管理条件下从田间收集的作物秸秆资源的最大可

能数量<sup>[47-48]</sup>，可由作物秸秆理论资源量与可收集系数相乘得到<sup>[47]</sup>

；作物秸秆可收集资源量可以用来表征其可持续利用潜力。



省略号表示未来新的作物秸秆利用方式，与传统利用方式均置于矩形文本框内，生物质原料利用方式则置于椭圆形文本框内；  
实线与虚线箭头分别表示作物秸秆肥料还田和其他利用方式副产物还田

图2 作物秸秆生物质原料可持续利用模式

作物秸秆是物质、能量和养分的重要载体<sup>[50]</sup>，作物秸秆生物质原料可

持续利用关乎现代生物质产业发展与资源、环境、农业可持续发展<sup>[51]</sup>

。作物秸秆富含有机碳、氮、磷、钾以及中微量元素<sup>[52]</sup>，是廉价、优质的有机肥料<sup>[51,53]</sup>，同时，作物秸秆还田还可以有效减少地表径流氮磷钾的流失量<sup>[54]</sup>。因此，是维持土壤肥力质量的最主要方式之一，亦是当前作物秸秆的重要用途<sup>[50]</sup>。

因此，在作物秸秆生物质原料可持续利用模式中，为促进可持续农业耕作管理，首先需要保证较高的作物秸秆还田比例，加拿大农业及农业食品部学者Guy Lafond认为这个比例不应该低于60%<sup>[53]</sup>

。作物秸秆还田主要通过作物秸秆肥料还田和作物秸秆其他利用方式的副产物还田2种方式实现，前者包括机械粉碎还田、翻压还田、高留茬还田等直接还田和堆沤还田等间接还田<sup>[51]</sup>

，后者包括用作传统农村生活能源过程中产生的灰分还田即烧灰还田<sup>[51]</sup>

、用作饲料原料过程中产生的畜禽粪便还田即过腹还田<sup>[51]</sup>以及用作工业原料、食用菌基料、生物质原料过程中产生的各类副产物还田。

在作物秸秆可持续利用模式实证分析方面，蔡亚庆等<sup>[47]</sup>的研究较为系统和科学，其研究

结果和主要参数受到后人相关研究的多次引用和参考<sup>[48-49]</sup>

。中国作物秸秆还田、传统农村生活能源、饲料原料、工业原料、食用菌基料、生物质原料等利用方式之间的适宜比例分别为14.6%、30.7%、24.5%、3.9%、2.3%、23.9%，也就是说，中国将作物秸秆用作生物质原料的比例整体上不宜超过25%；相同利用方式不同区域之间的可持续利用比例有差异，黄土高原区、蒙新区、青藏区、华北区、东北区、西南区、长江中下游区、华南区作物秸秆肥料还田可持续利用比例分别为20.0%、20.0%、20.0%、14.1%、15.0%、15.0%、12.0%、12.0%，生物质原料可持续利用比例分别为7.0%、21.1%、4.8%、21.2%、33.3%、10.0%、30.4%、31.9%，在中国东北区、长江中下游区、华南区，适宜将作物秸秆可收集资源量的30%用作生物质原料进行规模化开发利用，但亦不应该超过35%，而在黄土高原区、青藏区、西南区等生态环境脆弱地区则不宜将作物秸秆用作生物质原料进行大规模开发利用<sup>[47]</sup>。

#### 4讨论

#### 4.1 作物秸秆生物质原料可持续利用比例

作物秸秆是优质的生物质原料，全球作物秸秆的资源潜力巨大，但是，作物秸秆的这种资源潜力不应该视为作物秸秆生物质原料可持续利用潜力。将大量作物秸秆用作生物质原料，看似可以在“不与民争粮”的原则促进现代生物质产业发展，但是，如果必要的作物秸秆还田比例得不到保证而导致土壤肥力质量下降，将会间接地影响作物主产品可持续生产，就难以实现粮食安全与生物质产业发展之间的双赢<sup>[53]</sup>。

在现代生物质产业发展过程中，需要控制作物秸秆生物质原料利用比例，须兼顾作物秸秆传统利用方式的需要，尤其是保证作物秸秆还田比例以促进养分资源循环利用、促进土壤团粒结构形成和保水保肥能力提高，进而满足作物主产品可持续生产的需要，这样才符合作物秸秆生物质原料可持续利用模式的基本要求。

#### 4.2 草本类木质纤维素生物质原料可持续生产模式

生物质原料可持续生产模式是可持续发展理论在生物质原料生产和供应领域的科学应用，有利于促进生物质原料的可持续生产。木质纤维素草本植物与作物秸秆同属于草本类木质纤维素生物质原料，木质纤维素草本植物可持续生产模式<sup>[23]</sup>与作物秸秆生物质原料可持续利用模式构成草本类木质纤维素生物质原料可持续生产模式的主要内容。

与作物秸秆不同，木质

纤维素草本植物属于以生产植物茎、叶等为主要目标的营养体农业<sup>[55-56]</sup>，其生长发育过程是基于边际土地的<sup>[23]</sup>

。木质纤维素草本植物可持续生产是指在长期规模化种植过程中，在能源与资源节约、生态环境友好的前提下实现木质纤维素草本植物的优质生产与生物质原料稳定供应；其基本要求是通过实施生态调控与栽培管理，适当控制木质纤维素草本植物生长发育过程的能源与资源投入，维持或提高木质纤维素草本植物的生产潜力，同时维持或提高边际土地的土壤肥力质量、保护或丰富边际土地的生态环境多样性与生物多样性；其技术关键在于在木质纤维素草本植物生长季或生命周期的不同阶段科学应用种类筛选、保护性耕作、混合种植、水肥管理、杂草控制、生物质收获等可持续生产技术，旨在解决木质纤维素草本植物边际土地长期规模化种植过程的可持续性问题<sup>[23]</sup>。

木质纤维素草本植物可持续生产模式的实质是，基于可持续发展理论，科学认识和调控生物质原料生产与边际土地资源可持续利用、环境可持续性之间的关系，既要满足生物质原料的需要，又不对木质纤维素草本植物的生产功能与生态功能、边际土地的生态环境多样性与生物多样性构成危害；作物秸秆生物质原料可持续利用模式的实质是，基于可持续发展理论，科学认识和调控作物秸秆理论资源量、可收集资源量、各种利用方式之间的关系，既要满足生物质原料的需要，又不对作物秸秆传统利用方式，尤其是作物主产品可持续生产的需要构成危害。

#### 4.3 今后需要开展的研究工作

今后，可以基于可持续发展理论探究其他木质纤维素生物质原料可持续生产模式，探究、完善生物质原料可持续生产模式，为中国生物质原料的可持续生产和供应提供理论支持与技术支撑，亦可以探究生物质原料可持续收集储存运输模式以及生物质能源与生物基产品可持续生产和利用模式，从而不断完善生物质产业可持续发展模式。

生物质产业可持续发展模式是可持续发展理论在生物质产业领域的科学应用，有利于促进现代生物质产业与农林业和相关工业产业之间的协调统一发展，有利于维护资源可持续利用和环境可持续性，其主要内容来源于生物质产业，又指导生物质产业，随着生物质产业发展而不断发展，是一项长期的理论探索与实践工程。随着生物质产业发展，需要针对生物质产业中不断出现的新问题，补充发展新的内容，逐步完善生物质产业可持续发展模式，促进生物质产业可持续发展，进而促进经济可持续发展和社会可持续发展乃至全球可持续发展。

#### 参考文献

- [1]中国社会科学院语言研究所.现代汉语词典(第6版)[M].北京：商务印书馆，2012：733.
- [2]赵士洞，王礼茂.可持续发展的概念和内涵[J].自然资源学报，1996，11(3)：288-292.
- [3]牛文元.中国可持续发展总论[M].北京：科学出版社，2007：4-7，14-21.
- [4]石元春.决胜生物质[M].北京：中国农业大学出版社，2011：58-59.

- [5]世界环境与发展委员会.我们共同的未来[M].王之佳,柯金良,等译.长春:吉林人民出版社,1997:52.
- [6]杨开忠.一般持续发展论(上)[J].中国人口·资源与环境,1994,4(1):11-15.
- [7]辛岭,胡志全.中国农业可持续发展水平评价[J].中国农业科技导报,2015,17(4):135-142.
- [8]罗锡文,廖娟,胡炼,等.提高农业机械化水平促进农业可持续发展[J].农业工程学报,2016,32(1):1-11.
- [9]张灿强,王莉,华春林,等.中国主要粮食生产的化肥削减潜力及其碳减排效应[J].资源科学,2016,38(4):790-797.
- [10]黄兴成,石孝均,李渝,等.基础地力对黄壤区粮油高产、稳产和可持续生产的影响[J].中国农业科学,2017,50(8):1476-1485.
- [11]方精云,白永飞,李凌浩,等.我国草原牧区可持续发展的科学基础与实践[J].科学通报,2016,61(2):155-164.
- [12]蒋高明,郑延海,吴光磊,等.产量与经济效益共赢的高效生态农业模式:以弘毅生态农场为例[J].科学通报,2017,62(4):289-297.
- [13]邝远华,汪丽娜,陈晓宏,等.水资源可持续性的参数敏感性分析[J].地理科学,2016,36(6):910-916.
- [14]徐明岗,周世伟,张文菊,等.我国长期定位施肥试验与农业可持续生产[J].中国科学院院刊,2015,30(Z1):141-149.
- [15]徐镫钦,陆雅海.水稻农业增产减排可持续发展的生物工程技术[J].科学通报,2016,61(1):122-124.
- [16]黄国勤.中国南方农业生态系统可持续发展面临的问题及对策[J].中国生态农业学报,2017,25(1):13-18.
- [17]赵晶,郭放,阿鲁斯,等.未来航空燃料原料可持续性研究[J].北京航空航天大学学报,2016,42(11):2378-2385.
- [18]陶彬,李林,常波涛,等.应对成熟油田可持续开发的地质导向革新策略[J].西南石油大学学报:自然科学版,2017,39(2):62-70.
- [19]于汶加,陈其慎,张艳飞,等.世界新格局与中国新矿产资源战略观[J].资源科学,2015,37(5):860-870.
- [20]王云,朱宇恩,张军营,等.中国煤炭产业生命周期模型构建与发展阶段判定[J].资源科学,2015,37(10):1881-1890.
- [21]韩雅文,王安建,周凤英,等.基于全生命周期的褐煤制气与发电温室气体排放对比研究[J].地球学报,2017,38(1):54-60.
- [22]丁宁,逯馨华,杨建新,等.煤炭生产的水足迹评价研究[J].环境科学学报,2016,36(11):4228-4233.
- [23]侯新村,范希峰,陈龙池,等.木质纤维素草本植物边际土地可持续生产模式探究[J].中国农业大学学报,2014,19(2):14-20.
- [24]李哲,杨海芳.《生物燃料可持续生产国际准则》解读及其对我国生物燃料发展的启示[J].中国生物柴油,2010(2):1-5.
- [25]李欣,娄世玲,杨麒,等.基于生命周期能值分析的秸秆能源化利用方式的对比评价[J].环境工程学报,2016,10(8):4607-4614.
- [26]Dauber J, Jones M B, Stout J C. The impact of biomass crop cultivation on temperate biodiversity[J]. Global Change Biology Bioenergy, 2010, 2(6): 289-309.

- [27]霍丽丽, 赵立欣, 孟海波, 等. 秸秆类生物质气炭联产全生命周期评价[J]. 农业工程学报, 2016, 32(Supp.1): 261-266.
- [28] Consuelo L F Pereira, Enrique Ortega. Sustainability assessment of large-scale ethanol production from sugarcane[J]. Journal of Cleaner Production, 2010, 18(1): 77-82.
- [29] 王明新, 姚静波, 孙向武. 不同施肥模式下甘薯乙醇生命周期能效与环境影响分析[J]. 自然资源学报, 2017, 32(2): 245-254.
- [30] 余强, 庄新姝, 袁振宏, 等. 木质纤维素类生物质制取燃料及化学品的研究进展[J]. 化工进展, 2012, 31(4): 784-791.
- [31] 袁正求, 龙金星, 张兴华, 等. 木质纤维素催化转化制备能源平台化合物[J]. 化学进展, 2016, 28(1): 103-110.
- [32] 杨越, 刘琪英, 蔡焱柳, 等. 木质纤维素催化转化制备DMF和C5/C6烷烃[J]. 化学进展, 2016, 28(2/3): 363-374.
- [33] 谢光辉. 论我国非粮生物质原料的非粮属性[J]. 中国农业大学学报, 2013, 18(6): 1-5.
- [34] 赵其国, 黄季焜. 农业科技发展态势与面向2020年的战略选择[J]. 生态环境学报, 2012, 21(3): 397-403.
- [35] 国家能源局. NB/T 34029 2015, 非粮生物质原料名词术语[S]. 北京: 中国农业出版社, 2016.
- [36] Zhenying Wu, Yingping Cao, Ruijuan Yang, et al. Switchgrass SBP-box transcription factors PvSPL1 and 2 function redundantly to initiate side tillers and affect biomass yield of energy crop[J]. Biotechnology for Biofuels, 2016, 9: 101-115.
- [37] 范希峰, 侯新村, 左海涛, 等. 三种草本能源植物在北京地区的产量和品质特性[J]. 中国农业科学, 2010, 43(16): 3316-3322.
- [38] Davey C L, Jones L E, Squance M. Radiation capture and conversion efficiencies of *Miscanthus sacchariflorus*, *M. sinensis* and their naturally occurring hybrid *M. × giganteus*[J]. Global Change Biology Bioenergy, 2017, 9(2): 385-399.
- [39] Gaurav Sablok, Yuan Fu, Valentina Bobbio, et al. Fuelling genetic and metabolic exploration of C3 bioenergy crops through the first reference transcriptome of *Arundo donax* L. [J]. Plant Biotechnology Journal, 2014, 12(5): 554-567.
- [40] 范希峰, 侯新村, 朱毅, 等. 杂交狼尾草作为能源植物的产量和品质特性[J]. 中国草地学报, 2012, 34(1): 48-52.
- [41] 谢光辉. 非粮生物质原料体系研发进展及方向[J]. 中国农业大学学报, 2012, 17(6): 1-19.
- [42] 石元春. 中国生物质原料资源[J]. 中国工程科学, 2011, 13(2): 16-23.
- [43] 中华人民共和国农业部. NY/T 1915 2010, 生物质固体成型燃料术语[S]. 北京: 中国农业出版社, 2010.
- [44] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. GB 50762 2012, 秸秆发电厂设计规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 2012.
- [45] 乐园, 李龙生. 秸秆类生物质燃烧特性的研究[J]. 能源工程, 2006(4): 30-33.
- [46] Seungdo Kim, Bruce E Dale. Global potential bioethanol production from wasted crops and crop residues[J]. Biomass and Bioenergy, 2004, 26(4): 361-375.
- [47] 蔡亚庆, 仇焕广, 徐志刚. 中国各区域秸秆资源可能源化利用的潜力分析[J]. 自然资源学报, 2011, 26(10): 1637-1646.
- [48] 张崇尚, 刘乐, 陆歧楠, 等. 中国秸秆能源化利用潜力与秸秆能源企业区域布局研究[J]. 资源科学, 2017, 39(3): 473-481.

- [49]崔蜜蜜, 蒋琳莉, 颜廷武.基于资源密度的作物秸秆资源化利用潜力测算与市场评估[J].中国农业大学学报, 2016, 21(6) : 117-131.
- [50]汤宏, 沈健林, 刘杰云, 等.稻秸的不同组分对水稻土甲烷和二氧化碳排放的影响[J].生态环境学报, 2016, 25(7) : 1125-1133.
- [51]高利伟, 马林, 张卫峰, 等.中国作物秸秆养分资源数量估算及其利用状况[J].农业工程学报, 2009, 25(7) : 173-179.
- [52]代文才, 高明, 兰木羚, 等.不同作物秸秆在旱地和水田中的腐解特性及养分释放规律[J].中国生态农业学报, 2017, 25(2) : 188-199.
- [53]Duncan Graham- Rowe.Agriculture : Beyond food versus fuel[J].Nature , 2011 , 474(7352) : S6-8.
- [54]刘红江, 郑建初, 陈留根, 等.秸秆还田对农田周年地表径流氮、磷、钾流失的影响[J].生态环境学报, 2012, 21(6) : 1031-1036.
- [55]程序, 朱万斌.北方农牧交错带以开发能源作物促生态重建的前景[J].草业学报, 2012, 21(6) : 1-7.
- [56]任继周, 胥刚, 李向林, 等.中国草业科学的发展轨迹与展望[J].科学通报, 2016, 61(2) : 178-192.
- 原文地址：<http://www.china-nengyuan.com/tech/136087.html>