

# 中国粮食作物秸秆焚烧排碳量及 转化生物炭固碳量的估算

李飞跃<sup>1,2</sup>, 汪建飞<sup>1\*</sup>

(1. 安徽科技学院城建与环境学院, 凤阳 233100; 2. 上海交通大学环境科学与工程学院, 上海 200240)

**摘 要:** 生物质燃烧对全球大气碳排放和气候变化产生重要的影响。近年来, 利用生物质制备生物炭实现碳封存备受重视。该文根据 2001—2010 年中国粮食产量, 估算了主要粮食作物秸秆产量, 结合秸秆露天焚烧比例及 CO 和 CO<sub>2</sub> 排放因子, 得出 CO 和 CO<sub>2</sub> 的排放量及碳排放总量。同时, 根据实验室条件下秸秆转化为生物炭的产率及碳含量, 估算了中国粮食作物秸秆转化生物炭后固定碳的量。结果发现, 中国粮食作物秸秆因焚烧年排放 CO、CO<sub>2</sub> 和总碳量分别为  $1.15 \times 10^7$ 、 $1.57 \times 10^8$  和  $4.77 \times 10^7$  t。中国粮食作物秸秆全部转化为生物炭后年平均可固碳  $0.96 \times 10^8$  t, 如果把每年焚烧秸秆的量全部转化为生物炭可减少近一半因焚烧秸秆排放碳的量, 可见, 生物炭固碳技术是一种非常有前景的碳汇技术。

**关键词:** 秸秆, 排放控制, 碳, 秸秆焚烧, 碳固定, 生物炭

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2013.14.001

中图分类号: S156.2

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2013)-14-0001-07

李飞跃, 汪建飞. 中国粮食作物秸秆焚烧排碳量及转化生物炭固碳量的估算[J]. 农业工程学报, 2013, 29(14): 1—7.

Li Feiyue, Wang Jianfei. Estimation of carbon emission from burning and carbon sequestration from biochar producing using crop straw in China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2013, 29(14): 1—7. (in Chinese with English abstract)

## 0 引 言

作物秸秆是农作物生产过程中产生的一种生物资源。中国秸秆资源丰富, 约占世界秸秆总量的 25% 左右<sup>[1]</sup>。有研究表明, 2000—2003 年中国秸秆的年产量均在 6 亿 t 左右<sup>[2]</sup>。但是, 长期以来秸秆作为一类资源没有得到充分合理的利用, 大量的秸秆被丢弃、焚烧, 这不仅造成了资源浪费, 还污染了环境, 引起了全社会的广泛关注。

近年来, 研究人员发现生物质秸秆在限氧条件下(缺氧或是厌氧)热解碳化后, 产生一类高度芳香化且富含碳的固态物质称为生物炭<sup>[3]</sup>。生物炭具有高度稳定性, 在土壤中的平均停留时间可达千年<sup>[4]</sup>, 是一种有效的碳汇途径。此外, 生物质秸秆在转化

生物炭过程中还会产生混合气及生物质油等生物能源产品, 这产品可有效的减少化石原料的碳排放。因此, 生物炭固碳技术可为温室气体减排工作及生物质秸秆的综合有效的利用开辟新的途径。

中国农作物秸秆焚烧污染物释放量的估算已有相关研究<sup>[2,5-6]</sup>, 但侧重农作物秸秆焚烧引起的碳排放的估算较少<sup>[7]</sup>, 特别是研究中国农作物秸秆转化生物炭固碳量的估算, 至今未见相关报到。

为此, 本文依据中国粮食作物的产量、草谷比、露天秸秆焚烧比例及秸秆焚烧污染物排放因子, 估算了中国粮食作物秸秆焚烧排放 CO<sub>2</sub>、CO 和碳释放总量; 同时, 在实验室条件下, 把中国粮食作物秸秆热解转化为生物炭, 并根据生物炭产率及其碳含量, 估算中国粮食作物秸秆转化生物炭固定碳量, 展现了生物炭固碳技术的应用前景, 为相关的科学研究及政策的制定提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 粮食作物秸秆产量的估算

本文根据 2002—2011 年《中国统计年鉴》相关资料, 获得各省、自治区、直辖市的粮食总产量数据, 然后根据草谷比<sup>[8]</sup>计算出粮食作物秸秆产量。

收稿日期: 2013-05-15 修订日期: 2013-06-26

基金项目: 国家自然科学基金(21107070); 安徽省高等学校省级优秀青年人才基金项目(2012SQRL149); 安徽省长三角联合攻关项目(1101c0603046); 安徽省高校重大科研项目(KJ2012ZD04); 安徽科技学院自然科学研究项目(ZRC2013373)

作者简介: 李飞跃(1983—), 男, 主要从生物炭固碳及其环境效应方面的研究。安徽省凤阳县东华路9号 安徽科技学院城建与环境学院, 233100。Email: lifeiyue0523@163.com

\*通信作者: 汪建飞(1969—), 男, 安徽庐江人, 教授, 博士, 主要从事有机肥料研发及应用方面的研究。安徽省凤阳县东华路9号 安徽科技学院城建与环境学院, 233100。Email: jykjwf@sina.com

## 1.2 粮食作物秸秆露天焚烧量

本文采用曹国良等<sup>[2]</sup>的研究方法来估计粮食作物秸秆露天焚烧量。根据全国各省、自治区、直辖市秸秆露天燃烧比例<sup>[2]</sup>，确定粮食作物秸秆露天焚烧量

## 1.3 碳释放总量的确定

CO 和 CO<sub>2</sub> 气体排放量通过秸秆焚烧 CO、CO<sub>2</sub> 排放因子 (CO 排放因子 102.2 g/kg, CO<sub>2</sub> 排放因子 1 390.4 g/kg)<sup>[7]</sup> 与秸秆焚烧量相乘获得, 秸秆焚烧过程中碳释放只考虑 CO 和 CO<sub>2</sub> 气体排放, 不考虑其他形式的碳释放<sup>[7]</sup>。碳释放总量根据粮食作物秸秆露天焚烧释放 CO 和 CO<sub>2</sub> 的量中含碳量的比例来进行估算。

## 1.4 粮食作物秸秆生物炭的制备

水稻秸秆采自江苏常熟、小麦秸秆采自河南封丘、玉米秸秆和大豆秸秆采自安徽淮北。秸秆自然风干后, 用粉碎机破碎, 过 2 mm 筛, 称取一定质量的秸秆 (烘干基), 装入自制的圆柱体不锈钢反应器中, 通入高纯氮气使反应器内环境处于限氧状态 (O<sub>2</sub> 体积分数 <0.5%), 将反应器置于马弗炉内, 以 20℃·min<sup>-1</sup> 升温速率加热, 达到 500℃ 后维持 4 h, 关闭马弗炉, 自然冷至室温, 存留在反应器中固体物质即为生物炭<sup>[9]</sup>。

## 1.5 生物炭产率及固碳率的计算

生物炭产率计算公式:

$$\eta = \frac{m}{M} \times 100\% \quad (1)$$

式中,  $\eta$  生物炭产率, %;  $m$  反应装置内生物炭的烘干质量, g;  $M$  放入反应装置内生物质秸秆的烘干质量, g。

生物炭固碳率的计算公式:

$$CS = \eta \times c_{BC} \times 100\% \quad (2)$$

式中,  $CS$  生物炭固碳率, %;  $c_{BC}$  生物炭含碳量, %。

## 1.6 分析方法

生物炭的产率通过称质量法测定, 生物炭的含碳量用 C、N 元素用元素分析仪测定 (Vario EL III, Elementar, Germany)<sup>[10]</sup>。

# 2 结果与分析

## 2.1 2001—2010 年中国粮食作物秸秆产量

近 10 a 来, 中国粮食作物秸秆产量从 2001 年的  $4.6 \times 10^8$  t 增加到 2010 年的  $5.8 \times 10^8$  t, 年平均产量约为  $5.1 \times 10^8$  t (表 1)。从 2003 年开始, 玉米秸秆产量逐年增加, 并超过稻谷秸秆产量。以 2010 年为例, 玉米秸秆产量占到粮食作物秸秆产量的 41.6%, 主要分布于东北地区各省份及华北地区 (如河北、内蒙古等)、华东地区 (如山东) 和中南 (如

河南) 的部分省份; 其次, 是稻谷秸秆, 约占总秸秆产量的 32.5%, 主要分布于中南 (如湖南、湖北、广东和广西等) 和华东地区 (如江西、江苏、安徽和浙江等) 及东北 (如黑龙江) 和西南 (如四川) 部分省份; 小麦秸秆产量占粮食作物总产量的第 3 位, 约占 20.3%, 主要分布于华东 (如山东、安徽和江苏等)、中南 (如河南) 及华北 (如河北) 等地区; 豆类秸秆产量约占粮食作物秸秆产量的 5.6%。

表 1 2001—2010 年中国粮食作物秸秆产量

Table 1 National estimated amounts of grain crop residue  $10^6$  t

| 年份<br>Year | 稻谷<br>Rice | 小麦<br>Wheat | 玉米<br>Corn | 豆类<br>Bean | 总计<br>Total |
|------------|------------|-------------|------------|------------|-------------|
| 2001       | 172.25     | 96.69       | 156.30     | 35.10      | 460.35      |
| 2002       | 169.30     | 93.00       | 166.19     | 38.32      | 466.82      |
| 2003       | 155.84     | 89.08       | 158.69     | 36.38      | 439.99      |
| 2004       | 173.72     | 94.71       | 178.49     | 38.17      | 485.09      |
| 2005       | 175.17     | 100.37      | 190.93     | 36.90      | 503.37      |
| 2006       | 176.27     | 111.72      | 207.70     | 34.26      | 529.95      |
| 2007       | 180.45     | 112.58      | 208.65     | 29.41      | 531.10      |
| 2008       | 186.14     | 115.84      | 227.30     | 34.94      | 564.22      |
| 2009       | 189.25     | 118.57      | 224.64     | 33.01      | 565.47      |
| 2010       | 189.89     | 118.64      | 242.83     | 32.43      | 583.78      |

## 2.2 2001—2010 年中国粮食作物秸秆焚烧量

从表 2 可以看出, 2001—2010 年中国粮食作物每年秸秆露天焚烧量平均为  $1.13 \times 10^8$  t, 约占粮食作物秸秆总量的 21.6%, 其中稻谷秸秆  $0.41 \times 10^8$  t, 小麦秸秆  $0.22 \times 10^8$  t, 玉米秸秆  $0.42 \times 10^8$  t, 豆类秸秆  $0.08 \times 10^8$  t, 分别约占粮食作物秸秆每年平均焚烧量的 36.2%、19.8%、36.9% 和 7.1%。

表 2 中国粮食作物秸秆露天焚烧量

Table 2 National estimated amounts of grain crop residue by burning in field  $10^6$  t

| 年份<br>Year     | 稻谷<br>Rice | 小麦<br>Wheat | 玉米<br>Corn | 豆类<br>Bean | 总计<br>Total |
|----------------|------------|-------------|------------|------------|-------------|
| 2001           | 39.89      | 20.53       | 33.55      | 8.07       | 102.03      |
| 2002           | 39.00      | 19.62       | 35.62      | 8.80       | 103.03      |
| 2003           | 35.79      | 18.99       | 33.77      | 8.59       | 97.14       |
| 2004           | 40.01      | 20.17       | 38.04      | 8.89       | 107.11      |
| 2005           | 40.23      | 21.44       | 40.51      | 8.46       | 110.64      |
| 2006           | 40.84      | 23.05       | 42.69      | 8.32       | 114.90      |
| 2007           | 41.59      | 24.29       | 44.36      | 6.41       | 116.65      |
| 2008           | 42.89      | 24.98       | 48.30      | 7.95       | 124.12      |
| 2009           | 43.60      | 25.31       | 47.73      | 7.47       | 124.11      |
| 2010           | 43.99      | 25.36       | 51.70      | 7.31       | 128.36      |
| 平均值<br>Average | 40.78      | 22.37       | 41.63      | 8.03       | 112.81      |

### 2.3 2001—2010 年中国粮食作物秸秆露天焚烧 CO<sub>2</sub> 及总碳排放量

根据 2001—2010 年中国各省、自治区和直辖市秸秆露天焚烧量（表 2），结合 CO 和 CO<sub>2</sub> 排放因子估算出中国粮食作物秸秆露天焚烧释放 CO、CO<sub>2</sub> 和总碳量见表 3。2001—2010 年中国粮食作物秸秆露天焚烧排放的 CO、CO<sub>2</sub> 和总碳量平均每年  $1.15 \times 10^7$ 、 $1.57 \times 10^8$  和  $4.77 \times 10^7$  t。并且从 2003 年三者排放量随着粮食作物产量和秸秆量的增加而不断增加，到 2010 年三者的排放量较 2003 年增加了 32.1%。

表 3 中国粮食作物秸秆露天焚烧 CO、CO<sub>2</sub> 及总碳排放量  
Table 3 CO, CO<sub>2</sub> and total carbon emission from grain crop residue burned in field

| 年份<br>Year  | CO 排放量<br>CO emission | CO <sub>2</sub> 排放量<br>CO <sub>2</sub> emission | 总碳排放量<br>Total carbon emission |
|-------------|-----------------------|---|--------------------------------|
| 2001        | 10.43                 | 141.87  | 43.16                          |
| 2002        | 10.53                 | 143.26  | 43.58                          |
| 2003        | 9.93                  | 135.07  | 41.09                          |
| 2004        | 10.95                 | 148.93  | 45.31                          |
| 2005        | 11.31                 | 153.84  | 46.80                          |
| 2006        | 11.74                 | 159.76  | 48.60                          |
| 2007        | 11.92                 | 162.19  | 49.34                          |
| 2008        | 12.69                 | 172.58  | 52.50                          |
| 2009        | 12.68                 | 172.57  | 52.50                          |
| 2010        | 13.12                 | 178.47  | 54.30                          |
| 平均值 Average | 11.53                 | 156.854   | 47.718                         |

### 2.4 生物炭含碳量、产率及固碳率

从表 4 可以看出，粮食作物秸秆制备的生物炭产品中，大豆秸秆生物炭含碳量最高，其次是小麦秸秆生物炭、最后是玉米秸秆生物炭和水稻秸秆生物炭，总体平均含碳量约为 63.2%。生物炭产率变化不大，其中大豆秸秆产率最低，总体平均约为 30%，固碳率平均为 18.7%。

表 4 生物炭含碳量、产率及固碳率

Table 4 Carbon content, yield and carbon sequestration ration of biochar

|               | 碳质量分数<br>Carbon content/% | 生物炭产率<br>Biochar yield/% | 固碳率<br>Carbon sequestration/% |
|---------------|---------------------------|--------------------------|-------------------------------|
| 水稻<br>Rice    | 57.19                     | 32.14                    | 18.38                         |
| 小麦<br>Wheat   | 62.89                     | 31.71                    | 19.94                         |
| 玉米<br>Corn    | 59.76                     | 30.34                    | 18.13                         |
| 大豆<br>Soybean | 72.84                     | 25.43                    | 18.53                         |

### 2.5 2001—2010 年中国粮食作物秸秆转化生物炭固碳量的估算

从表 5 可以看出，2001—2010 年中国粮食作物秸秆转化生物炭的固碳量平均为  $0.96 \times 10^8$  t，其中稻谷秸秆生物炭固碳量为  $0.33 \times 10^8$  t，小麦秸秆生物炭固碳量为  $0.21 \times 10^8$  t，玉米秸秆生物炭固碳量为  $0.36 \times 10^8$  t，大豆秸秆生物炭固碳量为  $0.06 \times 10^8$  t，其分别占到粮食作物秸秆生物炭固碳总量的 34.1%、21.9%、37.2% 和 6.8%。

表 5 2001—2010 年中国粮食作物秸秆转化生物炭的固碳量的估算

Table 5 National estimated of carbon sequestrating amount by turning crop residue into biochar

| 年份<br>Year     | 稻谷<br>Rice | 小麦<br>Wheat | 玉米<br>Corn | 豆类<br>Bean | 总计<br>Total |
|----------------|------------|-------------|------------|------------|-------------|
| 2001           | 31.68      | 19.28       | 28.34      | 6.50       | 85.80       |
| 2002           | 31.13      | 18.54       | 30.13      | 7.10       | 86.91       |
| 2003           | 28.66      | 17.76       | 28.77      | 6.74       | 81.93       |
| 2004           | 31.95      | 18.89       | 32.36      | 7.07       | 90.26       |
| 2005           | 32.21      | 20.01       | 34.62      | 6.84       | 93.68       |
| 2006           | 32.42      | 22.28       | 37.66      | 6.35       | 98.70       |
| 2007           | 33.19      | 22.45       | 37.83      | 5.45       | 98.91       |
| 2008           | 34.23      | 23.10       | 41.21      | 6.47       | 105.01      |
| 2009           | 34.80      | 23.64       | 40.73      | 6.12       | 105.29      |
| 2010           | 34.92      | 23.66       | 44.02      | 6.01       | 108.61      |
| 平均值<br>Average | 32.52      | 20.96       | 35.57      | 6.47       | 95.51       |

### 2.6 2010 年中国各省市秸秆产量、碳排放量及生物炭固碳量的估算

从表 6 可以看出，2010 年中国粮食作物秸秆产量分布不均匀，主要集中在传统农业省份（黑龙江、河南、山东、吉林、河北、江苏、安徽、四川、湖南、内蒙古、湖北、辽宁等），这 12 省的粮食秸秆产量占到全国粮食作物秸秆产量的 73.9%。粮食作物秸秆固碳量也主要集中在上述省份，全国粮食作物秸秆生物炭固碳量高达  $1.09 \times 10^8$  t。粮食作物秸秆焚烧碳排放量主要集中在华东地区、东北地区和中南，其碳排放量占全国碳排放量的 78.2%。如果把焚烧秸秆的量转化为生物炭可减少  $0.26 \times 10^8$  t 碳排放量，减少近一半的碳排放量，可见秸秆转化为生物炭是有效的碳汇途径。

表 6 2010 年中国各省市粮食作物秸秆焚烧碳排放量及生物炭固碳量

Table 6 Provincial estimated amount of carbon emission by crop residue burning and carbon sequestration by biochar in 2010

10<sup>4</sup> t

| 省份<br>Province | 秸秆量<br>Straw | 焚烧秸秆量<br>Straw burning | CO 排放量<br>CO emission | CO <sub>2</sub> 排放量<br>CO <sub>2</sub> emission | 碳排放量<br>Carbon emission | 秸秆总量转化为生物炭固<br>碳量 Carbon sequestration<br>by turning total straw into<br>biochar | 焚烧秸秆量转化为生物炭<br>固碳量 Carbon<br>sequestration by turning<br>straw burning into biochar |
|----------------|--------------|------------------------|-----------------------|---|-------------------------|--|---|
| 北 京            | 146.73       | 0                      | 0                     | 0   | 0                       | 27.14  | 0   |
| 天 津            | 196.00       | 0                      | 0                     | 0   | 0                       | 36.57  | 0   |
| 河 北            | 3444.41      | 688.88                 | 70.40                 | 957.82  | 291.40                  | 647.77   | 160.25  |
| 山 西            | 1330.20      | 266.04                 | 27.19                 | 369.90  | 112.53                  | 245.66   | 64.58   |
| 内蒙古            | 2534.65      | 0                      | 0                     | 0   | 0                       | 463.93   | 0   |
| 辽 宁            | 2087.14      | 417.43                 | 42.66                 | 580.39  | 176.57                  | 379.83   | 98.29   |
| 吉 林            | 3491.26      | 1047.38                | 107.04                | 1456.28   | 443.04                  | 635.14   | 252.50  |
| 黑龙江            | 6097.45      | 1829.23                | 186.95                | 2543.37   | 773.77                  | 1115.78  | 436.65  |
| 上 海            | 113.51       | 0                      |                       | 0   | 0                       | 21.16  | 0   |
| 江 苏            | 3237.02      | 971.11                 | 99.25                 | 1350.23   | 410.78                  | 610.63   | 193.93  |
| 浙 江            | 722.79       | 216.84                 | 22.16                 | 301.49  | 91.72                   | 133.28   | 41.38   |
| 安 徽            | 3221.72      | 644.34                 | 65.85                 | 895.90  | 272.56                  | 610.78   | 133.40  |
| 福 建            | 546.53       | 163.96                 | 16.76                 | 227.97  | 69.35                   | 100.46   | 31.01   |
| 江 西            | 1864.01      | 372.80                 | 38.10                 | 518.34  | 157.70                  | 342.68   | 67.96   |
| 山 东            | 4940.65      | 1482.20                | 151.48                | 2060.84   | 626.97                  | 934.66   | 340.07  |
| 河 南            | 6031.00      | 1206.20                | 123.27                | 1677.10   | 510.22                  | 1152.66  | 268.07  |
| 湖 北            | 2297.72      | 459.54                 | 46.97                 | 638.95  | 194.39                  | 427.05   | 90.96   |
| 湖 南            | 2740.21      | 548.04                 | 56.01                 | 762.00  | 231.82                  | 503.34   | 102.90  |
| 广 东            | 1159.11      | 347.73                 | 35.54                 | 483.49  | 147.09                  | 212.85   | 65.38   |
| 广 西            | 1414.58      | 282.92                 | 28.91                 | 393.37  | 119.67                  | 259.35   | 55.57   |
| 海 南            | 150.44       | 45.13                  | 4.61                  | 62.75   | 19.09                   | 27.63  | 8.46  |
| 重 庆            | 966.65       | 193.33                 | 19.76                 | 268.81  | 81.78                   | 177.65   | 41.54   |
| 四 川            | 2991.89      | 598.38                 | 61.15                 | 831.99  | 253.11                  | 554.74   | 126.58  |
| 贵 州            | 1072.46      | 214.49                 | 21.92                 | 298.23  | 90.73                   | 196.16   | 47.62   |
| 云 南            | 1621.13      | 324.23                 | 33.14                 | 450.80  | 137.15                  | 296.81   | 73.60   |
| 西 藏            | 33.38        | 0                      | 0                     | 0   | 0                       | 6.52   | 0   |
| 陕 西            | 1300.63      | 260.13                 | 26.58                 | 361.68  | 110.03                  | 243.84   | 60.99   |
| 甘 肃            | 857.88       | 85.79                  | 8.77                  | 119.28  | 36.29                   | 160.46   | 20.58   |
| 青 海            | 67.63        | 0.00                   | 0.00                  | 0.00  | 0.00                    | 13.02  | 0.00  |
| 宁 夏            | 373.89       | 37.39                  | 3.82                  | 51.99   | 15.82                   | 69.29  | 8.54  |
| 新 疆            | 1325.44      | 132.54                 | 13.55                 | 184.29  | 56.07                   | 252.26   | 30.09   |
| 总计             | 58378.11     | 12836.05               | 1311.84               | 17847.26  | 5429.65                 | 10859.1  | 2820.9  |

注：香港、澳门和台湾没有数据

Note: No data of Hong Kong, Macao and Taiwan

### 3 讨 论

#### 3.1 秸秆焚烧碳排放量

中国粮食作物秸秆露天焚烧排放 CO、CO<sub>2</sub> 的量分别为 1.15×10<sup>7</sup>、1.57×10<sup>8</sup> t，这一结果与张鹤丰<sup>[6,11]</sup>、赵建宁<sup>[7]</sup>的研究结果相近。

#### 3.2 秸秆转化为生物炭的固碳量

生物炭的产率及含碳量直接影响到生物炭的固碳量，生物炭的产率及含碳量受到生物炭生产工艺及工艺参数的影响<sup>[12-15]</sup>。生物炭在慢速热解条件下，温度 400~600℃ 情况下，生物炭的产率达到 35%<sup>[16]</sup>，这和本研究粮食作物秸秆生物炭产率 30%

相接近。生物炭的含碳量一般高达 60% 以上<sup>[17]</sup>, 这和本研究粮食作物秸秆生物炭平均含碳量 63.2% 相近。

2001—2010 年中国粮食作物转化生物炭平均固碳量为  $0.96 \times 10^8$  t, 《中华人民共和国气候变化初始国家信息通报》指出中国 1994 年  $\text{CO}_2$  净排放量为  $26.66 \times 10^8$  t (折合碳约  $7.27 \times 10^8$  t)<sup>[18]</sup>, 可见, 若把中国粮食作物秸秆全部转化为生物炭可减少中国 13.2% 的碳排放量。生物炭固定碳的稳定性受到生物质原料和热解温度的影响<sup>[12,19-20]</sup>, Zimmerman 研究了 6 种生物质原料和 4 种温度条件下制备的生物炭, 在好氧条件下培养超过 1 a, 通过模型估算出这些生物炭 100 a 尺度下碳损失 3%~26%<sup>[21]</sup>。Hamer 等研究表明, 经过 60 d 的微生物培养, 大约 0.8% 玉米秸秆生物炭 (350℃)、0.7% 黑麦草秸秆生物炭 (350℃) 和 0.3% 橡树生物炭 (800℃) 被矿化为  $\text{CO}_2$ <sup>[22]</sup>。生物炭在土壤中也会发生部分降解, 如 Bruun 等研究表明经过 115 d 的培养 3%~12% 小麦秸秆生物炭被矿化成  $\text{CO}_2$ <sup>[23]</sup>, Knoblach 等研究表明经过约 3 a 的培养, 4.4% 和 8.5% 稻壳生物炭分别在好氧和厌氧条件下被矿化成  $\text{CO}_2$ <sup>[24]</sup>, 但这和生物炭固定碳的总量相比只占很少的一部分。

潘根兴等认为, 若水稻秸秆全部转化为生物黑炭, 中国稻田可增加碳汇  $0.2 \times 10^8$  t<sup>[25]</sup>, 这一研究结果和本研究水稻秸秆生物炭固碳量为  $0.33 \times 10^8$  t 相近; Okimori 等估算, 利用高温热解把作物秸秆废弃物转化为生物黑炭施入土壤储存, 可减少  $2.3 \times 10^5$  t  $\text{CO}_2$  的排放<sup>[26]</sup>; Lehmann 等提出, 生物黑炭技术潜在可行增汇量达  $9.5 \times 10^9$  t<sup>[27]</sup>; Lenton 等展望, 2100 年人类活动排放的  $\text{CO}_2$  量的 1/4 可以通过有机质转化的生物黑炭封存<sup>[28]</sup>。

可见, 生物炭固碳潜力巨大, 生物炭固碳技术也是一种非常有前景的碳汇技术。然而, 国内生物炭的相关标准还没有制定, 生物炭在土壤中稳定性、生物炭对土壤其他温室气体排放的影响、生物炭在土壤环境中的阈值及生物炭对作物产量的影响, 直接影响生物炭的最终固碳效率, 应当尽快开展相关研究, 为准确合理地评估我国生物炭固碳量提供数据支持。此外, 中国粮食作物秸秆产量分布极不均匀 (表 6), 主要集中在东北地区、华东地区、中南地区及其他地区某些省份, 应当在这些地区开展典型作物秸秆生物炭碳汇示范基地建设, 为后续的研究工作奠定基础。

## 4 结 论

1) 中国粮食作物每年秸秆焚烧量平均为  $1.12 \times 10^8$  t, 约占粮食作物秸秆总量的 21.6%。中国

粮食作物秸秆露天焚烧排放  $\text{CO}$ 、 $\text{CO}_2$  及总碳量分别为  $1.15 \times 10^7$ 、 $1.57 \times 10^8$  和  $4.77 \times 10^7$  t。

2) 中国粮食作物秸秆转化生物炭年平均固碳量为  $0.96 \times 10^8$  t, 焚烧的秸秆转化为生物炭可减少约一半的碳排放量。

3) 中国生物炭固碳量潜力巨大, 生物炭固碳是一种有效的固碳减排途径。

## [参 考 文 献]

- [1] Lal R. World crop residues production and implications of its use as a biofuel[J]. *Environment International*, 2005, 31(4): 575—584.
- [2] 曹国良, 张小曳, 王丹, 等. 秸秆露天焚烧排放的 TSP 等污染物清单[J]. *农业环境科学学报*, 2005, 24(4): 800—804.  
Cao Guo Liang, Zhang Xiaoye, Wang Dan, et al. Inventory of emission of pollutants from open burning crop residue[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2005, 24(4): 800—804. (in Chinese with English abstract)
- [3] Antal M J, Gronlim M. The art, science and technology of charcoal production[J]. *Industrial and Engineering Chemistry*, 2003, 42(8): 1619—1640.
- [4] Swift R S. Sequestration of carbon by soils[J]. *Soil Science*, 2001, 166(11): 858—871.
- [5] Yan Xiaoyuan, Ohara T, Akimoto H. Bottom-up estimated of biomass burning in mainland China[J]. *Atmospheric Environment*, 2006, 40(27): 5262—5273.
- [6] Zhang Hefeng, Ye Xingnan, Cheng Tiantao, et al. A laboratory study of agricultural crop residue combustion in China: Emission factor and emission inventory[J]. *Atmospheric Environment*, 2008, 42(36): 8432—8441.
- [7] 赵建宁, 张贵龙, 杨殿林. 中国粮食作物秸秆焚烧碳排放量的估算[J]. *农业环境科学学报*, 2011, 30(4): 812—816.  
Zhao Jian ning, Zhang Guilong, Yang Dianlin. Estimation of carbon emission from burning of grain crop residues in China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(4): 812—816. (in Chinese with English abstract)
- [8] 韩鲁佳, 闫巧娟, 刘向阳, 等. 中国农作物秸秆资源及其利用现状[J]. *农业工程学报*, 2002, 18(3): 87—91.  
Han Lujia, Yan Qiaojuan, Liu Xiaoyang, et al. Straw resources and their utilization in China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2002, 18(3): 87—91. (in Chinese with English abstract)
- [9] Cao Xinde, Harris W. Properties of dairy-manure-derived

- biochar pertinent to its potential use in remediation. *Bioresource Technology*, 2010, 101(14): 5222—5228.
- [10] Zhao Ling, Cao Xinde, Wang Qun, et al. Mineral constituents profile of biochar derived from diversifield waste biomass: implications for agricultural applications[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2013, 42: 545—552.
- [11] 张鹤丰. 中国农作物秸秆燃烧排放气态、颗粒态污染物排放特征的实验室模拟[D]. 上海: 复旦大学, 2009.
- Zhang Hefeng. A Laboratory Study on Emission Characteristics of Gaseous and Particulate Pollutants Emitted from Agricultural Crop Residue Burning in China[D]. Shanghai: Fudan University, 2009. (in Chinese with English abstract)
- [12] Zhao Ling, Cao Xinde, Mašek O, et al. Heterogeneity of biochar properties as a function of feedstock sources and production temperatures[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2013, 256/257: 1—9.
- [13] Bridgwater A V, Meier D, Radlein D. An overview of fast pyrolysis of biomass[J]. *Organic Geochemistry*, 1999, 30(12): 1479—1493.
- [14] Raja S A, Kennedy Z R, Pillai B C. Flash pyrolysis of *Jatropha* oil cake in gas heated fluidized bed research reactor[J]. *International Journal of Chemical Engineering Research*, 2010, 2(1): 1—12.
- [15] Titirici M M, Thomas A, Yu Shuhong, et al. A direct synthesis of mesoporous carbons with biocontinuous pore morphology from crude plant material by hydrothermal carbonization[J]. *Chemistry of Materials*, 2007, 19(17): 4205—4212.
- [16] 何绪生, 耿增超, 余雕, 等. 生物炭生产与农用的意义及国内外动态[J]. *农业工程学报*, 2011, 27(2): 1—7.
- He Xusheng, Geng Zengchao, She Diao, et al. Implications of production and agricultural utilization of biochar and its international dynamics [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2011, 27(2): 1—7. (in Chinese with English abstract)
- [17] 张旭东, 梁超, 诸葛玉平, 等. 黑碳在土壤有机碳生物地球化学循环中的作用[J]. *土壤通报*, 2003, 34(4): 349—355.
- Zhang Xudong, Liang Chao, Zhuge Yuping, et al. Roles of black carbon in the biogeochemical cycles of soil organic carbon[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2003, 34(4): 349—355. (in Chinese with English abstract)
- [18] 中华人民共和国气候变化初始国家信息通报[M]. 北京: 中国计划出版社, 2004: 13—22.
- The People's Republic of China Initial National Communications on Climate Change[M]. Beijing: China Planning Press, 2004: 13—22. (in Chinese with English abstract)
- [19] Gaskin J W, Steiner C, Harris K, et al. Effect of low-temperature pyrolysis conditions on biochar for agricultural use[J]. *Transactions of the Asabe*, 2008, 51(6): 2061—2069.
- [20] Kloss S, Zehetner F, Dellantonio A, et al. Characterization of slow pyrolysis biochars: effects of feedstocks and pyrolysis temperature on biochar properties [J]. *Journal of Environmental Quality*, 2012, 41(4): 990—1000.
- [21] Zimmerman A R. Abiotic and microbial oxidation of laboratory-produced black carbon (biochar) [J]. *Environmental Science and Technology*, 2010, 44 (4) : 1295—1301.
- [22] Hamer U, Marschner B, Brodowski S, et al. Interactive priming of black carbon and glucose mineralization[J]. *Organic Geochemistry*, 2004, 35(7): 823—830.
- [23] Bruun E W, Ambus P, Egsgaard H, et al. Effects of slow and fast pyrolysis biochar on soil C and N turnover dynamics[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2012, 46: 73—79.
- [24] Knoblach C, Maarifat A A, Pfeiffer E M, et al. Degradability of black carbon and its impact on trace gas fluxes and carbon turnover in paddy soils[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2011, 43 (9) : 1768—1778.
- [25] 潘根兴, 张阿凤, 邹建文, 等. 农业废弃物生物黑炭转化还田作为低碳农业途径的探讨[J]. *生态与农村环境学报*, 2010, 26(4): 394—400.
- Pan Genxing, Zhang Afeng, Zou Jianwen, et al. Biochar from agro-byproducts used as amendment to cropland: an option of low carbon agriculture[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2010, 26(4): 394—400. (in Chinese with English abstract)
- [26] Okimori Y, Ogawa M, Takahashi F. Potential of CO<sub>2</sub> emission reductions by carbonizing biomass waste from industrial tree plantation in south Sumatra Indonesia[J]. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 2003, 8 (3) : 261—280.
- [27] Lehmann J, Gaunt J, Rondon M. Biochar sequestration in terrestrial ecosystems- a review[J]. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 2006, 11: 403—427.
- [28] Lenton T M. The potential for land-based biological CO<sub>2</sub> removal to lower future atmospheric CO<sub>2</sub> concentration [J]. *Carbon Management*, 2010, 1(1): 145—160.

## Estimation of carbon emission from burning and carbon sequestration from biochar producing using crop straw in China

Li Feiyue<sup>1,2</sup>, Wang Jianfei<sup>1\*</sup>

(1. College of Urban Construction and Environment Science, Anhui Science and Technology University, Fengyang, 233100, China;

2. School of Environmental Science and Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

**Abstract:** The common management of straw is burning in the field, which is considered as a convenient and economical method for farmers to deal with them in China. However, the burning of straw enhances the release of greenhouse gases including CO<sub>2</sub>. Turning crop residues into biochar under low temperature (usually <700°C) and limited oxygen conditions has been recently proven as a promising approach for the long term carbon sequestration. However, up to now, the quantity of carbon emission from crop straw burning and the potential of carbon sequestration by turning straw into biochar in China are still unavailable. Hence, in this paper, the quantity was estimated. Based on the data of crop yield from 2001 to 2010 in China, the major straw (rice, wheat, corn and soybean) output was calculated according to the ratio of grain to straw. The proportion and amount of burned straw were quantitatively analyzed. The total amounts of CO and CO<sub>2</sub> emission were estimated according to the emission factors derived from references, and the total carbon emission was calculated based on the CO and CO<sub>2</sub> emission without thinking of the other forms of C emission. Moreover, biochars were derived from major crop straw under lab conditions (a typical slow pyrolysis process, heated in a muffle furnace at a speed of approximately 20°C min<sup>-1</sup> under limited oxygen and held at 500°C for 4 h) and the carbon sequestration amount of biochars were estimated according to the carbon contents and yields of biochars. The results showed that annually production of crop straw in China was about 5.1×10<sup>8</sup> t, and about 21.6% of them were burned, which led to high CO, CO<sub>2</sub> and carbon emission, which were about 1.15×10<sup>7</sup>, 1.57×10<sup>8</sup> and 4.77×10<sup>7</sup> t, respectively. Meanwhile, the average carbon contents and yields of biochars were 63.2% and 30%, respectively. Although the stability of biochar and the effect of pyrolysis temperature on the carbon sequestration were not studied in this study, the annually carbon sequestration amount by turning straw into biochars was 0.96×10<sup>8</sup> t and about half of carbon emission was decreased annually if the amount of burned straw was turned into biochar, which indicated that turning straw into biochar was a promising approach for straw management.

**Key words:** straw, emission control, carbon, straw burning, carbon sequestration, biocha

(责任编辑: 王 柳)