

新疆绿洲区秸秆燃烧污染物排放量及固碳减排潜力

杨 乐^{1,2}, 邓 辉³, 李国学^{1*}, 王 琦²

(1. 中国农业大学资源与环境学院, 北京 100193; 2. 石河子大学农学院, 新疆 石河子 832003; 3. 石河子大学化学化工学院, 新疆 石河子 832003)

摘 要: 根据 2004—2013 年新疆绿洲区主要作物产量, 采用排放因子法对秸秆燃烧污染物排放量和碳释放量进行了估算, 结果表明, 2013 年新疆地区作物秸秆燃烧排放的 CO_2 、 CO 、 CH_4 、 NMVOC 、 OC 、 BC 、 SO_2 、 NO_x 、 NH_3 和 $\text{PM}_{2.5}$ 的量分别为 $9.0 \times 10^6 \text{ t}$ 、 $5.5 \times 10^5 \text{ t}$ 、 $1.6 \times 10^4 \text{ t}$ 、 $9.4 \times 10^4 \text{ t}$ 、 $1.9 \times 10^4 \text{ t}$ 、 $3.9 \times 10^3 \text{ t}$ 、 $2.4 \times 10^3 \text{ t}$ 、 $1.8 \times 10^4 \text{ t}$ 、 $7.8 \times 10^3 \text{ t}$ 和 $1.2 \times 10^5 \text{ t}$, 碳排放总量为 $2.7 \times 10^6 \text{ t}$; 在排放清单中, CO_2 和 CO 是主要污染物, 分别占污染物排放总量的 91.6% 和 5.6%; 棉花秸秆为排放贡献最大的污染源, 占总排放量的 43.3%, 其次是小麦秸秆和玉米秸秆, 分别占 28.3% 和 21.9%。在此基础上, 基于生物炭固碳技术, 对该区域作物秸秆转化为生物炭的固碳量和碳封存潜力进行了估算, 结果表明, 若把被燃烧三类秸秆(棉花、小麦和玉米)转化为生物炭, 则每年可减少该区域 54.9% 的碳排放量; 若将作物秸秆全部转化为生物炭, 每年将有 $3.6 \times 10^6 \text{ t}$ 碳和 $1.3 \times 10^7 \text{ t}$ CO_2 被长期封存于生物炭中。可见, 生物炭具有良好的固碳减排潜力, 是一种可持续的碳封存技术。

关键词: 作物秸秆; 燃烧; 排放清单; 生物炭; 碳减排潜力

中图分类号: X705 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2015)05-0988-06 doi:10.11654/jaes.2015.05.023

Pollutant Releases from Crop Residue Burning and Carbon Emission Mitigation Potential by Biochar in Xinjiang Oasis

YANG Le^{1,2}, DENG Hui³, LI Guo-xue^{1*}, WANG Qi²

(1. College of Resource and Environmental Science, China Agricultural University, Beijing 100193, China; 2. College of Agriculture, Shihezi University, Shihezi 832003, China; 3. School of Chemistry and Chemical Engineering, Shihezi University, Shihezi 832003, China)

Abstract: Air pollutant releases from crop residue burning were estimated based on the 2004 to 2013 yield data of major crops using emission factor method, and carbon emission mitigation potential of turning crop straw into biochar was also calculated, in Xinjiang Oasis. Results showed that amount of crop residue burned in 2013 in Xinjiang area were about $6.0 \times 10^6 \text{ t}$, yielding the following atmospheric pollutants: $9.0 \times 10^6 \text{ t}$ of CO_2 , $5.5 \times 10^5 \text{ t}$ of CO , $1.6 \times 10^4 \text{ t}$ of CH_4 , $9.4 \times 10^4 \text{ t}$ of NMVOC , $1.9 \times 10^4 \text{ t}$ of OC , $3.9 \times 10^3 \text{ t}$ of BC , $2.4 \times 10^3 \text{ t}$ of SO_2 , $1.8 \times 10^4 \text{ t}$ of NO_x , $7.8 \times 10^3 \text{ t}$ of NH_3 and $1.2 \times 10^5 \text{ t}$ of $\text{PM}_{2.5}$. The total carbon emission from crop residue burning was $2.7 \times 10^6 \text{ t}$. Carbon dioxide and CO were the major pollutants in emission inventory, accounting for 91.6% and 5.6% of the total, respectively. Cotton stalk was the largest contributor with 43.3% of total atmospheric emission, followed by wheat straw and corn stalk with contributions of 28.3% and 21.9%, respectively. Calculation showed that turning the burned crop residues (cotton, wheat and corn) into biochar could reduce carbon emission by 54.9% annually, while might sequester $3.6 \times 10^6 \text{ t}$ of carbon and $1.3 \times 10^7 \text{ t}$ CO_2 (carbon dioxide equivalent) over 100 years, even if biochar applications did not increase soil organic carbon content. Therefore, biochar would be an good approach to sustainable carbon sequestration.

Keywords: crop residue; burning; atmospheric emission inventory; biochar; carbon emission mitigation potential

生物质是全球最主要的能源和可再生资源, 每年植物经光合作用可以固 56 Gt CO_2 , 产生 $170 \sim 200 \text{ Gt}$

生物质^[1-2]。我国生物质资源丰富, 秸秆是农业生产中形成的一类生物质资源, 每年可收集量约为 7 亿 t, 但随着农业现代化进程和农村能源结构改变, 农作物秸秆资源大量废弃, 就地焚烧秸秆现象日益严重^[3]。秸秆焚烧不仅造成了生物质资源严重浪费, 更会产生大量的 CO_2 、 CO 和氮氧化物等有害气体和气溶胶颗粒物, 不仅严重影响区域环境空气质量和交通安全, 危害人体健康, 也会导致全球气候变化。

新疆光热资源丰富, 是我国重要的粮棉生产基

收稿日期: 2014-12-17

基金项目: 国家科技支撑项目(2012BAD14B10-2); 国家自然科学基金(51162024); 石河子大学高层次人才专项(RCZX201204); 国家自然科学基金(51368051); 石河子大学杰出青年基金(2012ZRKXJQ05)

作者简介: 杨 乐(1980—), 女, 河南南阳人, 博士研究生, 讲师, 从事固体废弃物资源化利用与环境安全研究。E-mail: yl_shzu@163.com

* 通信作者: 李国学 E-mail: ligx@cau.edu.cn

地,以“高投入、高产出和高能耗”为主要特征的农业生产方式,已经引起了区域土壤碳库容显著下降和环境碳负荷的增加,同时产生了大量的秸秆残余物。目前,新疆地区作物秸秆主要以畜禽粗饲料和秸秆还田等方式利用,仍然约有 30%的作物秸秆以生活燃料和露天焚烧的形式损失^[4-5],既造成了区域大气环境污染问题,又加剧了绿洲区碳减排的压力。此外,秸秆还田等处理方式只能暂时将碳储存在土壤中,经微生物矿化代谢,很快以含碳化合物的形式返回到大气中,成为了新的农业碳排放源。现有的研究显示^[6-7],大气中 CO₂ 浓度已经达到了 385 μL·L⁻¹,超过了安全浓度,不仅需要进一步减少温室气体的排放,更要采取生物或物理化学措施移除大气中的碳氧化物。

生物炭是生物质在无氧或限氧条件下热解产生的高度芳香化富碳物质,其碳含量可达 50%~85%,具有良好的抗氧化和抗降解能力,能够稳定地封存在土壤中达到上千年,使 CO₂ 不断从大气碳循环中移除,是一种有效的碳削减措施^[8-9]。另外,将生物炭应用于农田,能够改善土壤结构,提高土壤有机碳库的稳定性和水肥利用效率,进而促进植物生长,间接减少了农业温室气体的排放,起到固碳减排的作用^[10-11]。据测算,到 2050 年,生物炭技术能够实现全球碳减排约 1 Gt·a⁻¹^[12];同时,Roberts、Lehmann 和 Pratt 等^[13-15]的研究也表明,与其他碳封存技术相比,生物炭技术在碳封存潜力和成本方面具有更大的优势。由此可见,利用作物秸秆固碳既可减少环境污染压力,又能够实现可持续碳封存和资源循环利用。

目前,对于我国生物质燃烧污染物和碳排放量的估算已有部分研究^[16-17],但侧重于农作物秸秆固碳减排量的研究较少^[18-19],尤其是对于干旱区的相关研究至今未见报道。为了建立新疆绿洲区作物秸秆燃烧污染物排放清单,本研究以该区域农田主要作物的产量为依据,基于作物秸秆燃烧相关参数及污染物排放因子,估算 CO₂、CO、PM_{2.5}、NO_x 等大气污染物的排放量和碳释放总量;同时,采用生物固碳技术,结合慢速裂解过程中生物炭产率、碳含量和生物炭稳定系数,估算新疆绿洲区作物秸秆转化为生物炭的固碳量和碳封存潜力,以期为绿洲区秸秆资源综合管理利用和固碳减排提供科学依据。

1 研究资料与方法

1.1 新疆地区作物秸秆产量和燃烧量的估算

依据《中国统计年鉴》中新疆地区作物产量数据,

选择水稻、小麦、玉米、棉花、豆类和油料为研究对象,利用 2004—2013 年《中国统计年鉴》中六类作物产量数据,结合中国农村能源行业协会的草谷比数据,分别估算出新疆绿洲区作物秸秆产量。

秸秆燃烧总量与秸秆种类和区域资源能源利用方式有关,而针对新疆地区的秸秆燃烧的相关研究未见报道。因此,本研究在综合分析国内外相关文献基础上,选取不同类型作物秸秆燃烧相关参数(表 1),其中秸秆干物质比例和燃烧效率采用 Streets 和 Turn 等^[20-21]对中国等亚洲地区不同作物试验研究结果获得的平均值;秸秆燃烧比例为燃料直接燃烧和露天焚烧之和,数据来源于田贺忠等^[5]根据《中国能源统计年鉴》对不同地区分类估算的结果,数据具有较高的可信度。秸秆燃烧量采用如下公式计算:

$$M = \sum P_i \times N_i \times D_i \times B \times F_i \quad (1)$$

式中: M 为秸秆燃烧总量,t; P_i 为第 i 种作物产量,t; N_i 为第 i 种作物的草谷比; D_i 为第 i 种作物秸秆的干物质比例; B 为秸秆燃烧比例,%; F_i 为第 i 种作物秸秆燃烧效率。

表 1 作物秸秆燃烧相关参数

Table 1 Parameters used in calculation of crop residue burning

作物类型 Crop type	草谷比 * Residue to production ratio	秸秆干物质 比例 ^[20] Dry matter ratio	秸秆燃烧比例/% ^[5] Crop residue burning percentage	秸秆燃烧效 率 ^[21] Burning efficiency
水稻	0.62	0.85	30	0.89
小麦	1.37	0.83	30	0.86
玉米	2.0	0.40	30	0.92
棉花	3.0	0.90	30	0.90
豆类	1.5	0.71	30	0.68
油料	2.0	0.85	30	0.82

注:* 来自中国农村能源行业协会数据(CAREI,2000)

Note:* Data from China association of rural energy industry,2000

1.2 作物秸秆燃烧污染物排放量和碳释放量的测算

目前有关我国秸秆燃烧产生的污染物排放因子研究较少,本研究在综合分析相关文献的基础上,选取国内外作物秸秆燃烧实测数据作为秸秆燃烧污染物排放因子(表 2)。根据 Streets 等^[20]研究方法估算秸秆燃烧产生的 CO₂、CO、CH₄、NMVOC、OC、BC、SO₂、NO_x、NH₃、PM_{2.5} 排放量,计算公式如下:

$$E_i = M \times F_i \quad (2)$$

式中: E_i 为第 i 类污染物排放量,t; M 为秸秆燃烧总量,t; F_i 为第 i 类污染物排放因子,g·kg⁻¹。

秸秆燃烧过程中碳排放主要以 CO₂ 和 CO 气体为主,因此本研究忽略其他形式的碳释放量。根据新

表2 秸秆燃烧排放因子
Table 2 Emission factor of crop residue burning

污染物 Pollutant	CO ₂	CO	CH ₄	NM VOC	OC	BC	SO ₂	NO _x	NH ₃	PM _{2.5}
排放因子/g·kg ⁻¹ Emission factor	1515 ^[22]	92 ^[22]	2.7 ^[22]	15.7 ^[22]	3.3 ^[22]	0.66 ^[4]	0.4 ^[22]	3.04 ^[4]	1.3 ^[22]	20.27 ^[23]

疆地区作物秸秆燃烧释放的 CO₂ 和 CO 量估算该区域碳释放总量,计算公式如下:

$$CE=0.27 E_{CO_2}+0.43 E_{CO} \quad (3)$$

式中:CE 为碳释放总量,t;E_{CO₂} 为秸秆燃烧排放的 CO₂ 总量,t;E_{CO} 为秸秆燃烧排放的 CO 总量,t;0.27和 0.43 分别为 CO₂ 和 CO 中含碳比例。

1.3 生物炭的固碳量和碳封存潜力估算

秸秆类型和制备条件都会影响生物炭产量和含碳量,但由于生物炭含碳量上升时,其产率呈现下降的趋势,秸秆类型对生物炭固碳率的影响差异不显著^[18]。生物质在热解过程中会形成固、液、气三类物质,本研究主要以生物炭形式来估算作物秸秆固碳减排潜力,故在综合分析相关文献基础上,选取生物质慢速裂解过程中生物炭平均产率为 35%^[24],含碳量为 67.68%^[25],结合各类作物秸秆量(以干物质计),来估算作物秸秆转化为生物炭的固碳量,计算公式如下:

$$CF_i=P_i \times N_i \times D_i \times \eta \times C_{BC} \quad (4)$$

式中:CF_i 为第 i 种作物秸秆转化为生物炭的固碳量,t;P_i 为第 i 种作物产量,t;N_i 为第 i 种作物的草谷比;D_i 为第 i 种作物秸秆的干物质比例;η 为作物秸秆转化为生物炭的平均产率,%;C_{BC} 为生物炭的含碳量,%。

生物炭的稳定性是影响其封存碳潜力的关键因素,目前研究表明,生物炭中易降解和不稳定碳组分约为 15%,剩余生物炭中约有 20%的碳在 100 a 内矿化损失^[26]。因此,在研究中选取碳稳定系数(CSF)为 0.68^[6]和 CO₂ 转化系数为 3.67,分别在百年尺度上估

算生物炭的碳及 CO₂ 封存潜力,计算公式如下:

$$CSP_i=CF_i \times CSF \quad (5)$$

$$CSP_{CO_2}=3.67 \times CSP_i \quad (6)$$

式中:CSP_i 为第 i 种作物秸秆转化为生物炭的长期碳封存量,t;CF_i 为第 i 种作物秸秆转化为生物炭的固碳量,t;CSF 为生物炭中碳稳定系数;CSP_{CO₂} 为生物炭长期封存 CO₂ 的量,t;3.67 为 C-CO₂ 的转化系数。

2 结果与讨论

2.1 新疆绿洲区作物秸秆产量和燃烧量

根据 2004—2013 年新疆地区作物产量,结合表 1 中作物秸秆燃烧相关参数,利用式(1)估算得到不同作物秸秆产量和燃烧量,如表 3 所示。近 10 年来,新疆绿洲区主要作物秸秆总产量逐年增加,从 2004 年的 1.4×10⁷ t 升至 2013 年的 3.2×10⁷ t,秸秆总产量增加了 1.43 倍;小麦、玉米和棉花秸秆产量增加尤为显著,分别增加了 3.2×10⁶ t、5.5×10⁶ t 和 9.1×10⁶ t。以 2013 年为例,小麦、玉米和棉花秸秆量分别占该区秸秆总量的 24.4%、36.7%和 32.9%,是新疆绿洲区秸秆主要贡献源。

随着作物秸秆产量的增加,新疆地区秸秆燃烧总量也呈现上升的趋势(表 3),2013 年秸秆燃烧总量比 2004 年增加了 3.8×10⁶ t,约占作物秸秆总量的 18.5%;小麦、玉米和棉花秸秆燃烧量最大,分别为 1.7×10⁶ t、1.3×10⁶ t 和 2.6×10⁶ t,共占秸秆燃烧总量的 93.5%。从以上分析可知,新疆绿洲区作物秸秆资源丰

表3 2004—2013 年新疆地区作物秸秆产量和燃烧量(10⁴ t)
Table 3 Amount of crop residues and their burning in Xinjiang during 2004—2013(10⁴ t)

年份 Year	水稻 Rice		小麦 Wheat		玉米 Corn		棉花 Cotton		豆类 Bean		油料 Oil crops	
	秸秆量	燃烧量	秸秆量	燃烧量	秸秆量	燃烧量	秸秆量	燃烧量	秸秆量	燃烧量	秸秆量	燃烧量
2004	31.60	7.17	470.04	100.65	634.68	70.07	150.39	36.54	40.53	5.87	0.89	0.19
2005	24.49	5.56	481.79	103.17	722.92	79.81	534.90	129.98	30.71	4.45	89.08	18.63
2006	33.51	7.61	541.25	115.90	753.44	83.18	562.20	136.61	38.15	5.52	77.88	16.28
2007	37.55	8.52	548.30	117.41	752.74	83.10	656.65	159.57	37.17	5.38	65.64	13.73
2008	38.95	8.84	466.17	99.83	787.36	86.92	903.82	219.63	31.04	4.50	53.80	11.25
2009	25.54	5.80	555.32	118.92	850.56	93.90	907.71	220.57	25.04	3.63	113.69	23.77
2010	30.10	6.83	856.69	183.45	806.78	89.07	757.26	184.01	48.35	7.00	127.83	26.73
2011	36.74	8.34	851.69	182.38	843.22	93.09	743.70	180.72	42.48	6.15	133.24	27.86
2012	37.78	8.57	787.69	168.68	1 035.34	114.30	869.32	211.25	43.65	6.32	133.53	27.92
2013	36.98	8.39	787.55	168.65	1 184.22	130.74	1 061.84	258.03	37.53	5.44	118.09	24.69

富,主要以小麦、玉米和棉花秸秆为主,具有较好的固碳减排前景。

2.2 新疆地区作物秸秆燃烧污染物排放总量及其变化趋势

根据上述数据,结合表 2 的排放因子,估算得到了近 10 年新疆地区作物秸秆燃烧释放的大气污染物总量。从表 4 可见,与作物秸秆燃烧量变化趋势类似,大气污染物总排放量呈显著上升的态势,从 2004 年的 3.7×10^6 t 增至 2013 年的 9.9×10^6 t,其中 CO_2 、 CO 、 CH_4 、 NMVOC 、 OC 、 BC 、 SO_2 、 NO_x 、 NH_3 和 $\text{PM}_{2.5}$ 的排放量比十年前分别增加了 5.7×10^6 t、 3.5×10^5 t、 1.0×10^4 t、 5.9×10^4 t、 1.2×10^4 t、 2.5×10^3 t、 1.5×10^3 t、 1.1×10^4 t、 4.9×10^3 t 和 7.6×10^4 t。在大气污染物排放清单中, CO_2 、 CO 、 $\text{PM}_{2.5}$ 和 NMVOC 排放量较高,分别占污染物排放总量的 91.6%、5.6%、1.2%和 0.9%,研究结果表明作物秸秆燃烧主要产生 CO_2 等温室气体和颗粒物。

2.3 各类作物燃烧排放清单和贡献分析

表 5 给出了 2013 年新疆地区各类作物秸秆燃烧排放的污染物清单,结果显示,该地区 2013 年作物秸秆燃烧排放的 CO_2 、 CO 、 CH_4 、 NMVOC 、 OC 、 BC 、 SO_2 、 NO_x 、 NH_3 和 $\text{PM}_{2.5}$ 的量分别为 9.0×10^6 t、 5.5×10^5 t、 1.6×10^4 t、 9.4×10^4 t、 1.9×10^4 t、 3.9×10^3 t、 2.4×10^3 t、 1.8×10^4

t、 7.8×10^3 t 和 1.2×10^5 t,其中水稻、小麦、玉米、棉花、豆类和油料的排放量分别为 1.4×10^5 t、 2.8×10^6 t、 2.2×10^6 t、 4.3×10^6 t、 8.9×10^4 t 和 4.1×10^5 t,分别占该地区排放总量的 1.4%、28.3%、21.9%、43.3%、0.9%和 4.1%。这表明小麦、玉米和棉花是新疆地区秸秆燃烧释放大气污染物的主要贡献源,与该地区种植结构有关,故应加强对这三类作物秸秆的管理和综合利用。

2.4 排放估算的不确定性分析

污染物排放估算的不确定性主要源于实际活动水平和排放因子等关键数据缺乏,以及数据代表性不足等因素。本研究通过定性和定量相结合的方法分析了 2013 年新疆绿洲区秸秆燃烧污染物排放清单的不确定性。

在估算新疆地区秸秆燃烧排放量过程中,六种作物产量、谷草比系数来源于国家统计局年鉴和中国农村能源行业协会资料,其不确定性相对较小;农作物秸秆作为家用燃料和露天焚烧的比例主要基于国家能源统计年鉴中能源消费数据和曹国良等^[4-5]调查资料估算,因缺少分作物类型的数据以及地域差异而具有一定的不确定性;作物秸秆干物质比例和燃烧效率多取自国外学者对亚洲地区不同作物燃烧获得的实测数据,降低了清单的不确定性;而排放因子是影响污

表 4 2004—2013 年新疆地区作物秸秆燃烧污染物排放量(10^4 t)
Table 4 Atmospheric emissions from crop residue burning in Xinjiang during 2004—2013(10^4 t)

年份 Year	CO_2	CO	CH_4	NMVOC	OC	BC	SO_2	NO_x	NH_3	$\text{PM}_{2.5}$
2004	334.05	20.29	0.60	3.46	0.73	0.15	0.09	0.67	0.29	4.47
2005	517.51	31.43	0.92	5.36	1.13	0.23	0.14	1.04	0.44	6.92
2006	553.15	33.59	0.99	5.73	1.20	0.24	0.15	1.11	0.47	7.40
2007	587.38	35.67	1.05	6.09	1.28	0.26	0.16	1.18	0.50	7.86
2008	652.91	39.65	1.16	6.77	1.42	0.28	0.17	1.31	0.56	8.74
2009	706.88	42.93	1.26	7.33	1.54	0.31	0.19	1.42	0.61	9.46
2010	753.10	45.73	1.34	7.80	1.64	0.33	0.20	1.51	0.65	10.08
2011	755.29	45.87	1.35	7.83	1.65	0.33	0.20	1.52	0.65	10.11
2012	813.62	49.41	1.45	8.43	1.77	0.35	0.21	1.63	0.70	10.89
2013	902.84	54.83	1.61	9.36	1.97	0.39	0.24	1.81	0.77	12.08

表 5 2013 年各类作物秸秆燃烧污染物排放清单(10^3 t)
Table 5 Atmospheric emission inventory for crop residue burning in Xinjiang in 2013(10^3 t)

作物 Crop	CO_2	CO	CH_4	NMVOC	OC	BC	SO_2	NO_x	NH_3	$\text{PM}_{2.5}$	总计 Total
水稻	127.15	7.72	0.23	1.32	0.28	0.06	0.03	0.26	0.11	1.70	138.85
小麦	2 555.00	155.15	4.55	26.48	5.57	1.11	0.67	5.13	2.19	34.18	2 790.04
玉米	1 980.68	120.28	3.53	20.53	4.31	0.86	0.52	3.97	1.70	26.50	2 162.89
棉花	3 909.10	237.38	6.97	40.51	8.51	1.70	1.03	7.84	3.35	52.30	4 268.71
豆类	82.35	5.00	0.15	0.85	0.18	0.04	0.02	0.17	0.07	1.10	89.93
油料	374.08	22.72	0.67	3.88	0.81	0.16	0.10	0.75	0.32	5.01	408.50
总计	9 028.37	548.26	16.09	93.56	19.67	3.93	2.38	18.12	7.75	120.80	9 858.92

染物排放量的重要指标,其与燃烧方式、环境条件、监测条件和方法等因素有关,虽然相关数据取自国内外各学者实测数据的平均值,但仍然缺少本地实测数据支撑,因而排放因子的不确定性相对较高。在定量分析中,由于其他参数不确定性相对较小,本研究仅对排放因子引起的排放清单不确定性进行了探讨。通过统计分析中的变异系数来估算各排放因子的不确定性,变异系数分别是: $\text{CO}_2 \pm 12.7\%$ 、 $\text{CO} \pm 19.8\%$ 、 $\text{CH}_4 \pm 43.5\%$ 、 $\text{NMVOC} \pm 46.3\%$ 、 $\text{OC} \pm 38.1\%$ 、 $\text{BC} \pm 24.7\%$ 、 $\text{SO}_2 \pm 57.9\%$ 、 $\text{NO}_x \pm 15.5\%$ 、 $\text{NH}_3 \pm 23.8\%$ 和 $\text{PM}_{2.5} \pm 63.2\%$;再根据 Streets 等^[20]采用的方法得到了新疆绿洲区秸秆燃烧污染物排放量的不确定性范围(95%置信区间),分别为: $\text{CO}_2 \pm 24.9\%$ 、 $\text{CO} \pm 38.9\%$ 、 $\text{CH}_4 \pm 85.2\%$ 、 $\text{NMVOC} \pm 90.7\%$ 、 $\text{OC} \pm 74.6\%$ 、 $\text{BC} \pm 48.5\%$ 、 $\text{SO}_2 \pm 113.6\%$ 、 $\text{NO}_x \pm 30.4\%$ 、 $\text{NH}_3 \pm 46.7\%$ 和 $\text{PM}_{2.5} \pm 123.9\%$ 。从分析结果可以看出,区域排放清单中 CO_2 、 CO 等主要污染物排放估算量的不确定性较小,但 $\text{PM}_{2.5}$ 、 SO_2 和 NMVOC 等污染物排放估算量的不确定性较高。今后开展新疆地区主要作物秸秆燃烧释放大气污染物的监测和实验研究工作,将有助于提高该区域作物秸秆燃烧污染物排放清单的可靠性。

2.5 新疆地区生物炭固碳量和碳封存潜力估算

表6列出了2013年新疆地区秸秆燃烧碳排放量和转化为生物炭的固碳减排潜力。2013年新疆地区秸秆燃烧碳排放总量为 $2.7 \times 10^6 \text{ t}$,其中棉花、小麦和玉米三类作物秸秆燃烧总贡献率达到了93.5%,在该地区碳排放中占绝对主导地位。假设将这三类作物燃烧的秸秆量转化为生物炭,则可减少该区域54.9%的秸秆燃烧碳排放量,与李飞跃等对我国焚烧秸秆转化为生物炭的减排研究结果基本相符^[18],说明本研究估算的固碳减排量较为合理。若将全区作物秸秆全部转化为生物炭,每年仅秸秆生物炭直接固定碳量就可达

$5.3 \times 10^6 \text{ t}$ 。“十二五”新疆地区碳消减量要达到2010年该区域碳排放总量的11%,结合2010年《新疆统计年鉴》中能源消费总量数据(折合成碳排放量约为 $6.2 \times 10^7 \text{ t}$),如果将所有秸秆转化为生物炭,则能完成新疆地区十二五期间碳消减量的77.9%。可见,生物炭技术具有良好的固碳减排潜力。

生物和环境因素都会影响生物炭长期碳封存效果,研究表明,在100年时间尺度内,生物炭中约有32%的碳以 CO_2 形式损失,而剩余碳可以长期稳定存在于土壤中,IPCC也是采用100年的时间尺度以 CO_2 当量来评价碳减排潜力^[26],因此本研究进一步估算了生物炭长期碳封存潜力。由表6可知,如果将新疆地区作物秸秆全部转化为生物炭,将会有 $3.6 \times 10^6 \text{ t}$ 碳和 $1.3 \times 10^7 \text{ t CO}_2$ 被长期封存于生物炭中,相当于新疆2010年排放 CO_2 总量的5.9%,与姜志翔等研究有关物炭封存计算结果一致^[19];若仅以被燃烧的秸秆估算,也有 $4.8 \times 10^5 \text{ t}$ 碳和 $1.8 \times 10^6 \text{ t CO}_2$ 被封存于生物炭中。由此可见,生物固碳技术既能够消减秸秆燃烧所排放的温室气体,又能固定封存秸秆中的碳,从而不断移除大气中的 CO_2 ,这无疑是一种可持续的碳封存技术。

3 结论

(1)新疆绿洲区主要作物秸秆总量和燃烧量呈现逐年上升的趋势,2013年秸秆总量和燃烧量分别为 $3.2 \times 10^7 \text{ t}$ 、 $6.0 \times 10^6 \text{ t}$,其中小麦、玉米和棉花秸秆燃烧量占秸秆燃烧总量的93.5%。

(2)近10年新疆地区作物秸秆燃烧释放的大气污染物呈增加的趋势。在大气污染物排放清单中, CO_2 和 CO 是主要污染物;而棉花、小麦和玉米,是新疆地区秸秆燃烧释放污染物的主要贡献源。

(3)2013年新疆地区秸秆燃烧碳排放总量为

表6 2013年各类作物秸秆燃烧碳排放量及固碳减排潜力(10^4 t)

Table 6 Carbon emissions from crop residue burning and carbon emission reduction potential of biochar in 2013(10^4 t)

作物 Crop	碳排放量 Carbon emission	生物炭固碳量 Carbon sequestration by biochar		生物炭封存碳量 Carbon sequestration from carbon storage in biochar after 100 years		生物炭封存 CO_2 潜力 CO_2 removal by carbon storage in biochar after 100 years	
		秸秆总量	燃烧秸秆	秸秆总量	燃烧秸秆	秸秆总量	燃烧秸秆
水稻	3.80	7.45	2.23	5.06	0.67	18.58	2.46
小麦	76.33	154.84	46.45	105.29	13.94	386.42	51.14
玉米	59.17	112.21	33.66	76.30	10.10	280.02	37.06
棉花	116.79	226.38	67.91	153.94	20.37	564.94	74.77
豆类	2.46	6.31	1.89	4.29	0.57	15.75	2.08
油料	11.18	23.78	7.13	16.17	2.14	59.34	7.85
总计	269.72	530.96	159.29	361.05	47.79	1 325.06	175.38

2.7×10⁶ t,将棉花、小麦和玉米燃烧的秸秆转化为生物炭,可减少该区域 54.9%的碳排放量;将全区作物秸秆全部转化为生物炭,每年仅秸秆生物炭就可直接固定碳量 5.3×10⁶ t,能完成新疆地区“十二五”期间碳消减量的 77.9%,具有较大的固碳减排潜力。

(4)以 100 年尺度来衡量,新疆绿洲区作物秸秆全部转化为生物炭,将会有 3.6×10⁶ t 碳和 1.3×10⁷ t CO₂ 被长期封存于生物炭中,是一种可持续的碳封存技术。

参考文献:

- [1] Kyeong E K, Gwi-Taek J, Changshin S, et al. Pretreatment of rapeseed straw by soaking in aqueous ammonia[J]. *Bioprocess and Biosystems Engineering*, 2012, 35(1-2): 77-84.
- [2] Markus P, Kenneth K. Cell-wall carbohydrates and their modification as a resource for biofuels[J]. *Plant Journal*, 2008, 54: 559-568.
- [3] 杨增玲, 楚天舒, 韩鲁佳, 等. 秸秆饲料化集成技术模式及其区域适用性评价[J]. 农业工程学报, 2013, 29(23): 186-193.
YANG Zeng-ling, CHU Tian-shu, HAN Lu-jia, et al. Regional applicability evaluation of technical integration for straw feed utilization[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2013, 29(23): 186-193.
- [4] 曹国良, 张小曳, 王 丹, 等. 秸秆露天焚烧排放量的 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 Xiao-ye, 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.
- [5] 田贺忠, 赵 丹, 王 艳, 等. 中国生物质燃烧大气污染物排放清单[J]. 环境科学学报, 2011, 31(2): 349-357.
TIAN He-zhong, ZHAO Dan, WANG Yan, et al. Emission inventories of atmospheric pollutants discharged from biomass burning in China[J]. *Acta Science Circumstantiae*, 2011, 31(2): 349-357.
- [6] Rodrigo I, Simon S, James H. Pyrolysis biochar systems for recovering biodegradable materials: A life cycle carbon assessment[J]. *Waste Management*, 2012, 32(5): 859-868.
- [7] Jim H, Simon S, Saran S. Prospective life cycle carbon abatement for pyrolysis biochar systems in the UK[J]. *Energy Policy*, 2011, 39: 2646-2655.
- [8] 姜志翔, 郑 浩, 李锋民, 等. 生物炭碳封存技术研究进展[J]. 环境科学, 2013, 34(8): 3327-3333.
JIANG Zhi-xiang, ZHENG Hao, LI Feng-min, et al. Research progress on biochar carbon sequestration technology[J]. *Environmental Science*, 2013, 34(8): 3327-3333.
- [9] Sohi S P, Krull E, Bol R. A review of biochar and its use and function in soil[J]. *Advances in Agronomy*, 2010, 105: 47-82.
- [10] Streubel J D, Collins H P, Garcia-Perez M, et al. Influence of contrasting biochar types on five soils at increasing rates of application[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2011, 75: 1402-1413.
- [11] 陈温福, 张伟明, 孟 军. 生物炭与农业环境研究回顾与展望[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(5): 821-828.
CHEN Wen-fu, ZHANG Wei-ming, MENG Jun. Biochar and agro-ecological environment: Review and prospect[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, 33(5): 821-828.
- [12] Woolf D, Amonette J E, Street-Perrott F A, et al. Sustainable biochar to mitigate global climate change[J]. *Nature Communications*, 2010, 1: 56.
- [13] Roberts K G, Gloy B A, Joseph S, et al. Life cycle assessment of biochar systems: Estimating the energetic, economic, and climate change potential[J]. *Environmental Science and Technology*, 2010, 44(2): 827-833.
- [14] Lehmann J. Biological carbon sequestration must and can be a win-win approach[J]. *Climatic Change*, 2009, 97(3-4): 459-463.
- [15] Pratt K, Moran D. Evaluating the cost-effectiveness of global biochar mitigation potential[J]. *Biomass and Bioenergy*, 2010, 34(8): 1149-1158.
- [16] 苏继峰, 朱 彬, 康汉青, 等. 长江三角洲地区秸秆露天焚烧大气污染物排放清单及其在空气质量模式中的应用[J]. 环境科学, 2012, 33(5): 1418-1424.
SU Ji-feng, ZHU Bin, KANG Han-qing, et al. Application pollutants released from crop residues at open burning in Yangtze River delta region in air quality model[J]. *Environmental Science*, 2012, 33(5): 1418-1424.
- [17] 赵建宁, 张贵龙, 杨殿林, 等. 中国粮食作物秸秆焚烧释放碳量的估算[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(4): 812-816.
ZHAO Jian-ning, ZHANG Gui-long, YANG Dian-lin. Estimation of carbon emission from burning of grain crop residues in China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(4): 812-816.
- [18] 李飞跃, 王建飞. 中国粮食作物秸秆焚烧碳排放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 Fei-yue, WANG Jian-fei. 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*, 2013, 29(14): 1-7.
- [19] 姜志翔, 郑 浩, 李锋民, 等. 生物炭技术缓解我国温室效应潜力初步评估[J]. 环境科学, 2013, 34(6): 2486-2492.
JIANG Zhi-xiang, ZHENG Hao, LI Feng-min, et al. Preliminary assessment of the potential of biochar technology in mitigating the greenhouse effect in China[J]. *Environmental Science*, 2013, 34(6): 2486-2492.
- [20] Streets D G, Yarber K F, Woo J-H, et al. Biomass burning in Asia: Annual and seasonal estimates and atmospheric emissions[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2003, 17(4): 1079-1099.
- [21] Turn S Q, Jenkins B M, Chow J C, et al. Elemental characterization of particulate matter emitted from biomass burning: Wind tunnel derived source profiles for herbaceous and wood fuels[J]. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 1997, 102: 3683-3700.
- [22] Andreae M O, Merlet P. Emissions of trace gases and aerosols from biomass burning[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2001, 15: 955-966.
- [23] 祝 斌, 朱先磊, 张元勋, 等. 农作物秸秆燃烧 PM_{2.5} 排放因子的研究[J]. 环境科学研究, 2005, 18(2): 18-33.
ZHU Bin, ZHU Xian-lei, ZHANG Yuan-xun, et al. Emission factor of PM_{2.5} from crop straw burning[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2005, 18(2): 18-33.
- [24] Laird D A, Brown R C, Amonette J E, et al. Review of the pyrolysis platform for coproducing bio-oil and biochar[J]. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 2009, 3(5): 547-562.
- [25] Roberts K G, Gloy B A, Stephen J, et al. Life cycle assessment of biochar systems: Estimating the energetic, economic, and climate change potential[J]. *Environmental Science and Technology*, 2010, 44(2): 827-833.
- [26] Hammond J, Shackley S, Sohi S, et al. Prospective life cycle carbon abatement for pyrolysis biochar systems in the UK[J]. *Energy Policy*, 2011, 39: 2646-2655.