

秸秆生物黑炭农业应用的固碳减排计量方法学探讨

张阿凤, 程 琨, 潘根兴*, 郑金伟, 李恋卿, 张旭辉, 杜彦玲, 韩晓君

(南京农业大学农业与气候变化研究中心, 南京 210095)

摘 要: 秸秆或生活垃圾热裂解转化生物黑炭的产业化技术已经成熟, 生物黑炭固碳减排方法学是进行自主碳交易的必备技术依据。基于河南三利新能源有限公司生物黑炭的生产工艺, 对秸秆燃烧(基线)和转化生物黑炭以及农业应用(项目)整个系统全生命周期的温室气体的排放量和碳汇清除量进行了评价。采用该方法学, 对已经进行的秸秆生物质黑炭的生产和稻田施用的总效应初步估计为秸秆产生净碳汇 $249\sim 398 \text{ kg CO}_2\text{-e}\cdot\text{t}^{-1}$ 。可以看出秸秆生物黑炭具有显著的固碳减排效果。

关键词: 生物黑炭; 固碳减排; 计量方法学

中图分类号: X11 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2011)09-1811-05

An Approach for Measurement the Carbon Sequestration and Mitigation of Straw Biochar Amendment

ZHANG A-feng, CHENG Kun, PAN Gen-xing*, ZHENG Jin-wei, LI Lian-qing, ZHANG Xu-hui, DU Yan-ling, HAN Xiao-jun

(Center of Agriculture and Climate Change, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China)

Abstract: The industrial technology of straw or domestic waste conversion into biochar by pyrolysis has been mature. The approach of straw biochar amendment for measurement of the carbon sequestration and mitigation provides a theoretical basis for carbon trading. The comparative effect of straw burned(basis) and biochar amendment(program) on greenhouse gas emission and carbon sink in relation to agricultural application was evaluated on the basis of the manufacturing process of Sanli New Energy Company, Henan Province, China. Using this method, the overall carbon sink was from $249 \text{ kg CO}_2\text{-e}$ to $398 \text{ kg CO}_2\text{-e}$ per ton of straw, indicating that straw biochar has a substantial effect on carbon sequestration and mitigation.

Keywords: biochar; carbon sequestration and mitigation; approach for measurement

中国政府于 2009 年提出, 到 2020 年全国单位国内生产总值二氧化碳排放比 2005 年下降 40%~50%。农业作为国民经济的基础产业, 占国家总温室气体排放量的 12%~17%, 但农业固碳减排的潜力十分明显, IPCC(2007)在第四次气候变化评估报告中估计, 农业减排潜力可占总自然潜力的 20%以上, 其中 90% 来自土壤固碳^[1]。根据中国农业碳足迹的初步研究, 中国农业碳足迹较大幅度高于欧美国家, 农业生产的碳排放 2/3 以上来自肥料施用, 其次是灌溉和耕作^[2]。基于农业具有明显巨大的减排空间的已有认识我们提出: 农业减缓气候变化拟以增汇优先, 减排为辅; 生

产资料减耗为主, 田间减排为辅; 生物废弃物综合利用还田的减废增汇减排应该列入优先发展的农业减排途径^[3]。但是, 农业作为基础产业, 需要通过经济或税收政策扶持和激励农民参与减排。因此, 计量和认证农业生产中温室气体减排实效的方法学, 是农业面向减缓气候变化的重要工作内容, 并且是自主碳交易的必备技术依据。随着我国各行业及区域减排任务的落实, 国内需要开展自主减排交易, 来协调不同地区和不同产业的减排与经济发展平衡。国家发改委正在制定国内自主减排交易管理办法, 北京环境交易所联合 BlueNext 交易所发起建立中国第一个针对农林业的自愿碳减排标准——熊猫标准, 此标准是为探索通过市场化机制实现东部补偿西部, 城市补偿农村, 高排放者补偿低排放者的新模式^[4]。农业减排计量方法学因此成为合理测量\计量\核实和报告农业生产过程中排放的重要技术性工作。

秸秆或生活垃圾热裂解转化生物黑炭的产业化

收稿日期: 2011-03-19

基金项目: 科技部“十一五”农田固碳减排支撑计划项目资助(2008BAD95B13-1)

作者简介: 张阿凤(1985—), 女, 博士研究生, 从事生物黑炭与农业固碳减排研究。E-mail: 2009203024@njau.edu.cn

* 通讯作者: 潘根兴 E-mail: gxpan@njau.edu.cn

技术已经成熟,可望在不久的将来在我国推广^[6]。国家能源局、农业部和财政部已经启动绿色能源示范县建设计划,国家财政按生物质处理量对秸秆能源企业进行补助^[6],生物黑炭的产业和农业应用将得到国家财政支持,发展生物黑炭减排方法学也可以为制定相关价格或税收政策、碳补贴政策提供依据。

生物质燃烧已成为全球重要的大气微痕量成分排放源,据估算全球每年生物质燃烧排放达 8.7 Pg-CO₂^[7],约占总 CO₂ 排放的 40%^[8]。我国每年的农业秸秆产生量约 7 亿 t,估计高达 50%的秸秆被焚烧^[9]。近年来,全球出现把秸秆碳通过热裂解技术转化为生物黑炭,应用于土壤培肥和固碳减排^[10]。秸秆转化生物黑炭,首先避免了燃烧造成的 CO₂ 直接排放(避免排放),秸秆转化产生部分能源,可以替代部分化石能源,产生能源替代减排效应(替代减排)。另外,根据我们的野外试验研究,生物黑炭应用于农田还可以减少氮肥施用量^[11],并显著降低氮肥的 N₂O 直接排放系数^[11],即还可产生额外减排。最近,Woolf 等^[12]运用生命周期评估的方法学分析了不同利用程度下全球秸秆生物黑炭可以减排 1.0~1.8 PgCO₂-C_e·a⁻¹,其中 50%来自避免释放,30%来自替代排放而另外 20%是避免了堆肥中 CH₄ 和 N₂O 的排放。

开发符合中国秸秆生物黑炭生产和应用状况的方法学对于生物黑炭产业和农业固碳减排自主交易十分必要,将为中国秸秆资源的合理利用提供科学依据。本文所指生物黑炭是国内现有的采用热裂解工艺进行秸秆转化而产生可燃气、木醋液和固体的生物黑炭,本文的工艺参数来自河南三利新能源有限公司的秸秆转化生物黑炭的生产线。生物黑炭农业应用的范畴包括:作为肥料介质(例如炭基肥料),作为土壤改良剂、污染物钝化剂以及木醋液叶面肥等。

1 方法学原理

本方法学是用于评价在假设项目不存在的情况下(即基准线)和实施生物黑炭项目活动的情况下,生物黑炭生产到农业应用整个系统全生命周期的温室气体的排放量和碳汇清除量的估计方法及计量依据。其中温室气体排放量和清除量包括:①1 t 秸秆燃烧释放的 CO₂,CH₄ 和 NO_x,其燃烧释放的 CO₂,CH₄ 和 NO_x 分别占 2000 年中国排放的 6.13%、0.68%和 3.63%^[9],因此设定其为本方法学中温室气体排放途径之一;②生物黑炭的农业应用影响土壤 CH₄ 和 N₂O 的排放,由此导致的温室气体净排放,还考虑到生物

黑炭应用产生的能源替代排放,及 1 t 秸秆转化生物黑炭过程中产生的生物气,这部分可作为避免化石燃料燃烧的能源替代排放。通过生物黑炭应用减少化肥碳排放也可考虑为氮肥生产的能源抵消排放效应。同时规定和讨论了整个项目计量的关键环节、基线的设定以及边界和泄露的认定。

1.1 计量关键环节

该方法学的目的是为了能确保秸秆转化生物黑炭固碳减排效果最终评价结果具有公正性、成本有效性和可操作性。从秸秆转化生物黑炭农业应用来看,方法学要处理的关键环节是生物黑炭农业应用项目边界的辨析,用于核算固碳减排效果基线,系统泄露的产生和处理。通过假设实施秸秆转化生物黑炭还田后固碳减排量的监测限,并研究或从文献吸纳有关计量参数,通过各环节的紧密衔接整合将秸秆转化生物黑炭农业应用产生固碳减排效果计量的规范化和标准化。

1.2 基线(baseline)设定探讨

基线实际上是在用作辨析项目产生效果的一种背景,即不实施项目时的背景水平。在温室气体计量中,基线是一种能合理代表在没有项目活动的情况下引起的温室气体排放量和碳变化量。秸秆生物黑炭减排计量方法学是基于秸秆进行热裂解转化成生物黑炭农业应用项目而产生的各种减排的总合,则其基线可以理解为不实施秸秆转化的背景排放。这里把它界定在 1 t 秸秆生物质燃烧释放的温室气体量。当然,如果秸秆生物质燃料项目和秸秆发电项目不能进行交易或不予碳补偿(例如财政部按秸秆消纳量给与秸秆沼气项目及秸秆成型燃料项目的政府补贴),则秸秆发电或秸秆燃料的温室气体排放可以作为生物黑炭项目的基线。

1.3 边界与泄露的认定

基线确定后,生物黑炭减排项目的范畴就是 1 t 秸秆转化生物黑炭并农业应用时产生的减排量,包括与生物黑炭同为产品的可燃气体的替代减排,炭基肥料的节氮额外减排,田间施用后减少温室气体释放的直接减排。当然,因热裂解处理,秸秆不再焚烧的直接避免排放是首要考虑的。

温室气体和碳汇评价一般采用全生命周期评价法,是指被评估对象或系统完成一个循环周期全过程的所有环节^[13]。我们认为,秸秆生物黑炭项目的边界是从作物收获后秸秆的田间收集到生物黑炭及相应产品的农业应用产生温室气体减排效果的所有环节,

即从原料-处理-产品生产-农业应用的完成一次循环的整个系统。其中,农业应用也是指应用生物黑炭的作物全生命周期。因此,本方法学中存在两个系统边界,包括生物黑炭转化生产的系统边界和生物黑炭农业应用的系统边界,这构成了本方法学的两个子模块。在本方法学中,核算减排的项目边界主要是指秸秆的收获打包运输到河南三利新能源有限公司(以15 km为例),从播种到农作物收获的整个作物生育期所有管理活动所囊括的地理范围。

温室气体泄漏是指项目活动涉及或引起的,产生于项目活动边界之外的、可测量的温室气体源排放。本方法学中存在的减排泄漏在于秸秆转化生物黑炭用于农业应用是需要由企业运输到实际农田的运输过程产生的温室气体排放。例如,在我们的试验研究案例中,生物黑炭由生产企业(河南三利新能源有限公司)运输到农业应用的田间(江苏宜兴市)^[11]产生的温室气体排放。

2 温室气体计算方法及参数的选择

2.1 生物黑炭生产的基本情况

目前国内秸秆生物黑炭的产业化技术已经成熟,河南三利新能源有限公司已经开发出基于温度为500℃左右的热裂解工艺的成套生产线,秸秆通过连续化自热式窑炉热裂解产生和分离得到气体、液体和固体等三相物质,产品包括生物黑炭、生物焦油和生物气。该公司建成的日产30 t的生物质碳化厂,年处理秸秆30 000 t,生产约10 000 t生物黑炭,生产可燃气300万m³,生产木醋液7 500 t,可配套生产炭基肥料20 000 t。本方法学参考该厂的工艺参数和生产条件^[14],进行基线排放量估算和计量参数选择。

2.2 基线情景温室气体排放量的估算

即秸秆焚烧温室气体排放量的估计,1 t秸秆焚烧释放的温室气体(*BE*)可用下式估算:

$$BE=12/44 \times BE_{CO_2} + 12/16 \times (12/44 \times 25) \times BE_{CH_4} + 28/44 \times (12/44 \times 296) \times BE_{N_2O} \quad (1)$$

式中:*BE*表示基线情景下1 t秸秆焚烧产生的CO₂、CH₄和N₂O的排放等折算的碳当量排放(kgCO₂-C_e·t⁻¹);*BE*_{CO₂}、*BE*_{CH₄}和*BE*_{N₂O}表示基线情景下秸秆焚烧产生的CO₂、CH₄和N₂O排放系数,在本方法学中这些系数的具体数值及依据见表1;12/44、12/16和28/44分别是CO₂、CH₄和N₂O转化为单位分子的系数,而25和296分别是CH₄和N₂O温室气体转化为碳当量(按100 a时间尺度)的系数。

2.3 项目活动过程中能源替代排放与温室气体减排的估算

2.3.1 秸秆转化为生物黑炭产生生物气的能源替代排放

根据生产企业的工艺和生产线运行参数,1 t秸秆平均可产生300 m³的生物气^[14],这部分可以用于发电,因替代能源消耗而产生抵消排放量(*PE*),等于生物气发电上网数量(*EP*)乘以煤电的CO₂排放因子:

$$PE_{power}=EP \times EF_{CO_2} \quad (2)$$

$$EF_{CO_2}=0.5 \times \delta EF_{OM,y} + 0.5 \times \lambda EF_{BM,y} \quad (3)$$

式中:*EP*为生产的电量,kWh;*EF*_{CO₂}为煤电的CO₂排放因子;*EF*_{BM,y}为容量边际排放因子,*EF*_{OM,y}为运行边际排放因子,δ、λ为中国不同区域各类装机项目的排放因子的系数^[20],由式(3)计算得各地区耗电的CO₂排放因子。

2.3.2 施用生物黑炭的土壤CH₄和N₂O的排放

施用生物黑炭项目活动下土壤CH₄和N₂O排放的监测推荐采用静态暗箱-气相色谱法,这种方法的田间操作和温室气体排放量计算参见参考文献[11]。这里需要指出的是,为了获得可靠和可信的结果,每次采样时间推荐统一在上午8:00—10:00间进行,并且监测日期需避开不良天气。

土壤CH₄和N₂O的排放与土壤类型、施肥、稻田的水分管理以及生物黑炭的物理化性质有关。本方法学中需要考虑生物黑炭施用于水田和旱地产生的排放效应的差异,这通过选择排放系数来反映。因此,由下式估算施用生物黑炭引起的农田(旱地和水田)的非CO₂总温室气体排放量(*PE*_(CH₄+N₂O),kg(CO₂-e))

表1 不同秸秆露天焚烧的排放因子(g·kg⁻¹)

Table 1 Emission factors of different crop residues burning(g·kg⁻¹)

秸秆来源	CO ₂	CH ₄	N ₂ O
水稻秸秆	1 757.6 ^[15] 、1 162.15 ^[16] 、1 019.9 ^[19]	0.72 ^[16]	3.52 ^[15] 、2.84 ^[16] 、2.66 ^[15]
小麦秸秆	1 483.6 ^[15] 、1 194.88 ^[16]	1.82 ^[16]	2.59 ^[15] 、2.33 ^[16]
玉米秸秆	2 200.2 ^[15] 、1 313.61 ^[16]	1.75 ^[16]	3.36 ^[15] 、1.82 ^[16]
棉花秸秆	1 453.4 ^[15]	2.7 ^[15]	2.68 ^[15]
未区分	1 515 ^[18] 、1 246.7 ^[19]	2.7 ^[18] 、2.7 ^[17] 、2.27 ^[19]	2.5 ^[18] 、2.7 ^[19]

hm⁻²):

$$PE_{(CH_4+N_2O)} = \alpha \times 12/16 \times (12/44 \times 25) \times BE_{CH_4} + \beta \times 28/44 \times (12/44 \times 296) \times BE_{N_2O} \quad (4)$$

式中: α 、 β 分别是施用生物黑炭后减少CH₄和N₂O的释放的系数; BE_{N_2O} 表示基线情景下土壤N₂O的排放,kg N₂O·hm⁻²; BE_{CH_4} 表示基线情景下土壤CH₄的排放,kg CH₄·hm⁻²;其他数字系数的意义同上。

本文中计算的 α 、 β 的系数是根据本中心2009—2010年在全国布置的8个试验点所得到的资料^[11]。

2.3.3 秸秆收集和运输产生的能耗排放(PE_{reg})

$$PE_{reg} = \sum_i \sum_j (EF_{ij} \cdot W_{ij}) \times 12/44 \times d \quad (5)$$

$$W_{ij} = n_{ij} \times t_{ij} \times e_{ij} \quad (6)$$

式中: i 为车辆类型; j 为燃料类型; PE_{reg} 指项目参与情况下因秸秆收集使用机械的碳排放量,kg CO₂-C_e; EF_{ij} 是指 j 种燃料的排放因子,kg CO₂-e·L⁻¹; W_{ij} 是指车辆 i 使用燃料 j 的消耗量,l h⁻¹; n_{ij} 为 i 种车型的数量; t_{ij} 指 i 种车型施肥的工作时间,h; e_{ij} 为 i 车型 j 燃料每小时的消耗量,各种燃料的排放因子参见文献[21]; d 为运输距离,方法学中默认为15 km;12/44为CO₂转换为碳当量的系数。

2.4 项目净碳汇量

根据上述基线和项目情境下温室气体的计量算式,进一步得到下式,计算生物黑炭生产和应用全生命周期项目净碳汇量(NE/kg CO₂-e·t⁻¹):

$$NE = BE + PE_p + PE_{(CH_4+N_2O)} - PE_{reg} \quad (7)$$

3 计量不确定性问题

3.1 秸秆露天焚烧排放因子的不确定性

由表1可以看出,秸秆焚烧排放因子特别是CO₂和N₂O存在很大的变异,本方法学中推荐采用CV(Coefficients of Variation,相对标准差或变异系数)来估算各影响因子的误差,参考政府部门统计数据,CV可取比较低的值±10%。

3.2 施用生物黑炭对土壤CH₄和N₂O排放量影响的不确定性

土壤CH₄和N₂O排放受土壤类型、施肥以及稻田水分管理差异的影响。如Rondon等^[22]研究表明,生物黑炭的用量为20 t·hm⁻²,在热带贫瘠的土壤上,完全抑制了CH₄的释放,由于生物黑炭的施用,土壤成为CH₄的汇;Knoblauch等^[23]研究表明,生物黑炭的施用增加了稻田CH₄的释放,其中释放CH₄的量占施

用生物黑炭量的0.14%,但是第二年的试验结果和对照相比没有显著差异。Zhang等^[11]研究表明,生物黑炭的施用增加了稻田CH₄的释放,当用量为40 t·hm⁻²和对照相比增加了41%。而对于N₂O生物黑炭的施用减少80%的N₂O的释放;Zhang等^[11]研究表明,生物黑炭的施用量为10、40 t·hm⁻²减少了稻田N₂O的释放,在施氮肥的情况下减少40%~51%,不施氮肥的情况下减少21%~28%。生物黑炭对土壤CH₄和N₂O排放影响的不确定性从而导致项目净碳汇量的不确定。我们推荐采用生物黑炭施用后2 a的结果的平均值作为施用生物黑炭对土壤CH₄和N₂O排放量影响的估计依据。

3.3 项目边界的不确定性

Woolf等^[12]研究表明,生物黑炭生产和农业应用主要是通过两个不同途径减少温室气体的排放,即生物黑炭施用于土壤的而实现土壤碳固定和通过生产中保留的能源而替代化石燃料的温室气体释放。生物能作物的固碳减排潜力计量也考虑到土壤碳固定^[13]。本计量方法学只考虑由于生物黑炭的施用减少因农业废弃物焚烧释放的温室气体,生物黑炭的施用增加土壤固定产生的碳汇可能会与减少焚烧排放效应重叠计算(及多次计量问题);其次,本方法学中也没有考虑生物黑炭的施用增加农作物NPP增加的碳汇和生物黑炭施用于土壤之后的部分黑炭的降解释放CO₂的量。Woolf等^[12]研究表明,若把这部分NPP经过热解转化为生物黑炭可以避免净的温室气体的释放9~16 Pg CO₂-C_e。以及生物黑炭的施用于土壤之后的降解释放的量为8~17 Pg CO₂-C_e。另外,本方法学中生物黑炭的运输能源消耗考虑为生物黑炭减排的外部泄漏,归于工业和交通运输的减排范畴,而不计入项目活动碳排放。而在生物黑炭生产过程中产生的生物气并电上网这一环节中机组的发电效率、不同秸秆类型也存在不确定性。

采用本方法学,我们对已经进行的秸秆生物质黑炭的生产和稻田施用的总效应初步估计为秸秆产生净碳汇249~398 kg CO₂-e·t⁻¹^[11,15-19]。因此,秸秆生物质黑炭具有显著的固碳减排效果,大面积推广应用可带来潜在的碳贸易或自主减排碳交易市场。

参考文献:

- [1] Intergovernmental Panel on Climate Change(IPCC). Agriculture[R]/Metz B, Davidson O R, Bosch P R, et al. Climate Change 2007: Mitigation, Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the

- Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York: 498–540.
- [2] Cheng K, Pan G X, Pete S, et al. Carbon footprint of China's crop production: An estimation using agro-statistics data over 1993–2007[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2011, doi: 10.1016/j.agee.2011.05.012.
- [3] 第380次香山科学会议“气候变化对农业的影响及应对”[R]. The 380th session of Xiangshan Science Conference: Impact of climate change on agriculture and its countermeasures[R].
- [4] http://www.pandastandard.org/index_cn.html
- [5] 潘根兴, 林振衡, 李恋卿, 等. 试论我国农业和农村有机废弃物生物质炭化产业化[J]. 中国农业科技导报, 2011, 13(1): 75–82. PAN Gen-xing, LIN Zhen-heng, LI Lian-qing, et al. Perspective on biomass carbon industrialization of organic waste from agriculture and rural areas in China[J]. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2011, 13(1): 75–82.
- [6] 秸秆资源化利用补助资金管理暂行办法[EB/OL] http://www.xdbmf.com/cn/News.asp?id=31&menu=ShowDetail&N_Id=103.
- [7] Koppmann R, Czapiewski K V, Reid J S. A review of biomass burning emissions, Part I: Gaseous emissions of carbon monoxide, methane, volatile organic compounds, and nitrogen containing compounds[J]. *Atmospheric Chemistry And Physics Discussions*, 2005, 5: 10455–10516.
- [8] Levine J S, Cofer W R, Cahoon D R, et al. Biomass burning: A driver for global change[J]. *Environmental Science and Technology*, 1995, 29(3): 120–125.
- [9] 曹国良, 张小曳, 郑方成, 等. 中国大陆秸秆露天焚烧的量的估算[J]. 资源科学, 2006, 28(1): 9–13. CAO Guo-liang, ZHANG Xiao-ye, ZHENG Fang-cheng, et al. Estimating the crop residues burnt in open field in China[J]. *Resources Science*, 2006, 28(1): 9–13.
- [10] 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 Gen-xing, ZHANG A-feng, ZOU Jian-wen, et al. Biochar from agro-byproducts used as amendment to croplands: An option for low carbon agriculture[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2010, 26(4): 394–400.
- [11] Zhang A F, Cui L Q, Pan G X, et al. Effect of biochar amendment on yield and methane and nitrous oxide emissions from a rice paddy from Tai Lake plain, China[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2010, 139: 469–475.
- [12] Woolf D, Amonette E J, Street-Perrott F A, et al. Sustainable biochar to mitigate global climate change[J]. *Nature communications*, DOI: 10.1038/ncomms1053.
- [13] Hillier J, Whittaker C, Dailey G, et al. Greenhouse gas emissions from four bioenergy crops in England and Wales: Integrating spatial estimates of yield and soil carbon balance in life cycle analyses[J]. *Global Change Biology Bioenergy*, 2009, 1: 267–281.
- [14] <http://sanlixinnengyuan.com/news.asp?newsid=391&class=2>.
- [15] 曹国良, 张小曳, 王亚强, 等. 中国区域农田秸秆露天焚烧排放量的估算[J]. 科学通报, 2007, 52(15): 1826–1831. CAO Guo-liang, ZHANG Xiao-ye, WANG Ya-qiang, et al. Estimating the quantity of crop residues burnt in open field in China[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2007, 52(15): 1826–1831.
- [16] Jenkins B M, Turn S Q, Williams R B, et al. Atmospheric pollutant emission factors from open burning of agricultural and forest biomass by wind tunnel simulations[M]. Volume 1. California State Air Resources Board, (NTIS PB97-133037), 1996.
- [17] U. S. Environmental Protection Agency (U. S. EPA). Compilation of air pollutant emission factors, Chapter 2.5: Open burning[M]. Fifth Edition. NC, USA; U. S. Environmental Protection Agency, Research Triangle Park, 2004: 1–19.
- [18] Andreae M O, Merlet P. Emissions of trace gases and aerosols from biomass burning[J]. *Global Biogeochem Cycle*, 2001, 15(4): 955–966.
- [19] IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). Greenhouse Gas Inventory Reference Manual[M]. Revised 1996 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories. IPCC/OECD/IES, UK Meteorological Office, Bracknell, UK, 1997.
- [20] 国家发展与改革委员会. 2010 中国区域电网基准线排放因子[R/OL]. <http://cdm.ccchina.gov.cn/WebSite/CDM/UpFile/File2537.pdf>
- [21] Waldron D C, Harnisch J, Lucon O, et al. IPCC (2006) Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories Volume 2, Energy: Chapter 3 Mobile Combustion[EB/OL]. <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/vol2.html>
- [22] Rondon M A, Molina D, Hurtado M, et al. Enhancing the productivity of crops and grasses while reducing greenhouse gas emissions through biochar amendments to unfertile tropical soils[C]//Proceedings of the 18th World Congress of Soil Science, Philadelphia, PA, USA, 2006: 138–168.
- [23] Knoblauch 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 Biol Biochem*, 2010, 43: 1768–1778.