

中国粮食作物秸秆焚烧释放碳量的估算

赵建宁, 张贵龙, 杨殿林*

(农业部环境保护科研监测所, 中国农业科学院武清转基因生物农田生态系统影响野外科学观测试验站, 天津 300191)

摘要 生物质燃烧对全球大气环境和气候系统会产生重要的影响,根据 1999—2008 年中国的粮食产量、谷草比,估算了主要粮食作物的秸秆产量,结合秸秆露天焚烧比例计算了中国 1999—2008 年主要粮食作物秸秆露天焚烧量,进一步依据相关排放因子得出 CO 和 CO₂ 的排放量及碳排放总量。结果发现,中国主要粮食作物年平均秸秆产量达到 4.9×10^8 t,粮食秸秆露天焚烧量平均为 0.94×10^8 t,约占粮食作物秸秆总量的 19%,其中稻谷秸秆露天焚烧量占到粮食秸秆露天焚烧量的 43.1%。粮食作物秸秆露天焚烧排放的 CO 和 CO₂ 总量平均每年分别为 9.19×10^6 t 和 1.07×10^8 t,排放的总碳量平均每年为 3.32×10^7 t,其中稻谷、小麦、玉米、豆类秸秆露天焚烧释放的总碳量分别为 9.88×10^6 、 9.93×10^6 、 11.14×10^6 、 2.22×10^6 t。

关键词 秸秆 粮食作物 露天焚烧 碳

中图分类号 X511 **文献标志码** A **文章编号** 1672-2043(2011)04-0812-05

Estimation of Carbon Emission from Burning of Grain Crop Residues in China

ZHAO Jian-ning, ZHANG Gui-long, YANG Dian-lin*

(Agro-Environmental Protection Institute, Ministry of Agriculture, Wuqing Experiment Station for Field Observation of Farmland Ecosystem Impact of Genetically Modified Organisms, CAAS, Tianjin 300191, China)

Abstract Biomass burning is the important source of gaseous pollutants, which has a strong impact on global atmospheric chemistry and climate change. Based on data of crop yield from 1999 to 2008 in China, the major grain crop residues output were calculated according to the ratio of residue/grain. The proportion and the amount of openly burned crop residues were quantitatively analyzed. The total amount of CO and CO₂ emission were estimated according to the emission factors. We found that annually production of grain crop residues in China was about 4.9×10^8 t·a⁻¹. The amount of openly burned residues in the field was about 0.94×10^8 t·a⁻¹, which accounted 19% of the total production of grain crop residues. The annually emission of gaseous CO and CO₂ were 9.19×10^6 t·a⁻¹ and 1.07×10^8 t·a⁻¹, respectively. The total carbon emission was 3.32×10^7 t·a⁻¹, which could be shared by rice residue (9.88×10^6 t·a⁻¹), wheat residue (9.93×10^6 t·a⁻¹), corn residue (11.14×10^6 t·a⁻¹), and legume residue (2.22×10^6 t·a⁻¹), respectively.

Keywords residue; grain crops; burning in the field; carbon

根据碳监测行动 (CARMA) 网站提供的数据,中国 2009 年 CO₂ 排放量位居全球第二,在国际谈判中面临着严峻的碳减排问题,这也是中国政府和科学家所面临的重要议题^[1-2]。从全球范围看,每年大约有 3.9 Pg 碳通过生物质燃烧排放到大气中,相当于人类每年燃烧化石燃料排放量的 70%^[3]。农田秸秆焚烧是生物质燃烧的一个重要组成部分,我国秸秆资源丰

富,占世界秸秆总产量的 20%~30%。据曹国良等的研究,2000—2003 年我国的秸秆总量变化不大,均在 6×10^8 t 左右^[4]。在传统农业阶段,秸秆资源主要用于肥料、燃料、饲料和建筑材料,但是随着农业的现代化进程,大量的传统农业生产要素被大工业所提供的农用生产要素所替代,农业主产区秸秆资源大量过剩,农民就地焚烧秸秆现象日益突出,引起了全社会的关注。

农作物秸秆燃烧时,会产生大量的 CO₂、CO、氮氧化物、苯以及多环芳烃等有害气体,不仅危害人体健康,造成环境污染,其中排放的大量 CO₂ 会使地球变暖,导致灾害发生。据多种模型预测结果显示,到 2030 年大气中 CO₂ 浓度将加倍,全球年平均气温将

收稿日期 2010-10-07

基金项目 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金(农业部环境保护科研监测所)资助项目

作者简介 赵建宁(1981—),男,博士,助理研究员,主要从事生物多样性与生态农业研究。E-mail: zhaojn2008@163.com

* 通讯作者 杨殿林 E-mail: yddlgrl@126.com

升高 1.5~4.5 °C^[5]。而大气中 CO 的存在会降低大气的氧化性,延长 CH₄ 在大气中的停留时间,是一种间接作用的温室气体^[6]。本文以此为立足点,根据中国粮食作物产量、谷草比、秸秆露天焚烧比例及排放因子,估算中国粮食作物秸秆产量、露天焚烧量及秸秆露天焚烧排放 CO₂、CO 量和碳释放量,为国家气候变化模拟提供数据基础,为制定相关政策以及气候和环境外交提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 粮食作物秸秆资源数量

中国作为世界粮食生产大国,粮食作物秸秆资源相当丰富。但由于作物秸秆产量并未列入国家的统计范围,其产量通常依据作物产量计算得出。本文根据 1999—2008 年《中国统计年鉴》获得各省、市、自治区粮食产量的数据^[7],然后根据谷草比^[8]测算出粮食作物秸秆产量。

1.2 粮食作物秸秆露天焚烧量

农作物秸秆露天焚烧具有很强的季节性,其燃烧量因所处气候带、农村生活水平、植被覆盖现状和粮食作物秸秆产量的不同而不同,但最主要是由农民的收入水平和农民的秸秆利用成本决定。曹国良等^[4]综合全国各省、市按农村生活水平、气候带、植被覆盖现状等资料提出了全国各省、市、自治区的秸秆露天焚烧比例,这一结果被陈新峰^[9]的研究所证实,并被张鹤丰等^[10,15]所使用,因此本文也采用这一方法来估计粮食作物秸秆露天焚烧量。首先依据 1.1 中估算 1999—2008 年的秸秆产量,然后根据全国各省、市、自治区秸秆露天焚烧比例^[4]确定粮食作物秸秆露天焚烧量。

1.3 排放因子及碳释放量的确定

排放因子是表征气态污染物排放特征的重要参数,本研究中粮食作物秸秆燃烧排放 CO、CO₂ 的排放因子是通过现阶段文献所查到的各国粮食作物秸秆燃烧排放因子,然后选择中国粮食作物秸秆燃烧排放 CO、CO₂ 的排放因子,在没有中国粮食作物秸秆燃烧

排放因子的条件下,选择与中国国情相同的发展中国家的排放因子。碳释放量根据粮食作物秸秆露天焚烧释放 CO、CO₂ 的量来估算。本文所采用的排放因子的值为相应的平均值,具体见表 1。

表 1 排放因子汇总 (g·kg⁻¹)

Table 1 Emission factors from burning of grain crop residue (g·kg⁻¹)

CO	CO ₂
64.2±4.9 ^[10]	791.3±12.5 ^[10]
141.2±14.8 ^[10]	1 557.9±85.8 ^[10]
114.7±12.4 ^[10]	1 261.5±59.9 ^[10] , 1 515±177 ^[11]
92±84 ^[11]	1 787±36 ^[12] , 1 470±46 ^[14]
99±32.7 ^[13]	1 350±16 ^[14]

2 结果与分析

2.1 1999—2008 年中国粮食作物秸秆产量

从表 2 可以看出,10 年间我国粮食作物秸秆产量随着粮食产量的变化从 1999 年的 5.2×10⁸ t 降低到 2003 年的 4.4×10⁸ t,到 2008 年又增加到 5.6×10⁸ t,年平均产量约为 4.9×10⁸ t,其产量占我国农作物每年秸秆总产生量约 6.4×10⁸ t 的 77%^[8]。其中玉米秸秆产量从 2000 年随着玉米产量的逐年增加而不断增加,并且从 2003 年开始超过了稻谷秸秆的产量,这反映了我国畜牧业的蓬勃发展和人民生活水平的稳步提升。

2.2 1999—2008 年中国粮食作物秸秆露天焚烧量

根据各省市粮食作物秸秆产量和秸秆露天焚烧比例获得 1999—2008 年中国粮食作物秸秆露天焚烧量见表 3。可以看到,粮食作物每年秸秆露天焚烧量平均为 0.94×10⁸ t,约占粮食作物秸秆总量的 19%,其中稻谷秸秆 0.41×10⁸ t,小麦秸秆 0.21×10⁸ t、玉米秸秆 0.28×10⁸ t、豆类秸秆 0.05×10⁸ t,分别约占粮食作物秸秆每年平均露天焚烧量的 43.1%、21.7%、30.0%和 5.1%。另外,各作物每年秸秆露天焚烧的比例也不尽相同,其中稻谷秸秆的 25.3%、小麦秸秆的 21.8%、玉米秸秆的 17.2%、豆类秸秆的 15.2%被露天焚烧。

表 2 1999—2008 年中国粮食作物秸秆产量 (10⁶ t)

Table 2 National estimated amounts of agricultural crop residue (10⁶ t)

作物	1999 年	2000 年	2001 年	2002 年	2003 年	2004 年	2005 年	2006 年	2007 年	2008 年
稻谷	192.53	182.27	172.25	169.30	155.84	173.72	175.17	177.09	180.45	186.14
小麦	117.30	102.63	96.69	93.00	89.08	94.71	100.37	107.60	112.58	115.84
玉米	175.48	145.22	156.30	166.19	158.69	178.49	190.93	199.31	208.65	227.30
豆类	32.39	34.37	35.10	38.32	36.38	38.17	36.90	35.99	29.41	34.94
合计	517.69	464.49	460.35	466.82	439.99	485.09	503.37	519.99	531.10	564.22

可以发现由于 10 年间粮食作物产量的不同以及各省市经济发展水平、资源条件、气候和人口密度的差异,导致 10 年间秸秆露天焚烧的量各有不同,但秸秆露天焚烧量与粮食产量和秸秆产量变化趋势一致,其中稻谷秸秆露天焚烧量最多,达到粮食作物秸秆露天焚烧量的 40%。

2.3 1999—2008 年中国粮食作物秸秆露天焚烧排放 CO、CO₂ 量

根据 1999—2008 年中国各省、市和自治区粮食作物秸秆露天焚烧量,结合所收集的 CO 和 CO₂ 排放因子,估算出中国粮食作物秸秆露天焚烧释放 CO 和 CO₂ 的排放总量见表 4、表 5。1999—2008 年中国粮食作物秸秆露天焚烧排放的 CO 和 CO₂ 总量平均每年分别为 9.19×10^6 t 和 1.07×10^8 t,并且从 2003 年开始二者排放量随着粮食作物产量和秸秆量的增加而不断增加,其中稻谷秸秆露天焚烧排放的 CO 和 CO₂ 总量平均为 2.38×10^6 t 和 2.93×10^7 t,分别约占总排放量的 25.8%和 27.3%;小麦秸秆露天焚烧排放的 CO 和 CO₂ 总量平均为 2.64×10^6 t 和 2.91×10^7

t,分别约占总排放量的 28.7%和 27.2%;玉米秸秆露天焚烧排放的 CO 和 CO₂ 总量平均为 2.97×10^6 t 和 3.26×10^7 t,分别约占总排放量的 32.2%和 30.4%;豆类秸秆露天焚烧排放的 CO 和 CO₂ 总量平均为 0.42×10^6 t 和 0.69×10^7 t,分别约占总排放量的 4.5%和 6.4%。

2.4 1999—2008 年中国粮食作物秸秆露天焚烧释放的碳量

根据粮食作物秸秆露天焚烧释放 CO、CO₂ 的量估算其碳释放量见表 6,可以看到 1999—2008 年中国粮食作物秸秆露天焚烧释放的总碳量平均每年为 3.32×10^7 t,其中 稻谷秸秆露天焚烧释放的总碳量平均为 9.88×10^6 t,约占总排放量的 29.8% 小麦秸秆露天焚烧释放的总碳量平均为 9.93×10^6 t,约占总排放量的 29.9% 玉米秸秆露天焚烧释放的总碳量平均为 11.14×10^6 t,约占总排放量的 33.6% 豆类秸秆露天焚烧释放的总碳量平均为 2.22×10^6 t,约占总排放量的 6.7%。

表 3 1999—2008 年中国粮食作物秸秆露天焚烧量 (10^6 t)

Table 3 National estimated amounts from grain crop residue by burning in field (10^6 t)

作物	1999 年	2000 年	2001 年	2002 年	2003 年	2004 年	2005 年	2006 年	2007 年	2008 年
稻谷	44.60	42.10	39.78	38.89	35.72	39.93	40.13	40.73	41.48	42.80
小麦	23.21	20.16	18.94	18.06	17.52	18.62	19.78	21.29	22.52	24.54
玉米	26.78	21.78	23.41	24.83	23.53	26.51	28.25	29.79	30.93	47.59
豆类	4.15	4.47	4.55	4.96	4.84	5.02	4.77	4.69	3.62	7.92
合计	98.74	88.51	86.68	86.74	81.61	90.08	92.93	96.50	98.56	122.85

表 4 1999—2008 年中国粮食作物秸秆露天焚烧排放 CO 量 (10^3 t)

Table 4 Total estimated of CO pollutants from grain crop residue burned in field (10^3 t)

作物	1999 年	2000 年	2001 年	2002 年	2003 年	2004 年	2005 年	2006 年	2007 年	2008 年
稻谷	2 863.37	2 702.71	2 554.09	2 496.70	2 292.91	2 563.28	2 576.27	2 614.61	2 663.15	2 747.83
小麦	3 277.53	2 846.67	2 674.42	2 549.42	2 473.99	2 629.29	2 792.26	3 006.32	3 180.09	3 465.27
玉米	3 071.94	2 498.23	2 685.49	2 848.55	2 698.78	3 041.04	3 240.23	3 417.41	3 548.03	5 458.51
豆类	381.62	411.18	418.25	456.33	445.29	461.87	438.97	431.70	332.88	728.67
合计	9 594.47	8 458.78	8 332.25	8 351.00	7 910.96	8 695.48	9 047.74	9 470.03	9 724.16	12 400.28

表 5 1999—2008 年中国粮食作物秸秆露天焚烧排放 CO₂ 量 (10^3 t)

Table 5 Total estimated of CO₂ pollutants from grain crop residue burned in field (10^3 t)

作物	1999 年	2000 年	2001 年	2002 年	2003 年	2004 年	2005 年	2006 年	2007 年	2008 年
稻谷	35 292.65	33 312.32	31 480.60	30 773.25	28 261.37	31 593.81	31 753.98	32 226.45	32 824.76	33 868.46
小麦	36 161.93	31 408.10	29 507.64	28 128.45	27 296.24	29 009.75	30 807.75	33 169.62	35 086.87	38 233.33
玉米	33 786.03	27 476.15	29 535.69	31 329.08	29 681.83	33 446.10	35 636.92	37 585.51	39 022.19	60 034.07
豆类	6 284.30	6 771.07	6 887.44	7 514.54	7 332.72	7 605.78	7 228.73	7 108.92	5 481.69	11 999.31
合计	111 524.91	98 967.64	97 411.37	97 745.32	92 572.16	101 655.44	105 427.38	110 090.50	112 415.51	144 135.17

表6 1999—2008年中国粮食作物秸秆露天焚烧释放的碳量(10^3)Table 6 Total estimated of carbon from grain crop residue burned in field (10^3)

作物	1999年	2000年	2001年	2002年	2003年	2004年	2005年	2006年	2007年	2008年
稻谷	10 852.43	10 243.48	9 680.23	9 462.72	8 690.32	9 715.04	9 764.29	9 909.58	10 093.56	10 414.49
小麦	11 267.00	9 785.85	9 193.72	8 764.00	8 504.71	9 038.59	9 598.80	10 334.68	10 932.04	11 912.39
玉米	10 530.92	8 564.16	9 206.11	9 765.10	9 251.66	10 424.96	11 107.83	11 715.20	12 163.00	18 712.29
豆类	1 877.45	2 022.88	2 057.64	2 244.99	2 190.67	2 272.25	2 159.60	2 123.81	1 637.67	3 584.83
合计	34 527.80	30 616.37	30 137.70	30 236.82	28 637.37	31 450.85	32 630.52	34 083.27	34 826.27	44 624.00

3 讨论

中国是一个发展中国家,人口众多,耕地面积相对较少,粮食需求与经济高速发展是中国目前以至今后几十年都需要克服的困难。因此,国家积极扶持农业生产,将粮食生产作为经济发展的头等任务。但在粮食生产增长的同时,农作物秸秆产量也同步增长,目前中国秸秆资源数量巨大,本研究发​​现每年仅粮食作物产生的秸秆就高达约 4.9×10^8 t, 其中玉米秸秆产量稳步增加,到 2008 年已达到 2.3×10^8 t,占到粮食作物秸秆总产量的 40%。这些结果与曹国良^[4]、韩鲁佳^[8]和张鹤丰等^[10,15]关于我国农作物秸秆产量的研究结果一致。

近年来,随着中国现代农业的飞速发展和人们生活水平的提高,大量农作物秸秆被随意堆放和焚烧,造成了资源的巨大浪费和环境污染,已经成为严重的环境和社会问题。本文对中国粮食作物秸秆露天焚烧量以及其排放 CO 、 CO_2 和释放碳量进行了估算,结果发现中国粮食作物每年秸秆露天焚烧量平均为 0.94×10^8 t,约占粮食作物秸秆总量的 19%。Streets^[16]研究认为中国秸秆露天焚烧比例为 17%,王书肖等^[17]发现中国农村平均秸秆露天焚烧比例为 18.59%,Yan 等^[18]论文计算出我国秸秆露天焚烧比例为 19.4%,Zhang 等^[10]认为我国的秸秆露天焚烧比例为 22.3%,这些研究中关于中国秸秆露天焚烧量的论述与作者结果相近。中国粮食作物秸秆露天焚烧排放 CO 、 CO_2 的量分别为 9.19×10^6 t 和 1.07×10^8 t,这一结果与张鹤丰^[10,15]的相关研究结果相近。同时本文根据粮食产量、谷草比结合相关地区的发展条件和排放因子推算出中国粮食作物秸秆露天焚烧释放的碳量,结果发现每年平均释放碳量达到 3.32×10^7 t,根据每吨标煤释放 CO_2 量^[19],可以推算出中国粮食作物秸秆露天焚烧释放碳量相当于 4.95×10^7 t 标煤释放碳量。

4 结论

本文根据 1999—2008 年的国家统计数据 and 谷草

比估算了中国粮食作物秸秆量,再结合各省市秸秆露天焚烧比例和秸秆燃烧排放因子估算了中国粮食作物秸秆排放的 CO 、 CO_2 和总碳量。结果发现:

(1) 每年仅粮食作物产生的秸秆就高达 4.9×10^8 t, 其中玉米秸秆产量最高,2008 年已达到 2.3×10^8 t。

(2) 中国每年有约 0.94×10^8 t 粮食作物秸秆被露天焚烧,约占粮食作物秸秆总量的 19%,这些粮食作物秸秆露天焚烧排放到大气中的 CO 、 CO_2 的量每年分别达到 9.19×10^6 t 和 1.07×10^8 t。

(3) 每年释放的总碳量平均为 3.32×10^7 t,稻谷秸秆露天焚烧释放的碳量平均为 9.88×10^6 t、小麦为 9.93×10^6 t、玉米为 11.14×10^6 t、豆类为 2.22×10^6 t。

参考文献:

- [1] 郭广芬, 张称意, 徐影. 气候变化对陆地生态系统土壤有机碳储量变化的影响[J]. 生态学杂志, 2006, 25 (4): 435-442.
GUO Guang-fen, ZHANG Cheng-yi, XU Ying. Effects of climate change on soil organic carbon storage in terrestrial ecosystem [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2006, 25 (4): 435-442.
- [2] 郑建初, 芮雯雯, 冯金侠, 等. 南方水田土壤有机碳动态研究的重要意义及其前沿领域[J]. 农业环境科学学报, 2006, 25 (增刊): 334-338.
ZHENG Jian-chu, RUI Wen-yi, FENG Jin-xia, et al. Research significances and advances in soil organic carbon dynamics in paddy field of South-China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2006, 25 (Supp): 334-338.
- [3] Andreae, M. O. Biomass burning: its history, use and distribution and its impact on environmental quality and global climate [M]//Levine, J. S. (Ed), *Global Biomass Burning*, vol. 1. MIT Press, Massachusetts, 1991: 3-21.
- [4] 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 Xiao-ye, WANG Dan, et al. Inventory of emissions of pollutants from open burning crop residue[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2005, 24 (4): 800-804.
- [5] 刘留辉, 邢世和, 高承芳, 等. 国内外土壤碳储量研究进展和存在问题及展望[J]. 土壤通报, 2009, 40 (3): 697-701.
LIU Liu-hui, XING Shi-he, GAO Cheng-fang, et al. The research progress, problems and prospects of soil carbon storage at home and

- aboard[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2009, 40 (3) 697-701.
- [6] Seinfeld J H, Pandis S N. Atmospheric chemistry and physics From air pollution to climate change[M]. New York: Wiley/Interscience, 1997.
- [7] 国家统计局数据库[DB/OL]/http://http://219.235.129.58/reportYearQuery.do?id=1400.
- [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 Lu-jia, YAN Qiao-juan, LIU Xiang-yang, et al. Straw resources and their utilization in China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2002, 18 (3) 87-91.
- [9] 陈新锋. 对我国农村焚烧秸秆污染及其治理的经济学分析 [J]. *中国农村经济*, 2001, 2 47-52.
- CHEN Xin-feng. The economic analysis of pollution and control of burning straw[J]. *Chinese Rural Economy*, 2001, 2 47-52.
- [10] Zhang H F, Ye X N, Cheng T, et al. A laboratory study of agricultural crop residue combustion in China Emission factor and emission inventory[J]. *Atmospheric Environment*, 2008, 42 8432-8441.
- [11] Andreae M O, Merlet P. Emission of trace gases and aerosols from biomass burning[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2001, 15 955-966.
- [12] Sahai S, Sharma C, Singh D P, et al. A study for development of emission factors for trace gases and carbonaceous particulate species from in situ burning of wheat straw in agricultural fields in India[J]. *Atmospheric Environment*, 2007, 41 9173-9186.
- [13] Zhang J, Smith K R, Ma Y, et al. Greenhouse gases and other air borne pollutants from household stoves in China A database for emission factors[J]. *Atmospheric Environment*, 2000, 34 4537-4549.
- [14] Li X H, Wang S X, Duan L, et al. Particulate and trace gas emissions from open burning of wheat straw and corn stover in China [J]. *Environmental Science & Technology*, 2007, 41: 6052-6058.
- [15] 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 He-feng. A laboratory study on emission characteristics of gaseous and particulate pollutants emitted from agricultural crop residue burning in China[D]. Shanghai: Fudan University, 2009.
- [16] 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) 1099-1119.
- [17] 王书肖, 张楚莹. 中国秸秆露天焚烧大气污染物排放时空分布[J]. *中国科技论文在线*, 2008, 3 (5) 329-333.
- WANG Shu-xiao, ZHANG Chu-ying. Spatial and temporal distribution of air pollutant emissions from open burning of crop residues in China [J]. *Sciencepaper Online*, 2008, 3 (5) 329-333.
- [18] Yan X, Ohara T, Akimoto H. Bottom-up estimate of biomass burning in mainland China[J]. *Atmospheric Environment*, 2006, 40 5262-5273.
- [19] 夏德建, 任玉珑, 史乐峰. 中国煤电能源链的生命周期碳排放系数计量[J]. *统计研究*, 2010, 27 (8) 82-89.
- XIA De-jian REN Yu-long, SHI Le-feng. Measurement of life-cycle carbon equivalent emissions of coal-energy chain[J]. *Statistical Research*, 2010, 27 (8) 82-89.

致谢 本论文英文摘要及表题英译文得到南京农业大学朱毅勇副教授的修正, 在此表示衷心感谢。