

基于发热量的中国煤炭碳含量研究

郜二刚^{1,2}, 李社红^{1,*}, 吴代赦¹, 胡军³, 王滨滨¹, 王明仕¹, 郑宝山¹

(1. 中国科学院地球化学研究所环境地球化学国家重点实验室, 贵阳 550002;
2. 中国科学院大学, 北京 100039; 3. 贵州省环境科学研究设计院, 贵阳 5500081)

摘要: 煤炭基于发热量的碳含量数据, 是计算煤炭的二氧化碳排放因子的基础。本研究对全国范围内采集的煤炭样品进行工业分析、元素分析及发热量分析, 统计分析得出我国基于发热量的煤炭碳含量。对所得结果按地区分煤种分别阐述, 并与国外煤炭碳含量数据进行了对比。结果表明, 我国褐煤、次烟煤、烟煤、无烟煤的碳含量平均值分别为 27.21 ± 0.35 kg/GJ、 26.57 ± 0.14 kg/GJ、 25.50 ± 0.03 kg/GJ、 26.77 ± 0.13 kg/GJ。我国无烟煤的碳含量与 IPCC 缺省值相当, 烟煤、褐煤的碳含量比 IPCC 缺省碳含量分别低 1.16% 和 1.41%, 次烟煤碳含量比 IPCC 缺省碳含量高 1.41%。

关键词: 煤炭; 碳含量; 碳排放因子

中图分类号: TQ533.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-9250(2014)01-0095-07

1992年《联合国气候变化框架条约》通过, 确定了在温室气体减排方面“共同但有区别的责任”^[1]。自1995年以来, 《公约》缔约方大会每年召开一次, 形成了一系列重要的文件。《京都议定书》第一承诺期于2012年年末到期, 由于不同国家的国情不同, 目前尚未形成具有法律约束力的决议划定各国的碳减排义务。但是发达国家利用其经济优势, 已经制定了旨在推动强制性减排的政策和措施。例如欧盟在能源、钢铁领域的“碳管制”机制, 以及在各国争议不断的情况下, 将全球航空业纳入欧盟碳排放交易体系的尝试^[2]。从国内国际形势来看, 中国积极主动地参与节能减排, 建设低碳社会, 应对气候变化挑战, 是必然的选择^[3]。

对于节能减排的目标和方案的制定, 编制温室气体排放清单是其中首要的工作。由于煤炭在我国能源消费中所占的比重巨大, 煤炭的碳排放量对于全国总的碳排放量具有重要影响。政府间气候变化专门委员会(IPCC)给出了不同类型煤炭的缺省碳含量和碳排放因子, 以便缺乏本国煤炭碳排放因子的国家编制其温室气体排放清单^[4]。本文根据全国范围内采集的煤炭样品的分析结果, 得出中国

实际的煤炭碳含量及其置信区间。根据本文数据可以进而推算中国煤炭的碳排放因子。

1 样品的采集与处理

1.1 样品的采集

我国以含煤建造的共性特征为转移, 可划分为六个不同的聚煤区: 东北内蒙古晚侏罗世聚煤区、西北早中侏罗世聚煤区、华北石炭二叠纪聚煤区、滇藏中生代聚煤区、华南晚二叠世聚煤区、台湾第三纪聚煤区^[5]。

我国煤炭资源按照成煤时代来说, 侏罗纪占成煤总量的 39.80%, 二叠纪 45.58% (北方 38.04%, 南方 7.54%), 白垩纪 11.91%, 第三纪 2.27%, 三叠纪 0.44%。从地域分布上来说, 煤炭资源分布相对较集中。以煤炭资源总量而言, 东北占 7.06%, 华北 50.49%, 华南 6.79%, 西北 35.52%, 滇藏 0.14%^[6]。

本研究的样品采集, 主要根据 1996 年全国各省煤炭产量, 以每 400 万吨产量取一个样的频度, 将取样点分配到各个地区。样品的采集主要集中在 2000 年 7 月到 2002 年 7 月。在全国 26 个主要产

收稿日期: 2013-01-25; 改回日期: 2013-04-18

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(40133010)、中国科学院战略性先导科技专项-应对气候变化的碳收支认证及相关问题(XDA05010101)资助。

第一作者简介: 郜二刚(1986-), 男, 硕士研究生, 环境工程专业。E-mail: gaoerganga@163.com.

* 通讯作者: E-mail: lisheshong@vip.gyig.ac.cn.

表 1 采样点的分布

Table 1 Distribution of the sampling sites

省份	无烟煤	烟煤	次烟煤	褐煤	合计
安徽	1	10			11
北京	1				1
重庆	2	5			7
福建	3				3
甘肃		3	2		5
广东	2				2
广西	3		2		5
贵州	7	9			16
河北	1	13	1		15
黑龙江		1			10
河南	7	18	2		27
湖北	2	1			3
湖南	6	4			10
内蒙古		7	7	2	16
江苏		6			6
江西	2	5			7
吉林		3	1	1	5
辽宁		8	1		9
宁夏	1	2	1		4
青海			1		1
陕西	2	9			11
山东	1	15	3		19
山西	18	69	1		88
四川		11			11
新疆		5	1		6
云南		5		2	7
合计	59	218	23	5	305

准分别划分。结果发现,中国分类中只有 8 个贫煤样品在美国 ASTM 标准下划分为无烟煤,其余中高阶煤炭样品的分类是一致的。可以认为,至少对于中高阶煤炭,由于不同分类标准导致的煤炭碳含量的差异是很小的。

煤炭的碳含量如果以 kg/kg 为单位,即以质量为基准,受到煤炭的元素组成、灰分等的影响,不同煤炭碳含量的变动会非常大。因此国际上通常用单位热量的碳含量(kg/GJ)进行表示,即提供 1 GJ 的能量的煤炭所释放的碳的质量。本文中所提到的碳含量如无特别说明,均是指“基于发热量的碳含量或单位热值碳含量”,而煤炭中碳元素的质量百分比称为碳的百分含量。煤炭的干基低位发热量用 $Q_{net,d}$ (单位 MJ/kg)表示,干基碳百分含量用

C_d (单位 kg/kg)表示。则碳含量(用 C_n 表示,单位为 kg/GJ)的计算公式为:

$$C_n = \frac{1}{Q_{net,d}} * C_d * 1000 \quad (1)$$

在煤炭的燃烧过程中,有一小部分碳没有被氧化。这个比例通常很小,尤其是在效率高的锅炉中。假设煤中的碳完全被氧化,因此 CO_2 的释放量只取决于煤中的碳含量,则煤炭的 CO_2 排放因子为:

$$E_{CO_2} = C_n * \frac{44}{12} \quad (2)$$

即碳含量数据乘以 44/12,得到完全燃烧条件下的煤炭 CO_2 排放因子。

2 结果与讨论

2.1 不同类型煤炭碳含量比较

统计结果显示(表 2),我国褐煤、次烟煤、烟煤、无烟煤的碳含量平均值分别为 27.21 ± 0.35 kg/GJ、 26.57 ± 0.14 kg/GJ、 25.50 ± 0.03 kg/GJ、 26.77 ± 0.13 kg/GJ。这里数据采用“均值±标准误差”的形式,并计算了不同置信系数下碳含量的置信区间和不确定度。不确定度的意义是:假设所取样品是研究对象的无偏代表,采用这一均值作为该煤种或该地区煤炭的含碳量,在所要求的置信度下,可能产生的最大误差。无烟煤的数据按照华南和华北两个聚煤区分别统计以便能够通过正态假设检验。由表 2 可以看出,置信系数为 0.95 时,华北地区无烟煤的置信区间为 $26.27 \sim 26.91$ kg/GJ,均值的不确定度为 $\pm 1.20\%$ 。本次研究中褐煤、次烟煤与烟煤之间碳含量的差异在 0.05 的检验水平上是显著的。但除与烟煤之外,无烟煤与褐煤、次烟煤之间的碳含量差异无法通过水平为 0.05 的双样本 t 检验。由图 2 也可以看出,无烟煤的碳含量介于褐煤和次烟煤之间,三者十分接近。华北地区无烟煤的碳含量均值(26.59 kg/GJ)似乎要略低于华南地区无烟煤的均值(26.98 kg/GJ),但这个差异在统计意义上是不显著的。

由图 2 可以看出,随着煤化程度提高,煤炭的碳含量逐渐降低,烟煤的碳含量降到最低,到无烟煤阶段,碳含量又有升高。造成这种变化的原因是:煤炭燃烧时发出的热量主要取决于煤炭中 C、H 和 O 的含量。每千克 C 产生 33.72 MJ 热量,煤炭中 $60\% \sim 80\%$ (干基)的成分是碳,因此 C 是主要的产

表2 不同类型煤炭的碳含量

煤种	均值	标准差	样品数	置信区间及不确定度		
				kg/GJ		
				$\alpha=0.1$	$\alpha=0.05$	$\alpha=0.01$
华北无烟煤	26.59	0.89	32	26.32~26.86±1.00%	26.27~26.91±1.20%	26.16~27.02±1.62%
华南无烟煤	26.98	1.14	27	26.60~27.36±1.39%	26.53~27.43±1.68%	26.37~27.59±2.26%
无烟煤	26.77	1.02	59	—	—	—
烟煤	25.50	0.47	218	25.45~25.55±0.20%	25.44~25.56±0.24%	25.42~25.58±0.32%
次烟煤	26.57	0.67	23	26.33~26.81±0.91%	26.28~26.86±1.10%	26.17~26.97±1.49%
褐煤	27.21	0.77	5	26.47~27.95±2.71%	26.25~28.17±3.53%	25.62~28.80±5.86%

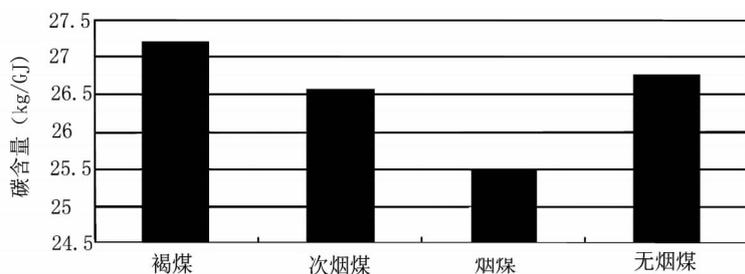


图2 不同类型煤炭碳含量的比较

Fig. 2 Comparison of carbon contents in coals of different ranks

表3 国内外不同类型煤炭碳含量的比较

国家	无烟煤	烟煤	次烟煤	褐煤
IPCC ^[4]	26.8	25.8	26.2	27.6
欧盟 ^[14]	26.9	25.9	26.5	30.3
美国 ^[15]	26.7	24.1	24.8	25.4
中国	26.77±0.13	25.50±0.03	26.57±0.14	27.21±0.35

热物质。煤炭中H的含量在5%以下,但每千克H产生144.2MJ热量,远远高于C的发热量,但是H和O结合形成蒸汽态水导致H的热值有些降低。煤炭中的O和C结合在一起,导致C被部分氧化,因此O的含量越高,煤炭发热量越低。随着煤化程度的增加,C的百分含量均匀增加;H在中等煤化程度以前大致不变,进入无烟煤阶段后明显减少;氧的百分含量随煤化程度的增加而逐渐降低。因此在中等煤化程度以前,随着煤化程度的增加,发热量迅速增加,超过了C百分含量的增加率,煤炭的碳含量由褐煤到烟煤是下降的。到了高煤化程度,由于氢含量的下降明显,而C的增加和O的减小幅度很小,造成煤炭的发热量略有降低,因此无烟煤的碳含量又上升,超过了烟煤的碳含量。

2.2 我国煤炭碳含量与国外的比较

我国与IPCC、欧盟和美国给出的不同类型煤炭的碳含量平均值见表3。可以看到,总体上,我国不同类型煤炭的碳含量与IPCC给出的缺省碳含量值

差别不大。

我国无烟煤的碳平均含量为 26.77 ± 0.13 kg/GJ,与IPCC的默认值、欧盟的碳含量值(26.9 kg/GJ)和美国的碳含量值(26.7 kg/GJ)大体相当。经过水平为0.05的单样本t检验,我国无烟煤碳含量与IPCC缺省碳含量值无显著性差异。

我国烟煤的碳含量变化范围在24.02 kg/GJ到26.99 kg/GJ,均值为 25.50 ± 0.03 kg/GJ。在0.05的检验水平上,我国烟煤的碳含量与IPCC烟煤缺省碳含量之间的差异显著,比IPCC缺省碳含量低1.16%。我国烟煤的碳含量同样比欧盟的低,比美国略高。

我国次烟煤的碳含量变化范围是25.17 kg/GJ到27.74 kg/GJ,均值为 26.57 ± 0.14 kg/GJ。在0.05的检验水平下,其与IPCC次烟煤缺省碳含量之间的差异显著,比IPCC给出的值高1.41%。我国次烟煤的碳含量比欧盟和美国的碳含量也要高。

我国褐煤的碳含量变化区间为26.34 kg/GJ到

28.45 kg/GJ, 均值为 27.21 ± 0.35 kg/GJ。比 IPCC 给出的褐煤缺省碳含量低 1.41%, 比欧盟给出的褐煤碳含量要低, 而比美国的要高一些。本次研究中褐煤碳含量与 IPCC 褐煤缺省碳含量之间的差异不显著。

2.3 我国煤炭碳含量的空间分布

各省煤炭碳含量见表 4。

就无烟煤而言, 陕西的无烟煤碳含量最低 (25.39 kg/GJ), 其次是山东 (26.03 kg/GJ), 宁夏无烟煤的碳含量最接近全国无烟煤碳含量的均值, 为 26.74 kg/GJ。北京出产的煤炭碳含量最高, 为 29.30 kg/GJ。不同省份之间无烟煤的变化幅度为 3.91 kg/GJ。

不同省份之间烟煤的碳含量变化幅度很小。烟煤碳含量最小的省份为湖南 (24.96 kg/GJ), 最大的为甘肃省 (26.02 kg/GJ)。不同省份之间烟煤变化幅度为 1.06 kg/GJ。

我国次烟煤的碳含量, 以山东为最低 (25.49 kg/GJ), 吉林次之 (25.97 kg/GJ)。新疆的次烟煤

碳含量最高 (27.74 kg/GJ)。不同省份之间次烟煤变化幅度为 2.25 kg/GJ。

本次研究的褐煤样品主要来自吉林、内蒙古和云南。吉林的褐煤碳含量为 26.34 kg/GJ, 稍低于 IPCC 给出的褐煤缺省碳含量 (27.6 kg/GJ)。云南褐煤的碳含量为 27.19 kg/GJ, 内蒙古褐煤的碳含量为 27.67 kg/GJ, 与 IPCC 默认值接近。

本次研究除了台湾第三纪聚煤区外, 样品涉及中国六大聚煤区中的五个。表 5 为东北、西北、华北、华南、滇藏五大聚煤区煤炭中碳含量的均值、标准差、范围, 以及碳含量置信度分别为 90%、95% 和 99% 的置信区间及相应的不确定度。滇藏聚煤区的煤炭储量不到 100 亿吨, 产量较少, 仅在四川盐源采了一个样。华北石炭二叠纪聚煤区, 为了数据能够通过正态假设检验, 按照煤种分别给出置信区间和不确定度。

由表 5 可以看到, 不同聚煤区煤炭中碳含量的排列由低到高为: 华北烟煤 < 滇藏 < 东北内蒙古 < 华南 < 西北 < 华北次烟煤 < 华北无烟煤。这里得

表 4 不同省份不同类型煤炭的碳含量

Table 4 The contents of carbon in coals of different ranks and from different provinces (kg/GJ)

省份	无烟煤	烟煤	次烟煤	褐煤	平均值
安徽	26.18	25.32 ± 0.12			25.40 ± 0.14
北京	29.30				29.30
重庆	26.23 ± 0.01	25.16 ± 0.13			25.47 ± 0.22
福建	29.05 ± 0.47				29.05 ± 0.47
甘肃		26.02 ± 0.25	26.65 ± 0.12		26.27 ± 0.21
广东	27.25 ± 1.09				27.25 ± 1.09
广西	26.12 ± 0.09		26.46 ± 0.23		26.26 ± 0.12
贵州	26.43 ± 0.12	25.22 ± 0.19			25.75 ± 0.19
河北	27.83	25.44 ± 0.09	27.11		25.71 ± 0.20
黑龙江		25.37 ± 0.09			25.37 ± 0.09
河南	26.91 ± 0.38	25.49 ± 0.09	25.99 ± 0.31		25.89 ± 0.16
湖北	26.48 ± 0.42	25.1			26.03 ± 0.51
湖南	27.56 ± 0.50	24.96 ± 0.31			26.51 ± 0.52
内蒙古		25.95 ± 0.15	26.95 ± 0.19	27.67 ± 0.78	26.60 ± 0.20
江苏		25.20 ± 0.25			25.20 ± 0.25
江西	26.32 ± 0.17	25.72 ± 0.44			25.89 ± 0.32
吉林		25.49 ± 0.12	25.97	26.34	25.76 ± 0.19
辽宁		25.59 ± 0.18	26.14		25.65 ± 0.17
宁夏	26.74	25.33 ± 0.02	26.91		26.08 ± 0.43
青海			27.19		27.19
陕西	25.39 ± 0.31	25.26 ± 0.15			25.29 ± 0.13
山东	26.03	25.33 ± 0.11	25.49 ± 0.16		25.39 ± 0.10
山西	26.42 ± 0.13	25.64 ± 0.05	26.79		25.82 ± 0.06
四川		25.60 ± 0.18			25.60 ± 0.18
新疆		25.73 ± 0.19	27.74		26.06 ± 0.37
云南		25.34 ± 0.07		27.19 ± 0.01	25.87 ± 0.34
平均值	26.77 ± 0.13	25.50 ± 0.03	26.57 ± 0.14	27.21 ± 0.35	25.85 ± 0.05

表5 五大聚煤区煤中的碳含量

Table 5 The contents of carbon in coals from five coal-accumulation zones

kg/GJ

聚煤区	均值	标准差	样品数	置信区间及不确定度		
				$\alpha=0.1$	$\alpha=0.05$	$\alpha=0.01$
				东北内蒙古	25.96	0.83
西北	26.24	0.74	12	25.85~26.63±1.47%	25.77~26.72±1.80%	25.57~26.91±2.54%
华北无烟煤	26.59	0.89	32	26.32~26.86±1.00%	26.27~26.91±1.20%	26.16~27.02±1.62%
华北烟煤	25.53	0.43	149	25.47~25.59±0.23%	25.46~25.60±0.27%	25.44~25.62±0.36%
华北次烟煤	26.29	0.79	9	25.80~26.78±1.85%	25.69~26.89±2.30%	25.41~27.17±3.34%
华北	25.74	0.68	190	—	—	—
华南	26.05	1.17	71	25.81~26.27±0.89%	25.77~26.32±1.04%	25.67~26.41±1.41%
滇藏	25.57	—	1	—	—	—

表6 碳含量均值之间差异的显著性检验结果

Table 6 The significance test of the mean difference

聚煤区	东北内蒙古	西北	华北无烟煤	华北烟煤	华北次烟煤	华南	滇藏
东北内蒙古			显著	显著			
西北				显著			
华北无烟煤	显著			显著	显著	显著	
华北烟煤	显著	显著	显著		显著	显著	
华北次烟煤			显著	显著			
华南			显著	显著			
滇藏							

注: $\alpha=0.05$

出的顺序在统计意义上能否获到肯定,需要参照表6给出的显著性检验结果。煤炭碳含量均值之间的差异,只有在统计意义上显著时,两者之间的比较才有说服力。表6给出了在0.05的检验水平下,关于碳含量均值差异的双样本t检验结果。

3 结论

通过前面的统计分析,大致可以得到以下结论:

1)我国无烟煤的碳含量均值为 26.8 ± 0.133 kg/GJ。烟煤的碳含量均值为 25.5 ± 0.032 kg/GJ,其95%的置信区间为 $25.44 \sim 25.56$ kg/GJ。次烟煤的碳含量均值为 26.6 ± 0.141 kg/GJ,95%的置信区间为 $26.28 \sim 26.86$ kg/GJ。褐煤的碳含量均值为 27.2 ± 0.346 kg/GJ,95%的置信区间为 26.25

~ 28.17 kg/GJ。不同地区煤炭的碳含量略有差别,以无烟煤的变化幅度最大,为 3.9 kg/GJ,而不同地区烟煤的碳含量变化很小,为 1.0 kg/GJ。次烟煤和褐煤的碳含量变化幅度介于两者之间。

2)由褐煤到次烟煤再到烟煤,随着煤化程度的提高,煤炭碳含量逐渐降低。但进入无烟煤阶段,碳含量又增加,超过烟煤和次烟煤的碳含量。

3)我国无烟煤、烟煤和褐煤的碳含量介于欧盟和美国煤炭碳含量之间,次烟煤的碳含量略高于欧盟、美国的数值。与IPCC给出的煤炭缺省碳含量比较,烟煤和褐煤的碳含量略低于IPCC的缺省值,无烟煤的碳含量和IPCC大致相同,次烟煤碳含量略高于IPCC缺省碳含量,但总体差别都不大。

参 考 文 献

- [1] 联合国. 联合国气候变化框架公约[OL]. http://unfccc.int/key_documents/the_convention/items/2853.php. 1992.
- [2] 王伟光,郑国光,罗勇,等. 应对气候变化报告2011[M]. 北京:社会科学文献出版社,2011:58-73.
- [3] 易鹏. 低碳真相[M]. 北京:中信出版社,2010:260-264.
- [4] IPCC. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, V2Energy_1_Ch1_Introduction[R]. <http://www.ipcc.ch>.
- [5] 王煦曾,朱榔如,王杰. 中国煤田的形成与分布[M]. 北京:科学出版社,1992:69-71.

- [6] 陈鹏. 中国煤炭性质、分类和利用[M]. 北京:化学工业出版社, 2011:35—41.
- [7] GB475-1996. 商品煤样采取方法[S]. 北京:中国标准出版社, 1996.
- [8] ASTM Standard D3173-00; Test Method for Moisture in the Analysis Sample of Coal and Coke[S]. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2000, DOI: 10.1520/D3173-00, www.astm.org.
- [9] ASTM Standard ASTM D3174-00; Test Method for Ash in the Analysis Sample of Coal and Coke from Coal[S]. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2000, DOI: 10.1520/D3174-00, www.astm.org.
- [10] ASTM Standard ASTM D3302-02; Test Method for Total Moisture in Coal[S]. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2002, DOI: 10.1520/D3302_D3302M-02, www.astm.org.
- [11] ASTM Standard ASTM D2015-00; Standard Test Method for Gross Calorific Value of Coal and Coke by the Adiabatic Bomb Calorimeter [S]. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2000, DOI: 10.1520/D2015-00, www.astm.org.
- [12] ASTM Standard ASTM D3176-89(2002); Standard Practice for Ultimate Analysis of Coal and Coke[S]. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2002, DOI: 10.1520/D3176-89R02, www.astm.org.
- [13] ASTM Standard ASTM D388-99e1; Standard Classification of Coals by Rank[S]. ASTM International, West Conshohocken, PA, 1999, DOI: 10.1520/D0388-99E01, www.astm.org.
- [14] Anke Herold. Comparison of CO₂ emission factors for fuels used in Greenhouse Gas Inventories and consequences for monitoring and reporting under the EC emissions trading scheme[R]. ETC/ACC Technical Paper 2003, 10.
- [15] Hong B D, Slatick E R. Carbon Dioxide Emission Factors for Coal[R]. Energy Information Administration, Quarterly Coal Report, January-April 1994; 1—8.

The Average Carbon Content per Unit Energy in Chinese Coals

GAO Er-gang^{1,2}, LI She-hong¹, WU Dai-she¹, HU Jun³, WANG Bin-bin¹,
WANG Ming-shi¹, ZHENG Bao-shan¹

- (1. State Key Lab of Environmental Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China;
3. Guizhou Institute of Environmental Science and Designing, Guiyang 550081, China)

Abstract: The data of coals on carbon content per unit energy are needed when calculating the CO₂ emission factors of coals. In this study, 305 coal samples were collected from all over China, and analyzed by means of proximate analysis, gross calorific value analysis and ultimate analysis. The average carbon content per unit energy of Chinese coals on an energy basis was calculated according to these results. The average carbon content per unit energy of anthracite is close to the IPCC default value, which is 26.77 ± 0.13 kg/GJ. Those values of bitumite and lignite, which are 25.50 ± 0.03 kg/GJ and 27.21 ± 0.35 kg/GJ, respectively, are 1.16% and 1.41% lower than the IPCC default values, respectively. The carbon content per unit energy of sub-bituminous coal is 26.57 ± 0.14 kg/GJ, which is 1.41% higher than the IPCC default value.

Key words: coal; carbon content; CO₂ emission factor