

Co-Benefits Linkage between Climate Change and Air Quality of Wind-Farm Projects*

Zhixiao Ma^{1,2}, Wanxia Ren¹, Yong Geng¹, Bing Xue^{1#}, Xiaoman Yu¹, Ping Jiang³

¹Key Laboratory of Pollution Ecology and Environmental Engineering, Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, Shenyang

²Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing

³Institute of Advanced Studies, United Nations University, Yokohama, Japan

Email: {renwanxia, gengyong, #xuebing}@iae.ac.cn

Received: Mar. 22nd, 2012; revised: May 21st, 2012; accepted: May 30th, 2012

Abstract: In China, the fast-growing consumption of energy leads to a great amount of greenhouse gas emission and air pollutants emissions. Although many measures have been proposed by the local governments to mitigate GHG emission and improve air quality, the lacking economic resources limited the local government to implement all the measures that control both emissions in developing countries. The way of co-benefits can efficiently apply resources to tackle multiple environmental issues. In this study, the co-benefits of wind farm projects were assessed and quantified under the consideration of installed generation capacity in China. The results showed that wind farm projects can reduce 8854.70×10^4 t of CO₂, 41.43×10^4 t of SO₂, 31.31×10^4 t of NO_x, and 4.14×10^4 t of PM₁₀, which benefits 118.22 billion RMB from CO₂ and air pollutants mitigation.

Keywords: Climate Change; Co-Benefits; Air Quality; Wind Farm Projects

风电项目在应对气候变化与改善大气质量中的协同效益分析*

马志孝^{1,2}, 任婉侠¹, 耿涌¹, 薛冰^{1#}, 于晓曼¹, 蒋平³

¹中国科学院沈阳应用生态研究所污染生态与环境工程重点实验室, 沈阳

²中国科学院研究生院, 北京

³联合国大学高等研究所, 横滨, 日本

Email: {renwanxia, gengyong, #xuebing}@iae.ac.cn

收稿日期: 2012年3月22日; 修回日期: 2012年5月21日; 录用日期: 2012年5月30日

摘要: 中国能源消费快速增长, 导致温室气体和大气污染物大量排放。对于发展中国家, 由于地方政府资源有限, 难以采用全部控制措施来应对气候变化和改善空气质量。利用协同控制措施可以有效利用经济资源, 解决更多的环境问题。本研究定量分析全国风电在应对气候变化与改善大气环境质量方面的协同效益。结果表明, 按风电装机容量计算, 全国风电项目“十一五”期间减排 CO₂ 为 8854.70 万吨, SO₂ 为 41.43 万吨, NO_x 为 31.31 万吨, PM₁₀ 为 4.14 万吨; 减排 CO₂ 和大气污染物(SO₂, NO_x, PM₁₀)共收益 1182.16 亿元。

关键词: 应对气候变化; 协同效益; 空气质量; 风电项目

1. 引言

全球应对气候变化的研究已经成为热点^[1-3]。

*资助信息: 国际合作“Urban Co-Benefits Research”项目; 国家自然科学基金(41101126, 71033004); 中国科学院“百人计划”(08YBR111SS)。

#通讯作者。

IPCC 第四次评估报告指出, 全球变暖很可能与温室气体排放有关^[4]。发展中国家如何应对气候变化特别受到国际关注, 例如中国 CO₂ 排放量在过去的短短几十年中有着快速地增长。化石燃料的燃烧不仅排放大量温室气体, 同时也排放大气污染物^[5]。随着我国污

染物减排形势的日益严峻,采用协同控制措施实现多种污染物控制目标逐渐成为一种趋势^[6]。协同效应包括三个视角:第一个视角是在减排温室气体排放的同时减少地区大气污染物的排放;第二个是视角是在控制地区大气污染物排放的同时减少温室气体排放;第三个视角是综合协同效应视角,即同时减排温室气体和地区大气污染物^[7]。这意味着应对气候变化与改善大气质量有着不可忽视的某种联系。对于发展中国家,由于地方政府资源有限,难以采用全部控制措施来应对气候变化和改善空气质量^[8]。风力发电作为一种协同控制措施可以使地方政府利用有限的资源,解决多种环境问题,并且获得经济上收益。已有的研究成果多是政策情景模拟、行业技术措施以及政策工程的协同效应的效益研究。本文通过定量计算地方政府风电项目在减排温室气体和改善空气质量的成本与效益,分析了“十一五”期间风电项目的减排贡献量及其收益。

1.1. 国外风电发展现状

1980年,商业化风机的单机容量仅为30 kW,叶轮直径为15 m,而目前世界上最大风机的单机容量达到了6 MW,叶轮直径为127 m。随着风机技术的快速发展,单机容量增加了200倍,叶轮直径也增加了近10倍,目前国外已经开始设计开发8~10 MW的风机。从目前的发展来看,风机设备的大型化还没有出现技术限制,即单机容量将继续增大。在1990~2004年间,风机叶轮直径平均每年增加5 m,如果继续保持这种速度,到2020年估计叶轮直径达到200 m,相应的单机容量将达到15 MW~20 MW^[9,10]。

2011年,美国累计风电装机为46,919 MW,排在中国之后,增加就业85,000人。美国联邦政府的激励对风力发电有着重要的影响。可再生能源生产税抵免(PTC, 1美分/千瓦时)是联邦政府对风电的主要激励政策,同时对于市场的成长也起到关键作用。其他电力生产技术也有其各自的政府法律永久性支持,在2012年底,联邦生产抵税的政策将会终止。因此如果没有PTC或者其他类似激励政策,会阻碍风电发展。

德国累计风电装机为29,060 MW,位于世界第三位,增加就业100,000人。2010年,德国制造业在销售风力发电机组中获利大约49.7亿欧元。从全球市场

来看,德国风电市场占据4.1%的风电安装和4.9%的风电投资^[11]。

1.2. 国内风力发电现状

目前普遍认为中国的风能资源大约 20×10^8 kW。1980年第一次风能资源普查得出我国风能资源储量约为 1.6×10^8 kW的结论。1984年9月~1987年7月开展了第二次风能资源详查。1995年,国家气象局对外公布,我国陆上10 m高度处风能资源总储量为 32.26×10^8 kW,技术可开发资源量为 2.53×10^8 kW。2004年,进行了第三次陆上风能资源普查,结果为我国陆上风能资源总储量 43.5×10^8 kW,其中技术可开发量为 2.97×10^8 kW。近期中国气象局公布,我国风能开发潜力逾 25×10^8 kW,5~25 m水深线以内近海区域海平面以上50 m高度可装机 2×10^8 kW^[12]。

1996年~2011年,国家颁布多项法律法规,从税收,融资,贷款,补贴等方面都给予了优惠政策,有力地促进了我国风电行业的发展,并不断完善相应配套政策^[13]。1996年,《中华人民共和国电力法》鼓励和支持农村利用风能进行农村电源建设,增加农村电力供应。2006年,《可再生能源发电有关管理规定》指出5万kW以上的风力发电项目,由国家发展和改革委员会核准和审批。2007年,《可再生能源中长期发展规划》计划到2020年,全国风电总装机容量达到3000万千瓦。在广东、福建、江苏、山东、河北、内蒙古、辽宁和吉林等具备规模化开发条件的地区,进行集中连片开发,建成若干个总装机容量200万千瓦以上的风电大省。2009年,《国家发展改革委完善风力发电价格政策的通知》规定,按风能资源状况和工程建设条件,将全国分为四类风能资源区,相应制定风电标杆上网电价,四类资源区风电标杆电价水平分别为每千瓦时0.51元、0.54元、0.58元和0.61元。2010年,中国(不包括台湾地区)新增安装风电机组12,904台,装机容量18927.99 MW,累计安装风电机组34,485台,装机容量44733.29 MW^[14],见表1。

2. 方法学

2.1. 成本分析

成本是决定项目实施效果的关键因素。本文首先计算风电项目年净成本,即等于项目等价年成本与

Table 1. Wind power capacity in provinces during 11th five years plan, MW
表 1. “十一五”期间各省累计装机容量, MW

序号	区域	2010 累计	2005 累计	十一五
1	内蒙古	13858.01	165.74	13692.27
2	甘肃	4943.95	52.2	4891.75
3	河北	4921.5	108.25	4813.25
4	辽宁	4066.86	127.46	3939.4
5	吉林	2940.86	109.36	2831.5
6	山东	2637.8	83.85	2553.95
7	黑龙江	2370.05	57.35	2312.7
8	江苏	1467.75	0	1467.75
9	新疆	1363.56	181.41	1182.15
10	宁夏	1182.7	112.95	1069.75
11	山西	947.5	0	947.5
12	广东	888.78	140.54	748.24
13	福建	833.7	58.75	774.95
14	云南	430.5	0	430.5
15	浙江	298.17	34.15	264.02
16	上海	269.35	24.4	244.95
17	海南	256.7	8.7	248
18	陕西	177	0	177
19	北京	152.5	0	152.5
20	安徽	148.5	0	148.5
21	河南	121	0	121
22	天津	102.5	0	102.5
23	湖南	97.25	0	97.25
24	江西	84	0	84
25	湖北	69.75	0	69.75
26	重庆	46.75	0	46.75
27	贵州	42	0	42
28	青海	11	0	11
29	广西	2.5	0	2.5
30	香港	0.8	0.8	0.8
	总计	44733.29	1265.91	43467.38

来源：中国可再生能源风能专业委员会，2010 年风电装机容量统计。

能源年节省成本、项目年收入之和，公式如下：

$$G_{NAC} = Y_{EAC} + H_{AFCS} + J_{AR} \quad (1)$$

其中， G_{NAC} ：项目年净成本； Y_{EAC} ：项目等价年成本； H_{AFCS} ：年能源节省成本； J_{AR} ：项目年收入。

项目等价年成本是指目标项目运营期内，基于该期间现金流出现值的年金，公式如下：

$$Y_{EAC} = \frac{C_{Total} \times r}{1 - (1 + r)^{-n}} + C_{AMC} \quad (2)$$

其中， C_{Total} ：项目总投资(见表 2)； r ：折现率， $r = 0.05$ ； n ：项目经营期； C_{AMC} ：年运行成本。年运行成本包括经营期年均成本费用、年均缴纳销售税金附加和年均缴纳所得税；项目年收入包括年发电销售收入。由于各地区 49.5 MW 风电场项目年运行成本数据难以获得，因此各个风电场年运行成本数据均使用辽宁康平张强(49.5 MW)风电场工程项目申请报告所提供的数据(见表 3)。

Table 2. Total investment and on-grid power of 49.5 MW wind farms in China
表 2. 各地区 49.5 MW 风电场总投资与预计上网电量

序号	区域	投资, 万元	预计年上网电量, 万 kW·h
1	内蒙古	44215.52	11,187
2	甘肃	49900.00	11,640
3	河北	48448.00	11,385
4	辽宁	46364.00	11,040
5	吉林	45466.44	11,251
6	山东	59700.00	12,000
7	黑龙江	51079.74	11,469
8	江苏	51900.00	11,200
9	新疆	46996.00	11,143
10	宁夏	45144.00	13,950
11	山西	47000.00	9087
12	广东	51900.00	11,200
13	福建	47475.00	12,000
14	云南	40996.00	11,819
15	浙江	60000.00	10,000
16	上海	45,000.00	8835
17	海南	50005.42	10,659
18	陕西	44278.60	8646
19	北京	45000.00	8835
20	安徽	41900.00	10,756
21	河南	51900.00	11,200
22	天津	49000.00	10,677
23	湖南	44471.86	9272
24	江西	50000.00	10,200
25	湖北	56141.52	8697
26	重庆	64653.00	11,864
27	贵州	57900.00	9547
28	青海	36872.35	6920
29	广西	60000.00	9547.2
30	香港	45000.00	8835

来源：数据均来自互联网新闻。

Table 3. Wind farm project basic data
表 3. 项目基础数据

基础数据	
年均缴纳销售税金附加	29 万元
年均缴纳所得税	273 万元
经营期年均成本费用	4527 万元
经营期	20 年

来源：辽宁康平张强(49.5 MW)风电场工程项目申请报告。

项目年能源节省成本公式如下:

$$H_{AFCS} = W_{AFSM} \times P_C \quad (3)$$

其中, W_{AFSM} : 年能源节省量; P_C : 能源价格, 煤炭价格为 600 RMB/t。

项目年节省能源量公式如下:

$$W_{AFSM} = M_{AGP} \times I_{CE} \quad (4)$$

其中, M_{AGP} : 预计风电场年上网电量(见表 2); I_{CE} : 当地火电供电煤耗系数(见表 4), 以标准煤计。由于没有查到重庆市火电供电煤耗系数, 因此采用全国火电供电煤耗系数。

项目年收入公式如下:

$$J_{AR} = M_{AGP} \times P_E \quad (5)$$

其中, P_E : 风电标杆上网电价; 国家发改委对风力发电上网电价政策进行了完善。全国按风能资源状况和工程建设条件分为四类风能资源区, 相应制定风电标杆上网电价, 见表 5。

2.2. CO₂ 与大气污染物排放量估计

IPCC 2006 提供了计算温室气体排放的详细方法, 并成为国际上较为普遍接受的碳排放评估方法。本文 CO₂ 排放估算方法是利用《2006 IPCC 国家温室气体清单指南》和《省级温室气体编制清单指南》, 并通过辽宁省实际情况计算确定排放因子。煤炭 CO₂ 排放因子选自烟煤排放因子。CO₂ 温室气体排放计算方法如下:

$$E = EF \times \text{Fuel} \quad (6)$$

E : CO₂ 排放量; EF : 排放因子; Fuel : 能源种类。

大气污染物(SO₂, NO_x, PM₁₀)排放估算方法与 CO₂ 排放估算方法相同, 排放因子采用国内学者研究成果^[15], 排放因子见表 6。

2.3. 成本效益

本文计算项目成本效益如下:

$$F_{CB} = G_{NAC} / M_{AER} \quad (7)$$

其中, F_{CB} : 成本效益; G_{NAC} : 项目年净成本; M_{AER} : 项目每年减排大气污染物或 CO₂ 量。当成本效益为负值时, 表示项目每年减排单位重量的大气污染物或者 CO₂ 能够收益 X 元。当成本效益值为正数, 表示项目

Table 4. Coal consumption indicators for power generation in 2010
表 4. 2010 年各省供电煤耗系数

排名	地区	供电煤耗 g/kW·h	排名	地区	供电煤耗 g/kW·h
1	北京	282	15	西藏	332
2	浙江	312	16	山东	337
3	上海	316	17	云南	338
4	福建	316	18	河北	339
5	江苏	322	19	辽宁	339
6	安徽	323	20	陕西	339
7	广东	325	21	湖南	343
8	河南	326	22	贵州	343
9	海南	326	23	山西	346
10	天津	327	24	内蒙古	347
11	江西	330	25	黑龙江	353
12	广西	330	26	四川	356
13	吉林	332	27	青海	362
14	湖北	332	28	新疆	421
a	甘肃	340	b	宁夏	350
c	贵州	344	d	重庆	333

来源: a 国家电力监管委员会甘肃省电力监管专员办公室; b 宁夏企业文化网; c 贵州能源网; d 国家平均供电煤耗; 其他来自电监会。

Table 5. Wind power benchmark prices
表 5. 风电标杆上网电价

分类	地区	电价
I 类资源区	内蒙古自治区除赤峰市、通辽市、兴安盟、呼伦贝尔市以外其他地区; 新疆维吾尔自治区乌鲁木齐市、伊犁哈萨克族自治州、昌吉回族自治州、克拉玛依市、石河子市。	0.51 元/度
II 类资源区	河北省张家口市、承德市; 内蒙古自治区赤峰市、通辽市、兴安盟、呼伦贝尔市; 甘肃省张掖市、嘉峪关市、酒泉市。	0.54 元/度
III 类资源区	吉林省白城市、松原市; 黑龙江省鸡西市、双鸭山市、七台河市、绥化市、伊春市, 大兴安岭地区; 甘肃省除张掖市、嘉峪关市、酒泉市以外其他地区; 新疆维吾尔自治区除乌鲁木齐市、伊犁哈萨克族自治州、昌吉回族自治州、克拉玛依市、石河子市以外其他地区; 宁夏回族自治区。	0.58 元/度
IV 类资源区	除 I 类、II 类、III 类资源区以外的其他地区。	0.61 元/度

来源: 四类风电标杆电价区正式划定。
<http://business.sohu.com/20090728/n265549687.shtml>

Table 6. CO₂ and air pollutants emission factors
表 6. CO₂ 与大气污染物排放因子

排放因子			
CO ₂ (t CO ₂ /t)	SO ₂ (g SO ₂ /kg)	NO _x (g NO _x /kg)	PM ₁₀ (g PM ₁₀ /kg)
1.8608	8.46	6.58	0.870

每年减排单位重量的大气污染物或者 CO₂ 需要付出 Y 元。

3. 结果

3.1. 风电项目成本效益

本文不予考虑项目运行时期非发电释放的温室气体和大气污染物。通过上文所述的方法，计算得出各个省风电项目单位减排量和成本效益(见表 7, 8)。

3.2. 协同效益分析

由于政府政策大力支持，风力发电项目建设成本不断下降，以及煤炭价格环比上涨，致使风电项目在减排温室气体和大气污染物中盈利。本文引用各省累计装机容量是指风电场现场已经完成吊装工程的风电机组容量，与风电并网装机容量及验收运行装机

Table 7. The emission mitigation per unit of wind farms
表 7. 各个省风电项目单位减排量

序号	区域	CO ₂ , t/MW	SO ₂ , kg/MW	NO _x , kg/MW	PM ₁₀ , kg/MW
1	内蒙古	2043	9486	7224	955
2	甘肃	2083	9671	7365	974
3	河北	2031	9431	7182	950
4	辽宁	1970	9145	6965	921
5	吉林	1966	9128	6951	919
6	山东	2128	9882	7526	995
7	黑龙江	2131	9893	7534	996
8	江苏	1922	8922	6795	898
9	新疆	2469	11,463	8730	1154
10	宁夏	2570	11,931	9086	1201
11	山西	1655	7683	5851	774
12	广东	1916	8895	6774	896
13	福建	1996	9266	7057	933
14	云南	2102	9762	7434	983
15	浙江	1642	7624	5806	768
16	上海	1311	6088	4637	613
17	海南	1829	8491	6467	855
18	陕西	1543	7162	5455	721
19	北京	1311	6088	4637	613
20	安徽	1828	8489	6465	855
21	河南	1922	8922	6795	898
22	天津	1837	8531	6497	859
23	湖南	1674	7771	5918	783
24	江西	1771	8225	6264	828
25	湖北	1520	7056	5373	710
26	重庆	2079	9654	7352	972
27	贵州	1728	8025	6112	808
28	青海	1318	6121	4662	616
29	广西	1658	7699	5863	775
30	香港	1311	6088	4637	613

Table 8. Cost-benefits of wind farm projects
表 8. 项目成本效益

序号	区域	CO ₂ , 元/t	SO ₂ , 元/kg	NO _x , 元/kg	PM ₁₀ , 元/kg
1	内蒙古	-321.59	-69.26	-90.94	-687.84
2	甘肃	-378.81	-81.58	-107.12	-810.21
3	河北	-331.82	-71.46	-93.84	-709.72
4	辽宁	-154.19	-33.21	-43.61	-329.80
5	吉林	-395.53	-85.19	-111.86	-845.99
6	山东	-356.95	-76.88	-100.94	-763.46
7	黑龙江	-359.16	-77.35	-101.57	-768.19
8	江苏	-375.16	-80.80	-106.09	-802.41
9	新疆	-301.65	-64.97	-85.30	-645.17
10	宁夏	-503.47	-108.43	-142.38	-1076.85
11	山西	-274.30	-59.08	-77.57	-586.68
12	广东	-375.32	-80.83	-106.14	-802.75
13	福建	-458.55	-98.76	-129.67	-980.76
14	云南	-490.98	-105.74	-138.85	-1050.14
15	浙江	-214.10	-46.11	-60.55	-457.94
16	上海	-262.73	-56.58	-74.30	-561.94
17	海南	-358.17	-77.14	-101.29	-766.07
18	陕西	-264.17	-56.89	-74.70	-565.01
19	北京	-262.73	-56.58	-74.30	-561.94
20	安徽	-436.58	-94.03	-123.46	-933.78
21	河南	-375.16	-80.80	-106.09	-802.41
22	天津	-368.08	-79.27	-104.09	-787.27
23	湖南	-312.95	-67.40	-88.50	-669.36
24	江西	-327.45	-70.52	-92.60	-700.36
25	湖北	-140.87	-30.34	-39.84	-301.30
26	重庆	-311.09	-67.00	-87.97	-665.36
27	贵州	-206.92	-44.56	-58.52	-442.56
28	青海	-183.99	-39.63	-52.03	-393.52
29	广西	-181.50	-39.09	-51.33	-388.20
30	香港	-262.73	-56.58	-74.30	-561.94

容量不同。通过计算得出“十一五期间”各省风电项目在减排 CO₂ 和大气污染物估算量及效益(见表 9, 10)。

如果各个省风电全部并网，全国“十一五期间”风电项目减排 CO₂ 为 8854.70 万 t，SO₂ 为 41.11 万 t，NO_x 为 31.31 万 t 以及 PM₁₀ 为 4.14 万 t；同时，减排 CO₂，SO₂，NO_x 以及 PM₁₀ 可以获得收益，共计 1182.16 亿元。2010 年全国二氧化硫排放总量 2185.1 万 t，与 2005 年相比，SO₂ 排放总量分别下降 14.29%，减排 312 万 t。全国风电项目对 SO₂ 减排量贡献率为 13%。各个省“十一五期间”风电减排大气污染物贡献率，例如：2005 年辽宁省 SO₂ 排放量为 119.70 万 t；2010 年辽宁省 SO₂ 排放量为 102.22 万 t，SO₂ 减排量为 17.8 万 t。

Table 9. Wind farm projects mitigating CO₂ and air pollutants amount during 10th five years in provinces (autonomous regions, municipalities)

表 9. “十一五期间”各省(自治区、直辖市)风电减排 CO₂ 和大气污染物估算量

序号	区域	CO ₂ 减排量万 t	SO ₂ 减排量 t	NO _x 减排量 t	PM ₁₀ 减排量 t
1	内蒙古	2797.26	129881.25	98914.19	13078.32
2	甘肃	1018.85	47306.85	36027.67	4763.54
3	河北	977.65	45394.06	34570.94	4570.93
4	辽宁	775.91	36026.89	27437.14	3627.71
5	吉林	556.62	25844.83	19682.75	2602.43
6	山东	543.55	25237.80	19220.45	2541.31
7	黑龙江	492.76	22879.55	17424.47	2303.84
8	江苏	282.03	13095.30	9973.04	1318.62
9	新疆	291.86	13551.42	10320.41	1364.55
10	宁夏	274.88	12762.99	9719.96	1285.16
11	山西	156.78	7279.54	5543.91	733.01
12	广东	143.34	6655.34	5068.53	670.16
13	福建	154.65	7180.75	5468.67	723.06
14	云南	90.51	4202.41	3200.45	423.16
15	浙江	43.35	2012.89	1532.96	202.69
16	上海	32.12	1491.29	1135.72	150.16
17	海南	45.35	2105.78	1603.71	212.04
18	陕西	27.30	1267.70	965.45	127.65
19	北京	20.00	928.44	707.08	93.49
20	安徽	27.15	1260.69	960.11	126.94
21	河南	23.25	1079.57	822.17	108.71
22	天津	18.83	874.48	665.98	88.06
23	湖南	16.28	755.76	575.57	76.10
24	江西	14.88	690.91	526.18	69.57
25	湖北	10.60	492.13	374.79	49.55
26	重庆	9.72	451.32	343.71	45.45
27	贵州	7.26	337.06	256.69	33.94
28	青海	1.45	67.33	51.28	6.78
29	广西	0.41	19.25	14.66	1.94
30	香港	0.10	4.87	3.71	0.49
总计		8854.70	411138.43	313112.37	41399.36

Table10. Benefits from wind farm projects mitigating CO₂ emission and air pollutants emissions during 10th five years in provinces (autonomous regions, municipalities)

表 10. 十一五期间各省(自治区、直辖市)风电减排 CO₂ 和大气污染物效益

序号	省(自治区、直辖市)	减排 CO ₂ 效益, 亿元	减排 SO ₂ 效益, 亿元	减排 NO _x 效益, 亿元	减排 PM ₁₀ 效益, 亿元
1	内蒙古	-89.96	-89.96	-89.96	-89.96
2	甘肃	-38.59	-38.59	-38.59	-38.59
3	河北	-32.44	-32.44	-32.44	-32.44
4	辽宁	-11.96	-11.96	-11.96	-11.96
5	吉林	-22.02	-22.02	-22.02	-22.02
6	山东	-19.40	-19.40	-19.40	-19.40
7	黑龙江	-17.70	-17.70	-17.70	-17.70
8	江苏	-10.58	-10.58	-10.58	-10.58
9	新疆	-8.80	-8.80	-8.80	-8.80
10	宁夏	-13.84	-13.84	-13.84	-13.84
11	山西	-4.30	-4.30	-4.30	-4.30
12	广东	-5.38	-5.38	-5.38	-5.38
13	福建	-7.09	-7.09	-7.09	-7.09
14	云南	-4.44	-4.44	-4.44	-4.44
15	浙江	-0.93	-0.93	-0.93	-0.93
16	上海	-0.84	-0.84	-0.84	-0.84
17	海南	-1.62	-1.62	-1.62	-1.62
18	陕西	-0.72	-0.72	-0.72	-0.72
19	北京	-0.53	-0.53	-0.53	-0.53
20	安徽	-1.19	-1.19	-1.19	-1.19
21	河南	-0.87	-0.87	-0.87	-0.87
22	天津	-0.69	-0.69	-0.69	-0.69
23	湖南	-0.51	-0.51	-0.51	-0.51
24	江西	-0.49	-0.49	-0.49	-0.49
25	湖北	-0.15	-0.15	-0.15	-0.15
26	重庆	-0.30	-0.30	-0.30	-0.30
27	贵州	-0.15	-0.15	-0.15	-0.15
28	青海	-0.03	-0.03	-0.03	-0.03
29	广西	-0.01	-0.01	-0.01	-0.01
30	香港	0.00	-0.003	-0.003	-0.003
总计		-295.54	-295.54	-295.54	-295.54

风电项目对 SO₂ 减排量贡献率为 20%。吉林到“十一五”末期, SO₂ 排放量控制在 35.5 万 t, 五年共削减 16.06 万 t, 风电项目对 SO₂ 减排量贡献率为 16%;“十一五”期间江苏省 SO₂ 累计减排 54.19 万吨, 风电项目对 SO₂ 减排量贡献率为 2.4%。

4. 讨论

协同效益正被越来越多的应用到应对气候变化

和改善地区大气污染物。采用协同效益控制措施可以有效利用资源, 特别是经济资源, 来解决更多的环境问题。同时, 在政策措施制定过程中, 利用协同效益思想可以提出更为全面的系统政策方案, 避免政策实际执行时, 产生负面影响。本文只研究了风电项目在应对气候变化与改善大气质量中的协同效益分析。在以后的研究中, 将会考虑风电项目减排大气污染物与人体健康的协同效益。

5. 致谢

本工作得到国际合作“Urban Co-Benefits Research”项目；国家自然科学基金(41101126, 71033004)；中国科学院“百人计划”(08YBR111SS)的联合资助，在此深表谢意！同时也真诚感谢几位匿名审稿人的有益建议。

参考文献 (References)

- [1] M. R. Allen, D. J. Frame, C. Huntingford, C. D. Jones, J. A. Lowe, M. Meinshausen and N. Meinshausen. Warming caused by cumulative carbon emissions towards the trillionth tonne. *Nature*, 2009, 458: 1163-1166.
- [2] H. D. Matthews, N. P. Gillett, P. A. Stott and K. Zickfeld. The proportionality of global warming to cumulative carbon emissions. *Nature*, 2009, 459: 829-832.
- [3] M. Meinshausen, N. Meinshausen, W. Hare, S. C. B. Raper, K. Frieler, R. Knutti, D. J. Frame and M. R. Allen. Greenhouse-gas emission targets for limiting global warming to 2°C. *Nature*, 2009, 458: 1158-1162.
- [4] B. Metz, O. Davidson, P. Bosch, R. Dave and L. Meyer. Climate change 2007: Mitigation. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Summary for Policymakers, 2007.
- [5] J. Bollen, B. van der Zwaan, C. Brink and H. Eerens. Local air pollution and global climate change: A combined cost-benefit analysis. *Resource and Energy Economics*, 2009, 31(3): 161-181.
- [6] 毛显强, 曾校, 胡涛, 邢有凯, 刘胜强. 技术减排措施协同控制效应评价研究[J]. *中国人口资源与环境*, 2011, 21(12): 1-7.
- [7] J. Bollen, C. Brink, H. Eerens and T. Manders. Co-benefits of climate policy, Netherlands. Environmental Assessment Agency, 2009.
- [8] G. Mckinley, M. Zuk, M. Hojer, M. Avalos, I. Gonzalez, R. Iniestra, I. Laguna, M. A. Martinez, P. Osnaya, L. M. Reynales, R. Valdes and J. Martinez. Quantification of local and global benefits from air pollution control in Mexico City. *Environmental Science & Technology*, 2005, 39(7): 1954-1961.
- [9] 施跃文, 高辉, 陈钟. 国外特大型风力发电机组技术综述[J]. *电网技术*, 2008, 32(18): 87-91.
- [10] European Wind Energy Association. Wind energy targets for 2020 and 2030, 2011. http://www.ewea.org/fileadmin/ewea_documents/documents/publications/reports/Pure_Power_III.pdf
- [11] Global Wind Energy Council. Germany: Wind market picking up, 2011. [http://www.gwec.net/index.php?id=77&L=0&tx_ttnews\[backPid\]=76&tx_ttnews\[pointer\]=1&tx_ttnews\[tt_news\]=305&cHash=491087408f](http://www.gwec.net/index.php?id=77&L=0&tx_ttnews[backPid]=76&tx_ttnews[pointer]=1&tx_ttnews[tt_news]=305&cHash=491087408f)
- [12] 朱成章. 关于中国风能资源储量的质疑[J]. *中外能源*, 2010, 4: 34-38.
- [13] 王敏. 风电市场投资分析[J]. *经济界*, 2011, 2: 82-90.
- [14] 中国可再生能源风能专业委员会. 2010年风电装机容量统计, 2011.
- [15] B. Zhao, J. Z. Ma. Development of an air pollutant emission inventory for Tianjin. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2008, 28: 368-375.