

我国京津冀和西北五省（自治区）大气环境容量研究

郝吉明^{1,2}, 许嘉钰^{1,2}, 吴剑¹, 马乔¹

(1. 清华大学环境学院, 北京 100084; 2. 国家环境保护大气复合污染来源与控制重点实验室, 北京 100084)

摘要: 本研究以京津冀和西北五省（自治区）为例, 研究处于不同经济发展阶段的区域大气环境容量。利用 GEOS-Chem 全球大气化学传输模式模拟计算大气污染源排放所带来的环境空气中污染物的浓度, 以京津冀和西北五省（自治区）的网格平均地面 PM_{2.5} 年均浓度达到环境空气质量标准（GB3095—2012）为约束条件, 确定出京津冀和西北五省（自治区）SO₂、NO_x、一次 PM_{2.5}、VOCs 和 NH₃ 五种大气污染物环境容量。结果表明, 2013 年京津冀和西北五省（自治区）SO₂、NO_x、一次 PM_{2.5}、VOCs 和 NH₃ 五种大气污染物的排放量均超出大气环境容量。

关键词: PM_{2.5}; 空气质量; 环境容量

中图分类号: X51 **文献标识码:** A

A Study of the Atmospheric Environmental Capacity of Jingjinji and of the Five Northwestern Provinces and Autonomous Regions in China

Hao Jiming^{1,2}, Xu Jiayu^{1,2}, Wu Jian¹, Ma Qiao¹

(1. School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. State Environmental Protection Key Laboratory of Sources and Control of Air Pollution Complex, Beijing 100084, China)

Abstract: This article discusses the regional atmospheric environmental capacity of areas in different stages of economic development, and presents the Beijing-Tianjin-Hebei (Jingjinji) region and the five northwestern provinces and autonomous regions in China as examples. The atmospheric environmental capacities for sulfur dioxide (SO₂), nitrogen oxides (NO_x), fine particulate matter (PM_{2.5}), volatile organic compounds (VOCs), and ammonia (NH₃) emissions were calculated for the various provinces with the constraint condition of the annual average ambient PM_{2.5} concentration standard (GB3095—2012), using a global chemical transport model from the Goddard Earth Observing System (GEOS-Chem). The results indicate that the total emissions of SO₂, NO_x, primary PM_{2.5}, VOCs and NH₃ emitted from the Jingjinji and the five northwestern provinces and autonomous regions all exceed the environmental capacity.

Keywords: PM_{2.5}; air quality; environmental capacity

收稿日期: 2017-06-20; 修回日期: 2017-07-10

通讯作者: 许嘉钰, 清华大学环境学院, 高级工程师, 研究方向为能源利用与大气污染模拟及控制对策等; E-mail: jiayu-xu@tsinghua.edu.cn

资助项目: 中国工程院咨询项目“生态文明建设若干战略问题研究(二期)”(2015-ZD-16)

本刊网址: www.enginsci.cn

一、前言

我国巨大的能源消费规模和以煤炭为主的能源消费结构导致各种大气污染物大量排放，近年来全国各地多次发生大范围、长时间的雾霾天气，已成为社会关注的焦点。为加快解决目前严重的大气污染问题、切实改善环境空气质量，国务院于2013年9月发布实施《大气污染防治行动计划》。自《大气污染防治行动计划》实施以来，全国74座城市的PM_{2.5}年均浓度较2013年有所下降，但有7个省区的PM₁₀年均浓度不降反升，我国东部区域大气PM_{2.5}和O₃污染十分严重，全国和重点区域大气环境质量仍然面临巨大挑战。

大气环境容量是指一个区域在某种环境目标（如空气质量达标或酸沉降临界负荷）约束下的大气污染物最大允许排放量。实际研究时更关注的是“区域大气环境容量”，即在一定的气象条件及一定的污染源排放条件下，某一特定区域在满足该区域环境空气质量目标的前提下，单位时间所能允许的各类污染源向大气中排放的各类污染物的总量。影响大气环境容量的因素除了大气污染物的环境化学特征外，还有区域环境目标、区域地理和气象特征等。

大气环境容量在我国一直被作为支撑国家大气污染物总量控制和空气质量管理的依据。围绕不同环境目标下的大气环境容量，我国学者已开展了许多研究。我国2012年对《环境空气质量标准》进行修订，PM_{2.5}成为影响我国城市空气质量达标的首要污染物，环境空气中的PM_{2.5}标准限值相比SO₂、NO₂、PM₁₀等成为更严格的约束条件，因此，从我国空气质量管理的需要出发，亟需以PM_{2.5}达标为约束条件核算大气环境容量，为大气污染物减排提供科学依据[1]。研究京津冀及西北五省（自治区）的大气环境容量将为构建处于不同经济发展阶段的区域精准化治霾体系提供重要依据。

二、研究方法

（一）方法概述

本研究以2013年为基准年，2030年为目标年，利用GEOS-Chem全球大气化学传输模式模拟计算

大气污染源排放所带来的环境空气中污染物的浓度，以2030年京津冀和西北五省（自治区）的网格平均地面PM_{2.5}年均浓度达到环境空气质量标准（GB3095—2012）为约束条件，确定京津冀及西北五省（自治区）的SO₂、NO_x、一次PM_{2.5}、VOCs和NH₃五种大气污染物的环境容量，以此分析基准年的超载情况及减排需求。

（二）GEOS-Chem模型设置

1. 模拟时段

基准年为2013年全年，目标年为2030年全年，模拟时间间隔为3 h。

2. 模拟区域

模拟区域包括中国以及中国临近的其他亚洲地区和国家：东至日本，西到印度，北到西伯利亚，南到印度尼西亚。经纬度范围为70°E~150°E，11°S~55°N，网格分辨率为0.5°×0.667°[2]。

3. 排放清单

基准年和目标年中国境内的人为源排放为清华大学最新人为源排放清单[3]，其他采用GEOS-Chem默认的排放清单。

4. 气象年的选择

采用的GEOS-5气象场目前只更新至2012年，同时根据2010—2012年三年的气象数据模拟基准年2013年的排放对我国东部地区PM_{2.5}月均浓度的比对结果，东部地区2012年PM_{2.5}月均浓度与2010—2012年三年月均浓度的平均值最为接近为6.28 μg/m³，而2010年和2011年分别为25.94 μg/m³和-32.22 μg/m³。所以气象年选择为2012年。

（三）模型验证

利用GEOS-Chem模型测算大气环境容量时，需要对气象场、排放清单和浓度场进行验证。

由于GEOS-Chem模型采用的气象场为已同化的GEOS-5气象场，因此本研究不再对气象场进行验证。

1. 基准年排放清单比较与校验

本研究也将基准年排放清单与近年来其他排放清单研究结果进行了比较，如表1所示。文献[4~6]的排放清单都是采用自下而上的方法建立；文献[7]中2015年的排放数据是以2010年为基准年的未来预测数据。除我国环境保护部公布的排放数

据明显低于本研究采用的排放清单外, 本研究采用的排放清单均在上述研究的变化范围内。环境保护部排放数据较低的原因之一是没有将非道路交通源的排放包括在内。

2. 基准年 PM_{2.5} 模拟浓度验证

基准年地面 PM_{2.5} 浓度模拟值准确, 才能保证未来年模拟结果的可靠性。下文将对基准年 PM_{2.5} 模拟浓度验证进行论述。

三、主要结果与分析

(一) 未来年排放清单

大气污染与能源利用密切相关, 未来年主要大气污染物的排放量取决于能源消费量和大气污染控制技术对策。通常通过设置不同的能源消费情景

和大气污染物控制情景分析法确定未来年主要大气污染物的排放量。本研究依据文献 [8] 的研究成果, 只针对能够实现 2030 年空气质量目标的能源情景 (2030PC) 和污染控制情景 (2030PC2) 进行分析, 如表 2 和表 3 所示。

在能源情景中, 2030 年中国能源消费量较 2013 年上涨 7%; 煤炭仍然是能源结构中比例最大的部分, 但所占比例由 2013 年的 61% 降低至 2030 年的 44%; 可再生能源及核能, 所占比例由 2013 年的 8.3% 上升至 2030 年的 15.1%。在末端控制策略方面, 该清单为每个能源情景设计了两个末端排放控制策略, 末端控制技术的分布率主要依据相关政府公告和规划计算。污染控制情景是依据《大气污染防治行动计划》设定, 并假设控制措施逐渐加严到 2030 年, 在该情景中, 烟气脱硫装置 (FGD)

表 1 排放清单与其他近期研究的比较

研究项目	SO ₂	NO _x	PM ₁₀	PM _{2.5}	VOCs
本研究	23 150	25 638	16 521	12 155	23 366
环境保护部, 2014	20 439	22 273	—	—	—
文献 [4], 2016	—	28 300	—	—	—
文献 [5], 2016	23 014~26 884	28 002~28 817	—	—	—
文献 [6], 2016 (2012)	—	—	—	—	29 850
文献 [7], 2013 (2015)	26 792	27 511	15 599	11 419	—

注: 括号中的年份表示该研究建立的排放清单所在年份。

表 2 2030 年能源情景的关键参数

关键参数	2013 年	2030PC
GDP (以 2005 年不变价计算) / 万亿元	39.5	117.8
人口 / 亿	13.6	14.7
城镇化率 / %	53.7	63
发电量 / TW·h	5 398	8 000
燃煤发电比例 / %	66.4	41.3
粗钢产量 / Mt	779	570
水泥产量 / Mt	2 417	1 751
城市人均居住面积 / m ²	23	29
农村人均居住面积 / m ²	37	39
每千人机动车保有量 / 辆	93.6	325.2
可再生能源比重 / %	8.3	15.1

表 3 2030 年未来情景设置

能源情景	情景描述	污染控制情景	情景描述
2030PC	由于更节能的生活方式导致的能源需求增长减慢 (包括高能耗工业产品、建筑面积和住宅服务需求、机动车、发电量、供暖); 推广清洁和可再生能源, 提高能效利用	2030PC2	《大气污染防治行动计划》得到实施, 控制政策措施逐渐加严至 2030 年

在电厂和工业部门中大范围应用,新建的工业锅炉均要求安装低氮燃烧技术设备(LNB),静电除尘器(ESP)和高效除尘器(HED)将逐步替代低效率的湿式除尘器(WET)。对于民用部门,到2030年低硫煤使用率将达100%,更先进的煤炭和生物质炉灶也将广泛使用;对于交通部门,高排放车辆将被更快淘汰,到2030年所有车辆都达到目前欧洲最严格的排放标准[9]。

(二) 未来年大气 PM_{2.5} 浓度分析

以2012年为气象年,将2013年我国的人为源大气污染物排放清单更新为未来年的排放清单、

自然源及境外源排放清单保持不变,利用 GEOS-Chem 模拟京津冀和西北五省(自治区)地面 PM_{2.5} 浓度分布(见图1)。为了便于分析,除了未来年2030年 PM_{2.5} 浓度变化外,图1增加了各省市自治区2013年监测浓度和模拟浓度。2013年底只有74座城市有完整和连续的 PM_{2.5} 监测数据[10],因为这74座城市只包含西北五省(自治区)的省会城市,所以在图1中增加了2015年 PM_{2.5} 地面监测数据[11]。图1的横坐标从左到右按照纬度递增进行城市排序。

1. 地面 PM_{2.5} 浓度模拟值验证

以标准平均偏差、标准平均误差及相关性系数

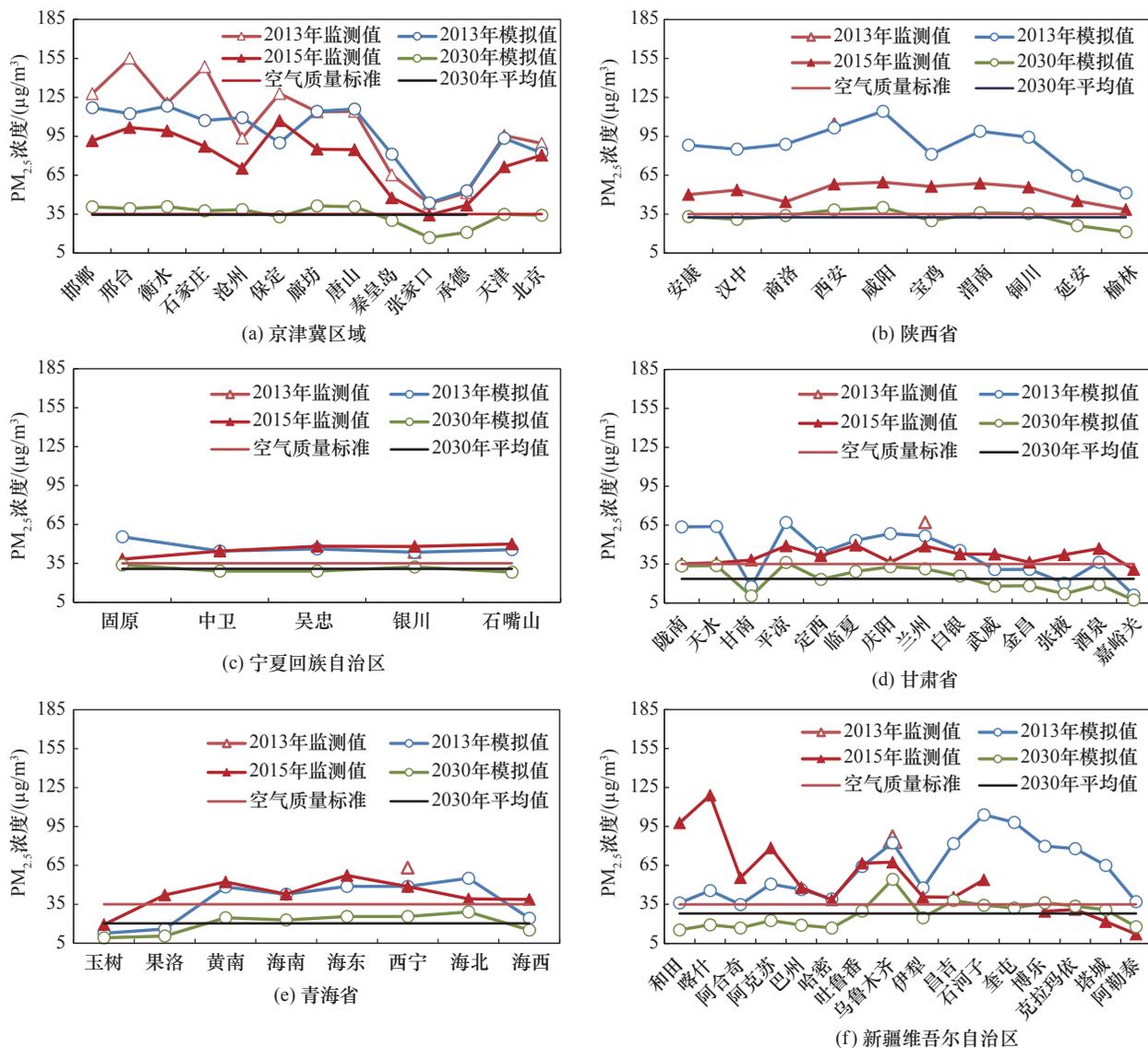


图1 京津冀及西北五省(自治区)地面 PM_{2.5} 浓度情况

R 三个参数对 GEOS-Chem 模型模拟的地表 $PM_{2.5}$ 浓度的能力进行校验。将京津冀 13 座城市和西北五省（自治区）省会城市地面 $PM_{2.5}$ 浓度监测数据与该城市中心所在 GEOS-Chem 模型网格的模拟浓度进行比较，结果见表 4。

由表 4 可见，京津冀的标准平均偏差为 -8.0% ，相关性系数 R 为 0.83；西北五省（自治区）的标准平均偏差为 -8.4% ，相关性系数 R 为 0.97，模型对地表 $PM_{2.5}$ 浓度评估略低，这是因为气象年为 2012 年，而普遍认为 2013 年的扩散条件优于 2012 年，所以导致模型对地表 $PM_{2.5}$ 浓度的模拟结果略低于监测值。京津冀和西北五省（自治区）合计 66 座城市，2015 年地面 $PM_{2.5}$ 监测值与基准年模拟值的相关性分析结果表明，虽然无论是气象场还是排放清单在 2013 年与 2015 年都存在差异，但是该相关性分析结果能够反映模拟结果的准确程度。结果表明，京津冀、陕西、青海的模拟结果好于甘肃、新疆和宁夏的模拟结果。

2. 未来年地面 $PM_{2.5}$ 浓度达标分析

图 1 表明，未来年京津冀、西北五省（自治区）的网格平均地面 $PM_{2.5}$ 年均浓度均能达到空气质量二级标准的 $35 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，但是，河北、西北五省（自治区）中 64 座地级市中合计有 15 座城市不能达

标。这就意味着，未来年排放清单的排放量是以京津冀和西北五省（自治区）的网格平均地面 $PM_{2.5}$ 年均浓度达到环境空气质量标准（GB3095—2012）为约束条件的大气环境容量，而不是以各地级市网格平均地面 $PM_{2.5}$ 年均浓度达到环境空气质量标准（GB3095—2012）为约束条件的大气环境容量，后者比前者小，尚需进一步研究才能确定后者的具体数值。

（三）大气环境容量分析

1. 大气环境容量

未来年排放清单的排放量是以京津冀和西北五省（自治区）的网格平均地面 $PM_{2.5}$ 年均浓度达到环境空气质量标准（GB3095—2012）为约束条件的大气环境容量， SO_2 、 NO_x 、一次 $PM_{2.5}$ 、VOCs、 NH_3 的环境容量如表 5 所示。

2. 大气环境容量超载率

通过基准年 2013 年的大气污染物排放量与其环境容量的比值，衡量大气环境超载的结果。由表 6 可知，西北五省（自治区）总体超载与京津冀基本相当。一次 $PM_{2.5}$ 和 NO_x 的超载状况比其他几种污染物更为严重，超载率为 $158\% \sim 400\%$ ；若使大气环境不超载，各地区相对于 2013 年的 SO_2 、

表 4 基准年地面 $PM_{2.5}$ 浓度模拟值校验结果

项目	京津冀	陕西	宁夏	甘肃	青海	新疆
标准平均偏差（与 2013 年相比）	-8.0%			-8.4%		
标准平均误差（与 2013 年相比）	13.4%			8.2%		
相关性系数 R （与 2013 年相比）	0.83			0.97		
相关性系数 R （与 2015 年相比）	0.80	0.85	-0.85	0.32	0.68	-0.20

表 5 主要大气污染物环境容量

地区	SO_2	NO_x	一次 $PM_{2.5}$	VOCs	NH_3
北京	5	7	2	24	40
天津	12	12	4	23	21
河北	44	55	23	85	565
京津冀	61	74	29	132	626
陕西	32	23	9	29	268
甘肃	16	21	8	16	234
青海	3	5	2	4	80
宁夏	12	12	4	5	40
新疆	31	33	12	23	294
西北五省（自治区）	94	94	35	77	916

表6 基准年主要大气污染物超载情况

地区	SO ₂	NO _x	一次 PM _{2.5}	VOCs	NH ₃	%
北京	240	257	300	146	148	
天津	200	283	275	139	213	
河北	227	275	378	174	169	
京津冀	223	274	359	163	170	
陕西	228	291	400	190	150	
甘肃	175	176	275	169	107	
青海	200	240	300	150	100	
宁夏	175	158	225	180	100	
新疆	300	258	233	165	136	
西北五省（自治区）	235	234	289	175	128	

NO_x、一次 PM_{2.5}、VOCs 的排放量削减比例应在 30%~75%，NH₃ 的排放量最大削减比例要达到 53%。

四、结语

以京津冀和西北五省（自治区）的网格平均地面 PM_{2.5} 年均浓度达到环境空气质量标准（GB3095—2012）为约束条件，京津冀 SO₂、NO_x、一次 PM_{2.5}、VOCs 和 NH₃ 五种大气污染物环境容量分别为 609 kt、745 kt、295 kt、1322 kt 和 6260 kt；西北五省（自治区）五种大气污染物环境容量分别为 926 kt、947 kt、349 kt、758 kt 和 9160 kt；然而该环境容量对应的京津冀和西北五省（自治区）中 66 座地级市的 PM_{2.5} 年均浓度达标率为 76.6%，100% 达标率对应的大气环境容量应小于该容量。

2013 年，京津冀地区 SO₂、NO_x、一次 PM_{2.5}、VOCs 和 NH₃ 五种大气污染物的排放量分别是其大气环境容量的 2.23 倍、2.74 倍、3.59 倍、1.63 倍和 1.70 倍；西北五省（自治区）五种大气污染物排放量分别是其大气环境容量的 2.28 倍、2.27 倍、2.81 倍、1.73 倍和 1.28 倍。2013 年，京津冀和西北五省（自治区）大气环境容量超载情况基本相同，所以在新时期“一带一路”战略实施过程中必须关注西部干旱区大气环境容量的约束条件。若使大气环境容量不超载，相对于 2013 年，京津冀五种大气污染物削减比例分别为 55%、64%、72%、39%、41%；西北五省（自治区）五种大气污染物削减比例分别为 56%、56%、64%、42%、22%。

利用空气质量模型确定大气环境容量的不确定性取决于空气质量模型、气象场、排放清单、空气质量标准值等诸多因素。本研究利用 GEOS-Chem 模型及清华大学编制的 2013 年人为源排放清单，发现甘肃、新疆和宁夏的地面 PM_{2.5} 浓度模拟值与监测值负相关或相关性低。因此，本研究确定甘肃、新疆和宁夏的大气环境容量的不确定性高于京津冀、陕西和青海，尚需深入研究。

参考文献

- [1] 薛文博, 付飞, 王金南, 等. 基于全国城市 PM_{2.5} 达标约束的大气环境容量模拟 [J]. 中国环境科学, 2014, 34(10): 2490–2496.
Xue W B, Fu F, Wan J N, et al. Modeling study on atmospheric environmental capacity of major pollutants constrained by PM_{2.5} compliance of Chinese cities [J]. China Environmental Science, 2014, 34(10): 2490–2496.
- [2] Chen D, Wang Y X, McElroy M B, et al. Regional CO pollution in China simulated by high-resolution nested-grid GEOS-Chem model [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2009, 9(11): 3825–3839.
- [3] Ma Q, Cai S, Wang S, et al. Impacts of coal burning on ambient PM_{2.5} pollution in China [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2017, 17(7): 4477–4491.
- [4] Liu F, Zhang Q, Zheng B, et al. Recent reduction in NO_x emissions over China: synthesis of satellite observations and emission inventories [J]. Environmental Research Letters, 2016, 11(11): 114002.
- [5] Xia Y, Zhao Y, Nielsen C P. Benefits of China's efforts in gaseous pollutant control indicated by the bottom-up emissions and satellite observations 2000–2014 [J]. Atmospheric Environment, 2016, 136: 43–53.
- [6] Wu R, Bo Y, Li J, et al. Method to establish the emission inventory of anthropogenic volatile organic compounds in China and its application in the period 2008–2012 [J]. Atmospheric Environment, 2016, 127: 244–254.
- [7] Zhao B, Wang S, Wang J, et al. Impact of national NO_x and SO₂

- control policies on particulate matter pollution in China [J]. *Atmospheric Environment*, 2013a, 77: 453–463.
- [8] Zhao B, Wang S X, Liu H, et al. NO_x emissions in China: historical trends and future perspectives [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2013, 13(19): 9869–9897.
- [9] Wang S X, Zhao B, Cai S Y, et al. Emission trends and mitigation options for air pollutants in East Asia [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2014, 14(13): 6571–6603.
- [10] 国际环保组织: 绿色和平. 2013 年度中国 74 座城市 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度排名 [EB/OL]. (2014-02-27) [2017-04-09]. <http://www.greenpeace.org.cn/PM25-ranking>.
- International Organization for Environmental Protection: Greenpeace. $\text{PM}_{2.5}$ ranking of 74 cities in China, 2013 [EB/OL]. (2014-02-27) [2017-04-09]. <http://www.greenpeace.org.cn/PM25-ranking>.
- [11] 国际环保组织: 绿色和平. 2015 年度中国 366 座城市 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度排名 [EB/OL]. (2016-01-20) [2017-04-15]. <http://www.greenpeace.org.cn/pm25-city-ranking-2015>.
- International Organization for Environmental Protection: Greenpeace. $\text{PM}_{2.5}$ ranking of 366 cities in China, 2015 [EB/OL]. (2016-01-20) [2017-04-15]. <http://www.greenpeace.org.cn/pm25-city-ranking-2015>.