

河北省“十四五”燃煤电厂主要大气污染物减排潜力分析

代玉

华北电力大学环境科学与工程学院, 北京

收稿日期: 2024年2月21日; 录用日期: 2024年3月7日; 发布日期: 2024年4月15日

摘要

中国广泛的经济增长导致严重的空气污染事件显著增多, 尤其是在主要城市地区, 燃煤电厂是一个特别重要的排放类别。探索合适的大气污染治理策略, 同时保持电力行业的可持续发展, 对改善环境质量和公众健康具有重要意义。本研究以2020年河北省81台燃煤机组装机清单为例, 在研究燃煤电厂主要大气污染物排放状况的基础上, 综合考虑了其技术政策要求和措施, 对“十四五”期间燃煤电厂的新增排放量进行了预测。为了更深入地探究减排潜力, 本研究设计了三个减排情景, 分别是基于淘汰落后机组情景、超低排放情景以及技术可行情景。结果表明: 总排放量分别减少39.5% (SO₂)、52.9% (NO_x)、27.8% (PM₁₀)和24.5% (PM_{2.5})。通过这些情景分析, 我们量化了“十四五”期间的减排潜力, 并评估了燃煤电厂在该时期的减排空间, 进一步为区域大气污染物控制提供思路和方法。

关键词

河北省, 燃煤电厂, 减排, “十四五”, 情景分析

Analysis of Air Pollutant Emission Reduction Potential of Coal-Fired Power Plants in Hebei Province during the 14th Five-Year Plan Period

Yu Dai

College of Environmental Science and Engineering, North China Electric Power University, Beijing

Received: Feb. 21st, 2024; accepted: Mar. 7th, 2024; published: Apr. 15th, 2024

Abstract

China's rapid economic growth has resulted in increasingly severe air pollution incidents, particularly in major urban areas where coal-fired power plants constitute a significant emission source. It is of paramount importance to explore appropriate strategies for air pollution control while ensuring the sustainable development of the power industry, aiming at improving environmental quality and public health. Taking into consideration the technical policy requirements and measures of the thermal power industry, this study predicts the new emissions from the thermal power sector during the "14th Five-Year Plan" period by examining the main air pollutant emissions from 81 coal-fired units installed in Hebei Province in 2020. To delve deeper into exploring emission reduction potential, three scenarios were designed including phasing out outdated units, implementing ultra-low emission standards, and adopting energy-saving technologies. The results demonstrate reductions of 39.5% (SO₂), 52.9% (NO_x), 27.8% (PM₁₀), and 24.5% (PM_{2.5}) in total emissions respectively. Through analyzing these scenarios, we quantify the emission reduction potential during the "14th Five-Year Plan" period and evaluate opportunities for reducing emissions from coal-fired power plants within this timeframe, thereby providing insights and methodologies for regional air pollutant control.

Keywords

Hebei Province, Coal-Fired Power Plants, Emission Control, 14th Five-Year Plan, Scenario Analysis

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

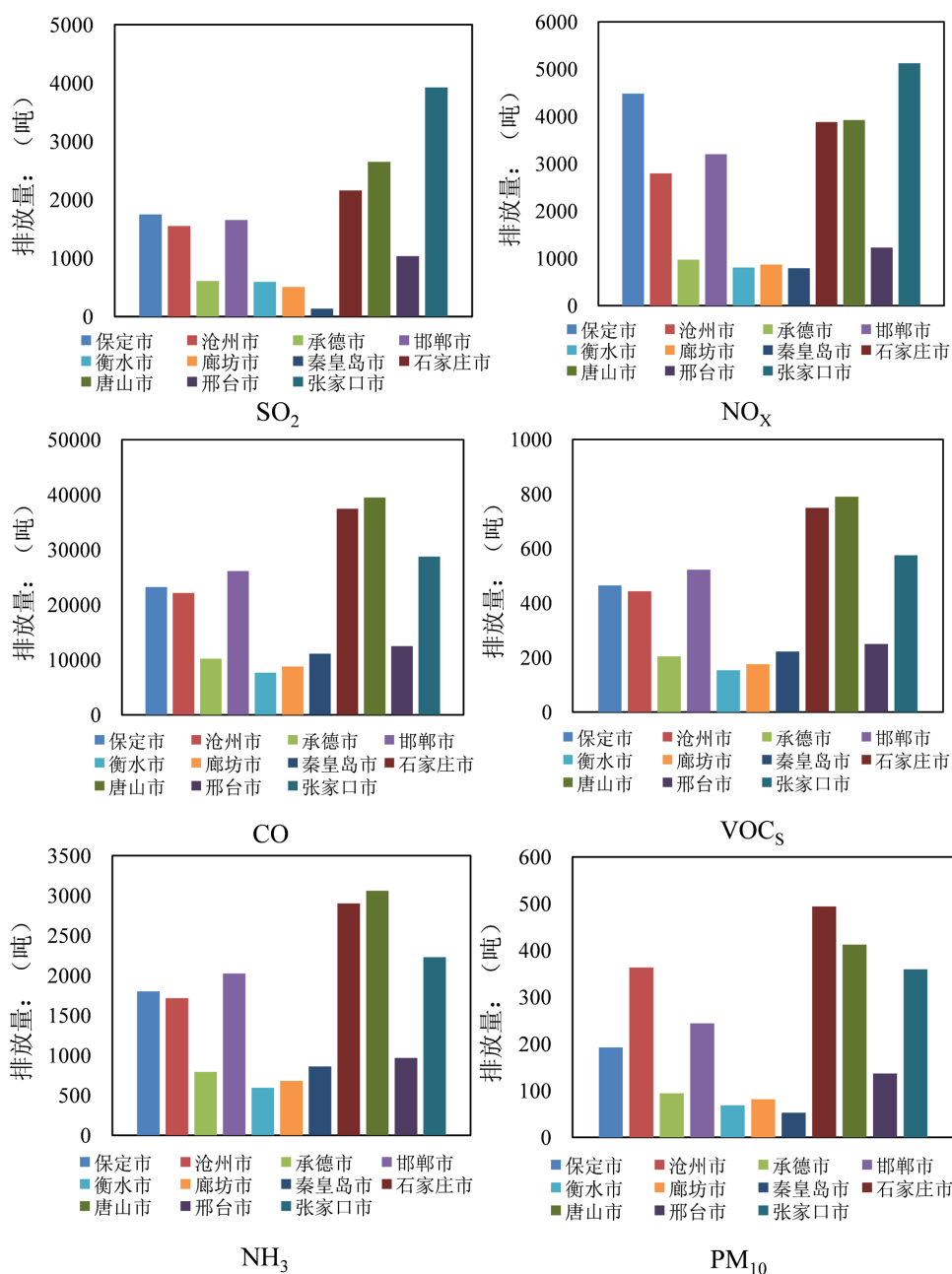
据估计, 在中国 500 个最大的城市中, 只有不到 1% 的城市能够达到世界卫生组织的空气质量标准 (PM_{2.5} 的年平均值为 10 μg/m⁻³, 24 小时平均值为 25 μg/m⁻³)。此外, 这些城市中有几个是世界上污染最严重的城市[1]。2010 年, 中国电力装机容量为 9.62 亿千瓦, 其中 80% 由火电厂提供。此外, 据估计, 中国的火电厂部门占人为排放 SO₂ 的 31%~59% [2] [3] [4] [5] [6], NO_x 的 21~44% [7] [8] 和颗粒物的 9% [8]。河北省位于中国北部, 环抱首都北京市, 总面积 18.88 万平方千米, 占中国国土面积的 2.0%, 包括保定、沧州、承德、邯郸、衡水、廊坊、秦皇岛、石家庄、唐山、邢台、雄安新区和张家口 12 个城市。河北省曾是中国空气污染最严重的地区之一, 2013 年河北省 PM_{2.5} 年平均浓度为 108 μg/m³ (数据来源于 2013 年河北省环境状况公报)。河北省的燃煤电厂主要集中在冀中南地区的石家庄市、邯郸市和沧州市以及冀北地区的唐山市和张家口市。在保持燃煤电厂可持续发展的同时, 探索合适的大气污染治理策略是当前备受关注的的问题之一。迄今为止, 中国和其他国家已经建立并研究了许多污染源排放清单, 以制定减排策略[9] [10] [11] [12]。

在电力行业协同效应研究方面, 李平等[13]利用行业宏观数据, 从“技术性减排”和“结构性减排”两个不同视角, 对攀枝花市“十一五”期间总减排措施的协同效应进行了评估。Mao 等[14]利用坐标系系统定量分析了中国火电行业技术减排措施的协同效应。在此, 本文评估了河北省燃煤电厂排放控制政策, 为燃煤电厂制定节能减排战略提供参考。

2. 河北省燃煤电厂现状

2.1. 河北省燃煤电厂大气污染物排放现状

2020年河北省燃煤电厂总排放量为16576.2吨(SO₂)、28082.9吨(NO_x)、227529.5吨(CO)、4550.6吨(VOC_s)、17633.5吨(NH₃)、2499.6吨(PM₁₀)、2260.2吨(PM_{2.5})。不同城市的大气污染物排放量如图1所示。张家口市燃煤电厂SO₂、NO_x排放量最大,为3924.3吨和5125.9吨,分别占总排放的23.7%和18.3%。唐山市燃煤电厂CO、VOC_s、NH₃排放量最大,分别为39506.4吨、790.1吨和3061.7吨,占总排放17.4%、17.4%和17.4%。石家庄市燃煤电厂PM₁₀、PM_{2.5}排放量最大,为494.2吨和446.9吨,均占总排放的19.8%。



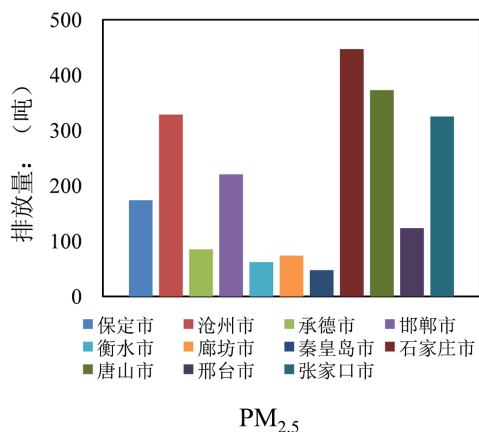
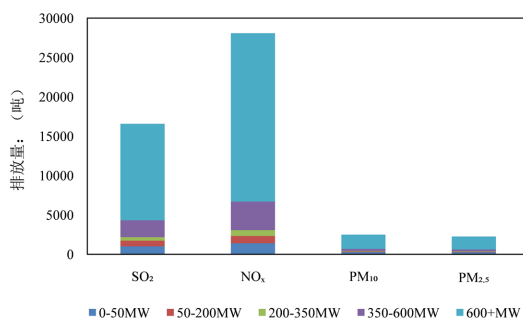


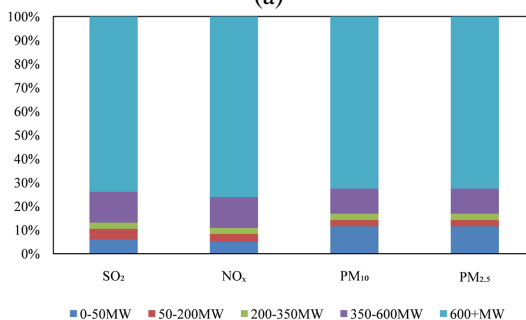
Figure 1. Emissions of air pollutants from coal-fired power plants in Hebei Province in 2010
图 1. 2020 年河北省各城市燃煤电厂大气污染物排放量

2.2. 分机组排放现状

将河北省燃煤机组按装机规模分为 0~50 MW、50~200 MW、200~350 MW、350~600 MW、600~1000 MW 五个等级。各类机组的污染物排放量、排放比例以及各城市所占燃煤机组比例如图 2(a)、图 2(b)、图 2(c)所示，石家庄、唐山和张家口等城市机组装机容量远远大于其他城市。对不同类别机组的总装机容量进行比较，得出 600+ MW 火电机组总装机容量最高，占总装机容量的 80.8%，其污染物排放量也最大，为 12254.5 吨(SO₂)，21390.6 吨(NO_x)，1815.4 吨(PM₁₀)和 1641.6 吨(PM_{2.5})，相应的排放比例为 73.9 % (SO₂)，76.2 % (NO_x)，72.6 % (PM₁₀)和 72.6 % (PM_{2.5})。此外，0~50 MW 机组装机容量占总装机容量的 1.3%，其总排放量分别为 1020.1 吨(SO₂)、1414.7 吨(NO_x)、288.9 吨(PM₁₀)和 261.2 吨(PM_{2.5})，排放占比分别为 6.2 %、5.0 %、11.6 %和 11.6 %。0~50 MW 机组总装机容量低，污染物排放比例高，其中不满足达标条件的机组应尽快关停。



(a)



(b)

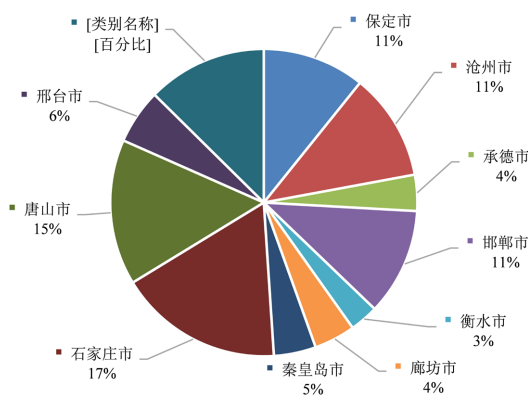


Figure 2. (a) Air pollutant emissions of various units in Hebei Province; (b) Air pollutant emission ratio of various units in Hebei Province; (c) Proportion of coal-fired units by city in Hebei Province
图 2. (a)河北省各类机组的大气污染物排放量; (b) 河北省各类机组的大气污染物排放比; (c) 河北省各城市所占燃煤机组比例

3. 河北省燃煤电厂大气污染物控制技术

NO_x 控制技术按照生成过程可分为低 NO_x 燃烧技术和烟气脱硝技术。低 NO_x 燃烧技术是直接控制燃烧阶段 NO_x 的产生，从而减少 NO_x 的排放，主要有空气分级燃烧技术、燃料再燃技术、烟气再循环技术等。烟气脱硝技术是将烟气中已经产生的 NO_x 减少或吸收，从而减少 NO_x 的排放。烟气脱硝技术包括催化还原法；液体吸收法、吸附法、电子束法等。催化还原方法可分为选择性催化还原(SCR)、选择性非催化还原(SNCR)和混合型 SNCR-SCR 催化还原组合方法。烟气脱硫是控制燃煤电厂 SO₂ 排放的主要手段。现存的脱硫技术包括石灰石 - 石膏法、湿式氨法脱硫、循环流化床工艺、海水脱硫技术及氧化镁法等。表 1、表 2 对比了电力行业各烟气脱硫、脱硝控制技术。其中，石灰石 - 石膏湿法因高效、经济、可回收副产品等优点，成为燃煤电厂最常用、最稳定的脱硫技术，适用于各种煤种。

Table 1. Comparison of flue gas denitrification technologies in power industry

表 1. 电力行业烟气脱硝技术对比表

	分类	去除效率	特点
低 NO _x 燃烧技术	再燃技术	40%~50%	采用此技术，需要对原燃烧和制粉系统及燃烧炉作较大的改造。
	空气分级燃烧技术	15%~30%	二段空气量过多会导致燃烧不完全，损失增加；而煤粉炉在还原气氛下易结渣、受腐蚀。
	烟气再循环技术	/	随着烟气再循环量的增加，燃烧趋于不稳定，不完全燃烧损失增大
烟气脱硝技术	SCR	80~90%	无副产物，无二次污染，结构简单，易于维护，但缺点是投资和运营成本高。
	SNCR	40~60%	该技术的优点是工艺简单，操作方便，无需催化剂床，初期投资低。缺点是温度要求较高，反应不完全，氨逸出率较高。该技术更适合于在役单位的改造
	混合 SNCR-SCR 催化还原组合方法	≥80%	主要优点是省去了在 SCR 烟道中设置的复杂的注氨系统，大大减少了催化剂的用量，减少了下游设备的腐蚀，脱硝效率高且可调节
	湿式氮氧化物吸收系统	≥90%	O ₃ 极难生产，KMnO ₄ 价格昂贵，初期投资和运行成本高，因此较少使用

Table 2. Comparison of FGD technologies in power industry**表 2.** 电力行业烟气脱硫技术对比表

脱硫技术	去除效率	优点	局限性
石灰石-石膏法	≥95%	应用最为广泛, 其所需的吸收剂在市场上易于获取, 且成本较低, 脱硫过程中产生的副产品也具有回收再利用的潜力	无法去除二噁英等特定污染物
湿式氨法脱硫	≥85%	脱硫效率高, 在脱硫过程中不产生废水和其他有害废弃物, 符合环保要求, 同时副产物硫酸铵具有农用肥料的潜力	氨的储运安全性以及氨逃逸等问题尚需进一步研究解决
循环流化床工艺	70%~85%	具有低成本、占地小、系统简洁、节水、运维经济、抗腐蚀性强等优势	该脱硫技术对吸收剂 CaO 的品质要求严苛, 价格高昂且获取困难, 同时产生的脱硫灰难以有效综合利用。
海水脱硫技术	≥90%	简洁易行, 投资及运行成本低廉, 不会对海洋生态造成污染, 同时确保高脱硫效率。	脱硫废水排放对海洋生态有不良影响。
氧化镁法	95%~98%	高效、经济、可靠, 副产物利用潜力大, 且无二次污染。	氧化镁市场价格昂贵, 且供应稀缺。

4. “十四五” 燃煤电厂减排情景分析

本研究以 2020 年基准, 以排放绩效法作为主要方法, 其概念为火电厂每产一度电所释放的特定污染物量, 是发电绩效理念的拓展。排放绩效法整合了机组类型、燃料特性、减排措施及排放标准等多元因素, 精准映射火电企业的生产效率和治理水平。此外, 其计算结果与实际排放量相近, 便于管理者快速估算和分配排放指标。具体公式参见公式(1)。

$$M_O = (CAP_O \times 5500 + D_O/1000) \times GPS_O \times 10^{-3} \quad (1)$$

式中 M_O 、 CAP_O 、 D_O 、 GPS_O 分别第 O 台机组的大气污染物排放量(t)、第 O 台机组的装机容量(MW)、第 O 台机组的排放绩效(g/kW·h)和第 O 台机组供热量折算的等效发电量(kW·h)。

本研究考虑控制措施、排放标准及政策, 预测了河北省“十四五”燃煤电厂新增排放量, 并设计了三个燃煤电厂减排情景: 淘汰落后机组情景、超低排放情景和技术可行情景, 预测了各情景下的大气污染物减排潜力。

4.1. 新增排放量预测

根据国务院印发的《河北省“十四五”节能减排综合实施方案》, 到 2025 年, 河北省煤电总规模稳定在 5100 万千瓦左右。照此预测, 2020 年~2025 年将新增煤电装机容量为 430.3 万千瓦。根据《建设项目主要污染物排放总量指标审核及管理暂行办法》, 按照排放绩效法, 预测 2025 年煤电机组新增 SO_2 、 NO_x 、 PM_{10} 、 $PM_{2.5}$ 排放量为分别为 1525.0 吨、2583.6 吨、230.0 吨和 207.9 吨。

4.2. 淘汰落后机组情景削减量

按照《关于深入推进供给侧结构性改革进一步淘汰煤电落后产能促进煤电行业优化升级的意见》, 全面梳理符合淘汰关停条件和服役期满的煤电机组, 提出 2022 年~2024 年淘汰落后产能计划, 淘汰机组包含但不限于以下几类:

- a. 单机 30 万千瓦以下, 不实施改造或改造后单位供电煤耗仍达不到全省平均水平(305 克/千瓦时)的机组。
- b. 单机 30 万千瓦以下, 设计寿命期满的机组。

- c. 在单机 30 万千瓦及以上热电联产机组供热半径 30 公里范围内的落后燃煤小热电机组。
- d. 停运 3 年以上, 不再具备运行条件的机组。
- e. 违规建设的燃煤自备机组。

淘汰落后机组情景共淘汰燃煤机组装机容量 64.1 万千瓦, SO_2 削减能力 689.2 吨, NO_x 削减能力 898.3 吨, PM_{10} 、 $\text{PM}_{2.5}$ 削减能力分别为 179.8 和 162.6 吨, 分别占 2020 年排放量的 3.8%、2.0%、5.0% 和 6.1%。

4.3. 超低排放情景削减量

超低排放情景是针对现有电力行业生产过程中污染物控制技术进行升级改造, 该情景下假设所用的主要控制脱除技术均为所处阶段可达到的最优技术, 即实现最优技术的最广泛应用。技术减排措施主要包含前端控制措施和末端治理措施。其中, 前端控制措施主要包括相关洁净煤技术, 如燃煤洗选和燃煤热处理等, 以及引入高效利用煤炭的新发电技术, 如引进整体煤气化联合循环发电技术等。而终端控制措施则指电力生产过程中在最后阶段对所形成的大气污染物进行脱除的相关技术, 如 WFGD 和 SCR 等。根据河北省环境保护厅发布的《燃煤电厂大气污染物排放标准》DB13/2209-2015 以及《河北省重点行业环保绩效 A 级标准》- 火电行业, 设计以下超低排放情景:

(a) 0~200 MW 机组达到特殊排放标准(SO_2 、 NO_x 和 PM 排放浓度不大于 50 mg/m^3 、 100 mg/m 和 20 mg/m^3)。

(b) 50% 的 200~350 MW 火电机组达到超低排放标准(SO_2 、 NO_x 和 PM 排放浓度不大于 35 mg/m^3 、 50 mg/m 和 10 mg/m^3)。

(c) 100% 的 350~600 MW 机组达到超低排放标准。

(d) 30% 的 600+ MW 火电机组达到河北省环保绩效 A 级标准(SO_2 、 NO_x 和 PM 排放浓度不大于 20 mg/m^3 、 30 mg/m 和 5 mg/m^3)。

超低排放情景中 SO_2 削减能力为 4144.1 吨, NO_x 削减能力 19096.4 吨, PM_{10} 、 $\text{PM}_{2.5}$ 削减能力分别为 522.9 吨和 472.8 吨, 占 2020 年排放量的 22.9%、43.3%、14.6% 和 10.9%。

4.4. 技术可行情景削减量

根据《河北省重点行业环保绩效 A 级标准》- 火电行业, 设计以下技术可行情景:

a: 40% 的现役 200~350 MW 燃煤机组发电标准煤消耗量不大于 311 g/kWh ;

b: 40% 的现役 350~600 MW 燃煤机组发电标准煤消耗量分别不大于 302 g/kWh ;

c: 40% 的现役 600+ MW 燃煤机组发电标准煤消耗量不大于 294 g/kWh 。

技术可行情景中 SO_2 削减能力 2318.2 吨, NO_x 削减能力 3352.0 吨, PM_{10} 、 $\text{PM}_{2.5}$ 削减能力分别为 293.6 吨和 265.5 吨, 占 2020 年排放量的 12.8%、7.6%、8.2% 和 7.5%。

5. 结论

本研究通过对燃煤电厂的生产规模、大气污染物排放进行盘点, 考虑控制措施、排放标准及政策, 为河北省燃煤电厂设计三个减排情景及新增排放量预测, 为制定节能减排战略提供参考。结果表明:

(1) 本研究预测 2025 年煤电机组新增排放量分别为 1525.0 吨(SO_2)、2583.6 吨(NO_x)、230.0 吨(PM_{10})、207.9 吨($\text{PM}_{2.5}$)。

(2) 淘汰落后机组情景共淘汰燃煤机组装机容量 64.1 万千瓦, SO_2 、 NO_x 、 PM_{10} 和 $\text{PM}_{2.5}$ 削减能力分别为 689.2 吨、898.3 吨、179.8 和 162.6 吨, 分别占 2020 年排放量的 3.8%、2.0%、5.0% 和 6.1%。

(3) 超低排放情景中 SO_2 、 NO_x 、 PM_{10} 和 $\text{PM}_{2.5}$ 削减能力分别为 4144.1 吨、19096.4 吨、522.9 吨和 472.8 吨, 占 2020 年排放量的 22.9%、43.3%、14.6% 和 10.9%。

(4) 技术可行情景中 SO₂、NO_x、PM₁₀ 和 PM_{2.5} 削减能力分别为 2318.2 吨、3352.0 吨、293.6 吨和 265.5 吨, 占 2020 年排放量的 12.8%、7.6%、8.2% 和 7.5%。

参考文献

- [1] Zhang, Q. and Crooks, R. (2012) Toward an Environmentally Sustainable Future: Country Environmental Analysis of the People's Republic of China. Asian Development Bank.
- [2] Streets, D.G., Bond, T.C., *et al.* (2003) An Inventory of Gaseous and Primary Aerosol Emissions in Asia in the Year 2000. *Journal of Geophysical Research*, **108**, 30-31. <https://doi.org/10.1029/2002JD003093>
- [3] Ohara, T., Akimoto, H., *et al.* (2007) An Asian Emission Inventory of Anthropogenic Emission Sources for the Period 1980-2020. *Atmospheric Chemistry and Physics*, **7**, 6483-6902. <https://doi.org/10.5194/acpd-7-6843-2007>
- [4] Cofala, J., Amann, M., Klimont, Z., Kupiainen, K. and Höglund-Isaksson, L. (2007) Scenarios of Global Anthropogenic Emissions of Air Pollutants and Methane until 2030. *Atmospheric Environment*, **41**, 8486-8499. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2007.07.010>
- [5] Zhao, Y., Wang, S., Duan, L., *et al.* (2008) Primary Air Pollutant Emissions of Coal-Fired Power Plants in China: Current Status and Future Prediction. *Atmospheric Environment*, **42**, 8442-8452. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2008.08.021>
- [6] Li, M., Zhang, Q., *et al.* (2017) MIX: A Mosaic Asian Anthropogenic Emission Inventory under the International Collaboration Framework of the MICS-Asia and HTAP. *Atmospheric Chemistry and Physics*, **17**, 935-963. <https://doi.org/10.5194/acp-17-935-2017>
- [7] Hao, J., Tian, H. and Lu, Y. (2002) Emission Inventories of NO_x from Commercial Energy Consumption in China, 1995-1998. *Environmental Science & Technology*, **36**, 552-560. <https://doi.org/10.1021/es015601k>
- [8] Zhang, Q., Streets, D.G., *et al.* (2007) NO_x Emission Trends for China, 1995-2004: The View from the Ground and the View from Space. *Journal of Geophysical Research*, **112**, D22306. <https://doi.org/10.1029/2007JD008684>
- [9] Shen, J., Zheng, C., Yang, L., Xu, L., Zhang, Y., Liu, S. and Gao, X. (2019) Atmospheric Emission Inventory of SO₃ from Coal-Fired Power Plants in China in the Period 2009-2014. *Atmospheric Environment*, **197**, 14-21. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2018.10.008>
- [10] Liang, X., Chen, X., Zhang, J., Shi, T., Sun, X., Fan, L. and Ye, D. (2017) Reactivity-Based Industrial Volatile Organic Compounds Emission Inventory and Its Implications for Ozone Control Strategies in China. *Atmospheric Environment*, **162**, 115-126. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2017.04.036>
- [11] Gao, C., Gao, W., Song, K., Na, H., Tian, F. and Zhang, S. (2019) Spatial and Temporal Dynamics of Air-Pollutant Emission Inventory of Steel Industry in China: A Bottom-Up Approach. *Resources, Conservation and Recycling*, **143**, 184-200. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.12.032>
- [12] Chen, L., Li, L., Yang, X., Zhang, Y., Chen, L. and Ma, X. (2019) Assessing the Impact of Land-Use Planning on the Atmospheric Environment through Predicting the Spatial Variability of Airborne Pollutants. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, **16**, 172. <https://doi.org/10.3390/ijerph16020172>
- [13] Li, L., Zhou, G. and Ji, H. (2010) Study of Co-Benefits Assessment of Pollution Reduction: A Case Study in Panzhihua. *China Population, Resources and Environment*, **20**, 91-95.
- [14] Mao, X., Zeng, A., Hu, T., *et al.* (2011) Study of Coordinate Control Effect Assessment of Technological Measures for Emissions Reduction. *China Population, Resources and Environment*, **21**, 1-7.