

引用格式: 张雅娟, 王铮, 李双成. 能源电力系统转型对中国环境影响评估[J]. 资源科学, 2023, 45(9): 1830–1843. [Zhang Y J, Wang Z, Li S C. Environmental impact assessment of energy and power system transformation in China[J]. Resources Science, 2023, 45(9): 1830–1843.] DOI: 10.18402/resci.2023.09.10

# 能源电力系统转型对中国环境影响评估

张雅娟<sup>1,2</sup>, 王 铮<sup>3</sup>, 李双成<sup>1,2</sup>

(1. 北京大学城市与环境学院, 北京 100871; 2. 北京大学地表过程与模拟教育部重点实验室, 北京 100871; 3. 北京师范大学湾区国际商学院, 珠海 519087)

**摘要:**【目的】构建以风电、光伏等可再生能源为主体的新型电力系统, 是实现“碳中和”的重要举措。中国国土面积广阔, 能源资源禀赋、能源生产结构、经济发展水平以及能源生产地域分工区域差异巨大。要实现全国尺度的“双碳”目标, 必须实施区域差异化的行动方案。【方法】从全国七大电网区域分析入手, 使用生命周期评估方法和GIS-MCDA模型, 结合各省未来用电需求及比例, 量化能源电力系统转型对全国和七大电网区域的环境影响。【结果】研究表明: ①2015—2020年, 全国及各区域环境压力持续增大, 华东地区和华北地区是主要排放区域。②2025—2060年构建以新能源为主体的能源系统能够极大程度减少环境影响的压力, 但非生物耗竭潜势除外。③从整体上看, 煤电对环境的影响程度高于其他能源电力类型(非生物耗竭潜势除外), 水力发电对环境的影响最小。【结论】本文研究成果可为中国通过能源转型助力“双碳”目标实现提供科学依据, 同时也对政府更好地制定政策具有一定的参考价值。

**关键词:** 生命周期评估; 双碳; 环境影响; 能源电力系统; 能源转型

DOI: 10.18402/resci.2023.09.10

## 1 引言

气候变化导致的环境问题是全球面临的重大挑战, 减少温室气体排放, 是应对气候变化的主要途径之一<sup>[1]</sup>。能源部门温室气体排放约占全球排放的3/4<sup>[2-5]</sup>, 以可再生能源为主体的电力系统在这一进程中起到关键作用。《世界能源展望2023》预计, 可再生能源在全球一次能源中的份额将从2019年的10%左右增加到2050年的35%~65%。这就意味着, 在未来, 风电和光伏的装机容量将大幅度增长。据英国石油公司预测, 风电和光伏的装机容量在“加速”和“净零”情景展望中增长约15倍, 在“新增长动力”中增长9倍, 有望成为可再生能源的主体, 助力“碳中和”目标的实现。

虽然可再生能源是低碳清洁能源, 但在整个生命周期内并不是“净零排放”。从全产业链角度来看, 制造、安装、材料运输和设备退役处理等阶段都

不可避免地产生一定量威胁地球系统关键过程的温室气体和其他污染物<sup>[6]</sup>。生命周期评估(Life Cycle Assessment, LCA)通常用于评价一种产品或一类设施从“摇篮到坟墓”全过程对于环境的影响。能源电力系统对环境效应的生命周期评估已经取得了一些研究进展<sup>[7-11]</sup>, 对现阶段以及未来的能源电力结构类型产生环境影响的研究较为匮乏, 在应用广泛性和深度上还有较大改进空间。相关文献指出, 陆上风电场的二氧化碳全球平均排放因子约为30 g CO<sub>2</sub>/kW·h<sup>[12]</sup>, 不同地域不同装机容量的排放水平稍有不同。全国和省级陆上风能温室气体排放强度分别为19.88 g CO<sub>2-eq</sub>/kW·h和13.59~34.50 g CO<sub>2-eq</sub>/kW·h。从整体来看, 全国陆上风能排放强度比传统化石燃料低98%以上, 以2020年能源结构衡量, 温室气体减缓效果可达到84%~98%<sup>[6]</sup>。光伏发电的环境效应影响主要通过能量偿还时间和温室

收稿日期: 2023-05-02 修订日期: 2023-08-06

基金项目: 国家自然科学基金项目(41590843)。

作者简介: 张雅娟, 女, 甘肃天水人, 博士, 研究方向为能源系统转型与可持续发展。E-mail: zhangyajuan0203@pku.edu.cn

通讯作者: 李双成, 男, 河北平山人, 博士生导师, 研究方向为新能源开发利用与生态环境效应。E-mail: scl@urban.pku.edu.cn

2023年9月

气体排放等指标表征。在煤电厂主要气体排放的问题上,已有学者使用LCA法、过程分析法和投入产出分析法计算了电厂建设、运行和退役过程中的温室气体排放量<sup>[13,14]</sup>。除了对水电站现实的环境影响评估外,一些学者还对未来的温室气体排放和社会经济影响进行评估<sup>[15,16]</sup>。由于能源设备在不同生产阶段的环境效应不同,将对区域的环境压力造成不同的影响,大多数研究都忽视了能源设备的生产与运行有着较大的时空异质性。

为研究能源电力系统转型对全国及七大区域的环境影响,本文参照中国电网分区方案,划分为东北、华东、华中、西南、南方、西北以及西南7个区域。受数据等因素限制,将内蒙古划分至华北区域。使用生命周期分析软件Simapro,应用CML-IA baseline环境评价方法和Ecoinvent数据库,计算风电、光伏、煤电、核电和水电5种主要能源电力类型的资源消耗和污染物排放量,并将其归类至各环境影响类别。进一步以《中国2030年前碳达峰研究报告》和《中国2060年前碳中和研究报告》(以下简称“30·60”报告)为指导,在基于GIS-MCDA(Multiple-Criteria Decision Analysis)模型模拟全国及七大区域2025、2030、2050和2060年的发电结构及发电量的基础上,量化全国及各区域能源电力系统环境影响变化情况。通过定量评估5种电力系统的环境效应,明晰对环境更加友好的能源电力类型,为实现能源低碳绿色转型提供参考和决策依据。

## 2 研究方法与数据来源

### 2.1 生命周期评估

#### 2.1.1 系统边界和功能单元

由于数据可得性所限,能源电力系统的生命周期评估阶段仅考虑生产制造和运营维护阶段,退役及废弃物管理阶段暂未考虑。电力生命周期评价的功能单位确定为1 kW·h电力供应。风电、光伏、煤电、水力、核能的发电能源设备系统边界分别如图1所示。为了确保在相同的系统边界内进行比较,5种发电能源设备的生命周期阶段均相同。

#### 2.1.2 能源电力类型数据

(1)风电。以内蒙古自治区赛罕风电场为研究对象<sup>[17]</sup>。该场址装机容量为49.5 MW,配备18台金风GW77/1500 kW风力发电机组(每台叶片直径77 m,轮毂高度65 m)。70 m高度的年平均风速为8.3 m/s,

对应该高度的年平均风功率密度为569.4 W/m<sup>2</sup>。风力发电机组生命周期评价中材料消耗清单详见文献<sup>[17]</sup>。

(2)光伏。研究对象为中国生产的多晶硅光伏系统,该系统由54个多晶硅电池组成的5个200 W模块和4个500W的逆变器构成,每个硅片的面积为156×156 mm<sup>2</sup>。电池板寿命为30年。光伏发电机组生命周期评价中材料消耗清单详见文献<sup>[9, 18]</sup>。

(3)煤电。以单超临界600 MW煤电机组为研究对象,根据煤电厂建设和运行的实际数据<sup>[19]</sup>编制电厂周期材料清单<sup>[20]</sup>。煤电机组生命周期评价中材料消耗清单详见文献<sup>[20, 21]</sup>。

(4)核能。中国具有完整的核燃料循环体系和产业链,以中国核电链为研究对象,能够较为全面客观地评价中国核电的环境排放状态。本文通过相关文献数据和核电厂技术手册,进行全生命周期材料消耗收集与计算<sup>[22]</sup>。核能发电机组具体生命周期各环节能源和材料消耗清单见文献<sup>[22]</sup>。

(5)水电。水力发电以中国清江干流(长江上游)某常规中型水电站为例进行研究,工程等级为Ⅲ<sup>[23]</sup>。水电站总装机容量252兆瓦,设计年平均发电量897 GW·h,寿命为50年<sup>[24]</sup>。水力发电机组具体生命周期各环节能源和材料消耗清单见文献<sup>[23]</sup>。

#### 2.1.3 风电、光伏技术开发潜力评估数据

为全面、准确评估风电、光伏技术开发潜力,从地理国情监测云平台、国家气候中心以及中国自然资源保护区共享平台等权威可信平台,收集土地利用、自然保护区、温度、风速、空气密度、DEM、潮间带、水深、水平面总辐射、居民地、人口公里网格、道路及交通以及土地价格数据(表1)。

### 2.2 情景设置

#### 2.2.1 基于“双碳”目标进程的中国能源结构情景

在实现“双碳”目标政策作用下,能源电力结构的低碳绿色转型是必然趋势。从国家需求角度,亟需回答诸如:能源结构转型对环境压力产生什么变化、对自然环境系统的可持续性有哪些影响等实践问题。2021年10月,国务院发布的《关于印发2030年前碳达峰行动方案的通知》中明确指出,太阳能发电及风电的总装机容量在2030年前要至少达12亿kW。因此,我们依据全球互联网发展合作

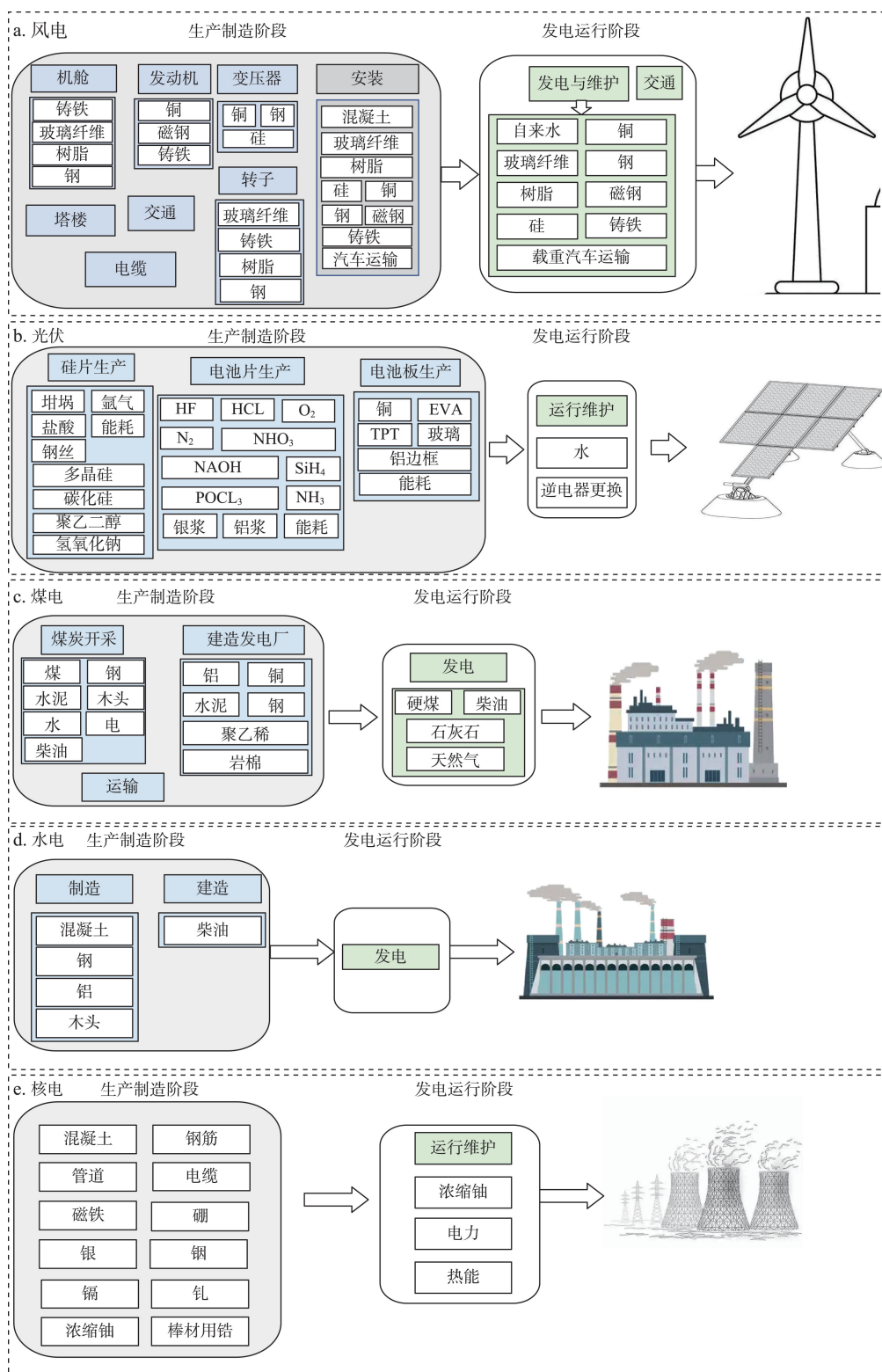


图1 能源电力系统边界和生命周期阶段

Figure 1 Energy and power system boundaries and life cycle stages

注:a、b、c、d、e分别表示风电、光伏、煤电、水电和核电的能源发电类型,将系统边界划分为生产制造阶段和发电运行阶段,方框表示不同阶段中使用的主要原材料。



表1 风电、光伏技术开发潜力主要数据与来源

Table 1 Data and sources of wind power and photovoltaic technology development potential

数据名称	数据集来源
土地利用	地理国情监测云平台,全国土地利用数据产品 <a href="http://www.dsac.cn/DataProduct/Detail/200804">http://www.dsac.cn/DataProduct/Detail/200804</a>
自然保护区	中国自然保护区共享平台: <a href="http://www.papc.cn">http://www.papc.cn</a> WDPA: <a href="http://www.protectedplanet.net">www.protectedplanet.net</a> wdpar R: <a href="https://prioritizr.github.io/wdpar/">https://prioritizr.github.io/wdpar/</a>
温度	CDS: <a href="https://cds.climate.copernicus.eu">https://cds.climate.copernicus.eu</a> ERA5Land: <a href="https://doi.org/10.24381/cds.e2161bac">https://doi.org/10.24381/cds.e2161bac</a>
风速	国家气候中心的 BCC_3km 风能资源数据
空气密度	BCC_3km 风能资源数据 MERRA2 数据集
DEM	Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) Global Enhanced Slope Database <a href="https://cgiaresci.community/data/srtm-90m-digital-elevation-database-v4-1/">https://cgiaresci.community/data/srtm-90m-digital-elevation-database-v4-1/</a>
潮间带	<a href="http://geodoi.ac.cn/WebCn/doi.aspx?Id=1140">http://geodoi.ac.cn/WebCn/doi.aspx?Id=1140</a>
水深	<a href="https://download.gebco.net/">https://download.gebco.net/</a>
水平面总辐射	国家气候中心的地表太阳辐射数据,时间范围是2000—2020年,时间分辨率为小时,空间分辨率为5 km
居民地	<a href="https://geoservice.dlr.de/web/maps/eoc:wsf2019">https://geoservice.dlr.de/web/maps/eoc:wsf2019</a>
人口公里网格	<a href="https://www.worldpop.org/project/categories?id=18">https://www.worldpop.org/project/categories?id=18</a> <a href="https://data.humdata.org/dataset/worldpop-population-counts-for-China">https://data.humdata.org/dataset/worldpop-population-counts-for-China</a>
道路及交通	<a href="https://download.geofabrik.de/asia.html">https://download.geofabrik.de/asia.html</a>
土地价格	中国土地市场网: <a href="https://www.landchina.com/landSupply">https://www.landchina.com/landSupply</a> 中国地价信息服务平台: <a href="http://www.landvalue.com.cn/Lvmonitor/Index">http://www.landvalue.com.cn/Lvmonitor/Index</a>

组织发布“30·60”报告,依据未来的电力需求预测设置“一切照旧”和“双碳目标”国家情景模式(表2)。其中,“一切照旧”情景是按照“30·60”报告对未来能源需求的总约束下,各类能源结构占比按照2010—2020年能源电力结构不变,在不同年份的电力总需求量的约束下进行分解,而“双碳目标”是选择“30·60”报告中预测未来各能源类型装机容量为依据。

预测数据显示,2030年总人口约为14.64亿,2060年降至13.33亿。全社会用电量在2030年、

2050年和2060年分别达到10.7万亿、16万亿和17万亿kW·h<sup>[25]</sup>。“30·60”报告分别对2025年、2030年、2050年以及2060年的各种能源发电装机容量进行了预测(表3)。由于全球互联网发展合作组织发布的报告中未能直接体现发电量,而能源生产的发电量与装机容量和容量系数密切相关。因此,本文采取2010—2020年能源电力系统的发电量与装机量的比值进行发电量预测估计(图2)。

2.2.2 七大电网区域情景

为进一步分析能源电力系统转型将对区域环境压力的变化程度,本文在全国情景设置的基础上讲七大区域能源电力结构进行相应的细化。首先,使用GIS-MCDA模型计算了各省份及区域的风、光资源开发量,然后根据装机容量和容量因子计算得到了区域理论能源发电量,最后依据相关能源规划对未来情景中不同能源的消纳量进行了模拟。

与国家尺度相同,在“30·60”报告的基础上设置“一切照旧”和“碳中和目标”两种能源结构,以对应政府提出的构建新能源为主体的新型电力系统的要求,以及“2030年前实现碳达峰,2060年前实现

表2 中国能源结构情景设置

Table 2 Scenario settings of China's energy structure

情景名称	年份设置	情景描述
情景1: 一切照旧	2025年	中国能源电力部门在按照2015—2020年发电结构不变的状态下,满足“30·60”报告的未来社会总电力能源需求。
	2030年	
	2050年	
	2060年	
情景2: 双碳目标	2025年	依据“30·60”报告的对未来装机容量的预测
	2030年	
	2050年	
	2060年	



表3 2025—2060年中国能源电力系统装机容量预测 (GW)

Table 3 Forecast of installed capacity of China's energy and power system, 2025-2060 (GW)

	风电	光伏	水电	煤电	核电
2025年	536	559	460	1100	72
2030年	800	1025	554	1050	108
2050年	2200	3450	740	300	200
2060年	2500	3800	760	0	250

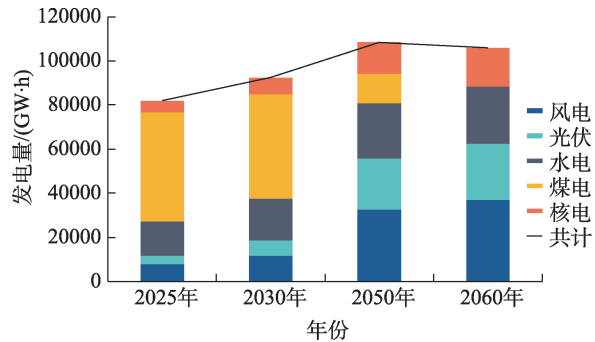


图2 2025—2060年中国能源电力系统发电量预测

Figure 2 Forecast of power generation of China's energy and power system, 2025-2060

碳中和”的承诺。具体来说,“一切照旧”情景为七大区域电力部门按照2015—2020年发电结构下,以满足“30·60”报告中未来社会的电力能源需求作为约束。区域“碳中和目标”情景通过GIS-MCDA模型优化风电和光伏在区域中的分配比例(图3),同时保持各区域水电与核电的发电相对比例,以“30·60”报告中未来社会的电力能源总需求作为约束。

各省份的风电、光伏未来的发电量及分布数据采用GIS-MCDA地理限制模型并结合各省未来用电需求及比例完成预估<sup>[26]</sup>。通过模型计算得到各省的风电、光伏的技术开发量及总发电潜力,并采用2010—2020年负荷学习曲线求得各省电力需求,进而根据省份技术开发潜力格局分配到不同区域,并以“30·60”报告中未来社会的电力能源总需求作为约束,最终获得各区域未来情景下的风光发电量。

### 3 结果与分析

#### 3.1 2015—2020年5种能源环境影响变化情况

##### 3.1.1 非生物耗竭潜势

各种能源电力设备在原材料获取和制造建设过程中所消耗的煤炭、柴油、钢铁、混凝土以及水资源等均属于非生物资源。2015—2020年,全国非生物耗竭潜势呈逐年增长状态,平均增长幅度为

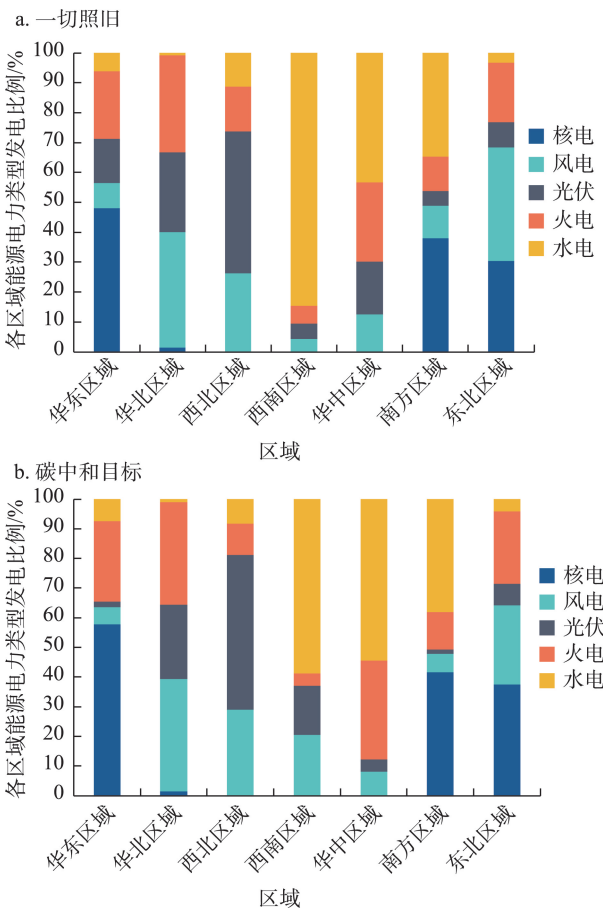


图3 在不同情景各区域能源电力类型发电比例

Figure 3 Proportion of power generation by energy and power type under different scenarios

10%。其中,2015年该类别环境影响值为 $2.95\text{E}+09$  g Sb-eq, 2020年与之相比,非生物耗竭潜势增长48%,增长至 $4.38\text{E}+09$  g Sb-eq(表4)。从区域尺度上看,华东地区和华北地区在该类别的排放比例较大,占总排放的50%以上,其次为南方地区,占总排放的16%(图4a)。

从单位发电量看,核电的单位发电量排放量最高,为 $1.34\text{E}-03$  g Sb-eq/kW·h,其次为光伏 $1.20\text{E}-03$  g Sb-eq/kW·h、风电 $8.53\text{E}-05$  g Sb-eq/kW·h、煤电

2023年9月

表4 2015—2020年各能源电力类型生命周期单位发电量环境影响排放

Table 4 Emissions per unit of power generation in the life cycle of each energy and power type, 2015-2020

环境影响	单位	2015年	2016年	2017年	2018年	2019年	2020年
非生物耗竭潜势	g Sb-eq	2.95E+09	3.17E+09	3.51E+09	3.91E+09	4.15E+09	4.38E+09
化石能源损耗潜势	MJ	2.54E+13	2.63E+13	2.82E+13	3.02E+13	3.10E+13	3.16E+13
全球增温潜势(GWP100a)	g CO <sub>2</sub> -eq	3.69E+15	3.82E+15	4.10E+15	4.39E+15	4.50E+15	4.60E+15
臭氧层耗竭潜势	Mg CFC-11 eq	2.51E+10	2.61E+10	2.80E+10	3.02E+10	3.10E+10	3.18E+10
酸化潜势	g SO <sub>2</sub> -eq	5.64E+12	5.85E+12	6.27E+12	6.73E+12	6.91E+12	7.06E+12
富营养化潜势	Mg PO <sub>4</sub> -eq	9.49E+14	9.84E+14	1.06E+15	1.13E+15	1.17E+15	1.19E+15

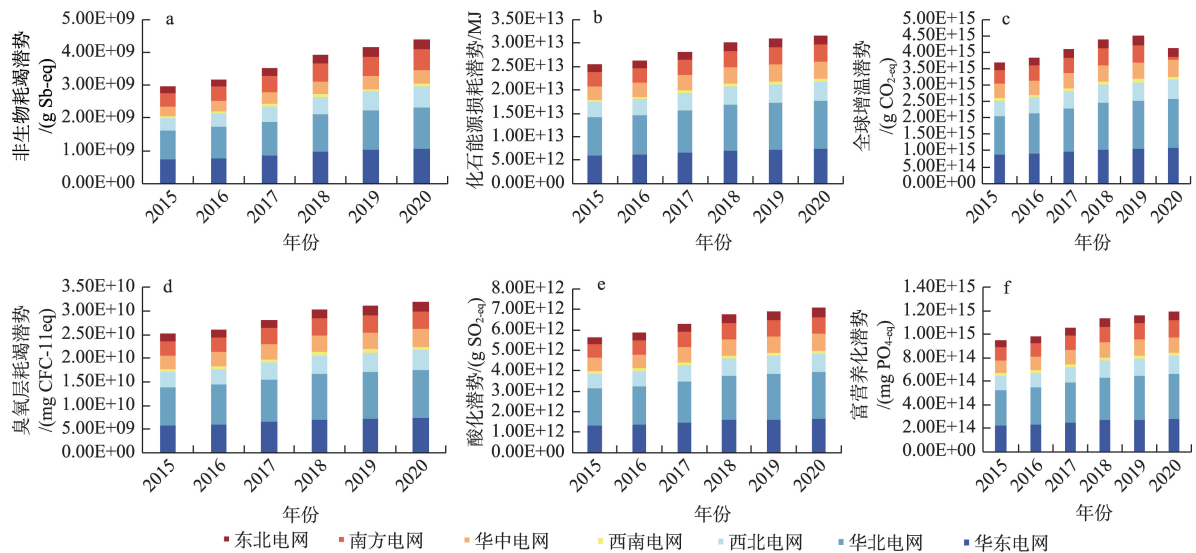


图4 2015—2020年各区域能源类型环境影响排放

Figure 4 Emissions of different types of energy in each region, 2015-2020

5.82E-04 g Sb-eq/kW·h 和水电 2.21E-05 g Sb-eq/kW·h(图 5a)。核能单位发电的非生物消耗潜势最高,主要是由于在制造阶段中铀转化与浓缩过程非生物消耗潜势值较大,分别占核能在生产制造阶段消耗的 48.7%。光伏发电的非生物消耗潜势位居第二位,主要是因为是在制造阶段中的电池片和逆变器生产的非生物耗竭潜势值较大,分别占光伏发电总排放的 61.38%和 23.82%。风力发电在生产制造阶段的涡轮机和电缆生产非生物消耗占比较高,分别占风力发电的 35.64%和 51.35%。建造厂房是煤电的主要的非生物消耗过程,非生物消耗潜势占比高达 79.32%。

### 3.1.2 化石能源损耗潜势

化石能源损耗潜势主要受资源开采率影响,一般根据全球范围内的可用存量来估计化石能源损耗潜势。2015—2020年,化石燃料损耗潜势呈逐年增长状态,平均增长幅度为 5%。其中,2015年该类

别环境影响值为 2.54E+13 MJ,2020年与之相比,化石燃料损耗潜势增长 25%,增长至 3.16E+13 MJ(表 4)。从区域尺度上看,华东和华北地区占总排放的 56%以上,华中和南方地区紧随其后,分别占总排放的 12%(图 4b)。

不同能源电力类型的化石燃料损耗潜值范围较大,一般在 0.03~5.90 MJ/kW·h(图 5b)。其中,水电潜势值最小为 0.03 MJ/kW·h,煤电潜势值最大为 5.90 MJ/kW·h。光伏、风电、核电的化石能源损耗潜势分别为 0.23、0.11、0.07 MJ/kW·h。煤电生产制造阶段产生的化石燃料损耗潜势巨大,占比高达 90.02%。

### 3.1.3 温室气体排放

全球变暖潜值计算方法是将温室气体折算为 CO<sub>2</sub>当量,因此,使用全球变暖潜势(GWP)指标来衡量能源电力系统全生命周期温室气体排放水平。2015—2019年,温室气体排放强度呈逐年增长状

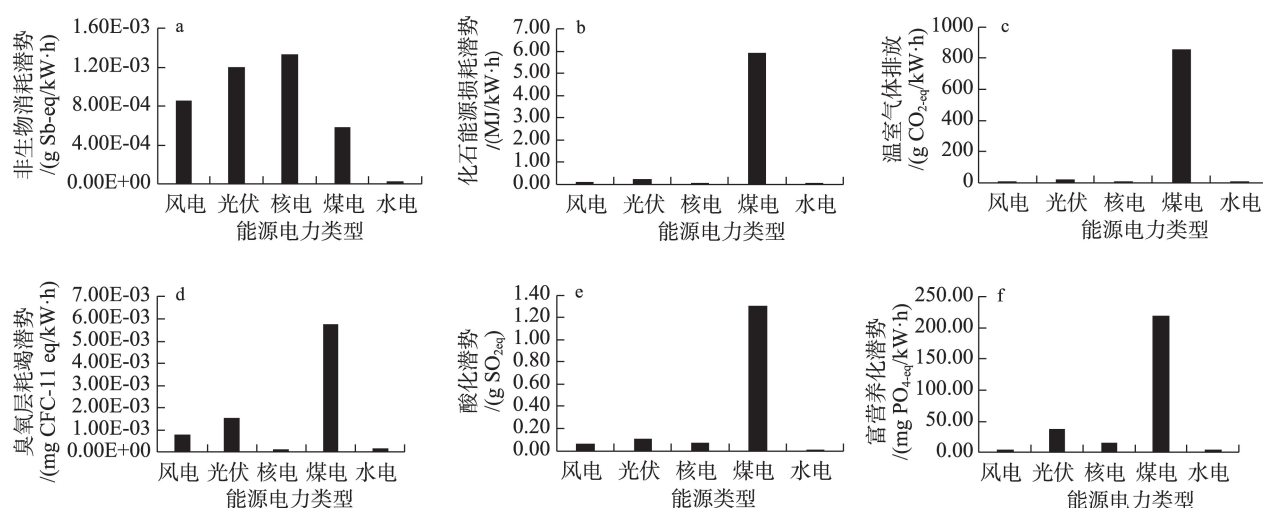


图5 各能源电力类型生命周期单位发电量环境影响排放

Figure 5 Emissions per unit of power generation in the life cycle of each energy and power type

态,平均增长幅度为5%,2020年呈现下降状态。其中,2015年该类别环境影响值为 $3.69\text{E}+15\text{ g CO}_{2\text{-eq}}$ ,2020年与之相比,温室气体排放增长25%,增长至 $4.60\text{E}+15\text{ g CO}_{2\text{-eq}}$ (表4)。从区域尺度上看,华东和华北地区排放依旧占比50%以上,且相对排放比例较为稳定。西北、南方和华中地区紧随其后,分别占总排放的12%以上。东北和西南地区排放强度最低(图4c)。

图5c展示各能源电力类型在生命周期内单位发电量温室气体的排放结果,从单位发电量的温室气体排放强度来看,传统火力发电的温室气体排放量最高,为 $859.36\text{ g CO}_{2\text{-eq}}/\text{kW}\cdot\text{h}$ ,其次为光伏 $20.57\text{ g CO}_{2\text{-eq}}/\text{kW}\cdot\text{h}$ 、核电 $14.14\text{ g CO}_{2\text{-eq}}/\text{kW}\cdot\text{h}$ 、风电 $10.59\text{ g CO}_{2\text{-eq}}/\text{kW}\cdot\text{h}$ 、水电最低,为 $4.42\text{ g CO}_{2\text{-eq}}/\text{kW}\cdot\text{h}$ 。值得注意的是,风电、光伏和核电的主要排放,占比高达76%。

由于缺少水电发电运行阶段的相关数据,忽略了由于筑坝蓄水产生的土地利用类型变化、淹没区域有机质分解等产生的大量温室气体核算。已有研究表明,热带地区的水电在此阶段排放大量温室气体,近乎与化石燃料发电厂排放的温室气体相当,而在其他地区筑坝蓄水产生的温室气体量不大<sup>[27]</sup>。

### 3.1.4 臭氧层耗竭潜势

由于平流层臭氧的消耗,使得一部分强紫外线(UV-B波段)到达地球表面,对人体和动物健康、生

态系统组成与功能产生有害影响。2015—2020年,臭氧层消耗潜势呈逐年增长状态,平均增长幅度为5%。其中,2015年该类别环境影响值为 $2.51\text{E}+10\text{ mg CFC-11eq}$ ,2020年与之相比,臭氧层消耗潜势增长27%,增长至 $3.18\text{E}+10\text{ mg CFC-11eq}$ (表4)。从区域尺度上看,华北区域的排放占比最大,占比约32%,其次为华东地区,排放占比为24%,西南地区排放占比最低(图4d)。

在各能源电力类型中,煤电产生的臭氧层耗竭潜势最大,为 $1.37\text{E}-03\text{ mg CFC-11eq}/\text{kW}\cdot\text{h}$ ,其次为光伏 $1.54\text{E}-03\text{ mg CFC-11eq}/\text{kW}\cdot\text{h}$ 和风电 $8.08\text{E}-04\text{ mg CFC-11eq}/\text{kW}\cdot\text{h}$ ,核电与水电的臭氧层耗竭潜值较低,分别为 $1.37\text{E}-03\text{ mg CFC-11eq}/\text{kW}\cdot\text{h}$ 和 $2.21\text{E}-05\text{ mg CFC-11eq}/\text{kW}\cdot\text{h}$ (图5d)。

从生命周期阶段来看,发电运行阶段的煤电臭氧层耗竭潜势最高,占总量的40%以上,其次是光伏生产制造与煤电、核电的发电运行阶段,占比在10%以上,核电与水电的生产制造阶段占比最低,约1%。

### 3.1.5 酸化潜势

酸化潜势是衡量大气中硫氧化物、氮氧化物排放造成环境酸化的效应。化石燃料的燃烧或用于发电会直接或间接排放二氧化硫和氮氧化物,从而产生环境酸化风险。2015—2020年,酸化潜势呈逐年增长状态,平均增长幅度为5%。其中,2015年该类别环境影响值为 $5.64\text{E}+12\text{ g SO}_{2\text{-eq}}$ ,2020年与之相



2023年9月

比,酸化潜势增长25%,增长至 $7.06\text{E}+12\text{ g SO}_{2\text{-eq}}$ (表4)。从区域尺度上看,与其他环境影响类型区域特征相似,华北、华东和西北排放占比位居前三,同时华北和华东地区也是排放超50%的主要排放区域(图4e)。

从单位发电量的酸化潜势强度来看,煤电为 $1.31\text{ g SO}_{2\text{-eq}}/\text{kW}\cdot\text{h}$ ,仍高于其他发电方式,光伏 $0.10\text{ g SO}_{2\text{-eq}}/\text{kW}\cdot\text{h}$ 、风电 $0.07\text{ g SO}_{2\text{-eq}}/\text{kW}\cdot\text{h}$ 和核电 $0.07\text{ g SO}_{2\text{-eq}}/\text{kW}\cdot\text{h}$ 接近,水电为 $0.01\text{ g SO}_{2\text{-eq}}/\text{kW}\cdot\text{h}$ ,酸化潜势强度最低(图5e)。

分阶段来看,单位发电量酸化潜势,煤电的酸化潜势贡献主要来自发电运行阶段,占比为79.32%。光伏发电的酸化潜势几乎全部来自光伏组件设备生产阶段,占比高达99.77%。风电和水电的酸化潜势主要来自生产制造阶段的机组设备生产和电厂建设环节,占比可达80.32%。

### 3.1.6 富营养化潜势

富营养化使得藻类或某种特定水生植物的过度生长,从而影响水质和水生生态系统功能<sup>[28,29]</sup>。2015—2020年,富营养化潜势呈逐年增长状态,平均增长幅度为5%。其中,2015年该类别环境影响值为 $9.49\text{E}+14\text{ mg PO}_{4\text{-eq}}$ ,2020年与之相比,富营养化潜势增长26%,增长至 $1.19\text{E}+15\text{ mg PO}_{4\text{-eq}}$ (表4)。从区域尺度特征与其他环境影响相似,华北、华东为主要的排放区域,西南地区的排放占比最小(图4f)。

与其他环境危害效应一致,煤电仍是主要的富

营养化潜势贡献者,强度高达 $218.95\text{ mg PO}_{4\text{-eq}}/\text{kW}\cdot\text{h}$ 。风电 $4.51\text{ mg PO}_{4\text{-eq}}/\text{kW}\cdot\text{h}$ 、光伏 $37.76\text{ mg PO}_{4\text{-eq}}/\text{kW}\cdot\text{h}$ 与核电( $15.11\text{ mg PO}_{4\text{-eq}}/\text{kW}\cdot\text{h}$ )次之,水电 $5.10\text{ mg PO}_{4\text{-eq}}/\text{kW}\cdot\text{h}$ 富营养化潜势强度最低(图5f)。煤电运行过程所产生的富营养化潜势强度最大,占煤电的53.83%,其次是生产制造阶段。与新能源发电项目相比,火力发电消耗大量不可再生的煤炭资源,导致高的富营养化潜势强度。

### 3.2 不同情景下能源环境影响变化特征

对于“一切照旧”情景中6个环境影响而言,在2025—2060年间所有区域的能源环境影响压力将持续增大,2050达到顶峰,随后开始下降。从国家尺度上看,与2020年相比,2060年6种环境影响的增幅30%以上,化石能源损耗、温室气体排放和酸化潜势增幅均在41%,臭氧层耗竭和富营养化潜势紧随其后,增幅为40%,非生物耗竭潜势增幅最低,为30%(图6)。从环境影响类型角度来看,2060年全球增温潜势与富营养化潜势的增幅最高,与2020年相比,各区域增幅约为70%(图7)。其次为化石能源损耗潜势和酸化潜势,增幅均为48%,臭氧层耗竭潜势和非生物耗竭潜势紧随其后,增幅分别为40%和30%(图7)。

在此期间,煤电仍是能源电力系统的主要发电方式,随着社会经济的不断发展,社会用电量持续增加,因此也增加了相应的煤电发电量。在全生命周期评估中,与其他发电类型相比,煤电对环境影响控制变量的权重最大,可达90%以上。如不

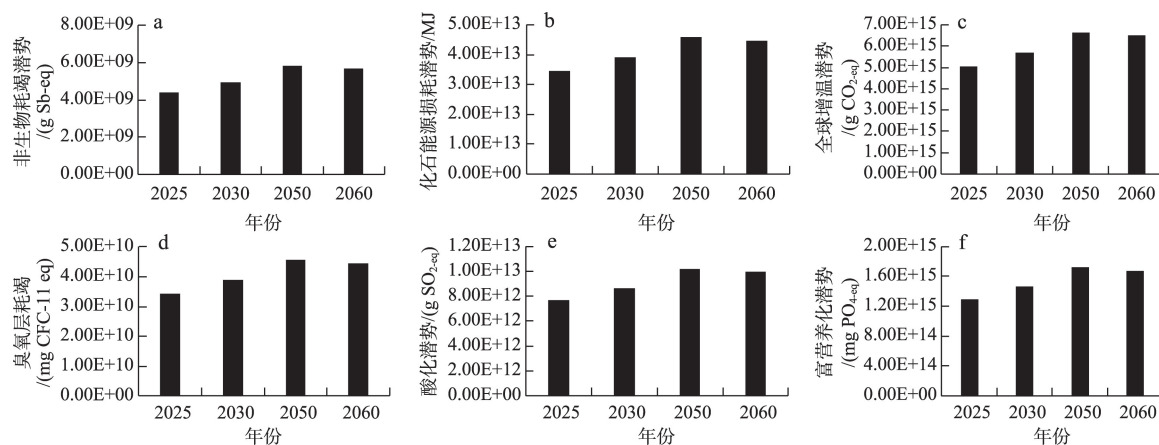


图6 2025—2060年“一切照旧”情景下中国环境影响排放的变化情况

Figure 6 Changes in environmental impact emissions in China under the “business as usual” scenario, 2025-2060

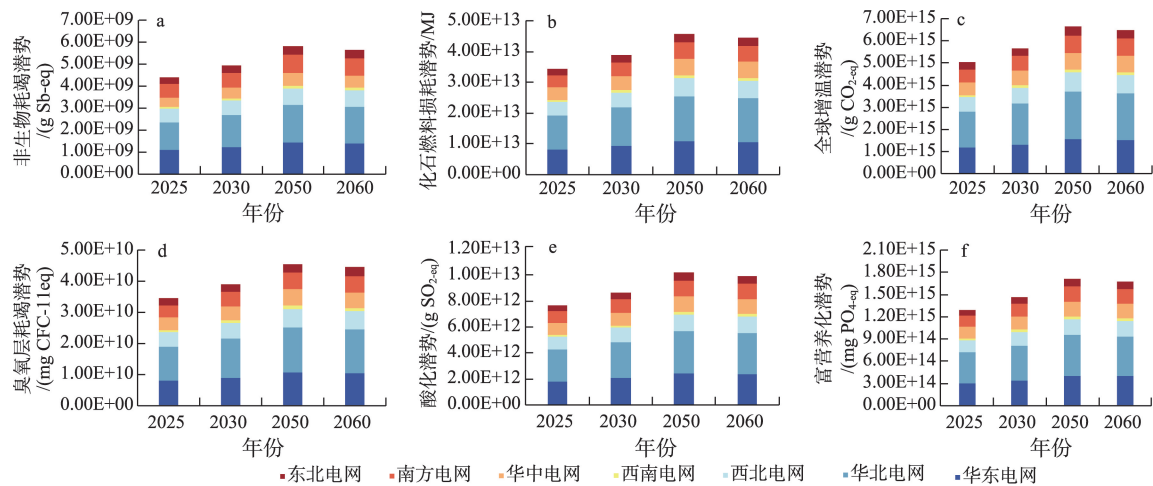


图7 2025—2060年“一切照旧”情景下区域环境影响排放的变化情况

Figure 7 Changes in environmental impact emissions in regions under the “business as usual” scenario, 2025-2060

改变能源结构,实现能源低碳绿色转型,国家和区域环境压力的态势将更加严峻。

为落实《关于完整准确全面贯彻新发展理念做好碳达峰碳中和工作的意见》,实现到2030年风电、光伏的总装机容量在12亿kW以上要求,在“碳中和目标”情景中,从不同区域的风电和光伏资源开发利用潜力出发,根据规划文件指标和实际电力需求量模拟,得到符合“碳中和”目标并满足区域能源负荷的最佳风光消纳比例及发电量。

总体来说,在优化风电和光伏发电比例的“碳中和目标”情景下,2025—2060年除非生物耗竭潜势之外,全国及各区域的能源环境影响压力将极大缓解(图8),主要路径是通过逐步减少甚至完全淘

汰煤电来减少环境影响。到2060年,在全面实现“双碳”目标下,煤电已退出电力供给系统,能源电力系统的温室气体和环境污染排放量将逐渐降至最低,国家尺度的化石能源损耗、全球增温潜势和臭氧层耗竭潜势分别减少 $4.34\text{E}+13$  MJ、 $6.38\text{E}+15$  g  $\text{CO}_2\text{-eq}$ 和 $3.69\text{E}+10$  mg CFC-11eq,酸化潜势和富营养化潜势分别减少 $9.27\text{E}+12$  g  $\text{SO}_2\text{-eq}$ 和 $1.52\text{E}+15$  mg  $\text{PO}_4\text{-eq}$ 。但是,非生物耗竭潜势却增加 $2.96\text{E}+09$  g Sb-eq,2060年为 $8.64\text{E}+09$  g Sb-eq。究其原因,核能和光伏是非生物耗竭的主要贡献能源类型,占该类型总排放均为30%以上。随着以风电和光伏为代表的可再生能源装机量继续增加,非生物耗竭潜势的增大值得引起关注。

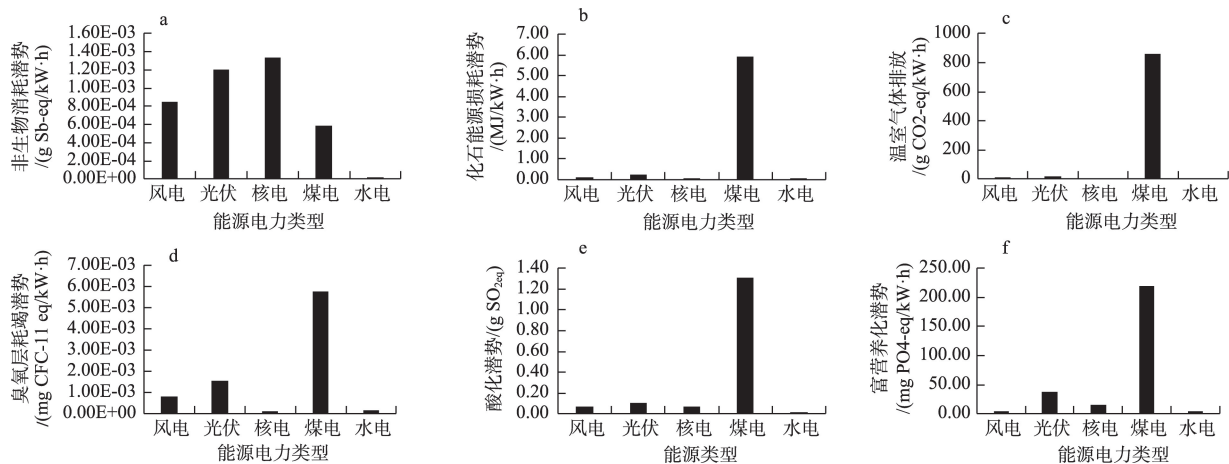


图8 2025—2060年“碳中和目标”情境下中国环境影响排放的变化情况

Figure 8 Changes in environmental impact emissions in China under the “carbon neutrality” scenario, 2025-2060

2023年9月

区域尺度上看,总体环境压力得到减轻,但是各区域相对环境压力却有不同。从排放比例上看,华北、西北地区仍是主要环境影响区域,但是变化趋势有所不同。随着能源结构持续优化,除西北和西南地区之外,其他区域的环境压力占比逐年减轻,而西北和西南地区的环境压力占比却逐渐增加(图9)。通过各能源电力类型的全生命周期评估结果可知,生产建设过程是能源电力系统的高强度温室气体和污染物排放阶段。华东、华北以及西北地区是风电和光伏的主要生产建设的区域,光伏是对西北和西南环境影响程度贡献的主要原因,致使西北和西南区域在环境影响的贡献程度逐年增加。

“碳中和目标”情景与“一切照旧”情景相比,2025—2030年期间各区域的能源环境压力将呈现持续降低状态,但非生物耗竭潜势却逐年增加。由于煤电尚未完全退出,在能源电力系统中仍占一定的比例。因此,对能源环境影响的缓解程度有限。在2050—2060年期间,各区域能源环境影响快速减少,2060年降至最低。在此期间,需要值得警惕的是,非生物耗竭潜势逐年在增加。

### 3.3 不同生命周期阶段的环境影响贡献率

5种能源电力类型在生命周期内各阶段产生的环境影响贡献率如图10所示,总体环境贡献率响假定为100%。从生命周期各阶段来看,生产制造是所选5种能源电力类型中环境影响的主要贡献阶段,对每个环境影响类别的贡献在70%~99%之间

(煤电的温室气体排放、酸化潜势和富营养化潜势3个环境影响类型除外),而发电运行阶段对环境的影响较小。这是因为在生产制造阶段,制造设备和建造设施等需要大量的能源和材料。风电轮机、塔筒和电缆制造以及光伏组件的晶硅材料、硅片和电池片生产过程,也是环境影响较大的阶段。因此,提高资源利用效率,减少材料使用量和提高循环利用率是降低环境损害的有效方法。

生产制造和发电运行阶段均为煤电环境影响的主要生命周期阶段。生产制造阶段中煤炭开采和设施建造过程是造成非生物损耗潜势、化石能源损耗潜势以及臭氧层消耗潜势的主要贡献过程,而发电运行阶段的煤炭燃烧是造成全球变暖潜势、酸化潜势以及富营养化潜势排放的主要贡献过程。

## 4 讨论与结论

### 4.1 讨论

#### 4.1.1 与其他研究的比较

为了说明本文结果的可靠性,以温室气体排放为例,与其他研究结果进行了对比(表5)。从表中可以看出,由于不同的系统边界界定与装机容量、使用年限和制造技术等因素影响,本文计算得到的数值与他人研究结果稍有偏差,但是差异较小,可以认为本文结果合理可靠。其中,水电与核电的温室气体排放结果较小,主要原因为:①水电依照Wang等<sup>[23]</sup>和王彦哲等<sup>[20]</sup>工作,选取中国清江干流常规中型水电站为例进行研究,由于水电站机组数据

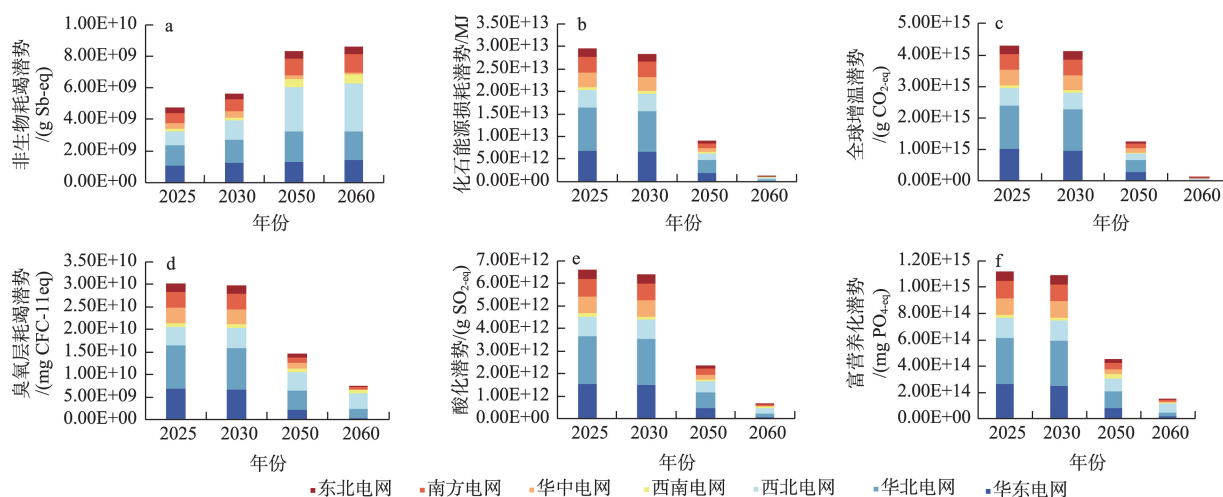


图9 2025—2060年“碳中和目标”情景下区域环境影响排放的变化情况

Figure 9 Changes in environmental impact emissions in regions under the “carbon neutrality” scenario, 2025-2060



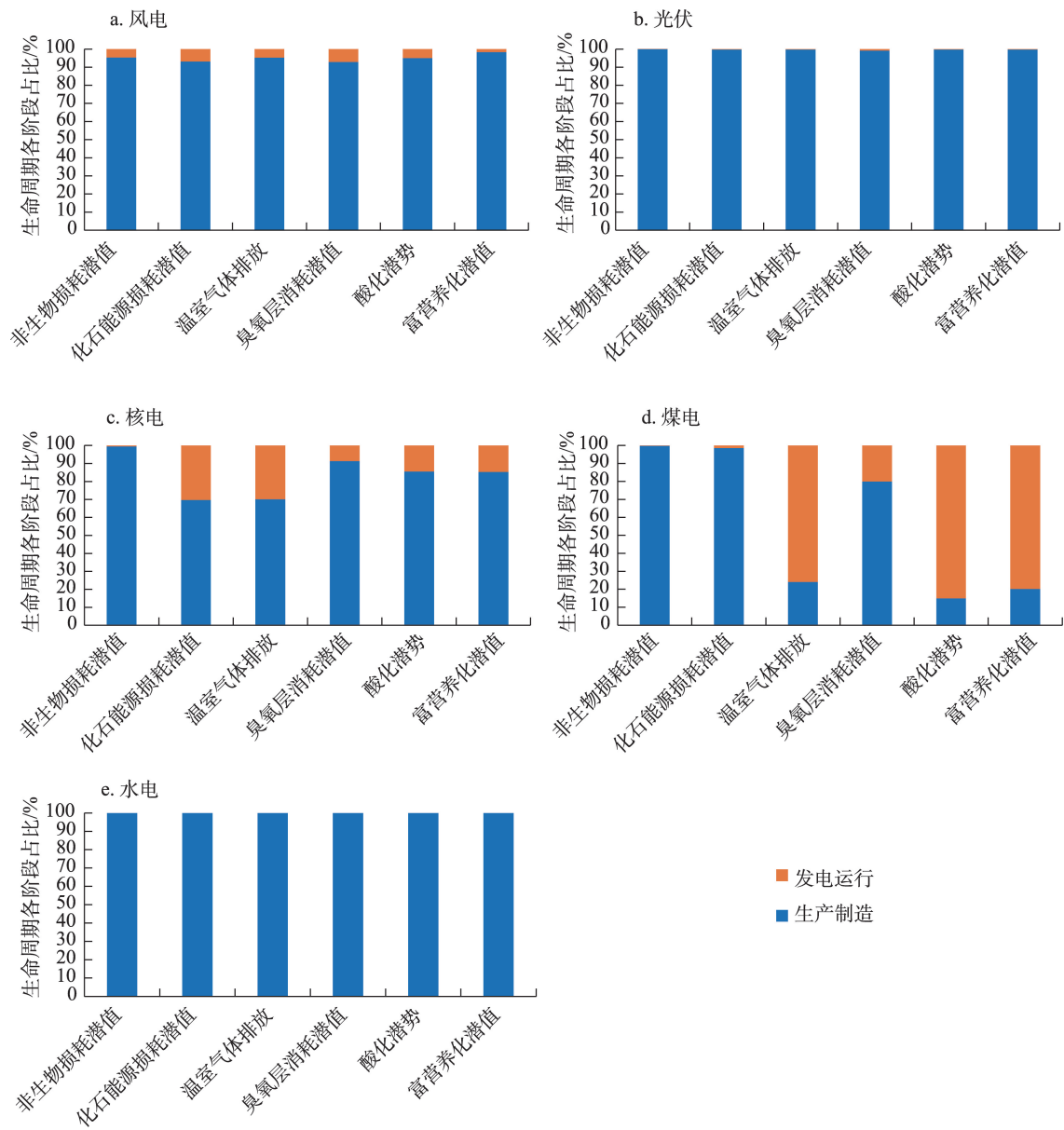


图 10 不同能源电力类型在生命周期阶段内对环境影响的比例

Figure 10 The proportion of environmental impacts of different types of energy and electricity during their life cycle stages

表 5 不同发电方式的温室气体排放研究结果对比 (g CO<sub>2</sub>/KW·h)

Table 5 Comparison of results of greenhouse gas emissions by different power generation methods (g CO<sub>2</sub>/KW·h)

文献来源	风电	光伏	核电	煤电	水电
Wang 等 <sup>[23]</sup>	28.3	—	12.4	—	3.84
王彦哲等 <sup>[20]</sup>	7.1~8.6	15.9~29.2	10.9	838~839	40.6~44.4
姜子英等 <sup>[22]</sup>	—	—	6.2	—	—
本文研究结果	10.59	20.57	7.43	859.36	4.42

获取较为困难,论文缺少机组建造阶段的估算。与其他研究相比,环境影响结果估算较小(表5),但与 Wang 等<sup>[23]</sup>的研究结果接近。②核电数据参照姜子

英等<sup>[22]</sup>对中国核电能源链的生命周期温室气体排放研究,通过大量的文献调研,确定核电能源链的核算范围以及材料消耗数据,更贴近中国国情。但由

2023年9月

于选取的数据库和分析方法不尽相同,因此结果有少许差异。

#### 4.1.2 不确定性分析与局限性

由于各区域5种能源的资源禀赋和开发利用条件的不同,本文研究结果存在一定的不确定性。通过SimaPro软件进行蒙特卡洛模拟,以分析5种能源电力类型环境影响的不确定性。在95%的置信区间内,对风电、光伏、核电、煤电和水电的所有输入材料进行 $\pm 10\%$ 的波动模拟,模拟次数执行10000次,以弥补数据规模导致评价结果的不确定性。所有影响类型的变异系数在0.28%~7.19%,不确定程度在允许范围内(小于10%),5种能源发电产生的环境影响的LCA结果可靠。

从环境影响类别来看,非生物消耗潜势具有最高的不确定性水平,化石能源损耗潜势不确定性水平最低。从能源电力类型来看,煤电与核电的非生物消耗潜势和风电的富营养化潜势具有最高的不确定性水平,分别为7.19%和6.74%。其次是核电非生物消耗潜势6.66%和风电的富营养化潜势6.49%。煤电化石能源损耗潜势的不确定水平最低,为0.28%。

此外,数据库参数的不确定性对LCA的可靠性有一定影响。例如,能源利用率、煤炭开采率,以及运输方式的选择等,都会影响LCA的准确程度。

由于数据可得性限制,本文未将能源设备的退役处理纳入生命周期计算过程。在LCA研究中,尽管能源发电设备的主要制造材料较为一致,但本文研究所选的材料清单可能存在差异和遗漏。此外,如果考虑能源发电相关设备在建筑安装阶段土地利用变化造成的温室气体排放,则该阶段的排放值将显著增加,甚至可能超过材料制造阶段。因此,系统边界的不确定性以及各种材料清单的选择仍有较大的改进空间。

#### 4.2 结论

本文利用生命周期评估理论以及CML-IA的环境评价方法,对风电、光伏、核电、煤电和水电在全生命周期的温室气体排放以及其他环境影响进行了评估。从全国及七大电网区域分析入手,通过能源结构变化情景假设,量化能源电力系统转型对中

国区域的环境影响。主要结论如下:

(1)2015—2020年,中国能源电力系统环境压力逐年增加。与2015年相比,2020年非生物耗竭潜势、化石能源损耗潜势、全球变暖潜势、臭氧层耗竭潜势、酸化潜势和富营养化潜势排放量分别增加48%、25%、25%、27%、25%和26%,增长至43.8E+09 g Sb-eq、3.16E+13 MJ、4.60E+15 g CO<sub>2-eq</sub>、3.18E+10 mg CFC-11eq、7.06E+12 g SO<sub>2-eq</sub>以及1.19E+15 mg PO<sub>4-eq</sub>。从区域角度来看,华东地区和华北地区排放占比较大,占总排放的50%以上,其次为南方地区,约占总排放的16%,西南地区排放占比最低。

(2)大力发展风电和光伏的新能源政策有利于减缓环境压力。情景分析表明,与现实情况相比,2025—2060年国家尺度“碳中和目标”情景能够极大程度减少环境影响的压力,但非生物耗竭潜势除外。到2060年,国家尺度的化石能源损耗、全球增温潜势和臭氧层耗竭潜势分别减少4.34E+13 MJ、6.38E+15 g CO<sub>2-eq</sub>和3.69E+10 mg CFC-11eq,酸化潜势和富营养化潜势分别减少9.27E+12 g SO<sub>2-eq</sub>和1.52E+15 mg PO<sub>4-eq</sub>。但是,非生物耗竭潜势却增加2.96E+09 g Sb-eq,2060年为8.64E+09 g Sb-eq。随着能源结构持续优化,除西北和西南地区之外,其他区域的环境压力占比逐年减轻,而西北和西南地区的环境压力占比却逐渐增加。

(3)煤电对环境的综合影响程度高于其他能源电力类型,水力发电对环境的影响是所选5种能源电力类型中最小的。以风电和光伏为主的新能源虽然在发电运行过程低碳、清洁绿色,但在设备制造、运输、安装等环节也会产生一定量的温室气体和污染物的排放,因此新能源发电并不是“零排放”。从生命周期的阶段来看,煤电在发电运行和生产制造环节均为温室气体和污染物排放的主要贡献阶段,而风电、光伏与水电的环境影响主要产生在生产制造阶段,核电的发电运行阶段则有一定的环境影响。

(4)大力发展风电和光伏新能源政策有利于减缓环境压力。中国在构建新型电力系统后,风电、光伏逐渐占主导,煤电比例降至较低水平。在未来,中国作为新能源的出口与消费大国,需要警惕

能源消费国的环境代价转移,通过制定环境调节税等政策,有效缓解自然环境系统的压力,增强自然-社会系统的可持续性。

## 参考文献(References):

- [1] Iyer G, Ou Y, Edmonds J, et al. Ratcheting of climate pledges needed to limit peak global warming[J]. *Nature Climate Change*, 2022, 12(12): 1-7.
- [2] Moosavian S M, Rahim N A, Selvaraj J, et al. Energy policy to promote photovoltaic generation[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2013, 25: 44-58.
- [3] Modahl I S, Askham C, Lyng K-A, et al. Weighting of environmental trade-offs in CCS: An LCA case study of electricity from a fossil gas power plant with post-combustion CO<sub>2</sub> capture, transport and storage[J]. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 2012, DOI: 10.1007/s11367-012-0421-z.
- [4] Khoie R, Bose A, Saltsman J. A study of carbon emissions and energy consumption of wind power generation in the Panhandle of Texas[J]. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 2021, DOI: 10.1007/s10098-020-01994-w.
- [5] Ardente F, Beccali M, Cellura M, et al. Energy performances and life cycle assessment of an Italian wind farm[J]. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2008, 12(1): 200-217.
- [6] Xu K, Chang J F, Zhou W J, et al. A comprehensive estimate of life cycle greenhouse gas emissions from onshore wind energy in China[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2022, DOI: 10.1016/j.jclepro.2022.130683.
- [7] Xie J B, Fu J X, Liu S Y, Hwang W S. Assessments of carbon footprint and energy analysis of three wind farms[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.120159.
- [8] Kumar A, Yang T, Sharma M P. Long-term prediction of greenhouse gas risk to the Chinese hydropower reservoirs[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.07.314.
- [9] 于随然, 李鹏. 中国光伏系统的生命周期评价[J]. *环境工程*, 2014, 32(10): 119-124. [Yu S R, Li Y. Life cycle assessment of photovoltaic system in China[J]. *Environmental Engineering*, 2014, 32(10): 119-124.]
- [10] Kumar I, Tyner W E, Sinha K C. Input-output life cycle environmental assessment of greenhouse gas emissions from utility scale wind energy in the United States[J]. *Energy policy*, 2016, 89: 294-301.
- [11] 刘聚明, 王志伟. 内蒙地区燃煤电厂生命周期温室气体排放分析[J]. *环境与发展*, 2014, 26(6): 60-63. [Liu J M, Wang Z W. The life cycle greenhouse gas emission inventories analysis of a coal-fired power plant in Inner Mongolia region[J]. *Environment and Development*, 2014, 26(6): 60-63.]
- [12] Feng K S, Hubacek K, Siu Y L, et al. The energy and water nexus in Chinese electricity production: A hybrid life cycle analysis[J]. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2014, 39: 342-355.
- [13] Hondo H. Life cycle GHG emission analysis of power generation systems: Japanese case[J]. *Energy*, 2005, 30(11): 2042-2056.
- [14] Wang C, Mu D. An LCA study of an electricity coal supply chain [J]. *Journal of Industrial Engineering and Management*, 2014, DOI: 10.3926/jiem.1053.
- [15] Dale V H, Efroymsen R A, Kline K L. The land use-climate change-energy nexus[J]. *Landscape Ecology*, 2011, 26(6): 755-773.
- [16] Vrînceanu A, Grigorescu I, Dumitraşcu M, et al. Impacts of photovoltaic farms on the environment in the Romanian Plain[J]. *Energies*, 2019, DOI: 10.3390/en12132533.
- [17] Xu L, Pang M Y, Zhang L X, et al. Life cycle assessment of on-shore wind power systems in China[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2018, 132: 361-368.
- [18] 李鹏. 中国晶体硅太阳能电池板的生命周期评价[D]. 上海: 上海交通大学, 2015. [Li Y. Life Cycle Assessment of Crystalline Silicon Modules in China[D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2015.]
- [19] 洪巧巧. 燃煤电厂烟气脱硫脱硝除尘技术生命周期评价[D]. 杭州: 浙江大学, 2015. [Hong Q Q. Life Cycle Assessment of Desulfurization, Denitration and Dedusting Technologies in Coal-fired Power Plants[D]. Hangzhou: ZheJiang University, 2015.]
- [20] 王彦哲, 周胜, 姚子麟, 等. 中国煤电生命周期二氧化碳和大气污染物排放相互影响建模分析[J]. *中国电力*, 2021, 54(8): 128-135. [Wang Y Z, Zhou S, Yao Z L, et al. Life cycle modeling analysis of the interaction between carbon dioxide and air pollutant emissions of coal power in China[J]. *Electric Power*, 2021, 54(8): 128-135.]
- [21] Tao M, Cheng W Q, Nie K, et al. Life cycle assessment of underground coal mining in China[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.150231.
- [22] 姜子英, 潘自强, 邢江於. 中国核能供应链的生命周期温室气体排放研究[J]. *中国环境科学*, 2015, 35(11): 3502-3510. [Jiang Z Y, Pan Z Q, Xing J Y. Greenhouse gas emissions from nuclear power energy chain life cycle in China[J]. *China Environmental Science*, 2015, 35(11): 3502-3510.]
- [23] Wang L, Wang Y, Du H B, et al. A comparative life-cycle assessment of hydro-, nuclear and wind power: A China study[J]. *Applied Energy*, 2019, 249: 37-45.
- [24] 陈冬波, 陆师敏, 宋木仿. 高坝洲水电站水轮发电机组选型设计[J]. *水力发电*, 2002, (3): 29-31. [Chen D B, Lu S M, Song M F. The selection and design of hydro-generating units in Gaobazhou



2023年9月

- Hydropower Station[J]. *Water Power*, 2002, (3): 29–31.]
- [25] 全球能源互联网发展合作组织. 中国2060年前碳中和研究报告[M]. 北京: 中国电力出版社, 2021. [Global Energy Interconnection Development Cooperation Organization. China's Carbon Neutral Research Report Before 2060[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2021.]
- [26] Liu L, Wang Y, Wang Z, et al. Potential contributions of wind and solar power to China's carbon neutrality[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2022, DOI: 10.1016/j.resconrec.2022.106155.
- [27] Fearnside P M. Hydroelectric dams in the Brazilian Amazon as sources of 'Greenhouse' gases[J]. *Environmental Conservation*, 1995, 22(1): 7–19.
- [28] Tilman D, Fargione J, Wolff B, et al. Forecasting agriculturally driven global environmental change[J]. *Science*, 2001, 292(5515): 281–284.
- [29] Smith VH. Eutrophication of freshwater and coastal marine ecosystems a global problem[J]. *Environmental Science and Pollution Research*[J]. 2003, 10: 126–139.

## Environmental impact assessment of energy and power system transformation in China

ZHANG Yajuan<sup>1,2</sup>, WANG Zheng<sup>1,3</sup>, LI Shuangcheng<sup>1,2</sup>

(1. College of Urban and Environmental Sciences, Peking University, Beijing 100871, China; 2. Key Laboratory for Earth Surface Processes of the Ministry of Education, Peking University, Beijing 100871, China; 3. Bay Area International Business School, Beijing Normal University, Zhuhai 519087, China)

**Abstract:** [Objective] Building a new type of electric system based on renewable energies, such as wind power and photovoltaic power, is an important measure to achieve carbon neutrality. China has a vast land area with significant differences in energy resource endowment, energy production structure, economic development level, and regional specialization for energy production. To achieve the “dual carbon” goals at a national scale, it is necessary to implement regionally differentiated action plans. [Methods] Starting from the analysis of the seven major power grid regions in China, using the methods of life cycle assessment and GIS-MCDA model, combined with the future electricity demand and proportion of each province, to quantify the environmental impact of energy and power system transformation on the Chinese region. [Results] The results of this study show that: (1) From 2015 to 2020, the environmental pressure on China and each of its seven regions continuously increased, with the East China and North China regions being the main emitting areas. (2) From 2025 to 2060, building an energy system based on new energy sources can greatly reduce the environmental pressure, except for the non-biomass exhaustion potential. (3) Overall, coal-based power generation has a higher environmental impact than other energy types (except for non-biomass exhaustion potential), and hydroelectric power generation has the smallest environmental impact among the five selected energy types. [Conclusion] The research results can provide a scientific basis for China to achieve the “dual carbon” goals through energy transformation, and also have some reference value for the government to make improved policy decisions.

**Key words:** life cycle assessment; dual carbon goals; environmental impact; energy and power system; energy transformation