

能源经济预测与展望研究报告

FORECASTING AND PROSPECTS RESEARCH REPORT

CEEP-BIT-2023-003 (总第 67 期)



中国电力部门省际虚拟水流动模式 与影响分析

2023 年 1 月 8 日

北京理工大学能源与环境政策研究中心

<http://ceep.bit.edu.cn>

能源经济预测与展望研究报告发布会

主办单位：北京理工大学能源与环境政策研究中心

北京理工大学国家安全与发展研究院

能源经济与环境管理北京市重点实验室

协办单位：北京经济社会可持续发展研究基地

北京理工大学管理与经济学院

中国“双法”研究会能源经济与管理研究分会

中国能源研究会能源经济专业委员会

特别声明

本报告是由北京理工大学能源与环境政策研究中心研究团队完成的系列研究报告之一。如果需要转载，须事先征得中心同意并注明“转载自北京理工大学能源与环境政策研究中心系列研究报告”字样。

中国电力部门省际虚拟水流动模式与影响分析

执笔人：曲申、林瑾、王永豪、喻可、张佳琪、刘洲屹、贾雅雯、余运磊

作者单位：北京理工大学能源与环境政策研究中心

联系人：曲申

研究资助：国家自然科学基金项目（72022004）。



北京理工大学能源与环境政策研究中心

北京市海淀区中关村南大街5号

邮编：100081

电话：010-68918651

传真：010-68918651

E-mail: squ@bit.edu.cn

网址： <http://ceep.bit.edu.cn>

Center for Energy and Environmental Policy Research

Beijing Institute of Technology

5 Zhongguancun South Street, Haidian District, Beijing 100081, China

Tel: 86-10-68918651

Fax: 86-10-68918651

E-mail: squ@bit.edu.cn

Website: <http://ceep.bit.edu.cn>

中国电力部门省际虚拟水流动模式 与影响分析

水资源危机被2020年世界经济论坛视作全球最大社会风险，气候变化已使我国水资源安全风险明显上升。能源、电力为水资源密集型行业，电力商品隐含的虚拟水资源通过跨省电力交换，进行了地区间水资源的再分配，对地区电力生产方式、水资源使用情况及利用方式产生广泛影响。本报告评估了我国30个省份电力部门的水资源使用情况，重点分析了电力行业的虚拟水流动模式，在结合地区水资源压力的基础上，进一步探讨了电力行业虚拟水转移对当地的水资源的使用和影响。

一、水资源匮乏威胁能源系统韧性

水和能源具有高度依存的关系，水资源的短缺将严重影响能源系统的稳定发展^[1]。水-能关系主要是指用于能源生产的水（包括能源的提取、净化、输送、加热、处理等消耗的水资源）与生产、处理水所消耗的能源之间的关系^[2]。

电力供应与发展依赖于水资源。在电力生产环节中，除原料外，还需要大量的水参与其中，例如煤炭洗选、运输、水力发电、火电机组冷却等，而冷却环节则是需水量与耗水量最大的一环。本世纪初，法国与美国多个火力发电厂因缺少足够的水资源而被迫关停或减产。2011年，长期干旱导致水库干涸，罗马尼亚水电公司产量降低了30%。2016年，由于严重干旱，印度燃煤发电行业利润损失至少3.5亿美元。

2022年，我国四川省遭遇了大范围长时间极端高温干旱天气，直接导致发电机组停机，影响波及全国产业供应链的稳定。

跨省跨区电力传输带来虚拟水转移。全国电力的远距离跨省输送，优化了电力资源的配置，同时造成了水资源的空间转移。缓解了极度缺水地区，如京津冀地区的发电用水量，而进一步加剧了西部地区本就严峻的水资源现状，增大了富煤缺水地区的水资源压力。以内蒙古、新疆、陕西为例，2020年对外输电分别导致了约12.38亿立方米、1.14亿立方米和1.88亿立方米的虚拟水外流。因此研究我国省际电力行业的虚拟水转移对水资源利用、以及电力系统安全稳定运行具有重要意义。

二、电力行业虚拟水流动网络模拟

（一）模型

本报告采用基于广义矩阵的网络法^[1]评估了我国 2020 年电力跨省运输隐含的虚拟水转移量。基于广义矩阵的网络法根据一定时期内（如一年）各省电网发电、跨省电力交换和电力生产用水的统计汇总数据，将一个电网的发电直接用水与另一个电网的电力消费联系起来。在模型中，发电端和用电端视作节点，地区间的电力传输线路视作链接，电能在这个网络中流动。同时，电能的流动带动电力产品中隐含的虚拟水流动，形成了一个虚拟的水流动网络。如果一个电网从另一个电网进口电力，而另一个电网又从第三个电网进口，那么第一个电网可能间接从第三个电网进口一些电力。该方法能够模拟无穷高阶电力转移，刻画地区间复杂电力贸易和电力部门的虚拟水转移网络。

（二）数据来源与处理

2020 年跨省电力交换数据、各省份总发电量、各省份分类型发电量、全国出口电量来自中国电力企业联合会发布的《二〇二〇年电力工业统计资料汇编》。跨省电力交换数据中电力送端地区均为省份，电力受端地区也大多为省份，个别受端地区为区域电网。针对这种情况，本报告根据实际的电网传输路线，将输电电量依次分解到省级单位。由于输电线路损电量的用水也计入发电厂年许可用水量中，本报告不扣除输电线损电量。

报告中我国机组冷却技术组合参考文献^[4-5]设定，文献^[4]公布了我国各省份 2015 煤电机组不同冷却技术的装机容量，如表 1 所示；文献^[5]中统计了 2015 年我国燃气机组的冷却技术，即均采用直流冷却技术。由于数据可得性，本报告假定 2020 年我国各省火电机组冷却技术组合保持不变。我国核电机组取水水源均为海水，而水库具备统筹防洪、供水、灌溉、生态、航运和发电等多种需求，水电用水量在核算上具有较大争议，因此本报告仅考虑火力发电的用水情况。基于各省发电的平均取水、耗水系数^[6]，本报告核算了中国省际输电导致的电力虚拟水流动。

表 1 各省份火电冷却技术组合

省份	直流冷却	循环冷却	空冷
北京	15%	85%	0%
天津	38%	62%	0%
河北	22%	61%	17%
山西	0%	42%	58%
内蒙古	3%	48%	49%
辽宁	28%	70%	2%
吉林	9%	68%	24%
黑龙江	19%	77%	3%

上海	88%	12%	0%
江苏	66%	34%	0%
浙江	79%	21%	0%
安徽	31%	69%	0%
福建	94%	6%	0%
江西	22%	78%	0%
山东	24%	76%	0%
河南	5%	94%	1%
湖北	58%	42%	0%
湖南	60%	40%	0%
广东	77%	23%	0%
广西	66%	34%	0%
海南	100%	0%	0%
重庆	28%	72%	0%
四川	0%	100%	0%
贵州	0%	100%	0%
云南	0%	100%	0%
陕西	0%	50%	50%
甘肃	0%	62%	38%
青海	16%	84%	0%
宁夏	0%	47%	53%
新疆	0%	47%	53%

三、结果分析与讨论

(一) 我国跨省电力交换情况

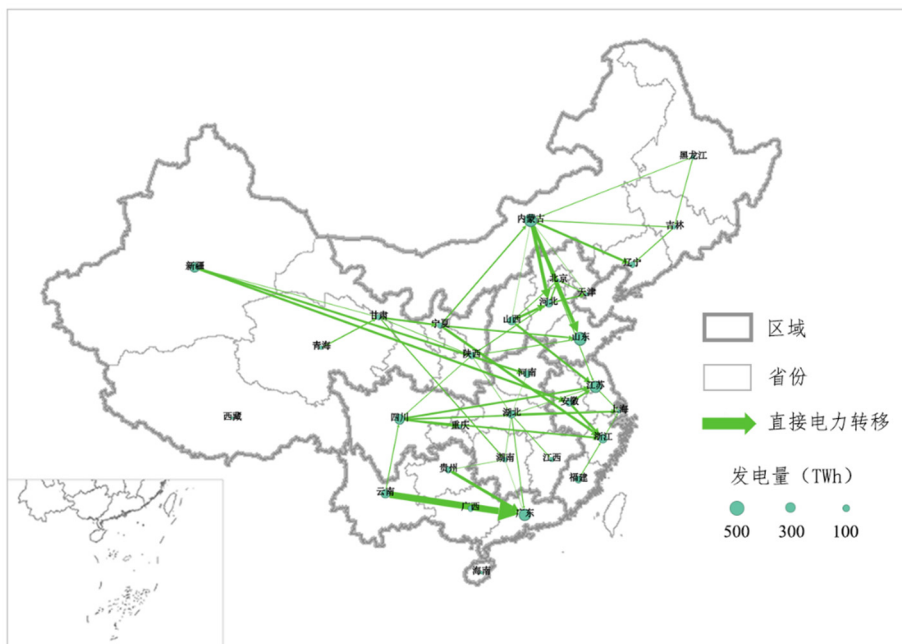


图 1 2020 年我国跨省直接电量交换流
(注：图中仅显示大于 50 亿千瓦时的电力交换)

我国跨省电力传输的总体方向是从西北地区往华北、华东地区输送，西南地区向东南沿海、长三角地区输送，即煤炭、水能资源集中但经济水平不发达的地区向经济发达、用电负荷集中的东部地区输送，具有输送距离远、输送体量大、跨多个省份输送的特点。图 1 绘制了 2020 年我国跨省直接电量交换的网络流动图，图中节点的大小和颜色深浅分别代表各省份本地发电量的大小，箭头由电量送端省份指向受端省份，其粗细代表了 2020 年直接电量传输量的多少。2020 年中国跨省直接输送电量占总发电量的 19.80%，输送总量约为 1511.42 太瓦时，直接外送电量最大的省份是内蒙古，在 2020 年总共输送了约 229.69 太瓦时的电量。2020 年直接受电最多的省份是广东省，接收外省输送电量达到 222.21 太瓦时。广东省跨省进口电量主要来自于云南省输送的 130.88 太瓦时，占全国省际电力交换的 8.66%，是流量最大的跨省电力传输。附表 1 列出了 2020 年我国排名前 20 的跨省电力交换流。随着我国的经济增长，电力消费也在逐年提升，输送线路数量及容量逐年提升，跨省跨区域传输网络和电量总数将进一步提高。

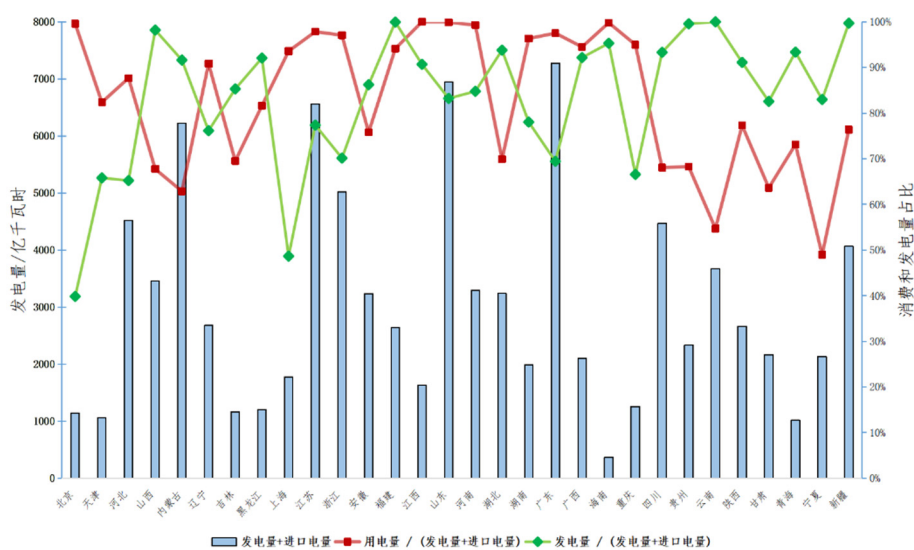


图 2 2020 年各省发电量、输入电量之和及用电量、本地发电量占比

内蒙古、山西、四川、云南、宁夏和新疆为主要电量输出省(区)，北京、上海、天津、河北和浙江为主要电量输入省。图 2 展示了各个省份和直辖市的总电量即发电量和输入电量之和，以及用电量和本地发电量的占比。如果某省的用电量在总流入电量中所占比例较低，则该省份的电力可输出比例就相对较高，例如内蒙古自治区、宁夏自治区、云南省，其占比均低于 60%，在全国电力网络传输系统中为主要电量输出省份，这些省份多位于我国的西部地区，具有丰富的水力、煤炭、石油、天然气和风、光资源，在我国电力交换系统中起着电力仓库的作用。发电量占总流入量较低的省份，则极大依赖于外省的电力输入，例如北京市、上海市，均低于 50%，这两个城市均为第三产业占比高，经济高度发达而能源匮乏的地区，可利用的自然资源相对较少，十分依赖电网体系中的外部电力供应，是我国电力消费的排头兵。某省发电量占总流入量比例和用电量占总流入量都较低，那么这个省份极有可能在电力交易网络中发挥了“传递”的作用，如陕西和甘肃省。

(二) 我国各省电力部门的虚拟水转移模式分析

虚拟水转移网络比电力直接交换网络互相连接更加紧密，存在大量间接电力交换。电力直接交换链路共有 115 条，图 1 仅显示大于 50 亿千瓦时的电力交换；虚拟水转移链路共有 761 条，图 3 仅显示大于 0.1 亿立方米的虚拟水转移链路。这表明在没有直接进行电力传输的省份之间，存在着大量的隐形间接电力交换。在上图中，节点的大小

代表各省电力生产的取水量大小，箭头的指向代表虚拟水的流动方向，箭头的粗细则代表了虚拟水转移量的大小。

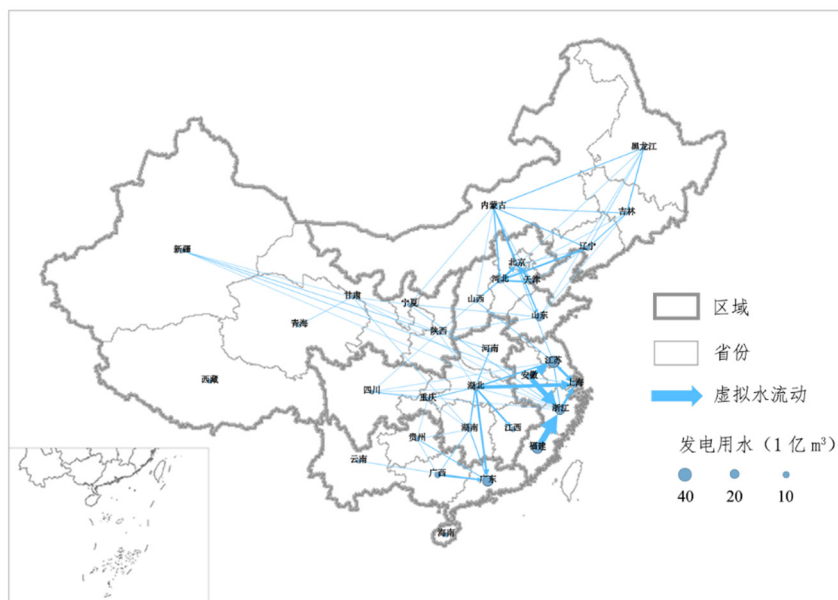


图 3 2020 年基于网络推断的中国省际虚拟水传输流
(注：图中仅显示大于 0.1 亿立方米的虚拟水转移流)

截止 2020 年底，省际电力部门的电量交换产生的虚拟水转移流量总值高达 175.78 亿立方米。2020 年全国水资源总量约为 31605.20 亿立方米，全国用水量为 5812.90 亿立方米。2020 年，由电力部门跨省运输导致的虚拟水转移量约占全国用水量的 3%。表 2 列出了 2020 年我国排名前 20 的跨省电力交换导致的虚拟水转移流，其中虚拟水总流出量最多的省份是湖北，总流出量达到 32.74 亿立方米，主要流向上海、广东、江苏和江西等地区。虚拟水总流入量最多的省份为浙江省，总流入量 42.62 亿立方米，主要来源于福建、安徽两省。

表 2 网络推断的跨省电力交换导致的虚拟水转移流（前 20）

区域	起点		终点		虚拟水转移（亿 m ³ ）
	区域	省市	区域	省市	
东部区域	东部区域	福建	东部区域	浙江	20.57
东部区域	东部区域	安徽	东部区域	浙江	17.05
东部区域	东部区域	安徽	东部区域	江苏	12.32

中部区域	湖北	东部区域	上海	11.04
东部区域	江苏	东部区域	上海	7.31
东部区域	浙江	东部区域	上海	7.12
北方区域	天津	北方区域	北京	6.74
北方区域	河北	北方区域	北京	6.13
中部区域	湖北	南方区域	广东	5.70
东北区域	辽宁	北方区域	河北	5.29
中部区域	湖北	中部区域	江西	5.13
南方区域	广西	南方区域	广东	4.64
北方区域	河北	北方区域	天津	4.62
中部区域	湖北	东部区域	江苏	4.08
东北区域	内蒙古	北方区域	山东	3.77
东部区域	上海	东部区域	江苏	3.56
东北区域	内蒙古	北方区域	河北	3.35
中部区域	湖北	中部区域	湖南	3.26
东北区域	黑龙江	东北区域	吉林	2.62
东部区域	上海	东部区域	浙江	2.44

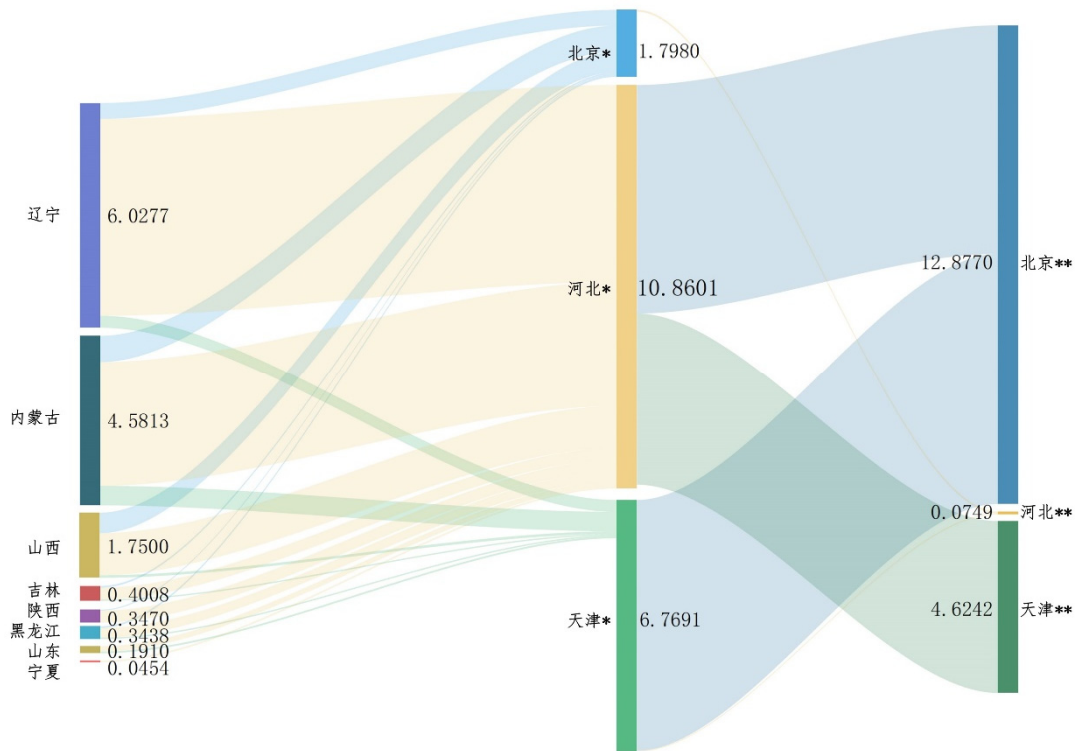


图4 京津冀地区三省电力转移虚拟水流量（单位：亿 m³）

（注：左侧表示京津冀地区三省外地区向京津冀三省的虚拟水流入，右侧表示京津冀三省内部的虚拟水流动，分别用省份*和省份**表示，仅显示流量超过0.02亿 m³的虚拟水流动）

2020 年京津冀地区通过电力输送从中国其他地区进口了 13.69 亿立方米的虚拟水资源，无向地区外各省份跨省输电，为虚拟水净流入

入地区。河北省为京津冀地区最主要的电力输入和虚拟水流入节点，其流入量几乎全部再输送给北京、天津。考虑京津冀地区内部的虚拟水转移后，北京、河北仍为虚拟水净流入地区，净流入量分别为 14.60 亿立方米和 0.18 亿立方米。2020 年京津冀地区自身发电量为 4100 亿千瓦时，京津冀地区全社会用电量超过 5973.72 亿千瓦时，存在较大的电力供应缺口，京津冀地区与周边山西、河南、山东、内蒙古已经建立起了 15 条超高压和特高压输电通道，总电力交换能力可达到 7600 万千瓦，缓解电力供应压力的同时，引入了大量伴随电力输入带来的虚拟水。

京津冀地三省最主要的虚拟水来源是辽宁省、内蒙古和山西省。辽宁省向北京、天津、河北提供电力分别导致 0.42 亿立方米、0.32 亿立方米、5.29 亿立方米的虚拟水流入。辽宁省向京津冀地区输送虚拟水量占辽宁省向全国其他各省的虚拟水流量的 99.50%。北京、天津、河北由于从内蒙古接收电力分别导致 0.70 亿立方米、0.52 亿立方米、3.35 亿立方米的虚拟水流入。内蒙古自治区向京津冀地区输送虚拟水量占其向全国其他各省的虚拟水流量的 37.02%。山西省向京津冀地区提供电力输送虚拟水量为 1.75 亿立方米。

长江经济带地区的虚拟水流动主要集中于地区内部浙江、江苏、上海、安徽和湖北五省。长江流域经济带中存在较大电力缺口的省份主要是位于经济带上游的浙江、江苏和上海三省，为虚拟水资源流入省份；而安徽省和湖北省通过电力输送向浙江、江苏和上海三省输送了总计 45.45 亿立方米的虚拟水资源。如图 5 所示，浙江省 2020 年

发电量 3521 亿千瓦时，全社会用电量 4872.21 亿千瓦时，电力缺口主要由地区外福建省和地区内安徽省和湖北省输送。由于电力输送导致的地区内部、外部虚拟水输入流量分别为 20.57 亿立方米和 20.94 亿立方米，总计 41.51 亿立方米。安徽省是长江经济带中向区域内其他各省输送虚拟水最多的省份，高达 30.03 亿立方米，主要通过电力交换向浙江、江苏转移虚拟水资源，占比分别为 41%和 57%。湖北省分别向长江经济带地区内和地区外各省输送 25.12 亿立方米和 7.62 亿立方米虚拟水，总计 32.73 亿立方米，是长江流域经济带中其他各省输送虚拟水最多的省份。长江流域经济带中的其他省份，尤其是中下游省份，几乎不向区域外的省流出虚拟水。

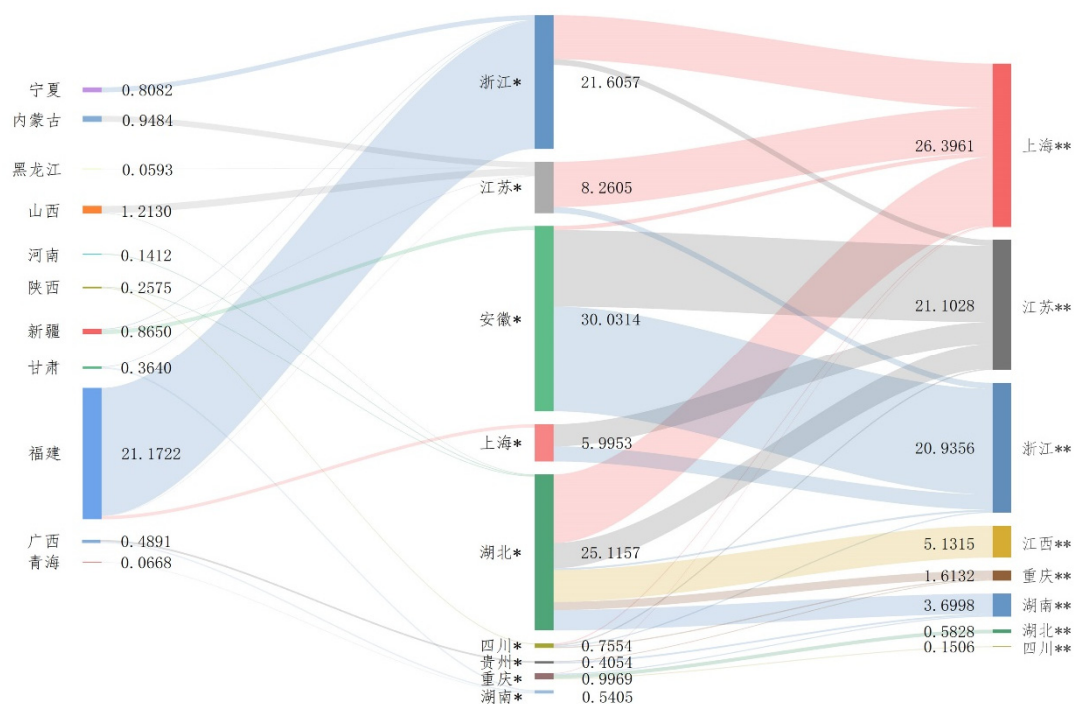


图 5 长江经济带地区十一省电力转移虚拟水流量 (单位: 亿 m³)

(注: 左侧表示长江经济带地区十一省以外地区向长江经济带十一省的虚拟水流入, 右侧表示长江经济带十一省内部的虚拟水流动, 分别用省份*和省份**表示, 仅显示流量超过 0.05 亿 m³ 的虚拟水流动)

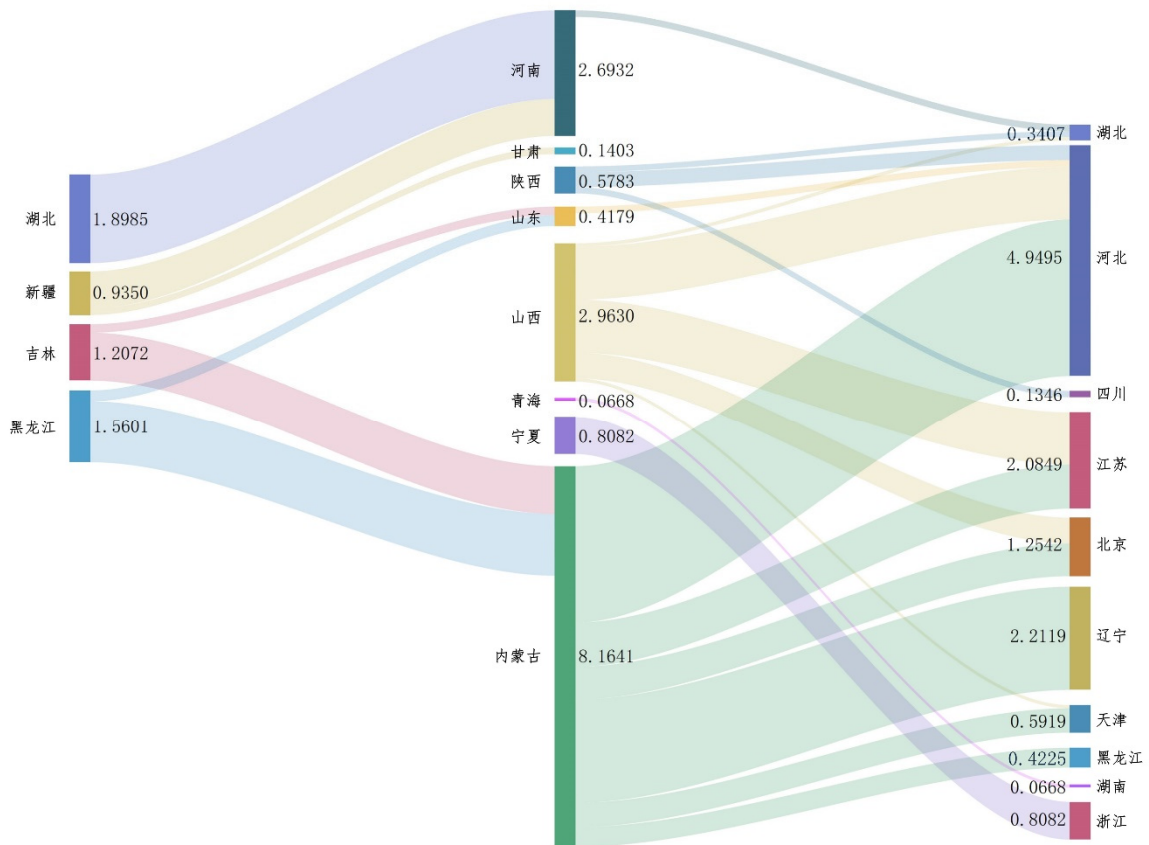


图6 黄河流域八省电力转移虚拟水流量 (单位: 亿 m³)
 (注: 左侧表示黄河流域八省以外地区向黄河流域八省的虚拟水流入, 右侧表示黄河流域八省的虚拟水流出, 仅显示流量超过 0.05 亿 m³ 的虚拟水流动)

黄河流域煤炭资源的富集, 黄河流域八省通过向中国其他各省输出电力, 净流出 8.22 亿立方米的虚拟水; 内蒙古虚拟水资源流出量最大, 山西次之。整体来看, 2020 年黄河流域八省通过电力输送向中国其他省份输送了 13.97 亿立方米的虚拟水资源, 中国其他省份向黄河流域八省通过电力输送 5.75 亿立方米的虚拟水, 为虚拟水净流出区域。黄河流域八省中, 结合 2020 年我国跨省直接电量交换流 (图 1) 分析可得, 作为 2020 年供电量最大的省份内蒙古自治区, 除保障区内电力供应之外, 还为周边省份提供了大量的电力来源。2020 年内蒙古自治区为他省提供的电力导致了电力部门共计 5.93 亿立方米的虚拟水净流出。内蒙古自治区 2020 年跨省输出前三的省份分别是

河北、辽宁和江苏省，分别导致了 3.35 亿立方米、2.21 亿立方米和 0.95 亿立方米的虚拟水流出；而吉林和黑龙江向内蒙古输送电力带来了 2.35 亿立方米虚拟水流入。除此以外，山西省、宁夏回族自治区、甘肃省和陕西省与外省的电力交换过程也导致了虚拟水资源的外流，这四个省份电力部门的虚拟水净流出量分别为 2.99 亿立方米、0.92 亿立方米、0.29 亿立方米和 0.69 亿立方米。

(三) 电力部门虚拟水转移对各省水资源的影响

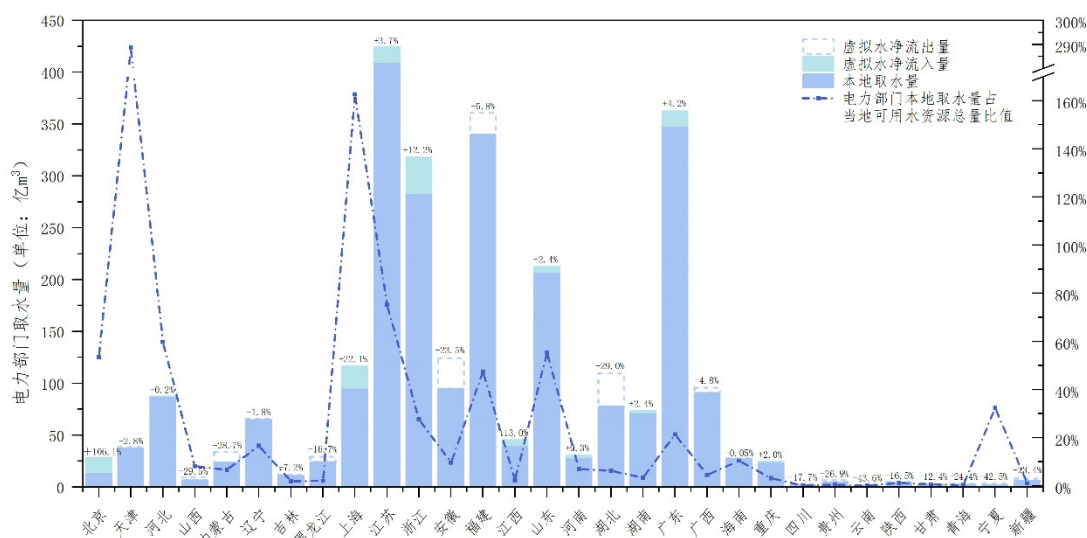


图 7 我国各省电力部门本地取水量与虚拟水转移情况

跨省跨区电力交换的虚拟水转移引致了地区间水资源的再次分配。对于电力输出大省，支撑外省电力供应增加了本地电力部门取水量 20%-30%；对于电力输入大省，虚拟水资源流入对本地电力部门取水量的缓解程度波动较大。电力部门取水量是指由于电力生产的需要直接从江河、湖泊或者地下通过工程或人工措施获得的水量，通常包括蓄水、引水、提水、调水等。虚拟水表示电力生产过程中所使用的水资源，也可分为取水和耗水，电力一旦进行跨省交换，电力所隐含的虚拟水也在省际之间流通和转移。考虑了电力交换过程中隐含的

虚拟水，取水量下降的省份有天津、内蒙古、辽宁、吉林、黑龙江、安徽、福建等地，表明这些省份通过电力传输向中国其他省份输送了虚拟水资源。北京、河北、上海、江苏、浙江、江西、山东、河南、湖南、广东以及重庆均在考虑虚拟取水量变动后实现了取水量的净增长，其中北京的增长率最高，增加了原先自身电力部门取水量的106.1%，这是由于北京地区严重缺水而对电力的需求量又相对较高。

我国各省电力部门本地取水量呈现东部沿海地区较高，中西部地区较低的特点。2020年，由于各省本地发电带来取水量最大的均为耗电量大的东部沿海省份，分别为江苏、广东、福建、浙江、山东，取水量分别达到了409.43亿立方米、347.81亿立方米、360.77亿立方米、283.33亿立方米和207.33亿立方米。其中，江苏、广东、浙江2020年火力发电量位居全国前列。

电力部门本地取水量与发电类型、冷却技术和发电量密切相关。山西、四川、贵州、云南、陕西、甘肃、青海、宁夏、新疆地区电力部门本地取水量较少，均未超过10亿立方米。内蒙古、新疆为我国重大能源基地，其2020年火力发电量分别位于全国第二、第五，但整体本地取水量仍低于江苏、广东、浙江三省；由于内蒙古和新疆的火电机组多采用空冷冷却方式，占比超过50%，而江苏、广东、浙江三省的火电机组以直流冷却为主，占比约80%。我国中西部地区水资源存量较为丰富，四川、贵州和云南以水电为主，火力发电量仅占本省发电量约10%左右，而水电取水量在本报告中不计入。各省电力部门本地取水量占水资源总量的比值中最高的是天津，上海次之，二者

均超过了 150%，主要是因为该地区可用水资源总量较低。而四川、贵州、云南等地占比仅在 1%左右，反映了上述地区水资源丰富，但电力部门用水较少的特点。

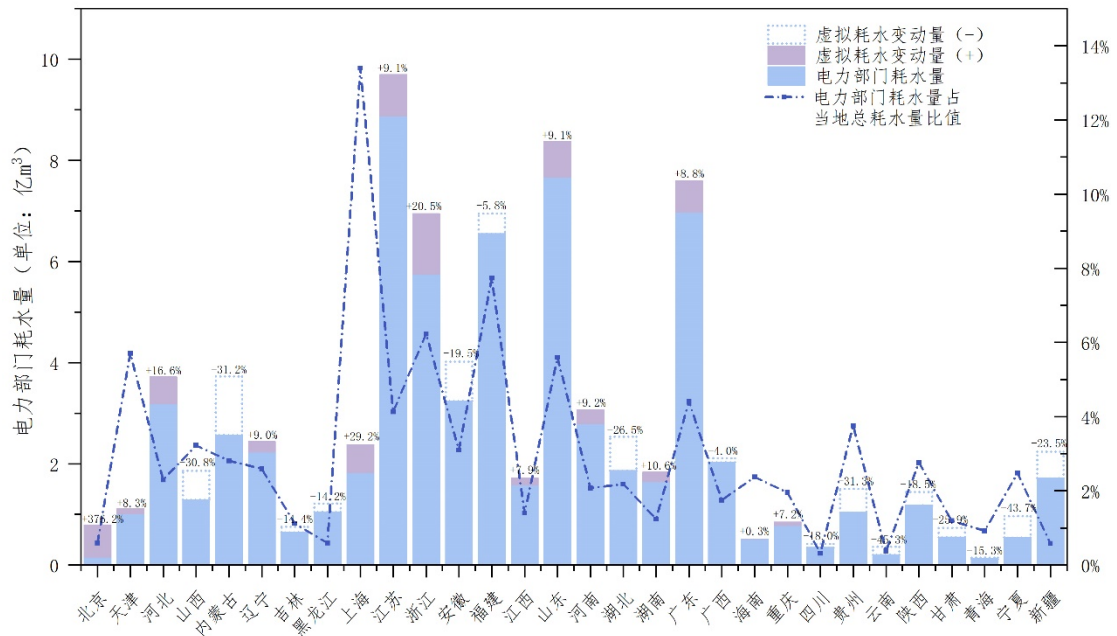


图 8 我国各省电力部门本地耗水量与虚拟水转移情况

整体而言，除天津、辽宁二省以外，各省纳入电力交换隐含的虚拟耗水量后，变动趋势与取水量的变动趋势大致相同；变动幅度的变化主要与电力交换省份火电机组冷却技术、交换电量相关。各省电力部门本地耗水量也同样呈现出东部沿海地区较高，中西部地区较低的特点，由于各省份火电机组冷却技术不变前提下，取水和耗水的比例不变。电力部门耗水量是指为满足电力生产需求，用水过程中所消耗的、不可回收利用的净用水量。江苏、山东、广东、福建、浙江电力部门本地耗水量同样显著多于其他省份，位居全国前五，但其差距大大缩小。这是由于，江苏等五省火电机组主要采用直流冷却技术，其取水量较大，而耗水量小。上海电力部门的本地耗水量占当地耗水总量的比值为 13.40%，是唯一占比超越了 10%的省份，主要是由于上

海当地水资源匮乏，全市耗水总量仅为 13.72 亿立方米，全国最低。计算和比较各省包括隐含虚拟水的实际耗水量后，北京市电力部门耗水量变动比例最大，从 0.17 亿立方上升为 0.78 亿立方米，增加了 376.20%。天津、河北的虚拟耗水量的变动值也较虚拟取水量的变动值有较大幅度的上升。这是由于京津冀地区的电力缺口主要由内蒙古、山西和辽宁等地区补充，内蒙古和山西地区火电机组大多采用空冷冷却技术，其取水量较直流冷却低，但其耗水量大。

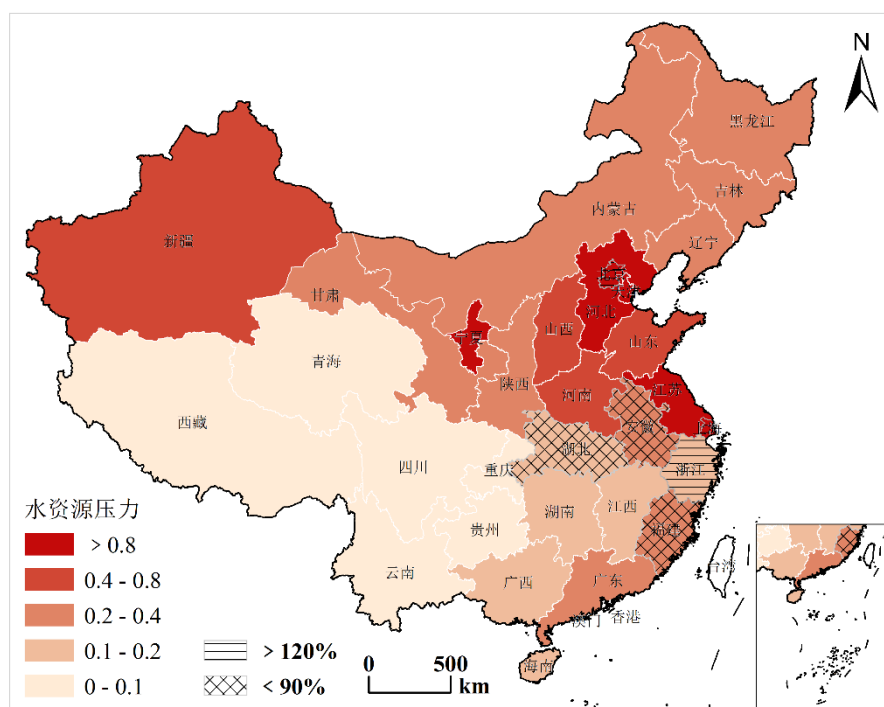


图 9 我国各省份水资源压力情况

我国 19 个省份存在中度以上的缺水，其中，超过半数为高度缺水地区。由于电力部门的虚拟水转移，当地水资源压力变动较大的地区为北京、上海、浙江、安徽、福建和湖北。报告采用 Withdrawal to Availability (以下简称为 WTA) 作为水资源压力指标，该指标通过地区取(用)水量与该地区的可用水量总量的比值，衡量一个地区的缺水程度，具体数值见附录中附表 2。若某一地区 WTA 值小于 10%，

则说明该地区水资源较为丰富，缺水程度低；其值介于 10%到 20%之间说明该地区面临低至中度缺水；其值介于 20%到 40%说明该地区面临中至高的缺水压力；而值介于 40%到 80%的地区为高度缺水地区,超过 80%则为极度缺水地区。图 9 中，各省的水资源压力越大，其颜色越深。按照缺水程度，将我国 30 个省份（除西藏以外）划分为极度缺水地区、高度缺水地区、中-高度缺水地区、低-中度缺水地区和水资源较丰富地区，如图 9 和图 10(a)-(d)所示。

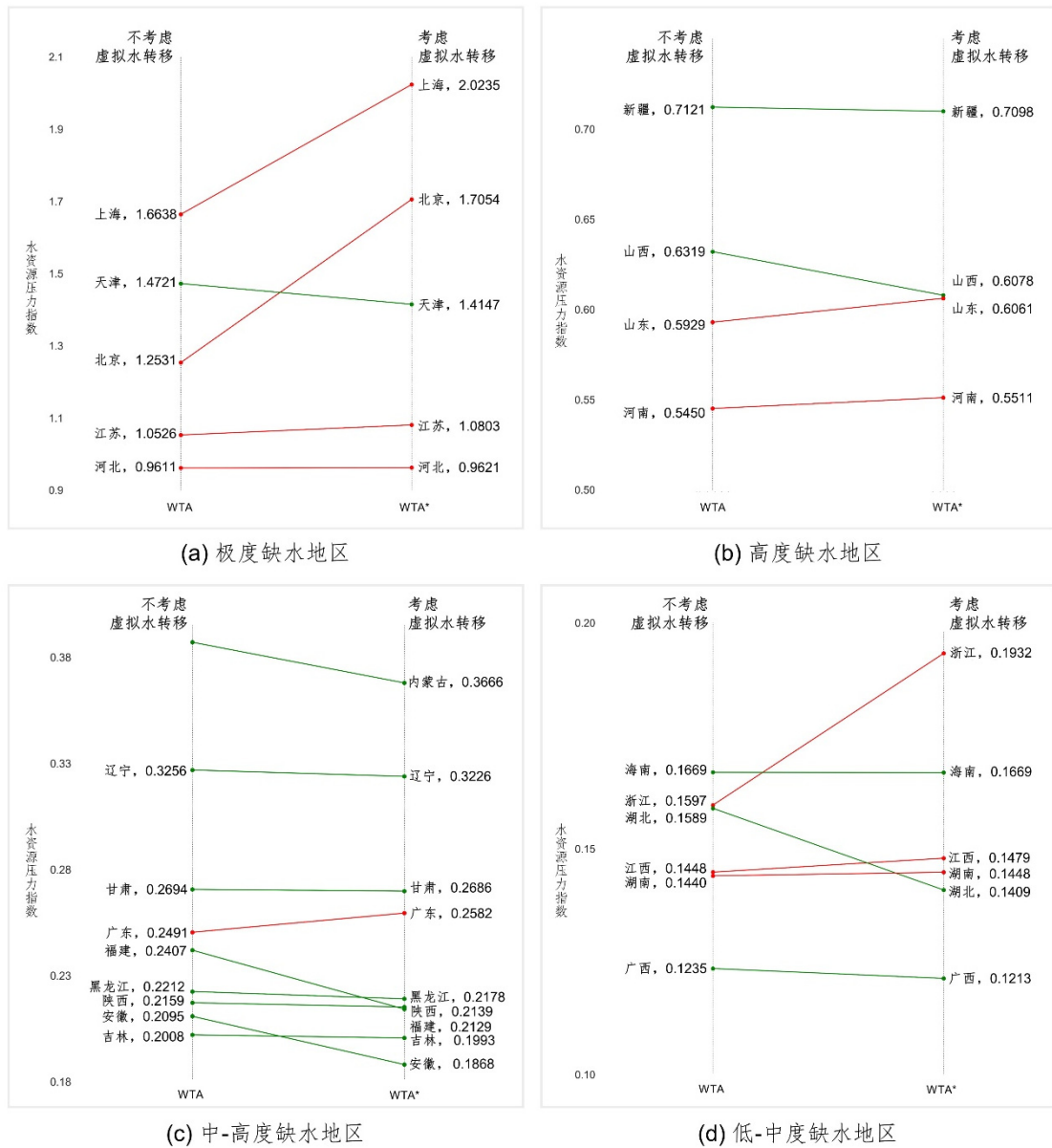


图 10 不同水资源压力地各省份水资源压力指数对比

跨省跨区电力贸易虽可以缓解电力受端省份的缺水问题，同时也减轻电力受端省份的用水压力，但是将大大增加电力富余省份的水资源压力。北京、上海等经济发达地区为虚拟水贸易的受益地区；而山西、内蒙古等地水资源短缺和供需矛盾进一步加剧。考虑和不考虑电力部门虚拟水转移的水资源压力指标之间的差异，反映了电力部门虚拟水流动对电力送端省份水资源压力的加剧程度。图 9 中分别用横线和网格线标记电力商品的隐含取水量纳入指标计算后上升超过 20% 和下降超过 10% 的省份。内蒙古、山西、宁夏等极度贫水地区同为我国火电输出省份，转移了大量的本地虚拟水，进一步加剧流域“水-能”矛盾；如果不发生虚拟水输出，其水资源压力等级将明显降低。而电力受端省份，其中大多经济发达地区，如北京、上海、浙江、江苏、广东等，虚拟水进口远大于出口，若不发生虚拟水进口，其水资源压力将进一步升高，如浙江省将由低-中度水资源压力地区直逼中度水资源压力地区。而京津冀地区位于水环境脆弱的海河流域，地区平均水资源总量仅相当于全国人均水资源量的 5%~13%，属于极度缺水地区。根据《全国水资源综合规划配置阶段关键成果》，京津冀地区 2030 年将面临约 14.2 亿立方米的水资源缺口，电力部门的虚拟水流入在一定程度上缓解了京津冀地区的水资源短缺风险。

参考文献

- [1] Bauer D, Philbrick M, Vallario B, et al. The water-energy nexus: Challenges and opportunities[J]. US Department of Energy, 2014.
- [2] Gleick P H. Annual review of energy and the environment[J]. Water and Energy, 1994, 19(1): 267-299.
- [3] Qu S, Liang S, Xu M. CO₂ emissions embodied in interprovincial electricity transmissions in China[J]. Environmental science & technology, 2017, 51(18): 10893-10902.
- [4] Liao X, Hall J W. Water Management in China's Power Sector[M]. Routledge, 2020.
- [5] Tang B, Wu Y, Yu B, et al. Co-current analysis among electricity-water-carbon for the power sector in China[J]. Science of The Total Environment, 2020, 745: 141005.
- [6] Macknick J, Newmark R, Heath G, et al. Operational water consumption and withdrawal factors for electricity generating technologies: a review of existing literature[J]. Environmental Research Letters, 2012, 7(4): 045802.

附录

附表 1 跨省直接电力交换流（前 20）

起点		终点		电力转移（万千瓦时）
区域	省市	区域	省市	
南方区域	云南	南方区域	广东	13088258
西北区域	内蒙古	北方区域	山东	6953321
西北区域	内蒙古	北方区域	河北	6551047
南方区域	贵州	南方区域	广东	5813223
西北区域	宁夏	东部区域	浙江	4982996
北方区域	山西	北方区域	河北	4714968
东部区域	安徽	东部区域	浙江	4562097
西北区域	内蒙古	西北区域	辽宁	4455399
西北区域	新疆	东部区域	安徽	4395593
北方区域	山西	东部区域	江苏	4242774
西北区域	新疆	中部区域	河南	4085790
中部区域	四川	东部区域	江苏	3742356
西北区域	甘肃	西北区域	宁夏	3598309
中部区域	湖北	东部区域	上海	3460413
中部区域	四川	中部区域	重庆	3328511
中部区域	四川	东部区域	浙江	3313038
东部区域	安徽	东部区域	江苏	3259618
西北区域	宁夏	北方区域	山东	3080753
中部区域	四川	东部区域	上海	3068694
北方区域	河北	北方区域	天津	2898366

附表2 各省份水资源压力指数对比

省份	水资源压力指数 (考虑电力部门虚拟水转移)	水资源压力指数 (不考虑)
宁夏	6.2444	6.3818
上海	2.0235	1.6638
北京	1.7054	1.2531
天津	1.4147	1.4721
江苏	1.0803	1.0526
河北	0.9621	0.9611
新疆	0.7098	0.7121
山西	0.6078	0.6319
山东	0.6061	0.5929
河南	0.5511	0.5450
内蒙古	0.3666	0.3858
辽宁	0.3226	0.3256
甘肃	0.2686	0.2694
广东	0.2582	0.2491
黑龙江	0.2178	0.2212
陕西	0.2139	0.2159
福建	0.2129	0.2407
吉林	0.1993	0.2008
浙江	0.1932	0.1597
安徽	0.1868	0.2095
海南	0.1669	0.1669
江西	0.1479	0.1448
湖南	0.1448	0.1440
湖北	0.1409	0.1589
广西	0.1213	0.1235
重庆	0.0920	0.0914
云南	0.0863	0.0867
四川	0.0730	0.0732
贵州	0.0665	0.0678
青海	0.0233	0.0240

*按照水资源压力指数（考虑电力部门虚拟水转移）降序排列

北京理工大学能源与环境政策研究中心简介

北京理工大学能源与环境政策研究中心是 2009 年经学校批准成立的研究机构，挂靠在管理与经济学院。能源与环境政策中心大部分研究人员来自魏一鸣教授 2006 年在中科院创建的能源与环境政策研究中心。

北京理工大学能源与环境政策研究中心（CEEP-BIT）面向国家能源与应对气候变化领域的重大战略需求，针对能源经济与气候政策中的关键科学问题开展系统研究，旨在增进对能源、气候与经济社会发展关系的科学认识，并为政府制定能源气候战略、规划和政策提供科学依据、为能源企业发展提供决策支持、为社会培养高水平专门人才。

中心近年部分出版物

唐葆君. 项目管理——能源项目为例. 北京: 科学出版社, 2022.

余碧莹, 张俊杰等. 时间利用行为与低碳管理. 北京: 科学出版社, 2022.

沈萌, 魏一鸣. 智慧能源. 北京: 科学技术文献出版社, 2022.

魏一鸣等. 气候工程管理: 碳捕集与封存技术管理. 北京: 科学出版社, 2020.

魏一鸣, 廖华等. 能源经济学 (第三版). 北京: 中国人民大学出版社, 2019.

中心近年“能源经济预测与展望”报告

总期次	报告题目	总期次	报告题目
1	“十二五”中国能源和碳排放预测与展望	37	2019 年国际原油价格分析与趋势预测
2	2011 年国际原油价格分析与走势预测	38	我国农村居民生活用能现状与展望
3	2012 年国际原油价格分析与趋势预测	39	高耗能行业污染的健康效应评估与展望
4	我国中长期节能潜力展望	40	我国社会公众对雾霾关注的热点与展望
5	我国省际能源效率指数分析与展望	41	我国新能源汽车行业发展水平分析及展望
6	2013 年国际原油价格分析与趋势预测	42	2019 年光伏及风电产业前景预测与展望
7	2013 年我国电力需求分析与趋势预测	43	经济承压背景下中国能源经济发展与展望
8	国家能源安全指数分析与展望	44	2020 年光伏及风电产业前景预测与展望
9	中国能源需求预测展望	45	砥砺前行中的新能源汽车产业
10	2014 年国际原油价格分析与趋势预测	46	2020 年国际原油价格分析与趋势预测
11	我国区域能源贫困指数	47	二氧化碳捕集利用与封存项目进展与布局展望
12	国家能源安全分析与展望	48	2020 年碳市场预测与展望
13	经济“新常态”下的中国能源展望	49	我国“十四五”能源需求预测与展望
14	2015 年国际原油价格分析与趋势预测	50	基于行业视角的能源经济指数研究
15	我国新能源汽车产业发展展望	51	全球气候保护评估报告
16	我国区域碳排放权交易的潜在收益展望	52	全球气候治理策略及中国碳中和路径展望
17	“十三五”及 2030 年能源经济展望	53	新能源汽车产业 2020 年度回顾与未来展望
18	能源需求预测误差历史回顾与启示	54	碳中和背景下煤炭制氢的低碳发展
19	2016 年国际原油价格分析与趋势预测	55	2021 年国际原油价格分析与趋势预测
20	2016 年石油产业前景预测与展望	56	中国省际能源效率指数（2010-2018）
21	海外油气资源国投资风险评价指数	57	后疫情时代中国能源经济指数变化趋势
22	“十三五”北京市新能源汽车节能减排潜力分析	58	电力中断对供应链网络的影响
23	“十三五”碳排放权交易对工业部门减排成本的影响	59	2022 年国际原油价格分析与趋势预测
24	“供给侧改革”背景下中国能源经济形势展望	60	全国碳中和目标下各省碳达峰路径展望
25	2017 年国际原油价格分析与趋势预测	61	迈向碳中和的电力行业 CCUS 发展行动
26	新能源汽车推广应用：2016 回顾与 2017 展望	62	中国碳市场回顾与展望（2022）
27	我国共享出行节能减排现状及潜力展望	63	全球变暖对我国劳动力健康影响评估
28	我国电子废弃物回收处置现状及发展趋势展望	64	中国上市公司碳减排行动指数研究报告
29	2017 年我国碳市场预测与展望	65	2022 年中国能源经济指数研究
30	新时代能源经济预测与展望	66	省级能源高质量发展指数研究（2012-2022 年）
31	2018 年国际原油价格分析与趋势预测	67	中国电力部门省际虚拟水流动模式与影响分析
32	2018 年石化产业前景预测与展望	68	2023 年国际原油价格分析与趋势预测
33	新能源汽车新时代新征程:2017 回顾及未来展望	69	中国碳市场回顾与最优行业纳入顺序展望（2023）
34	我国电动汽车动力电池回收处置现状、趋势及对策	70	我国 CCUS 运输管网布局规划与展望
35	我国碳交易市场回顾与展望	71	全球变暖下区域经济影响评估
36	新贸易形势下中国能源经济预测与展望	72	迈向中国式现代化的能源发展图景