

DOI: 10.12006/j.issn.1673-1719.2021.274

闫书琪, 李素梅, 吕鹤, 等. 基于混合 LCA 的新疆地区电力生产水足迹分析及碳中和目标下的变化 [J]. 气候变化研究进展, 2022, 18 (3): 294-304

Yan S Q, Li S M, Lyu H, et al. Water footprint analysis of electricity production in Xinjiang Uygur Autonomous Region based on a hybrid LCA model and its changes under carbon neutralization target [J]. Climate Change Research, 2022, 18 (3): 294-304

## 基于混合 LCA 的新疆地区电力生产水足迹 分析及碳中和目标下的变化

闫书琪<sup>1</sup>, 李素梅<sup>1</sup>, 吕鹤<sup>1</sup>, 陈莎<sup>1</sup>, 刘影影<sup>1</sup>,  
王宏涛<sup>2</sup>, 刘会政<sup>3</sup>, 陈前利<sup>4</sup><sup>1</sup> 北京工业大学环境科学系, 北京 100124;<sup>2</sup> 中国质量认证中心, 北京 100070;<sup>3</sup> 北京工业大学经济与管理学院, 北京 100124;<sup>4</sup> 新疆农业大学管理学院, 乌鲁木齐 830052

**摘要:** 新疆是我国电力生产的主要地区, 同时存在严重的水资源短缺问题。作为综合评价指标, 水足迹可以用来量化分析电力生产中的水资源消耗及其水环境影响。文中基于投入产出和生命周期的混合生命周期模型对新疆地区 2012 年和 2017 年电力生产水足迹进行了量化研究, 并对不同发电技术的水足迹贡献部门进行了分析。结果发现: 因电力生产结构的变化和燃煤发电技术革新, 新疆电力生产的单位水足迹由 2012 年的  $4.26 \times 10^{-3} \text{ m}^3/(\text{kW}\cdot\text{h})$  下降到 2017 年的  $3.08 \times 10^{-3} \text{ m}^3/(\text{kW}\cdot\text{h})$ 。对不同发电技术的水足迹贡献部门分析发现, 煤电和水电的间接水足迹分别主要来自采矿业和重工业, 占比分别为 60.3% 和 52.8%。风电和光伏发电的间接水足迹分别主要来自重工业和轻工业, 占比分别为 38.1% 和 56.0%。最后针对碳中和目标下新疆电力结构转型带来的水足迹变化进行分析, 2017—2050 年高比例的可再生能源发电将使新疆电力生产单位水足迹下降 75%。

**关键词:** 水足迹; 电力生产; 混合生命周期评价; 投入产出; 碳中和

### 引言

能源和水资源二者之间存在密切的耦合关联, 两者相互依存、相互制约。一方面, 水资源的开发利用会受到能源供给的限制<sup>[1]</sup>, 另一方面, 能源的开采、运输、转化和终端使用需要消耗大量水资源。联合国水机制 (UN Water) 的报告<sup>[2]</sup>表明, 2010 年全球能源生产取水量为 5830 亿  $\text{m}^3$ , 占全球总取水量的 15%。目前我国已成为全球最大的能源消费国, 2018 年能源消费总量占全球能源消

费的 23%<sup>[3]</sup>, 能源行业已成为仅次于农业的水资源使用部门<sup>[4]</sup>。

2020 年, 我国提出了  $\text{CO}_2$  排放力争于 2030 年前达到峰值, 努力争取 2060 年前实现碳中和的目标。在此目标下, 高比例的可再生能源发电将成为未来电力系统的重要部分。新疆可再生能源资源丰富, 例如: 新疆水力资源技术可开发量为 2041 万  $\text{kW}$ , 居全国第五位; 风能资源总储量为 9.57 亿  $\text{kW}$ , 约占全国风能储量的 1/4<sup>[5-6]</sup>。因此, 新疆地区将成为国家重要的新能源发电基地, 以支持

收稿日期: 2021-12-06; 修回日期: 2022-01-13

资助项目: 国家重点研发计划 (2018YFF0215700)

作者简介: 闫书琪, 男, 硕士研究生; 陈莎 (通信作者), 女, 教授, chensha@bjut.edu.cn

碳中和目标的实现。

然而, 由于地理位置和气候因素, 新疆面临着严重的水资源短缺问题, 量化其能源和水资源的耦合关联对新疆可再生能源的发展至关重要。由 Hoekstra 等<sup>[7]</sup>在虚拟水理论基础上提出的水足迹概念在研究能源和水资源的耦合关联中得到应用<sup>[8-12]</sup>。水足迹是指任何已知人口(国家、地区或个人)在一定时间内消耗的所有产品和服务所需要的水资源数量, 是衡量水消耗和水污染的综合指标, 且根据水源不同分为绿水足迹、蓝水足迹和灰水足迹<sup>[13]</sup>。绿水足迹指不会成为径流的水资源, 蓝水足迹指生产过程中对地表水或地下水的消耗, 灰水足迹指同化吸收生产过程排放对水资源影响所需淡水的消耗。在同一系统边界内产品水足迹的核算即为产品生产过程中的蓝水足迹、灰水足迹和绿水足迹的和。与以往水资源以取水量研究为核心不同, 水足迹不仅确定了消费者或生产者的直接用水, 也确定了其间接用水; 既可应用于微观产品水平, 也可用于流域、地区或国家等宏观层面<sup>[14-15]</sup>。

目前能源部门水足迹的研究方法有生命周期评价(LCA)和投入产出分析(IOA), 前者主要对能源产品的水足迹进行核算<sup>[16-18]</sup>, 而后者多用于宏观层面量化区域电力生产的水资源消耗<sup>[19-20]</sup>。基于LCA的研究发现中国能源生产的总用水量占全国全行业总水量的12.3%<sup>[21]</sup>, 其中以风电、光伏为代表的可再生能源发电的水足迹则主要来自设备的制造过程<sup>[22-24]</sup>, 火电的水足迹主要来自于冷却用水, 其灰水足迹主要来自上游的物料生产阶段<sup>[25-28]</sup>。在投入产出分析研究中, 主要是对区域内和区域间的水足迹进行量化<sup>[29-31]</sup>。通过区域投入产出模型对不同区域间的水资源转移进行分析, 发现北方特大城市群的能源水足迹严重依赖于外部地区, 其中电力生产用水占总能源用水量的47%<sup>[32-34]</sup>。对中国能源供应的灰水足迹进行分析可知, 加强煤炭开采和洗选以及减少化肥使用可以大幅度减少电力生产对水环境的影响<sup>[35-36]</sup>。

虽然LCA能自下而上对电力生产的每一阶段的用水量进行评估计算, 但是由于数据和工作

量的限制, LCA无法考虑到产品生产的全部投入过程, 只能追溯到有限的物质投入和环境影响, 因此会因系统边界的不确定性造成截断误差<sup>[37]</sup>。IOA从宏观层面自上而下地对整个经济系统或是经济系统内某一部门进行分析, 可以避免LCA的截断误差。但IOA在部门分类上存在合并和同质化假设, 很难做到针对具体产品或技术的分析。因此结合IOA的混合LCA方法既可避免LCA所产生的截断误差, 也可对具体的产品或技术的水足迹进行评价<sup>[38]</sup>。目前, 已有研究采用混合LCA方法对能源部门的水足迹进行分析, 通过整合基于过程的LCA和投入产出, 跟踪电力生产供应链, 整理了不同发电方式的全生命周期耗水量和碳排放量<sup>[12,39-40]</sup>。然而, 已有研究只是单一量化了能源行业的水足迹及单一部门对能源行业的水足迹贡献, 并没有基于全行业视角对能源行业水足迹的贡献部门进行分析。

文中基于混合LCA模型, 对新疆2012年及2017年的不同电力生产技术(煤电、水电、风电和光伏发电)水足迹进行量化分析, 同时基于全行业的视角量化农业、采矿业、轻工业、重工业等行业对电力生产间接水足迹的贡献。不同于目前LCA与IOA综合方法的研究只关注历史水足迹, 本研究还量化分析碳中和目标下2017—2050年电力结构转型对新疆电力生产水足迹的影响。本研究不仅可为新疆实现碳中和目标的能源结构转型与水资源可持续管理提供科学支撑, 也可为其他行业水足迹的核算提供基础数据。

## 1 研究方法

### 1.1 电力部门拆分的投入产出模型

根据数据可获取情况及国家统计局发布的《三次产业划分规定》将投入产出表中原有42个部门合并为9个行业部门(表1)。

在此基础上, 根据投入产出表拆分方法构建电力部门拆分的投入产出模型<sup>[41-44]</sup>, 拆分后的电力部门包括煤电、风电、水电和光伏发电。拆分依据及方法如下所示。在对电力部门进行拆分的

表 1 部门合并情况  
Table 1 Departmental consolidation of Xinjiang Uygur Autonomous Region

行业	部门	行业	部门
农业	农林牧渔产品和服务	重工业	非金属矿物制品
服务业	批发和零售 住宿和餐饮 信息传输、软件和信息技术服务 金融 房地产 租赁和商务服务 科学研究和技术服务 水利、环境和公共设施管理 居民服务、修理和其他服务 教育 卫生和社会工作 文化、体育和娱乐 公共管理、社会保障和社会组织		金属冶炼和压延加工品 金属制品 通用设备 专用设备 交通运输设备 电气机械和器材 通信设备、计算机和其他电子设备 仪器仪表 其他制造产品 废品废料 金属制品、机械和设备修理服务
轻工业	食品和烟草 纺织品 纺织服装鞋帽皮革羽绒及其制品 木材加工品和家具 造纸印刷和文教体育用品 石油、炼焦产品和核燃料加工品 化学产品	采矿业	金属矿采选产品 非金属矿和其他矿采选产品
		交通业	交通运输、仓储和邮政
		建筑业	建筑
		水的生产和供应	水的生产和供应
		能源行业	电力、热力的生产和供应 燃气生产和供应 煤炭采选产品 石油和天然气开采产品

投入产出表中，横、纵向的拆分分别满足公式(1)和公式(2)：

$$a_{i,n} = (1-s) \times A_{i,n} + s \times A_{i,n+1}, \quad (1)$$

$$a_{n,j} = A_{n,j} + A_{n,j+1}. \quad (2)$$

电力部门的拆分见公式(3)：

$$a_{n,n} = (1-s) \times (A_{n,n} + A_{n+1,n}) + s \times (A_{n,n+1} + A_{n+1,n+1}). \quad (3)$$

式中， $a_{i,n}$  和  $a_{n,j}$  分别代表拆分部门对其他部门的直接消耗系数以及其他部门对拆分部门的直接消耗系数； $a_{n,n}$  表示待拆分部门对自身的直接消耗系数； $A_{i,n}$  和  $A_{i,n+1}$  分别为拆分后子部门对  $i$  部门的直接消耗系数； $A_{n,j}$  和  $A_{n,j+1}$  亦如此。 $s$  和  $1-s$  为两部门在原有部门的总产出比例。其中投入产出表的基础数据来自新疆统计局统计年鉴。

## 1.2 基于混合 LCA 的电力水足迹量化方法

电力生产水足迹主要分为两个部分：直接水足迹和间接水足迹（图 1）。直接水足迹包括直接蓝水足迹和直接灰水足迹，分别指每种发电技术的系统边界内的直接耗水和造成的污水排放。同样间接水足迹也包括间接蓝水足迹和间接灰水足迹，分别指每种发电技术的上游投入（原料生产、设备制造、厂房投入等）造成的水资源消耗和污水排放。以煤电为例，直接蓝水足迹包括煤炭开采、洗选和燃煤发电过程的直接耗水（清洗用水、冷却用水等），直接灰水足迹则是在这些过程中产生的污水量，间接蓝水足迹和间接灰水足迹则是在上游投入阶段的耗水量和污水排放量。另外，农业、采矿业、轻工业、重工业等全行业对电力生产间接水足迹的贡献，由水足迹在行业不同部门间的转移矩阵计算得到。

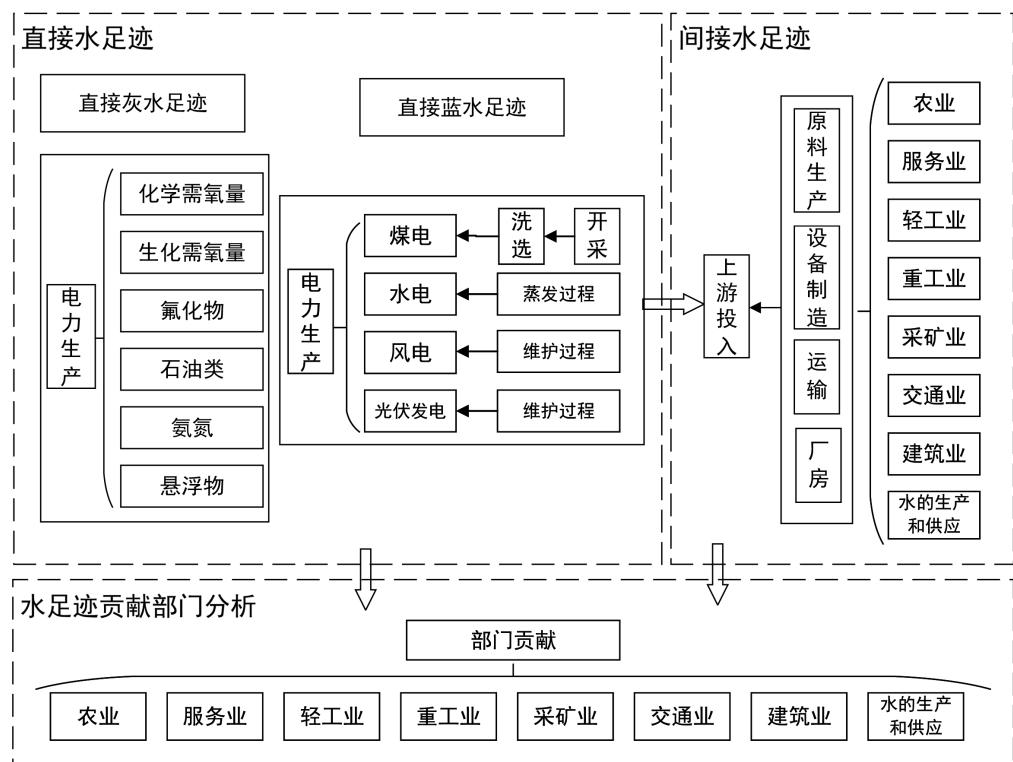


图 1 混合 LCA 的电力水足迹量化框架图

Fig. 1 Hybrid LCA framework for quantifying the water footprint of electricity production

### 1.3 直接水足迹量化

根据 LCA 的矩阵量化计算直接蓝水足迹<sup>[45]</sup>, 如公式(4)所示。

$$W_{d,b} = \mathbf{B} \cdot \mathbf{T}^{-1} \cdot \mathbf{y}。 \quad (4)$$

式中,  $W_{d,b}$  为直接蓝水足迹,  $\mathbf{T}$  为生产过程的清单数据矩阵,  $\mathbf{y}$  为直接水足迹最终需求向量,  $\mathbf{B}$  为每单位产品的投入矩阵。表 2 列出了单位燃煤发电量 (1 kW·h) 蓝水阶段物质输入清单。本研究中电力数据来自于新疆能源统计年鉴和能源平衡表, 蓝水足迹数据主要来自于包含了中国不同地区、不同发电技术的生命周期清单数据的 Eco-invent 数据库<sup>[46]</sup>。

直接灰水足迹 ( $W_{d,g}$ ) 采用目前国际公认的水足迹网络 (WFN) 水足迹计算方法<sup>[47]</sup>, 见公式(5)。

$$W_{d,g} = \frac{L \times V_p}{C_{\max} - C_{\text{nat}}}。 \quad (5)$$

表 2 单位燃煤发电量蓝水阶段物质输入数据清单

Table 2 Material inventory of thermal power generation of blue water footprint

输入物质	水资源消耗量
开采用水	0.25 m <sup>3</sup> /t
洗选用水	0.12 m <sup>3</sup> /t
发电用水	1.08 m <sup>3</sup> /(MW·h)

式中,  $L$  为单位能源生产的废水排放量 (m<sup>3</sup>/GJ),  $V_p$  为废水中污染物浓度 (mg/m<sup>3</sup>),  $C_{\max}$  为水中可接受的污染物浓度 (mg/m<sup>3</sup>),  $C_{\text{nat}}$  为自然水的污染物浓度 (mg/m<sup>3</sup>), 取值 0。文中选取化学需氧量 (COD) 为灰水足迹计算的重要指标。单位燃煤发电量灰水阶段输出物质数据清单如表 3 所示<sup>[21]</sup>。

### 1.4 间接水足迹量化

间接水足迹为完全水足迹和直接水足迹之差, 见公式(6)。

$$W_{\text{ind}} = W - W_d。 \quad (6)$$

表3 单位燃煤发电量灰水阶段输出物质数据清单  
Table 3 Material inventory of thermal power generation of grey water footprint

输出物质	物质质量/(mg/L)
化学需氧量(COD)	150
生化需氧量(BOD)	30
氟化物	20
石油类	10
氨氮	25
悬浮物	150

式中,  $W_{\text{ind}}$  表示间接水足迹,  $W_d$  为直接水足迹,  $W$  为完全水足迹。

完全水足迹  $W$  计算原理如公式(7)所示。

$$W = W_d \cdot (\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1}。 \quad (7)$$

式中,  $\mathbf{I}$  表示单位矩阵,  $\mathbf{A}$  为直接消耗系数矩阵, 表示部门  $j$  生产单位产品对部门  $i$  产品的直接消耗量,  $(\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1}$  为列昂惕夫逆矩阵。

### 1.5 电力生产间接水足迹贡献部门分析

相关研究表明, 水足迹在不同行业间的转移矩阵, 等于完全用水矩阵与自身转置矩阵的差<sup>[48-50]</sup>。因此, 本研究基于此方法分析不同部门对电力生产间接水足迹的贡献, 其计算如公式(8~9):

$$\mathbf{V}_W = W_d \cdot (\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1} \cdot \mathbf{Y}, \quad (8)$$

$$\mathbf{T}_{VW} = \mathbf{V}_W - \mathbf{V}_W^T = \begin{bmatrix} 0 & tvw_{12} & \cdots & tvw_{1n} \\ tvw_{21} & 0 & \cdots & tvw_{2n} \\ \vdots & \vdots & 0 & \vdots \\ tvw_{n1} & tvw_{n2} & \cdots & 0 \end{bmatrix}。 \quad (9)$$

式中,  $\mathbf{V}_W$  为完全用水矩阵,  $\mathbf{T}_{VW}$  表示水足迹在行业间的转移矩阵,  $\mathbf{Y}$  表示最终需求向量, 其元素  $tvw_{ij}$  从行方向看, 表示  $i$  部门向  $j$  部门的水足迹输出, 在列方向看, 表示从  $j$  部门到  $i$  部门的水足迹输入, 行方向综合为  $i$  部门水足迹转移量。

## 2 结果与讨论

### 2.1 新疆能源与水资源分析

新疆石油、天然气、煤炭资源地质储量分别为 209.2 亿 t、10.85 万亿 m<sup>3</sup>、2.19 万亿 t, 分别占我国陆上资源总量的 30%、34% 和 40%<sup>[5]</sup>。风能资源总储量为 9.57 亿 kW, 约占全国风能储量的 1/4, 太阳能资源十分丰富, 年辐射总量达 4800 ~ 6400 MW/m<sup>2</sup>, 居全国第二位, 如果考虑技术进步, 以及更大地域的光伏发展, 该地区的太阳能装机潜力超过 2000 亿 kW<sup>[6]</sup>。

如图 2 所示, 2012 年新疆总发电量为 1190 亿 kW·h, 其中, 煤电、水电和风电占比分别为 84%、12% 和 4%。从 2014 年开始, 新疆充分利用当地的太阳能资源, 大力发展光伏发电, 2017 年总发电量为 3010 亿 kW·h, 煤电、水电的发电量占比分别下降了 5% 和 4%。风电和光伏发电的总量占比增长到 13%。同时, 新疆也是“西电东送”的主力军, 2018 年该地区外送电量达 503 亿 kW·h, 清洁能源达 188 亿 kW·h<sup>[51]</sup>。由此可见, 目前新疆主要发电方式仍是燃煤发电, 而煤炭的开采和洗选以及发电过程中消耗大量水资源。新疆地处内陆, 降水稀少, 水资源时空分布不均, 地表水蒸发量大, 导致水资源不足, 水资源总量仅占全国的 3%, 单位面积产水量仅为 5.3 万 m<sup>3</sup>/km<sup>2</sup>, 列全国倒数第三

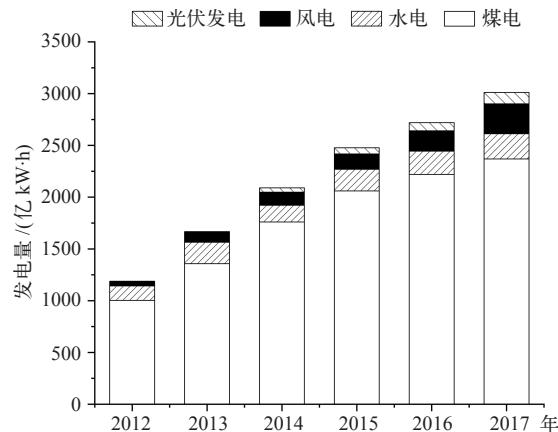


图 2 2012—2017 年新疆电力生产情况  
Fig. 2 Status of electricity production in Xinjiang during 2012—2017

位, 是我国典型的干旱地区, 对电力生产有较大影响<sup>①[52-53]</sup>。因此, 新疆发电情况与水资源稀缺的特点形成掣肘。

## 2.2 不同发电技术水足迹量化分析

计算 2012 年和 2017 年新疆不同发电技术水足迹(图 3)。2012 年新疆电力生产的总水足迹为 5.08 亿 m<sup>3</sup>, 其中煤电、水电和风电分别为 2.95 亿 m<sup>3</sup>、2.06 亿 m<sup>3</sup> 和  $5.09 \times 10^{-2}$  亿 m<sup>3</sup>(占比分别为 58%、41% 和 1%)。对于煤电来说, 直接水足迹中直接蓝水足迹和直接灰水足迹都几乎各占 50%, 间接水足迹主要为灰水足迹, 且煤电的间接水足迹最高; 水电的直接水足迹几乎全为直接蓝水足迹, 间接水足迹几乎为 0, 风电主要为间接水足迹。

由于发电量的持续增长, 相较于 2012 年, 2017 年不同发电技术的水足迹都明显升高, 煤电、水电、风电和光伏发电完全水足迹分别为 5.34 亿 m<sup>3</sup>、3.60 亿 m<sup>3</sup>、0.32 亿 m<sup>3</sup> 和  $6.25 \times 10^{-3}$  亿 m<sup>3</sup>, 总和为 9.27 亿 m<sup>3</sup>。煤电水足迹增长 81%, 主要体现在灰水足迹; 水电水足迹增长 75%, 主要体现在直接蓝水足迹; 风电水足迹增长了 4 倍, 主要体现在间接蓝水足迹。

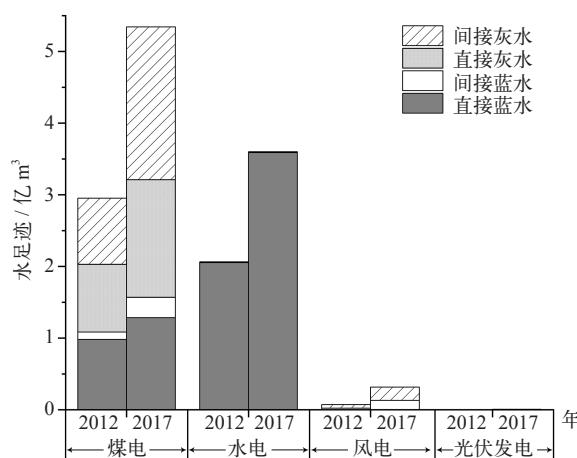


图 3 2012 年和 2017 年新疆不同发电技术水足迹

Fig. 3 Water footprint of power structure of Xinjiang in 2012 and 2017

虽然 2017 年新疆电力生产的总水足迹相比于 2012 年有所上升, 但根据电力生产水足迹与发电量比值得到的电力生产单位水足迹明显降低。2017 年电力生产单位发电水足迹为  $3.08 \times 10^{-3}$  m<sup>3</sup>/(kW·h), 比 2012 年的  $4.26 \times 10^{-3}$  m<sup>3</sup>/(kW·h) 下降了 28%。其主要原因是电力结构发生改变, 电力生产单位发电水足迹中煤电单位水足迹下降。2017 年电力结构更优化, 2017 年煤电和水电的发电占比分别下降了 5% 和 4%, 风电占比上升 6%, 且新发展了光伏发电(图 2)。煤电系统中冷却技术得到进一步发展, 循环冷却与空冷比例由 2012 年的 74:36 变为 2017 年的 35:65, 有效降低了煤电系统耗水; 同时淘汰高排放、高耗水的落后产能。因此煤电单位发电水足迹由 2012 年的  $2.95 \times 10^{-3}$  m<sup>3</sup>/(kW·h) 下降到 2017 年的  $2.56 \times 10^{-3}$  m<sup>3</sup>/(kW·h)。

## 2.3 不同发电技术水足迹贡献部门分析

不同发电技术的水足迹贡献部门受技术水平和用水效率的影响, 与 2012 年相比, 2017 年的各发电技术的用水效率和技术水平无明显改变, 所以水足迹贡献部门并没有明显变化, 本研究仅对 2017 年不同发电技术水足迹贡献部门进行了分析, 发现煤电的水足迹由直接和间接水足迹构成, 水电的水足迹几乎全是直接水足迹, 而风电和光伏发电的水足迹几乎全为间接水足迹。

2017 年新疆地区煤电的直接和间接水足迹占比分别为 54.8% 和 45.2%。煤电的直接水足迹主要来自冷却系统用水、锅炉补给水、化学自用水、除灰和除渣系统用水, 冷却用水占电厂耗水量的 80%。煤电的间接水足迹主要来自采矿业、工业、建筑业和农业(表 4)。其中因煤炭开采和洗选的间接过程(包括机械设备冷却、绿化及该过程中投入的能源生产所消耗的水资源等)消耗大量的水, 因此采矿业间接水足迹占比高达 60.4%; 工业部门间接水足迹累计占比 22.5%, 其原因是机器、化工产品的生产用水;

<sup>①</sup>部分参考《全国水资源综合规划》概要, 来源网址为 <https://max.book118.com/html/2017/0624/117638005.shtml>。

在建筑和采矿阶段的木材使用以及在化工生产中农业产品有一定投入，所以农业部门的间接水足迹贡献也较高。水力发电的水足迹中直接和间接水足迹占比分别为 99.7% 和 0.3%。直接水足迹主要来自水库水层表面蒸发作用消耗的水，间接水足迹中贡献最大的为重工业（52.8%），主要来自于设备生产和维护。光伏发电和风电的水足迹全部为间接水足迹。光伏发电的间接水足迹主要贡献部门是轻工业（56.0%）、采矿业（15.6%）和建筑业（14.0%），其水足迹来自多晶硅的生产和光伏板的清洁用水；风电的间接水足迹主要贡献部门是重工业（38.1%）、轻工业（21.0%）和农业（19.6%），主要来自发电机扇叶等大型机器设备的生产。

表 4 2017 年不同发电技术间接水足迹贡献部门  
Table 4 Indirect water footprint contribution departments of different power generation technologies in 2017

行业	煤电	水电	光伏发电	风电	%
农业	4.5	0.0	0.1	19.6	
服务业	0.3	0.0	0.0	3.4	
轻工业	14.5	18.2	56.0	21.0	
重工业	8.0	52.8	7.2	38.1	
采矿业	60.4	0.2	15.6	0.2	
交通业	4.0	11.4	6.3	10.9	
建筑业	6.5	16.8	14.0	6.2	
水的生产和供应业	1.8	0.6	0.8	0.6	

### 3 碳中和目标下电力生产水足迹变化

为实现 2060 年前碳中和目标，电力结构的转变将发挥至关重要的作用。新疆目前煤电比例较高但可再生能源丰富，具有较大的电力结构转型潜力。文中电力结构转型的碳中和情景设置主要参考《新疆气候变化科学评估报告》中的能源转型路径以及相关课题组的研究成果<sup>[54]</sup>。根据报告中给出的相关数据，计算可知新疆电力行业将在 2050 年提前实现碳中和，碳中和目标下新疆地区的总发电量从 2017 年的 2595 亿 kW·h 上升到 2050 年的 6475 亿 kW·h（图 4），其中煤电

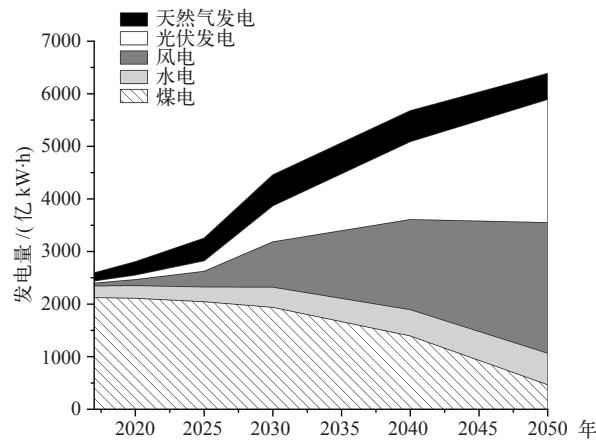


图 4 2017—2050 年新疆碳中和目标下电力结构变化  
Fig. 4 Power structure change under carbon neutralization target in Xinjiang

占比逐年降低，风电和光伏发电占比逐年升高，2050 年煤电占比 7.1%，水电和天然气发电占比分别稳定在 9.3% 和 11.2% 左右，风电和光伏发电总占比高达 77.8%。

如图 5 所示，碳中和目标下新疆电力生产的总水足迹将呈现先升后降的趋势，在 2030 年达到峰值 7.12 亿 m<sup>3</sup>，到 2050 年下降到 4.96 亿 m<sup>3</sup>。2017—2030 年水足迹升高的原因是持续增加的电力需求和较高比例的煤电，2030—2050 年水足迹降低是因为燃煤电厂冷却方式的优化和可再生能源发电规模不断扩大。因燃煤发电的比重减小及电厂冷却方式由循环冷却逐渐向空冷转变的优化，煤电的水足迹自 2017 年的 5.44 亿

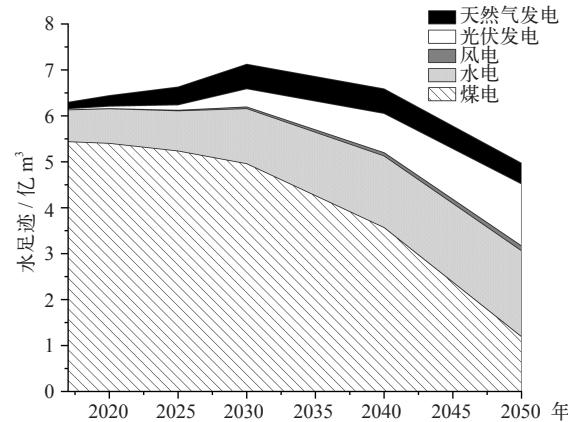


图 5 2017—2050 年新疆碳中和目标下电力生产水足迹变化  
Fig. 5 Water footprint of electricity production under carbon neutralization target in Xinjiang

$\text{m}^3$  下降到 2050 年的 1.19 亿  $\text{m}^3$ 。由于持续增长的发电量, 光伏发电、风电、水电的水足迹均持续增长, 2050 年光伏发电水足迹为 1.35 亿  $\text{m}^3$ , 风电的水足迹为 0.11 亿  $\text{m}^3$ , 水电水足迹为 1.87 亿  $\text{m}^3$ , 天然气发电的水足迹为 0.45 亿  $\text{m}^3$ 。

由于风电和光伏发电的单位发电水足迹远低于煤电, 所以随着可再生能源的发展及新疆电力结构的优化, 新疆单位发电水足迹逐年降低, 从 2017 年的  $3.08 \times 10^{-3} \text{ m}^3/(\text{kW}\cdot\text{h})$  下降到 2050 年的  $0.766 \times 10^{-3} \text{ m}^3/(\text{kW}\cdot\text{h})$ , 下降 75%。

## 4 结 论

采用混合 LCA 模型量化了我国新疆地区 2012 年和 2017 年电力生产水足迹, 并分析了不同发电技术间接水足迹的主要贡献部门, 主要结论如下。

(1) 2012 年新疆电力生产水足迹为 5.08 亿  $\text{m}^3$ , 单位发电水足迹为  $4.26 \times 10^{-3} \text{ m}^3/(\text{kW}\cdot\text{h})$ , 2017 年电力生产水足迹为 9.27 亿  $\text{m}^3$ , 单位发电水足迹为  $3.08 \times 10^{-3} \text{ m}^3/(\text{kW}\cdot\text{h})$ 。与 2012 年相比, 2017 年新疆电力生产水足迹明显升高, 但单位电力生产水足迹下降了 28%。

(2) 煤电的直接水足迹中 80% 来自于冷却用水, 间接水足迹主要来自采矿业、工业、建筑业和农业。水电的水足迹中 99.7% 是直接水足迹, 间接水足迹主要来自设备生产和维护。风电和光伏发电水足迹几乎都是间接水足迹, 前者主要来自工业生产中设备制造的耗水, 后者主要来自轻工业和采矿行业中多晶硅生产加工耗水。

(3) 在碳中和目标下, 随着可再生能源发电比例的提高, 新疆单位发电水足迹将逐年降低, 但电力生产总水足迹将呈现先升后降的趋势。与 2017 年相比, 2050 年新疆电力结构的改变将使单位发电水足迹下降 75%。

由于新疆可再生能源发电的间接水足迹主要来自材料和设备的生产阶段, 这一部分的水足迹并不都发生在新疆境内, 因此对新疆区内来说, 可再生能源发电具有更大的节水潜力。■

## 参 考 文 献

- [1] Xiang X, Jia S. China's water-energy nexus: assessment of water-related energy use [J]. Resources, Conservation and Recycling, 2019, 144: 32-38
- [2] United Nations Water. The United Nations world water development [R/OL]. 2019 [2021-10-01]. <https://www.un.org/zh/global-issues/water>
- [3] 李锐, 崔玉杰. 中国能源消费总量的预测及影响因素分析 [J]. 低碳经济, 2020, 9 (1): 1-9. Li Y, Cui Y J. Prediction of total energy consumption in China and analysis of its influencing factors [J]. Journal of Low Carbon Economy, 2020, 9 (1): 1-9 (in Chinese)
- [4] Zhang C, Zhong L, Liang S, et al. Virtual scarce water embodied in inter-provincial electricity transmission in China [J]. Applied Energy, 2017, 187: 438-448
- [5] Xu L J, Fan X C, Wang W Q, et al. Renewable and sustainable energy of Xinjiang and development strategy of node areas in the "Silk Road Economic Belt" [J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2017, 79: 274-285
- [6] Xu L, Eli W, Abudula A. Construction and practice of fine-grained energy management research center of engineering and technology [J]. Experimental Technology & Management, 2014, 31 (11): 153-155
- [7] Hoekstra A Y, Chapagain A K. Water footprints of nations: water use by people as a function of their consumption pattern [J]. Water Resources Management, 2006, 21 (1): 35-48
- [8] Hua E, Wang X, A. Engel B, et al. Water competition mechanism of food and energy industries in WEF nexus: a case study in China [J]. Agricultural Water Management, 2021, 254 (3): 106941
- [9] Tandon S A, Kolekar N, Kumar R. Water and energy footprint assessment of bottled water industries in India [J]. Natural Resources, 2014, 5 (2): 68-72
- [10] Ming J, Liao X, Zhao X. Grey water footprint for global energy demands [J]. Frontiers of Earth Science, 2020, 14 (1): 201-208
- [11] Anna T, William H, Paul C, et al. A methodology for industrial water footprint assessment using energy-water-carbon nexus [J]. Processes, 2021, 9 (2). DOI: 10.3390/pr9020393
- [12] Chini C M, Peer R A M. The traded water footprint of global energy from 2010 to 2018 [J]. Scientific Data, 2021, 8 (1). DOI: 10.1038/s41597-020-00795-6
- [13] Hoekstra A, Chapagain A, Aldaya M M, et al. The water footprint assessment manual: setting the global standard [M]. London: Earthscan, 2011
- [14] 钱逸颖, 董会娟, 田旭, 等. 应对水资源危机的中国水足迹研究综述 [J]. 生态经济, 2018, 34 (7): 162-166. Qian Y Y, Dong H J, Tian X, et al. A review of the research on China's water footprint responding to water crisis [J]. Ecological Economy, 2018, 34 (7): 162-166 (in Chinese)
- [15] 陈莎, 吕鹤, 李素梅, 等. 面向水资源可持续利用的综合水足迹评价方法 [J]. 水资源保护, 2021, 37 (4): 7. Chen S, Lyu H, Li S M, et al. Methods of comprehensive water footprint assessment for sustainable utilization of water resources [J]. Water Resources Protection, 2021, 37 (4): 7 (in Chinese)

- [16] Jia C, Yan P, Liu P, et al. Energy industrial water withdrawal under different energy development scenarios: a multi-regional approach and a case study of China [J]. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2021, 135: 110224
- [17] 姜小云. 基于生命周期评价的我国区域电力水足迹特征研究 [D]. 上海: 上海交通大学, 2019. Jiang X Y. Study on water footprint of regional electricity production in China based on life cycle assessment [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2019 (in Chinese)
- [18] Xie X, Jiang X, Zhang T, et al. Study on impact of electricity production on regional water resource in China by water footprint [J]. *Renewable Energy*, 2020, 152 (C): 165-178
- [19] Zhu X, Guo R, Chen B, et al. Embodiment of virtual water of power generation in the electric power system in China [J]. *Applied Energy*, 2015, 151: 345-354
- [20] 朱永楠, 姜珊, 赵勇, 等. 我国煤电生产水足迹评价 [J]. *水电能源科学*, 2019, 37 (9): 28-31. Zhu Y N, Jiang S, Zhao Y, et al. Water footprint evaluation of coal-fired power generation in China [J]. *Water Resources and Power*, 2019, 37 (9): 28-31 (in Chinese)
- [21] Zhang C, Anadon L D. Life cycle water use of energy production and its environmental impacts in China [J]. *Environmental Science & Technology*, 2013, 47 (24): 14459-14467
- [22] 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): 189-190
- [23] Meldrum J, Nettles-Anderson S, Heath G, et al. Life cycle water use for electricity generation: a review and harmonization of literature estimates [J]. *Environmental Research Letters*, 2013, 8 (1): 015031
- [24] Liu J, Zhao D, Gerbens-Leenes P W, et al. China's rising hydropower demand challenges water sector [J]. *Scientific Reports*, 2015, 5 (1): 11446
- [25] 檀勤良, 姚洵睿, 艾炳均. 考虑生命周期的中国煤电水足迹评估 [J]. *华北电力大学学报: 社会科学版*, 2020 (5): 41-50. Tan Q L, Yao X R, Ai B J. Water footprint assessment of coal-fired power generation in China based on life cycle theory [J]. *Journal of North China Electric Power University: Social Sciences*, 2020 (5): 41-50 (in Chinese)
- [26] Chai L, Liao X, Yang L, et al. Assessing life cycle water use and pollution of coal-fired power generation in China using input-output analysis [J]. *Applied Energy*, 2018, 231: 951-958
- [27] Ma X T, Yang D L, Shen X X, et al. How much water is required for coal power generation: an analysis of gray and blue water footprints [J]. *Science of The Total Environment*, 2018, 636 (1): 547-557
- [28] Wu X D, Ji X, Li C, et al. Water footprint of thermal power in China: implications from the high amount of industrial water use by plant infrastructure of coal-fired generation system [J]. *Energy Policy*, 2019, 132: 452-461
- [29] 谭圣林, 邱国玉, 熊育久. 投入产出法在虚拟水消费与贸易研究中的新应用 [J]. *自然资源学报*, 2014, 29 (2): 355-364. Tan S L, Qiu G Y, Xiong Y J. New application of the input-output framework in the study of virtual water consumption and trade [J]. *Journal of Natural Resources*, 2014, 29 (2): 355-364 (in Chinese)
- [30] 孙才志, 郑靖伟. 基于投入产出表的中国水资源消耗结构路径分析 [J]. *地理科学进展*, 2021, 40 (3): 370-381. Sun C Z, Zheng J W. Structural path analysis of water resources consumption in China based on input-output table [J]. *Progress in Geography*, 2021, 40 (3): 370-381 (in Chinese)
- [31] 孙才志, 刘淑彬. 基于MRIO模型的中国省(市)区水足迹测度及空间转移格局 [J]. *自然资源学报*, 2019, 34 (5): 945-956. Sun C Z, Liu S B. Water footprint and space transfer at provincial level of China based on MRIO model [J]. *Journal of Natural Resources*, 2019, 34 (5): 945-956 (in Chinese)
- [32] Liao X, Zhao X, Liu W, et al. Comparing water footprint and water scarcity footprint of energy demand in China's six megacities [J]. *Applied Energy*, 2020, 269. DOI: 10.1016/j.apenergy.2020.115137
- [33] 杨文娟, 赵荣钦, 张战平, 等. 河南省不同产业碳水足迹效率研究 [J]. *自然资源学报*, 2019, 34 (1): 92-103. Yang W J, Zhao R Q, Zhang Z P, et al. Industrial carbon and water footprint efficiency of Henan province based on input-output analysis [J]. *Journal of Natural Resources*, 2019, 34 (1): 92-103 (in Chinese)
- [34] Okadera T, Geng Y, Fujita T, et al. Evaluating the water footprint of the energy supply of Liaoning province, China: a regional input-output analysis approach [J]. *Energy Policy*, 2015, 78: 148-157
- [35] Liao X, Chai L, Xu X, et al. Grey water footprint and interprovincial virtual grey water transfers for China's final electricity demands [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 227: 111-118
- [36] 刘秀丽, 郭丕斌, 王昕. 煤炭资源型地区产业能-水足迹效率及影响因素 [J]. *生态学报*, 2020, 40 (24): 8999-9010. Liu X L, Guo P B, Wang X. Industrial energy-water footprint efficiency and its influencing factors in coal resources-based areas [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40 (24): 8999-9010 (in Chinese)
- [37] 梁赛, 王亚菲, 徐明, 等. 环境投入产出分析在产业生态学中的应用 [J]. *生态学报*, 2016, 36 (22): 7217-7227. Liang S, Wang Y F, Xu M, et al. Environmental input-output analysis in industrial ecology [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36 (22): 7217-7227 (in Chinese)
- [38] 王长波, 张力小, 庞明月. 生命周期评价方法研究综述: 兼论混合生命周期评价的发展与应用 [J]. *自然资源学报*, 2015, 30 (7): 1232-1242. Wang C B, Zhang L X, Pang M Y. A review on hybrid life cycle assessment: development and application [J]. *Journal of Natural Resources*, 2015, 30 (7): 1232-1242 (in Chinese)
- [39] Feng K, Hubacek K, Siu Y L, et al. The energy and water nexus in Chinese electricity production: a hybrid life cycle analysis [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2014, 39: 342-355
- [40] Li X, Feng K, Siu Y L, et al. Energy-water nexus of wind power in China: the balancing act between CO<sub>2</sub> emissions and water consumption [J]. *Energy Policy*, 2012, 45: 440-448
- [41] Lindner S, Legault J, Guan D. Disaggregating the electricity sector of China's input-output table for improved environmental life-cycle assessment [J]. *Economic Systems Research*, 2013, 25. DOI: 10.1080/09535314.2012.746646
- [42] Lindner S, Guan D. A hybrid unit energy input-output model to evaluate embodied energy and life cycle emissions for China's economy [J]. *Journal of Industrial Ecology*, 2014, 18 (2): 201-211

- [43] Wan L, Wang C, Cai W. Impacts on water consumption of power sector in major emitting economies under INDC and longer term mitigation scenarios: an input-output based hybrid approach [J]. Applied Energy, 2016, 184: 26-39
- [44] Joshi S. Product environmental life-cycle assessment using input-output techniques [J]. Journal of Industrial Ecology, 1999, 3: 95-120
- [45] 马忠, 张芯瑀, 冯浩源. 基于混合 LCA 模型的酒店服务业水足迹量化研究: 以张掖市为例 [J]. 环境科学学报, 2018, 38 (9): 3780-3786. Ma Z, Zhang X Y, Feng H Y. Research on the water footprint quantification of the hotel service industry based on the hybrid LCA model: a case of Zhangye [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2018, 38 (9): 3780-3786 (in Chinese)
- [46] Swiss Centre for Life Cycle Inventories. The eco-invent database [EB/OL]. 2015 [2021-01-15]. <http://www.ecoinvent.ch>
- [47] Aldaya M M, Chapagain A K, Hoekstra A Y, et al. The water footprint assessment manual [J]. London: Eearthscan, 2011
- [48] 马忠, 张继良. 张掖市虚拟水投入产出分析 [J]. 统计研究, 2008 (5): 65-70. Ma Z, Zhang J L. Analysis on virtual water in Zhangye city using regional input-output model [J]. Statistical Research, 2008 (5): 65-70 (in Chinese)
- [49] Wang S, Cao T, Chen B. Water-energy nexus in China's electric power system [J]. Energy Procedia, 2017, 105: 3972-3977
- [50] Wang S, Chen B. Energy-water nexus of urban agglomeration based on multiregional input-output tables and ecological network analysis: a case study of the Beijing-Tianjin-Hebei region [J]. Applied Energy, 2016, 178: 773-783
- [51] 中华人民共和国中央人民政府.“疆电外送”首次突破 500 亿千瓦时 [EB/OL]. 2019 [2021-02-01]. [http://www.gov.cn/xinwen/2019-02/01/content\\_5363129.htm](http://www.gov.cn/xinwen/2019-02/01/content_5363129.htm). The Central People's Government of The People's Republic of China. ‘Xinjiang Power Transmission’ for the first time exceeded 50 billion kWh [EB/OL]. 2019 [2021-02-01]. [http://www.gov.cn/xinwen/2019-02/01/content\\_5363129.htm](http://www.gov.cn/xinwen/2019-02/01/content_5363129.htm) (in Chinese)
- [52] 热孜娅·阿曼, 方创琳, 赵瑞东. 新疆水资源承载力评价与时空演变特征分析 [J]. 长江流域资源与环境, 2020, 29 (7): 1576-1585. Re A, Fang C L, Zhao R D. Research on the water resources carrying capacity and spatial-temporal characteristics in Xinjiang [J]. Resources and Environment in The Yangtze Basin, 2020, 29 (7): 1576-1585 (in Chinese)
- [53] 邓铭江, 李湘权, 龙爱华, 等. 支撑新疆经济社会跨越式发展的水资源供需结构调控分析 [J]. 干旱区地理, 2011, 34 (3): 379-390. Deng M J, Li X Q, Long A H, et al. Regulation of supply and demand structure of the water resources and support economic and social leap-forward development of protection measures [J]. Arid Land Geography, 2011, 34 (3): 379-390 (in Chinese)
- [54] Jiang K, He C, Xu X, et al. Transition scenarios of power generation in China under global 2℃ and 1.5℃ targets [J]. Global Energy Interconnection, 2018, 1 (4): 477-486

## Water footprint analysis of electricity production in Xinjiang Uygur Autonomous Region based on a hybrid LCA model and its changes under carbon neutralization target

YAN Shu-Qi<sup>1</sup>, LI Su-Mei<sup>1</sup>, LYU He<sup>1</sup>, CHEN Sha<sup>1</sup>, LIU Ying-Ying<sup>1</sup>,  
WANG Hong-Tao<sup>2</sup>, LIU Hui-Zheng<sup>3</sup>, CHEN Qian-Li<sup>4</sup>

1 Department of Environmental Science, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;

2 China Quality Certification Center, Beijing 100070, China; 3 College of Economics and Management, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China; 4 College of Management, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China

**Abstract:** Xinjiang Uygur Autonomous Region, as a major region for power production in China, also has a severe scarcity of water resources. Water footprint is a widely used comprehensive indicator that quantifies one area's water consumption in the electricity production and its impact on the water environment. This paper used a combined model based on input-output and life cycle analysis to quantitatively analyze Xinjiang's water footprint of power production in 2012 and 2017, and also investigated the water footprint contribution departments of various power generation technologies. The findings revealed that the water footprint per unit of electricity generation in Xinjiang decreased from  $4.26 \times 10^{-3} \text{ m}^3/(\text{kW}\cdot\text{h})$  to  $3.08 \times 10^{-3} \text{ m}^3/(\text{kW}\cdot\text{h})$  from 2012 to 2017 due to the change of electricity production structure and technological innovation of thermal power generation. We also discovered that the indirect water footprints of coal power and hydropower were primarily from mining and heavy industry, accounting for 60.3% and 52.8%, respectively, after analyzing the water footprint contribution departments of different power generation technologies. When it came to wind power and photovoltaic power generation technology, heavy industry and light industry accounted for 38.1% and 56.0% of the indirect water footprints, respectively. Furthermore, the high proportion of renewable energy generation from 2017 to 2050 will reduce the unit water footprint of Xinjiang's power production by 75%, according to the analysis of the changes in the water footprint influenced by the transformation of Xinjiang's power structure under China's carbon neutrality target.

**Keywords:** Water footprint; Electricity production; Hybrid life cycle assessment (HLCA); Input-output analysis; Carbon neutrality