ENERGY FOUNDATION
能源基金会

典型地区
能源与水耦合关系研究与政策分析

Research and Policy Analysis on Energy-Water Relationship in Typical Regions

北京师范大学
BEIJING NORMAL UNIVERSITY

中国绿色发展协同创新中心
GREEN DEVELOPMENT INSTITUTE

2020 年 7 月

目　录

1 摘要.....1

2 能源与水耦合关系的研究意义：水资源管理是否可以作为间接控制碳排放减少的有效政策工具？.....4

3 省级区域的能水关系研究.....7

3.1 河北省能源与水基本情况介绍.....7

3.1.1 河北省的水资源极其匮乏.....7

3.1.2 河北省的能源特征粗犷.....14

3.1.3 河北省的碳排放情况.....21

3.2 路径分析.....23

3.2.1 识别关键部门对解析能源与水耦合关系具有重要意义.....24

3.2.2 伴随钢铁产业为代表的重工业产品省外出口是河北省能源消费的流向.....28

3.2.3 伴随农产品生产和贸易的省外出口是河北省水消费的主要流向.....36

3.2.4 不考虑农业部门的水资源流动路径分析.....42

4 基于省级能源与水耦合关系的水资源压力解决路径.....44

4.1 路径一：调整产业结构.....44

4.1.1 二三产业结构调整是河北省实现节水节能的主要方式.....44

4.1.2 第二产业是节水节能路径实现的关键.....46

4.1.3 金属冶炼和压延加工品业等产业是通过控水限能的关键部门.....48

4.1.4 第三产业的整体扩张需要以批发零售业等产业部门为主力.....50

4.1.5 产业结构调整是节水、节能减排的可用手段之一.....51

4.2 路径二：节水效率提升.....53
4.2.1 节水效率提升能够实现显著节水成效.....53
4.2.2 节水效率提升能够帮助二产实现显著节水目标，节能目标却相较有限.....56
4.2.3 建筑业和金属冶炼和压延加工品制造业的节能节水效应最为明显.....58
4.2.4 第三产业实现的节水部门多，节能部门少.....61
4.2.5 节水效率提升能够带来的碳减排效果较弱.....63
4.3 路径三：能源结构调整.....65
4.3.1 研究能源结构变化对水资源消费影响的基本假设.....65
4.3.2 情景分析：压煤能够实现最显著的碳减排效益，但节水效果有限.....67
4.4 三种解决办法的比较.....69
5 城市能源与水耦合关系研究探索.....75
5.1 唐山市和承德市的水资源与能源.....75
5.1.1 唐山——“华北第一工业城市”.....75
5.1.2 承德——“京津冀水源涵养地”.....76
5.1.3 唐山市与承德市水资源消费和能源消费的特征.....77
5.2 地级城市的能源与水相关关系研究.....80
5.3 地级城市的能源与水定性关系研究.....82
5.3.1 短期内城市层面优选节水效率提升.....84
5.3.2 长期内三种方法都可以用来缓解水资源压力.....85
5.4 本章讨论.....86
6 政策建议.....89
附录.....91

1 摘要

中国是个水资源分布及其不均的国家，虽然从总量上看，我国的淡水资源总量为 2.8 万亿立方米，占全球水资源的 6%，仅次于巴西、俄罗斯、加拿大、美国和印尼，名列世界第六位。但我国人均水资源量 2300 立方米每年，约为世界平均水平的四分之一。

地处经济较为发达的东部地区的河北省，人均水资源更是匮乏，只有 386 立方米，是全国平均水平的 1/8[1]，远远低于全国水平和相邻地区。

本研究针对的“能源与水耦合关系”主要是将能源与水资源作为人类社会生产和生活的基本资源要素，考察其在社会各部门行业间如何参与生产与生活，在各部门的中间消耗和最终产品之间的流动方向和分配比例。

本研究通过对河北省能源与水资源关系的研究，力图在理清河北省水资源消费与能源消费强度居高不下的经济原因，描绘在社会生产中的两种要素在各生产部门中的汇集和流通路线，并试图通过产业结构调整、节水效率提升和能源结构调整三种方式来优化河北省除第一产业部门之外的能水关系，寻找可能通过水资源管理来间接撬动能源消费变化从而形成可观的碳减排效益的路径。

通过研究发现，产业结构调整是能够在节约全社会用水的同时实现能源与碳排放的下降的可用手段之一。河北省二三产业结构调整是实现节水节能的主要方式，第二产业是节水节能路径实现的关键，金属冶炼和压延加工品业等产业是通过控水限能的关键部门。要实现经济发展和节水节能目标的协同，第三产业需要继续扩张，需要以批发零售业等产业部门为主力。

[1] 河北省水资源概况，http://www.360doc.com/content/17/0405/10/19446_642992517.shtml

节水效率提升能够实现显著节水成效，能够帮助第二产业实现显著节水目标，节能目标却相较有限。分部门来看，建筑业和金属冶炼和压延加工品制造业受用水效率提升的节能节水作用较明显。第三产业实现的节水部门多，节能部门也较少。整体来看，节水效率提升能够带来的碳减排效果较弱。

表 1 对节水效率提升不同反馈下的产业部门的政策建议

	第二产业	第三产业	适应政策
强正反馈	金属冶炼和压延加工品制造业	–	优先强力的节水政策
	非金属矿物制品制造业		
	建筑业		
弱正反馈	–	住宿和餐饮	温和有序的节水政策
		卫生和社会工作	
弱负反馈	化学产品制造业	房地产	不适合节水政策
	食品和烟草制造业	信息传输、软件和信息技术服务	
	纺织品业		
强负反馈	–	交通运输、仓储和邮政	不适合节水政策
		批发和零售	

最后，我们假设将河北省的煤炭消费用太阳能来代替，则会发现压煤能够实

现最显著的碳减排效益，但其节水效果有限。如果替代煤炭消费的是生物质能，则水资源需求反而会大幅增加。

虽然没有具体讨论第一产业，从研究结果来看，也能够带给我们一些政策启示。首先，产业结构调整的方法适合于全社会的水资源与能源消费量实现节约；第二，节水效率提升更适合单个产业部门的节水节能减排工作，聚焦重点行业，对技术研发和成果转化要求较高；第三，能源结构变化对煤炭部门的水资源节约效果有限，但能够从根本上解决碳排放问题，对于碳减排来说，能源结构优化是终极手段。

除此之外，我们还简单讨论了城市层面的能源与水关系，简单分析了“华北第一工业城市”唐山市和“京津冀水源涵养地”承德市的水资源和能源供给与需求。受制于可用数据较少的限制，研究对两个城市的能水关系做了定性分析，认为短期内，社会总需求不变将限制产业结构调整的空间，用水效率提升是缓解水资源压力的主要方式，但并不意味着一定带来碳减排效益；长期看，社会总需求的变化并不确定，产业结构调整和节水效率提升都是缓解水资源压力的重要途径，但是大幅度的碳减排还需要靠能源结构转型。

通过研究我们发现，受数据的可获得性约束，城市级别的能水关系研究需要下沉的具体行业中，获得一手数据来支撑；城市层面的产业结构更加固化，节水技术是应对水资源压力的优先选择；城市层面节水可能能够带动的节能效果未知，减排还是要靠提高能效和能源结构优化。

2 能源与水耦合关系的研究意义：水资源管理是否可以作为间接控制碳排放减少的有效政策工具？

中国是个水资源分布及其不均的国家，虽然从总量上看，我国的淡水资源总量为 2.8 万亿立方米，占全球水资源的 6%，仅次于巴西、俄罗斯、加拿大、美国和印尼，名列世界第六位。但我国人均水资源量 2300 立方米每年，约为世界平均水平的四分之一。

地处经济较为发达的东部地区的河北省，人均水资源更是匮乏，只有 386 立方米，是全国平均水平的 1/8[2]，远远低于全国水平和相邻地区。

河北省整体降水分布是太行山和燕山迎风区降水较丰富，其它地区则降水量较少。2018 年，河北省水资源总量明显下降，比 2017 年增加 25.70 亿立方米，比多年平均值少 40.65 亿立方米，降至 164.04 亿立方米。其中，全省地表水资源量 85.32 亿立方米，地下水资源量 124.41 亿立方米。更为严峻的是，人均水资源量明显下降，低至 217.09 立方米[3]。

虽然河北省严重缺水，但其同时也是中国重要的能源生产基地、农业和工业大省，在我国经济发展中扮演着重要的角色，也是我国的碳排放大省。

在煤炭生产方面，除了中西部的几个能源生产大省，如内蒙古、山西、陕西、新疆和宁夏之外，在东部地区河北省的煤炭生产仅次于山东，2017 年煤炭生产总量是 6019.95 万吨。在工业领域，河北省的 2017 年工业增加值在全国排名第 6；第一产业增加值则在全国排名第 7。根据 2016 年的计算数据，河北省的碳

[2] 河北省水资源概况，http://www.360doc.com/content/17/0405/10/19446_642992517.shtml
[3] 2018 年河北省水资源公报，河北省水利厅

排放量为 6.15 亿吨，位居全国第 5 位[4]。

能源与水资源都是人民生活和经济发展最主要的资源，在社会各个部门都发挥着动力作用，二者之间也有着复杂且不可分割的密切关系。伴随全球变暖压力日渐增大，减少碳排放成为各国各地区乃至各部门的重要责任。对于河北省而言，一方面是极度匮乏的水资源和丰富的能源禀赋，一方面是继续推进经济稳定增长和快速降低碳强度的目标，能源与水资源的协同高效管理则显得尤为总要。

基于以上，本研究倡议更密切地探讨水资源有限的用水用能大省-河北省的水与能源关系，以期从省级层面讨论能源与水要素的供应与其消费的协同管理方式。同时，基于当前我国已经形成的水资源的严格管控制度，本研究尝试通过解析河北省能源与水关系，构建通过水资源管理实现减少碳排放的路径，为未来应对气候变化和实现我国自主贡献目标提供潜在的新方法和新建议。

要解答水资源管理是否可以作为间接控制碳排放减少的有效政策工具这一问题，需要聚焦几个关键问题：

（1）河北省的水资源与能源的关系是怎样的？

（2）经济目标不变的情况下，是否有可能通过产业、技术和能源手段缓解能水紧张关系，优化增长路径？

（3）水资源管理能否成为协调能源系统和产业结构优化的抓手，从而形成低碳、环保的发展路径？

基于以上问题，本报告的主要研究思路如下，以河北省作为研究目标，探索河北省能源与水资源的耦合关系，第三部分首先介绍河北省能源与水的基本情况；之后通过结构路径分析的方法，识别在复杂耦合关系中的重要节点，即在整

[4] ceads 数据库

个社会生产生活中能源和水资源的流动方向，以及影响二者关系的关键部门，找到可以通过政策来影响的主要方向。

第四部分用不同的政策调控手段来讨论如何能够优化改善河北省能源与水的耦合关系，应用了投入产出分析法和情景分析法来完成。政策调控包括三种手段，一是调整产业结构；二是提升节水技术；三是通过能源结构变革来实现。

第五部分则通过逻辑归纳的定性方法讨论了在河北省境内的两个典型城市，唐山市与承德市的能水关系，分别对枯水地区和丰水地区在城市级别的能源与水互动展开了讨论研究。

3 省级区域的能水关系研究

从这章开始，我们将从省级区域的层面来研究能源与水资源的关系。在第一部分，我们将对河北省的能源供给和能源消费、水资源供给和水资源消费做简单介绍，以此来阐明河北省作为能源消费大省和水资源短缺大省的基本特征；在第二部分，我们将通过社会部门生产的角度来解构能源和水资源作为生产要素是如何在各部门中间结合和流动的。

3.1 河北省能源与水基本情况介绍

在探索河北省能源消费和水资源消费的关系之前，我们先对“能源与水耦合关系”作出一个研究概念的基本界定，接着会对河北省的基本情况做简单介绍。

本研究针对的“能源与水耦合关系”主要是将能源与水资源作为人类社会生产和生活的基本资源要素，考察其在社会各部门行业间如何参与生产与生活，在各部门的中间消耗和最终产品之间的流动方向和分配比例。对于能源与水资源消费总量和强度都较大的行业部门，我们就认为能源与水资源在这类部门的耦合关系较为紧密；反之则反是。

3.1.1 河北省的水资源极其匮乏

（1）水资源匮乏的北方大省-河北

中国的水资源虽然丰沛，但分布极度不均。相较于人口、经济发展需求和当前所处的发展发展水平，中国的水资源形式并不容乐观。人均水资源量是衡量一个国家可利用水资源的重要指标之一，中国的人均水资源量长期低于全球平均水平，约为世界人均水资源量的四分之一，不足 2200 立方米/人，全国有三分之

二的城市处于缺水地区，四分之一的城市属于严重缺水。

地处中国北部、亦属经济较为发达的东部地区的河北省，人均水资源更是匮乏，只有 386 立方米，是全国平均水平的 1/8[5]，远远低于全国水平和相邻地区。

河北省整体降水分布是太行山和燕山迎风区降水较丰富，其它地区则降水量较少。2018 年，河北省水资源总量明显下降，比 2017 年增加 25.70 亿立方米，比多年平均值少 40.65 亿立方米，降至 164.04 亿立方米。其中，全省地表水资源量 85.32 亿立方米，地下水资源量 124.41 亿立方米。更为严峻的是，人均水资源量明显下降，低至 217.09 立方米[6]。

2017 年，河北省总供水量（农业、工业、家庭、环境或其他活动用水）为 181.6 亿立方米，其中地表水 59.4 亿立方米，占总供水量的 32.7%；地下水 116 亿立方米，占总供水量的 63.9%。其他水源，包括回收污水、收集的雨水和淡化水，不包括直接使用的海水（例如用于冷却核电站的海水），为 6.2 亿立方米，占总供水量的 3.4%（见下图）。

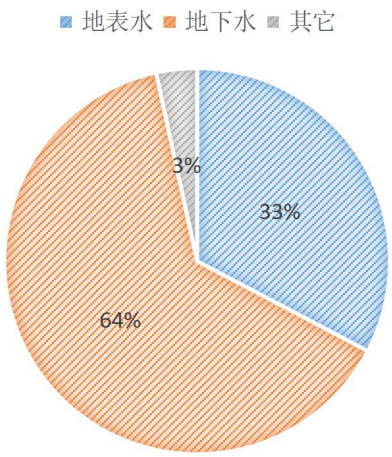


图 1 2017 年河北省供水结构图[7]
（数据来源：2017 年中国水资源公报）

[5] 河北省水资源概况，http://www.360doc.com/content/17/0405/10/19446_642992517.shtml
[6] 2018 年河北省水资源公报，河北省水利厅
[7] 2017 年中国水资源公报，中华人民共和国水利部

从时间尺度上看，河北省的水资源量波动较大，近几年呈上升趋势，但人均水资源量在 2017 年却有所下降。从水资源结构来看，地表水匮乏，地下水资源是供应河北省水资源的主要组成。河北省供水总量，也就是用水量逐年降低。地下水占比虽然有所减弱，但仍旧是河北省用水的主要来源，远远超出全国平均水平。

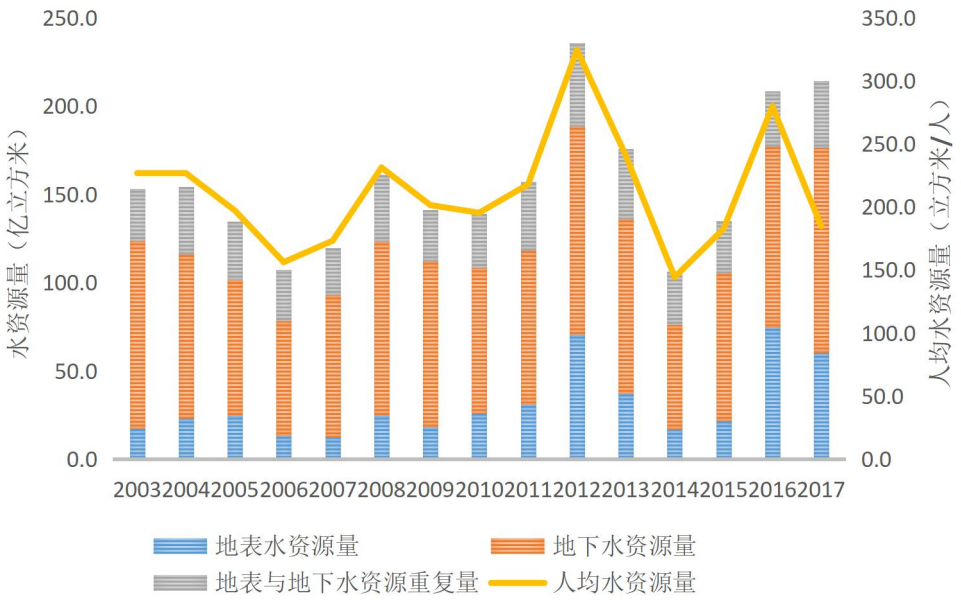


图 2 2003-2017 年河北省水资源量情况图
（数据来源：河北省经济年鉴 2018）

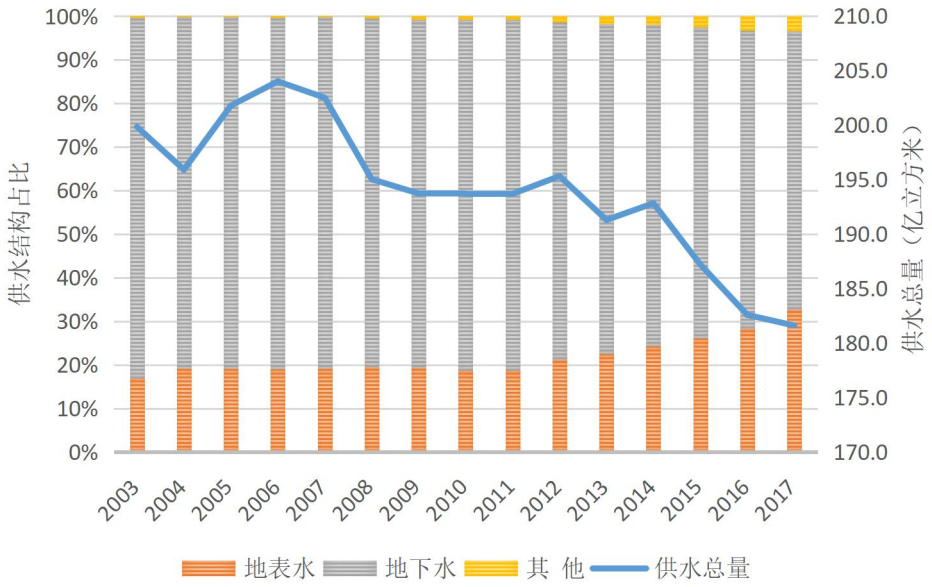


图 3 2003-2017 河北省供水总量结构图
（数据来源：2018 年河北省经济年鉴）

（2）庞大农业与工业用水量是河北省水资源消费的主要方向

2017 年，河北总需水量为 181.6 亿立方米，与上一节提到的供水量相当，生产用水（农业与工业）占据了河北省用水总量的 80%。其中，农业用水 121.6 亿立方米，占 69.4%；工业（含能源）20.3 亿立方米，占 11.2%；生态补水 8.2 亿立方米，占总水量的 4.5%；生活用水 27 亿立方米，占 14.9%，包含城镇公共用水量 5.22 亿立方米和居民生活用水量 21.75 亿立方米[8]（见下图）。

[8] 2017 年河北省水资源公报，河北省水利厅

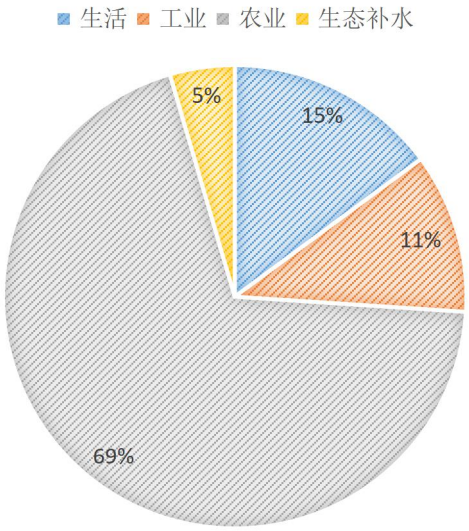


图 4 2017 年河北省用水结构图
（数据来源：2017 年河北省水资源公报）

从用水结构来看，虽然农业和工业用水占比在持续缩小，但二者仍旧总量庞大。特别是农业用水仍旧占约 70%，消耗了绝大部分的河北省供水资源。可以看出，在农业领域的节水空间巨大，但是由于农业灌溉过程中巨大的蒸发效应，实现和普及农业节水的难度也非常大。

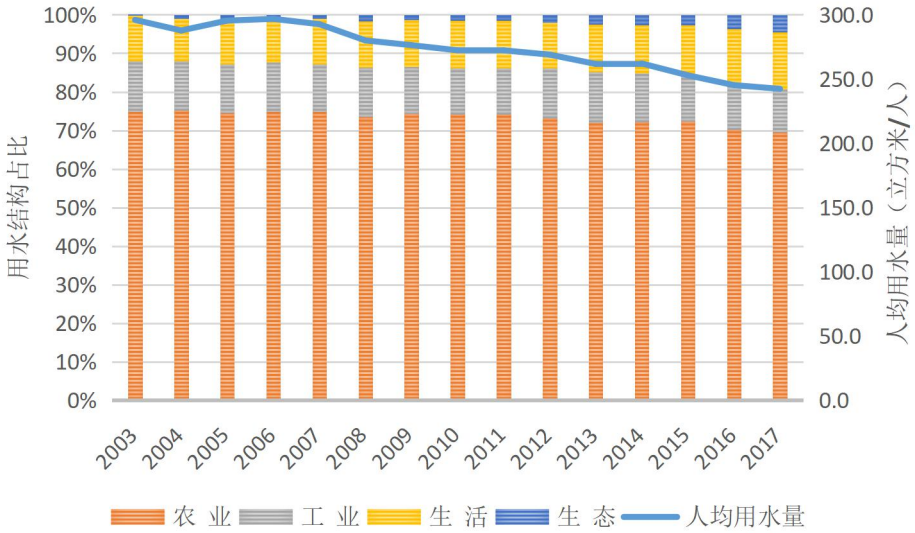


图 5 2003-2017 河北省用水总量结构图
（数据来源：河北省经济年鉴 2018）

（3）与其它省市相比，河北省具有地下水超采、农业用水占比大的特点更加突出

1） 严重缺水的河北省是全国唯一一个地下水供给超过 60%供水总量的省份

如果一开始对河北省地下水超采的特点介绍并不能够引发读者对于其缺水问题的深刻认知，那么对比中国其他省份地区，河北省的问题会反映地更加直观。2017 年，河北省是中国地下水供给占比最多的省份，也是唯一一个占比超过 60%的省份。

正是由于河北省地下水资源的长期超采，平原区地下已经形成了不可忽视的地下水漏斗，可能引发水位下降、地面沉陷和海水倒灌等恶果。当前，河北省的以宁柏隆漏斗（周边埋深 50 米）、高蠡清-肃宁漏斗（周边埋深 30 米）为代表的浅层漏斗呈现覆盖面积扩大但漏斗中心埋深减少的特点，以冀枣衡漏斗（周边埋深 90 米）、南宫漏斗（周边埋深 90 米）为代表的深层漏斗则在面积和中心埋深上都有所增加[9]。

[9] 河北省水资源公报 2018，河北省水利厅

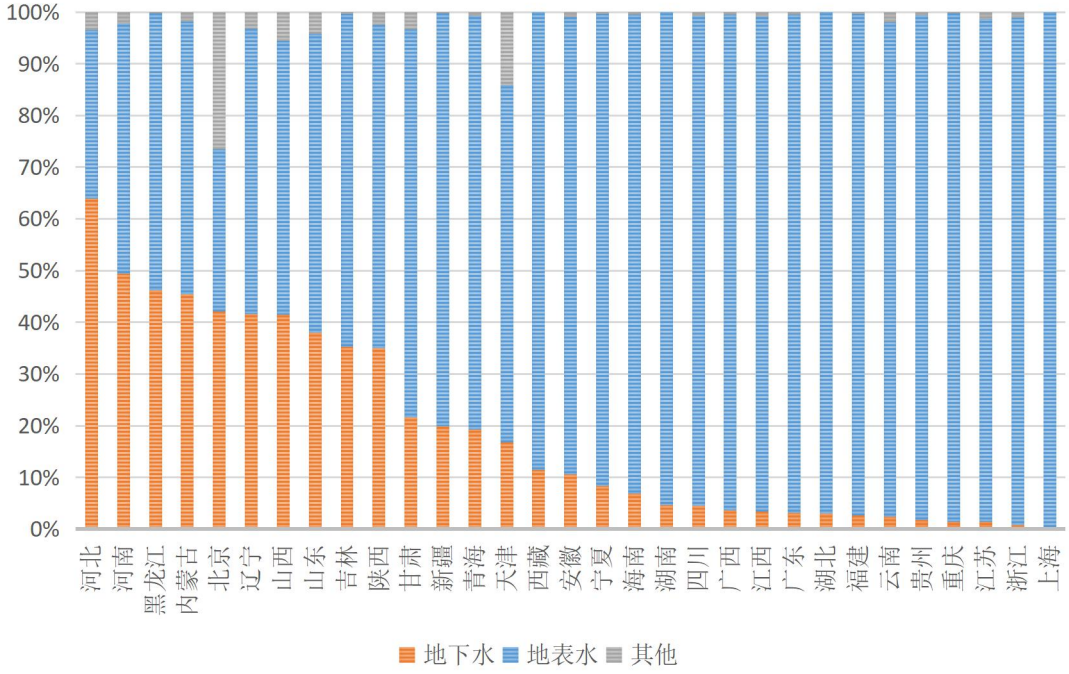


图 6 2017 年中国各地区供水结构
（数据来源：中国统计年鉴 2018）

2） 河北省似乎东部地区为数不多的工农业用水占比大省

2017 年，与其它省份地区相比，河北省农业用水占全省用水总量比重为 69%，排名第 10 位；工业用水占比 11%，排名 22 位；生活用水占比 15%，排名 17 位；生态用水占比 5%，排名第 7 位。虽然这些数据分开来看都并不突出，但河北省是为数不多的东部地区工农业用水占比超过 80%的省份。另一个占比更高的东部省份是江苏省，接近 90%。但值得一提的是，江苏省位于中国雨量充沛的南方地区、长江下游，其水资源拥有量是河北省无法比拟的。

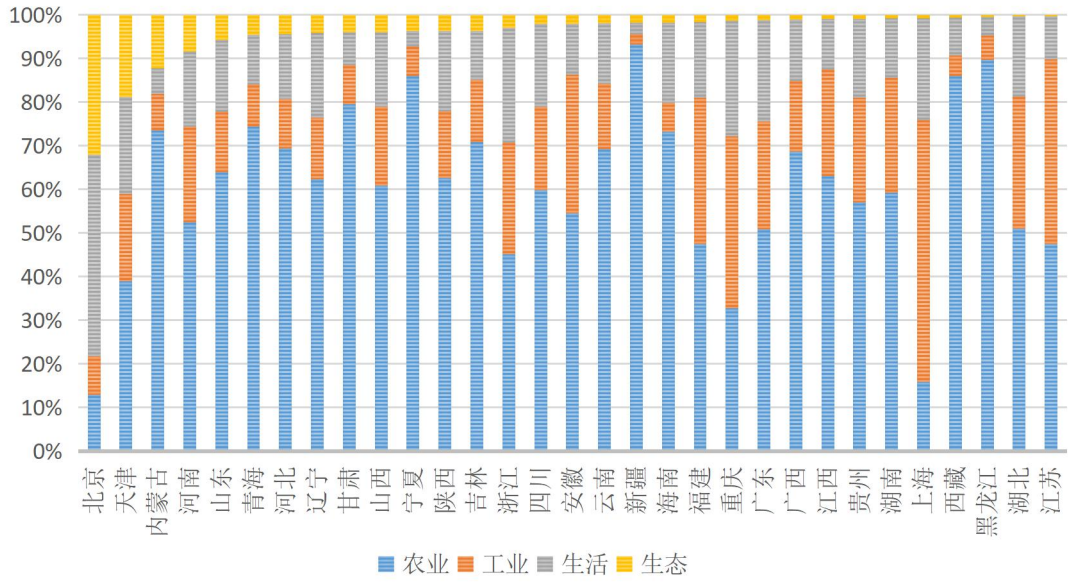


图 7 2017 年中国各地区用水结构
（数据来源：中国统计年鉴 2018）

3.1.2 河北省的能源特征粗犷

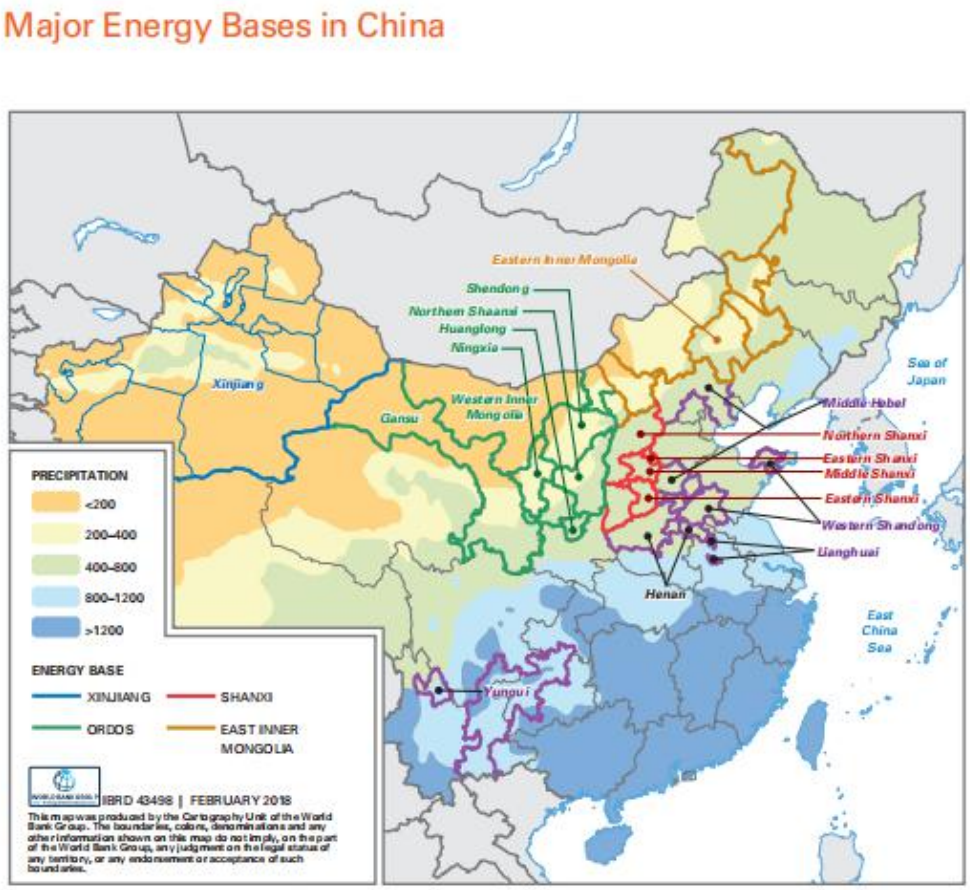
地处华北煤炭生产基地的河北省亦是煤炭消费大省，快速发展的经济水平和偏重的产业结构都使得河北省能源强度居高不下。

（1）河北省地处中国主要的能源基地，一次能源生产以煤炭为主

中国是一个富煤、贫油、贫气的国家。长期以来，无论是在能源生产上，还是在能源消费上，煤炭都占据了绝对的霸主地位。伴随全球气候变暖形式的逐渐严峻和能源技术的不断革新，虽然煤炭在能源消费结构中的比重不断下降，但在当前它依旧是中国能源消费的主要类型。2015 年，煤炭约占中国一次能源消费总量的 63.7%（国家统计局，2016 年），这一数据在 2017 年的数值是 60.4%，2018 年降到了 60%以下，煤炭占比 59%。

受资源禀赋的影响，中国能源生产主要集中在黄河以北的北方地区。除云贵能源基地外，中国主要的能源基地均位于北方干旱或半干旱缺水地区。这些地区拥有中国 71%的国家煤炭储量和 13%的水资源。因此，如果煤炭继续占据主导

地位，严重的水资源限制将对中国的能源发展战略构成挑战。



Source: IWHR with data from the National Energy Administration 2012; State Council of China 2014 and Xie et al. 2007.

图 8 中国主要的能源生产基地

图片来源：Thirsty Energy – Modeling the Water-Energy Nexus in China, World Bank Group

河北省的能源生产近年来保持平稳趋势，2017 年能源生产总量为 6778.54 万吨标煤。原煤是一次能源生产的主要品种，占全省一次能源生产总量的 70% 左右。从时间尺度上来看，伴随原煤生产占比逐渐下降，一次电力及其它能源占比在 2012 年后逐年明显攀升，到 2017 年已经超过 18%。

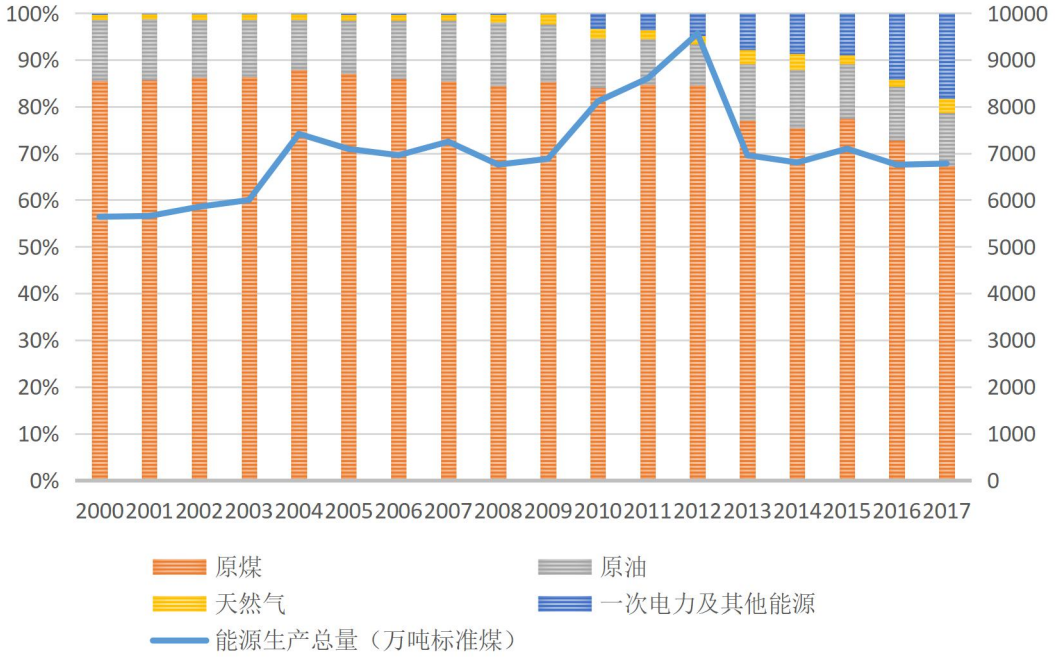


图 9 2000-2017 年河北省一次能源生产总量与结构图
（数据来源：河北省经济年鉴 2018）

（2）快速发展的产业和经济带动了河北省的能源消费，粗放的消费方式依旧是河北省能源消费的痛点

1）河北省位于东部经济较发达地区，经济一直保持着中高速发展的态势。

河北省地处华北平原，环绕京津，紧邻渤海，下属 11 个地市，不仅是中国重要的工业大省，也是我国的棉粮主产区。2017 年，河北省生产总值 34016.32 亿元，比上年增长 7.4%。其中，第一产业增加值 3129.98 亿元，增长 1.5%；第二产业增加值 15846.21 亿元，增长 3.9%；第三产业增加值 15040.13 亿元，增长 12.9%。一二三产结构为 9.2:46.6:44.2。全省人均地区生产总值为 45387 元，比 2016 年增长 6.8%。到了 2018 年，河北省 GDP 为 36010.3 亿元，其中第一产业、第二产业和第三产业分别为 3338 亿元，16040.1 亿元和 16632.2 亿元，三次产业结构为 9.3:44.5:46.2。也是在 2018 年，河北省的第三产业比重首次超过第二产业，当年全省人均地区生产总值为 47772 元。

2）2000 年以来，河北省能源消费伴随经济发展持续增长，能源结构依旧以煤为主。

2017 年，河北省的能源消费总量为 30385.88 万吨标准煤。其中，煤炭消费占比为 83.71%，石油消费占比为 7.97%，天然气消费占比为 4.23%，一次电力消费占比为 4.09%。较 2000 年，能源消费总量增长 171%，煤炭消费占比下降了 7 个百分点，而一次电力消费则上涨了 4 个百分点。

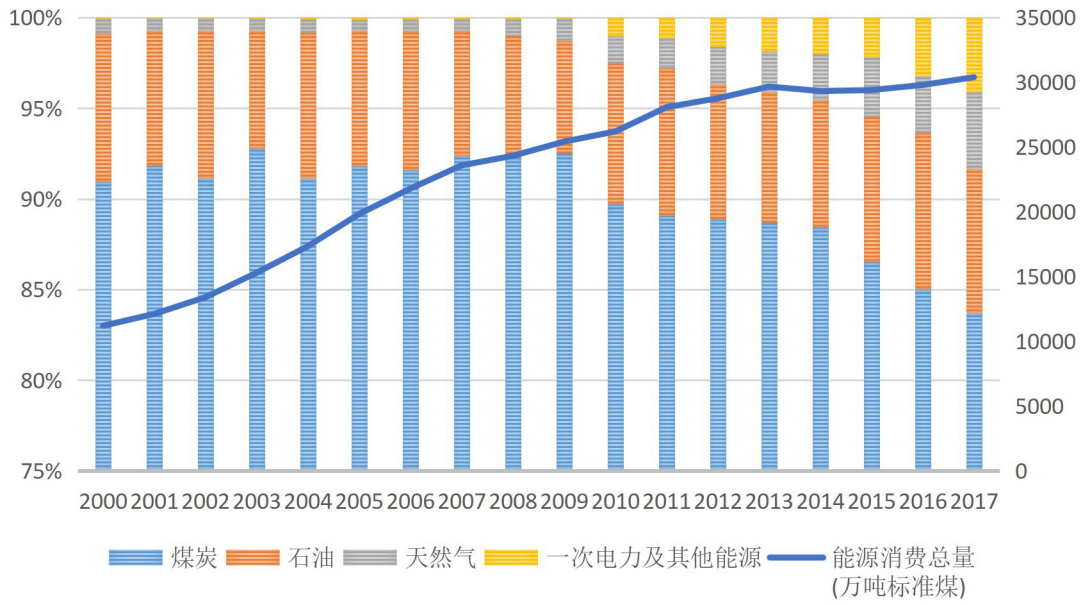


图 10 2000-2017 年河北省能源消费总量与结构图
（数据来源：河北省经济年鉴 2018）

3）河北省的能源消费接近四分之三来自于工业部门，同时，过去十几年间工业能源消费占比呈现显著下降趋势，生活消费所用能源占比快速上升。

按产业结构分，2017 年河北省能源消费占比最大的是工业 22507 万吨标准煤，约占全部能源消费的 74%，较 2005 年下降 6 个百分点。2017 年农林牧渔水利业能源消费为 675 万吨标准煤，占比 2%；建筑业为 315 万吨标准煤，占比 1%；交通运输、仓储和邮政业与批发、零售业和住宿、餐饮业分别为 1215

和 977 万吨，占比为 4%和 3%；其他行业和生活消费分别为 892 和 3806 万吨，占比 3%和 13%。

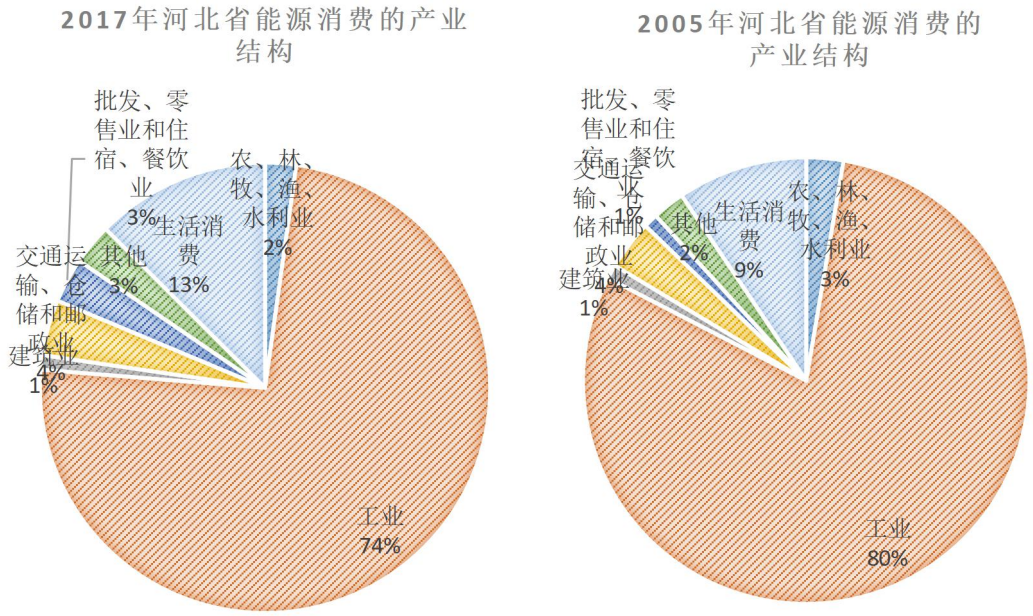


图 11 河北省能源消费的产业结构变化
（数据来源：河北省经济年鉴 2018）

4）工业能源消费占比虽然明显下降，但河北省经济发展的能源代价在全国依旧位居前列，在东部地区排在第一位。

在全国范围来看，2017 年河北省 GDP 排在第八位，能源消费排在第四位，单位 GDP 能耗第八位。然而，在东部地区的十个省市中（除去台湾、香港和澳门），河北省的表现不佳，GDP 排名第 5，能源消费排名第 4，单位 GDP 能耗排名高居第一。

河北省作为一个工业和农业生产大省，能源生产和消费长期以煤炭为主，接近 80%的能源消费来自于其它省市的进口调入。河北省的能源消费在全国排名第 4，能源强度排名第 1；工业能源消费占全社会能源消费总量的 3/4，工业能

源强度则是其单位综合 GDP 能源消耗的接近 2 倍。

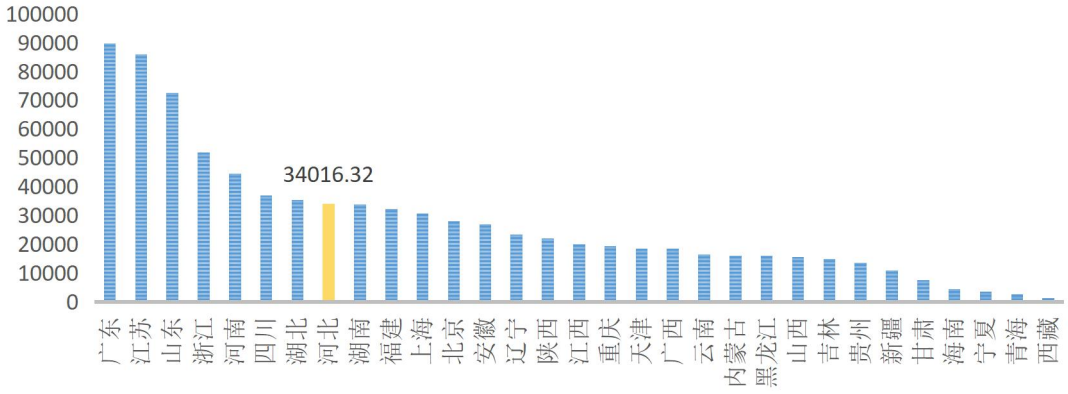


图 12 2017 年各地区 GDP 排名情况（亿元）
（数据来源：中国统计年鉴 2018）

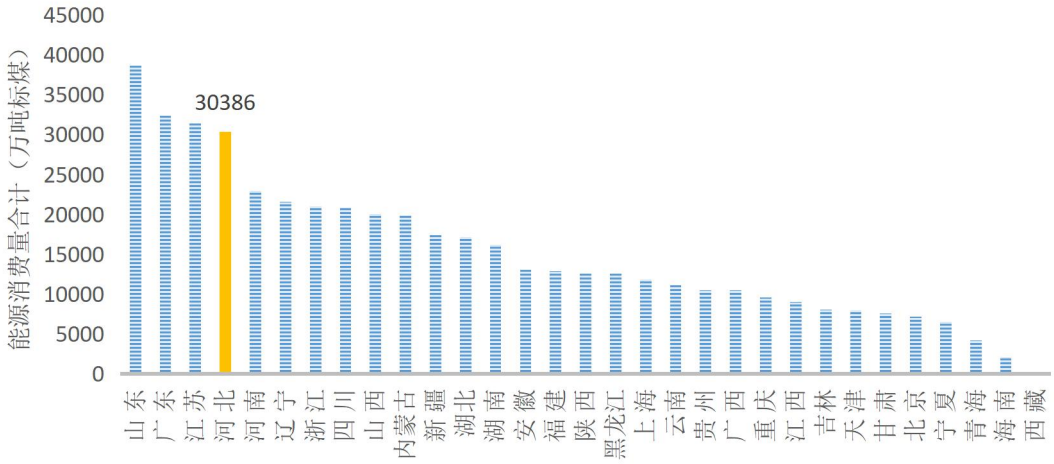


图 13 2017 年各地区能源消费排名情况（万吨标煤）
（数据来源：中国能源统计年鉴 2018，西藏地区数据暂无）

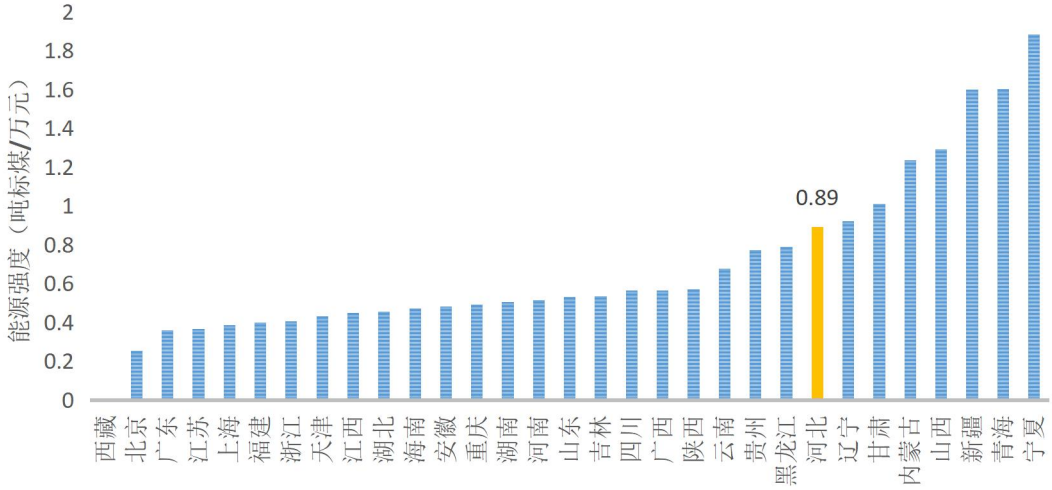


图 14 2017 年地区单位 GDP 能耗排名情况（吨标煤/万元）
（数据来源：根据中国统计年鉴 2018 和中国能源统计年鉴 2018 数据计算，西藏地区数据暂无）

5）**综合单位 GDP 能源消耗自 2000 年来显著降低，工业能源强度在进入 2010 年后则维持在一定水平，难以继续明显下降。**

2017 年，综合单位 GDP 能源消耗为 0.89 吨标准煤/万元，较 2000 年和 2005 年下降了 60%和 55%，能源强度降低显著。于此同时，工业能源强度则依旧是综合单位 GDP 能源消耗的接近 2 倍，自 2013 年一直在 1.7 吨标准煤/万元左右。同年，广东省的工业能源强度是 0.53 吨标煤/万元，对于河北省来说，工业能源强度仍然面临巨大的下降空间。

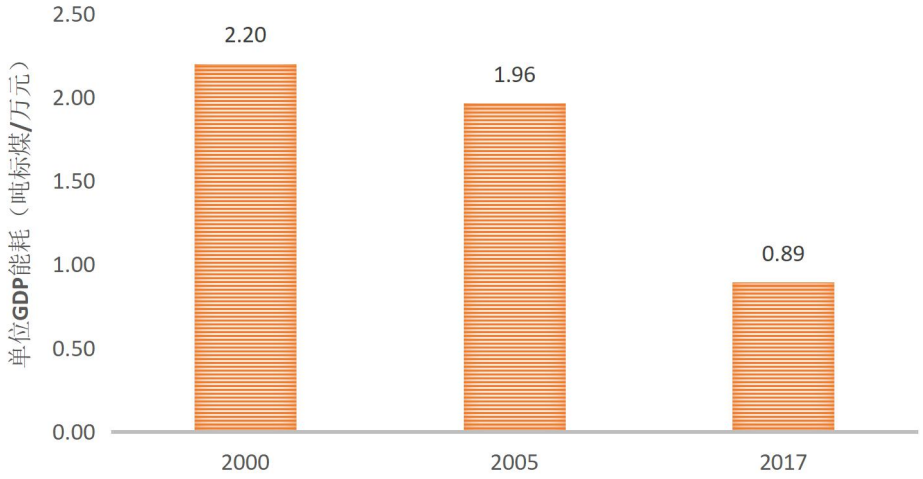


图 15 河北省能源强度下降趋势
（数据来源：根据河北省经济年鉴 2018 数据计算）

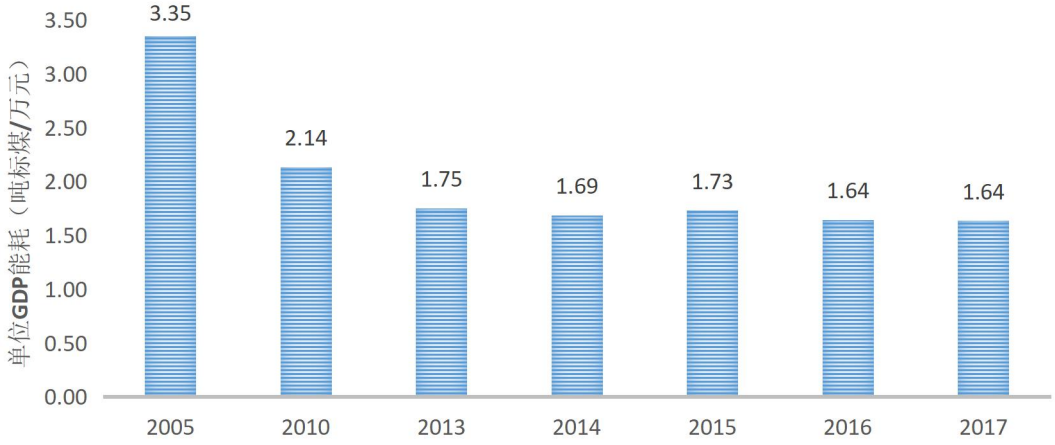


图 16 河北省工业能源强度
（数据来源：根据河北省经济年鉴 2018 数据计算）

3.1.3 河北省的碳排放情况

我们比较了 2016 年全国各地区的碳排放水平，发现河北省在全国的碳排放排名位列第五，排在山西、山东、内蒙古和江苏之后，占全国碳排放总量的 5%。山西和内蒙是中国的产煤大省，其巨大的碳排放与其自身能源生产环节密切相关。除了山西和内蒙古，河北省的碳排放仅次于山东省和江苏省，而后者则分别是中国地区 GDP 的第二位和第三位，同年河北省的 GDP 位列全国第八位，其碳强度能源强度分别是山东和江苏的 1.6 倍和 2.3 倍，由此可见**河北省减排的空**

间和压力巨大。

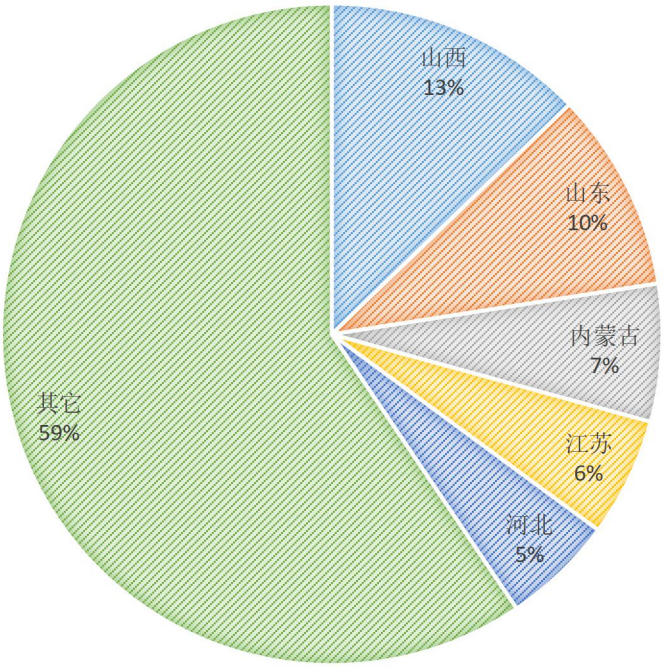


图 17 2016 年全国行政区碳排放 TOP 5
（数据来源：ceads 数据库）

受数据的可获得性约束，在本研究中假设河北省的碳排放行业分布与能源消费的行业分布一致。回顾能源消费的行业分布图，可以发现，河北省的碳排放主要集中在工业领域，虽然从 2005 年的 80%下降到了 2017 年的 74%，工业仍然是河北省碳排放的贡献垄断寡头。因此，探究工业领域的水能关系及在其基础上可能产生的碳减排效益，是本研究的重点方向之一。

接下来，本研究将针对河北省能源与水的耦合关系进行研究，正如前文所言，期望在解析河北省能源与水关系的基础上，找到通过能水协同管理，特别是通过水资源管控实现碳排放降低的路径和手段。

3.2 路径分析

为了探明能源和水资源作为两种生产资源在社会经济中的耦合关系，首先我们需要明确的是这两种资源既可以作为生产部门的资源在社会化大生产中使用，也可以作为普通民众的生活资源用来保证人民的基本生活需要。无论是在生产还是生活部门，能源与水都存在着复杂密切的耦合关系。基于本研究的初衷在于寻找一条新的减排路径，因此研究重点将放在经济生产部门，即以下研究都将围绕生产部门来展开。生活部门将不在此次研究的范围内。

正是由于需要对所有生产部门能源与水关系的进行解析，本研究首先采用了SPA 路径分析的方法来追踪河北省的能源与水资源是如何在中间生产环节在不同生产部门中间流动的，这些资源凝结在最终产品中又流向了何方？

SPA 路径分析方法是建立在投入产出分析基础上的，其基本原理可以参见附录。考虑到河北省在近些年能源消费的行业分布并没有明显差异，加之河北省最新的投入产出表是以2012 年数据进行编制，因此我们接下来的研究也将以2012 年为基期。

表 2　2012 年与 2017 年行业能源消费占比情况

行业	2012 年能源消费量（万吨标煤）	2012 占比	2017 年能源消费量（万吨标煤）	2017 占比
农、林、牧、渔、水利业	707.46	2.3%	675	2.2%
工业	24086.65	79.6%	22507	74.1%
建筑业	396.99	1.3%	315	1.0%
交通运输、仓储和邮政业	1118.65	3.7%	1215	4.0%
批发、零售业和住宿、餐饮业	419.54	1.4%	977	3.2%
其他	846.24	2.8%	892	2.9%
生活消费	2674.61	8.8%	3806	12.5%

3.2.1 识别关键部门对解析能源与水耦合关系具有重要意义

从整个社会的宏观层面来看，能源与水在经济生产、居民生活两个领域中作为两种重要的基础资源而相互牵绊，本研究主要聚焦在前者，探讨在经济生产领域能源与水的复杂耦合关系。

因此，在经济生产的中观层面，第一、第二和第三产业的能水关系可以简单概括为：一产冠水，二产冠能。即超过 70%的水资源被第一产业消费，接近 90%的能源被第二产业消费。从这个层面来看，河北省的能源与水资源在一二三产上并没有明显的耦合关系。一是因为其大宗流向并不相同，分别被第一产业和第二产业所消费；第二则是因为第一产业与第二产业自身的关联性并不强势，如果通过压缩第一产业的用水，很难传导到第二产业的用能。

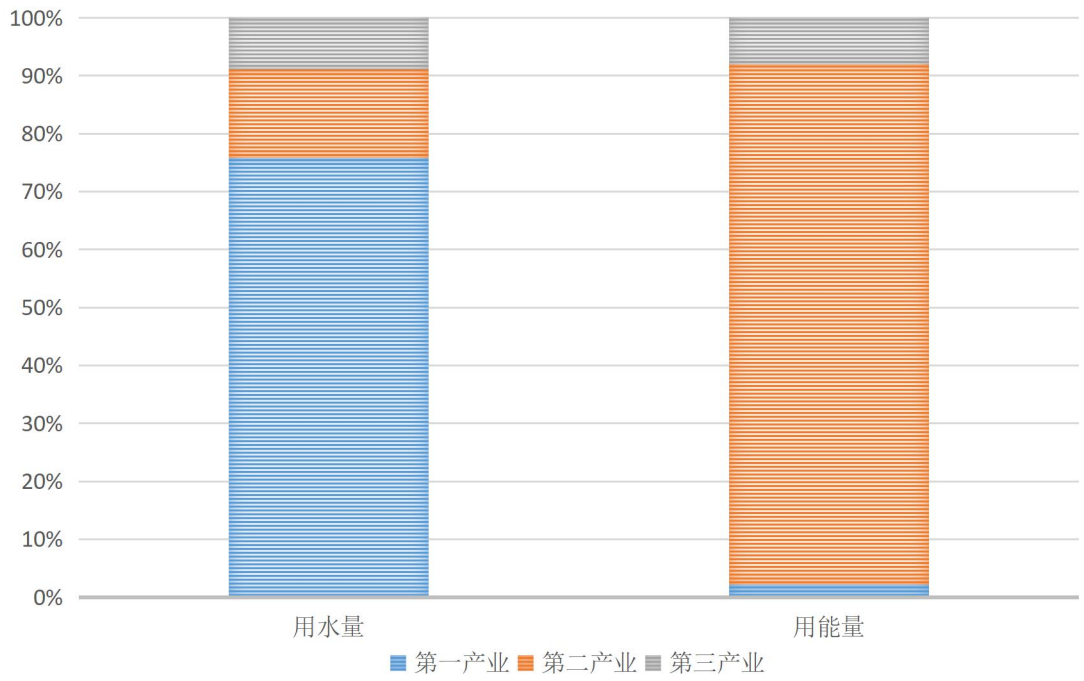


图 18 河北省一二三产业水资源与能源使用占比
（数据来源：河北省经济年鉴 2018，ceads 数据库）

（1）金属冶炼和压延加工品制造业、电力热力的生产和供应业、第三产业

是河北省生产部门中能源与水在总量关系上耦合较密集的产业，在强度关系上，耦合较紧密的只有电力热力的生产和供应业

在经济生产的微观层面来看，即聚焦在生产部门这一层面，能源消费分布与水消费分布则显示出巨大的差异性。在水资源消费中，排名前五位的部门分别是农林牧渔产品和服务业（76%）、第三产业（12%）、金属冶炼和压延加工品制造业（3%）、非金属矿和其他矿采选产品制造业（2%）、电力热力的生产和供应业（2%），之后依次是金属矿采选产品制造业、化学产品制造业、煤炭采选产品制造业、食品和烟草业、石油炼焦产品和核燃料加工品制造业。

在能源消费中，排名前五位的部门分别是金属冶炼和压延加工品制造业（52%）、电力热力的生产和供应业（10%）、第三产业（9%）、煤炭采选产品制造业（8%）和化学产品制造业（6%），之后依次是石油炼焦产品和核燃料加工品制造业、非金属矿和其他矿采选产品制造业、农林牧渔产品和服务业、金属矿采选产品制造业、食品和烟草业、通用设备制造业。

其中，能源与水资源消费排名都靠前的三个部门分别是金属冶炼和压延加工品制造业、电力热力的生产和供应业、第三产业。也就是说，从消费总量上来看，这三个部门是能源与水耦合的关键部门，需要在研究中重点关注。

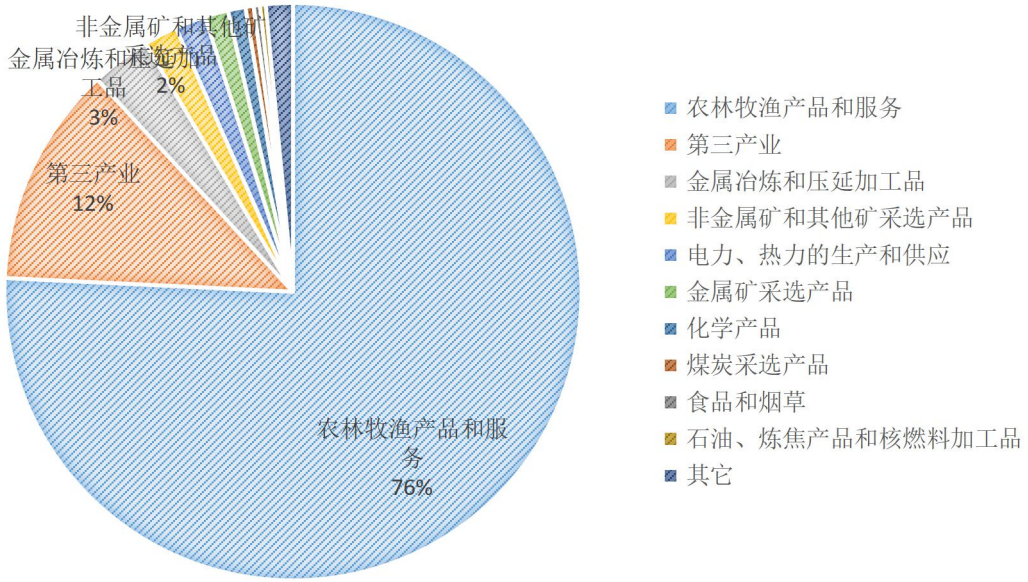


图 19 2012 年河北省水资源消费部门分布图
（数据来源：根据 2012 年河北省投入产出表绘制）

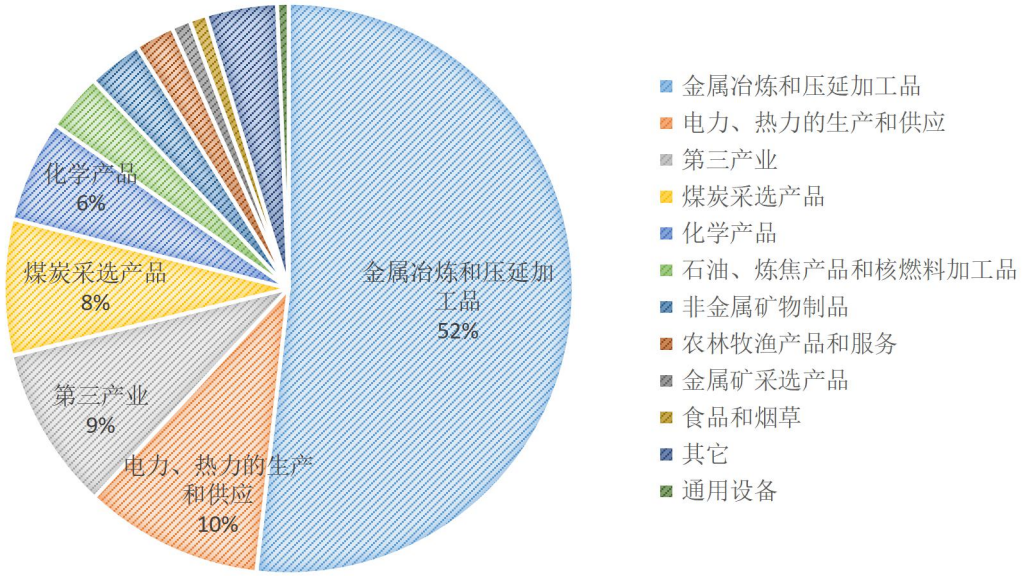


图 20 2012 年河北省能源消费部门分布图
（数据来源：根据 2012 年河北省投入产出表绘制）

从用水强度来看，农林牧渔产品和服务业（268 立方米/万元）、非金属矿和其他矿采选产品制造业（122 立方米/万元）、电力热力的生产和供应业（12 立方米/万元）、第三产业（11 立方米/万元）、石油和天然气开采产品制造业（7 立方米/万元）排列在前五位。

从能源强度来看，金属冶炼和压延加工品制造业（9243 吨标煤/亿元）、电力热力的生产和供应业（8962 吨标煤/亿元）、煤炭采选产品制造业（7999 吨标煤/亿元）、非金属矿物制品（3521 吨标煤/亿元）和化学产品制造业（2959 吨标煤/亿元）位列前五。

虽然用水强度与能源强度高的交叉部门只有电力热力的生产和供应业。但与消费总量相比，可以发现，无论是能源还是水资源，消费总量高的部门往往消费强度也偏高，这一点在农林牧渔产品和服务业的用水上，金属冶炼和压延加工品制造业、电力热力的生产和供应业的用能上体现的格外明显。可以说，对于这三个部门，要想降低单个要素在生产中的使用量，降低使用强度是主要的发展方向。

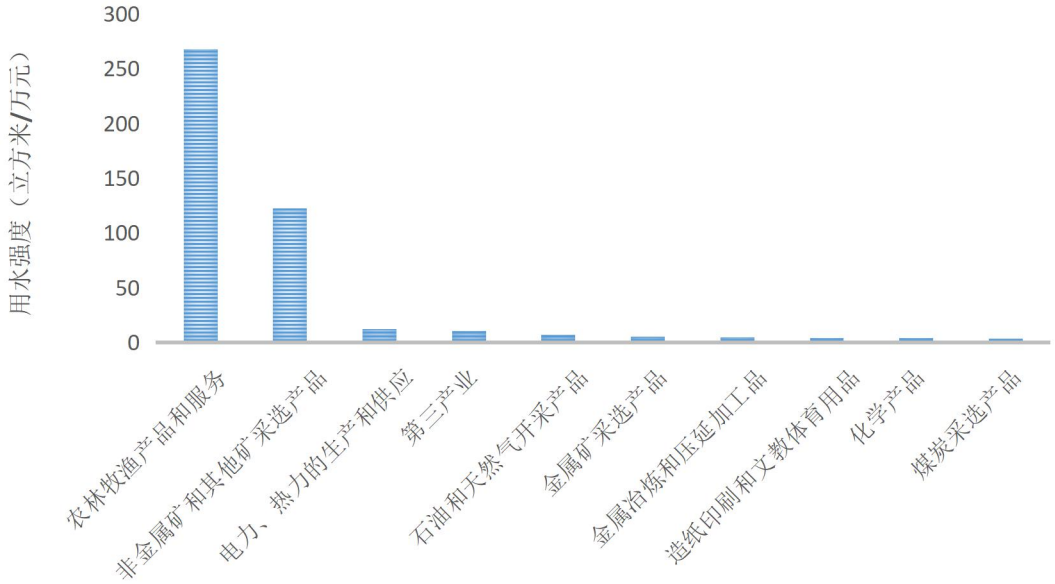


图 21 2012 年河北省部门用水强度 TOP10
（数据来源：根据河北省经济年鉴 2018 计算）

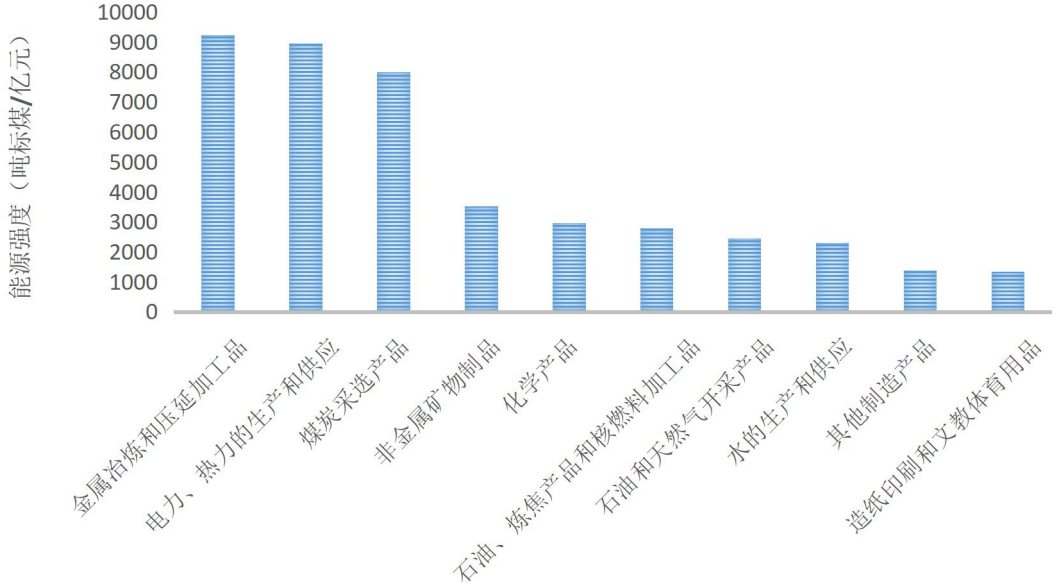


图 22 2012 年河北省部门用能强度 TOP10
（数据来源：根据河北省经济年鉴 2018 和 ceads 数据库数据计算）

3.2.2 伴随钢铁产业为代表的重工业产品省外出口是河北省能源消费的流向

通过 SPA 分析，可以发现河北省在生产部门中消费的能源与水中较大部分蕴含在最终产品中流向国内省外地区，这也体现了河北省作为我国棉量主产区和工业大省的地位和作用。

通过 SPA 路径分析方法整理了 2012 年河北省能源消耗量最大的 150 条路径，可以发现，2012 年河北省的能源消费总量中约 34%用于社会生产的中间消耗，即各部门生产环节中的消耗；剩余的约 66%流向了最终消费，即用有形的物理形式将能源固定在了流通在社会和市场上的产品里。

首先介绍一下最终消费包含的七个部分，包括农村居民消费、城镇居民消费、政府消费、固定资本形成、存货增加、出口和流出国内省外。农村居民消费和城镇居民消费是指产品分别被农村和城镇居民购买，政府消费表示产品作用于政府为了完成其公共职能而进行的支出，固定资本形成是指生产者在其固定资产存量

上追加的新的耐用品的净支出，存货增加表示生产原材料、半成品和成品的库存量的净增加，出口和流出国内省外则顾名思义都表示最终产品流向了河北省以外的地区，一个是流向了国外，一个则流向了中国其它省市地区。

从下图可以看出，河北省的能源在最终消费中，流出省外的最终消费占主要部分，包括流出国内省外消费占 41%，出口消费占 3%；留在河北本省的能源最终消费占 22%，其中占比最大的是固定资本形成占 15%，城镇居民消费和农村居民消费分别是 4%和 1%，政府消费 2%，存货增加则极少，不到全部能源消费总量的 1%。

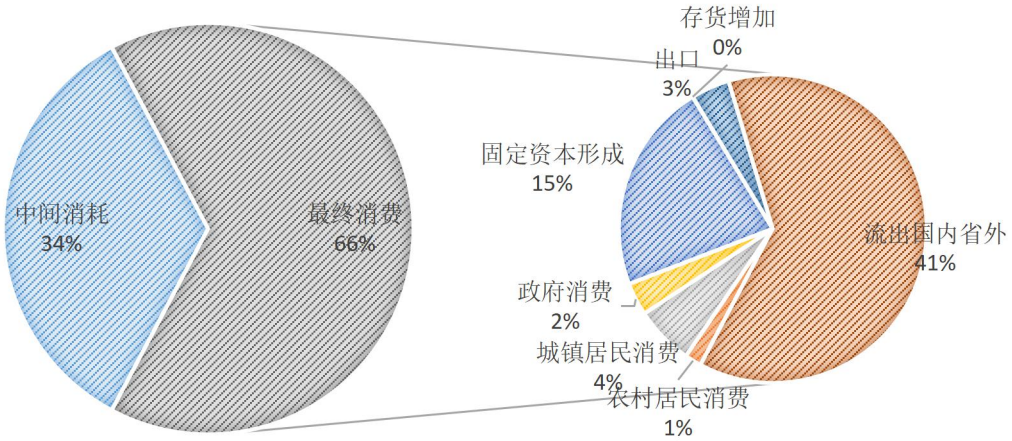


图 23 2012 年河北省能源消费流向结构图
（数据来源：根据 2012 年河北省投入产出表计算绘制）

在分析中，我们将所有路径给予编号，从 1 到 150 号不等，编号的原则是按照路径能源消费占比的大小来拍排序的，也就是说，越靠后的路径能源消费占比越小。选取 2012 年河北省能源消费占比最大的 50 条路径，可以发现累计，这 50 条路径的能源消费量为 1.24 亿吨标准煤，占河北省能源消费总量的

54.47%。

在这 50 条路径中，从最后一层的流经部门来看，金属冶炼与压延产品的能源消费量最大，约占这 50 条路径消费总量的 49.4%，占河北省能源消费量的 26.9%，其次是第三产业的能源消耗，占 50 条路径消费的 27.1%，占总能源消费量的 14.8%。除此之外，还有交通运输设备制造业、通用设备照业和化学产品制造业等部门也占据了一席之地，但消费所占比重与前两者相比有明显降低。

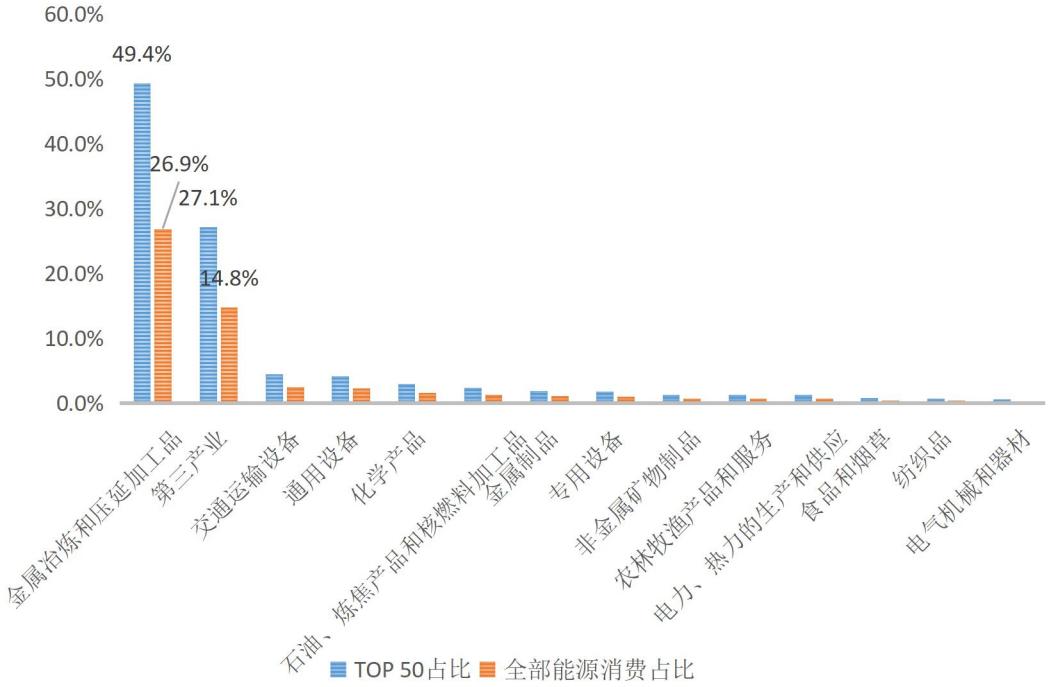


图 24 能源消费路径 TOP 50 中的消费部门
（数据来源：根据 2012 年河北省投入产出表绘制）

在这 50 条 TOP 能源消费路径中，流向最终消费的部分里，流出国内省外的能源消费主要来自于金属冶炼的压延产品加工业，占流出国内省外能源消费的 70.8%，第二名的第三产业占 7.1%；在流向固定资本形成的部分里，流出国内省外的能源消费则主要来自于第三产业，占 72.5%，排名第二的是通用设备制造业，占比 13.6%。

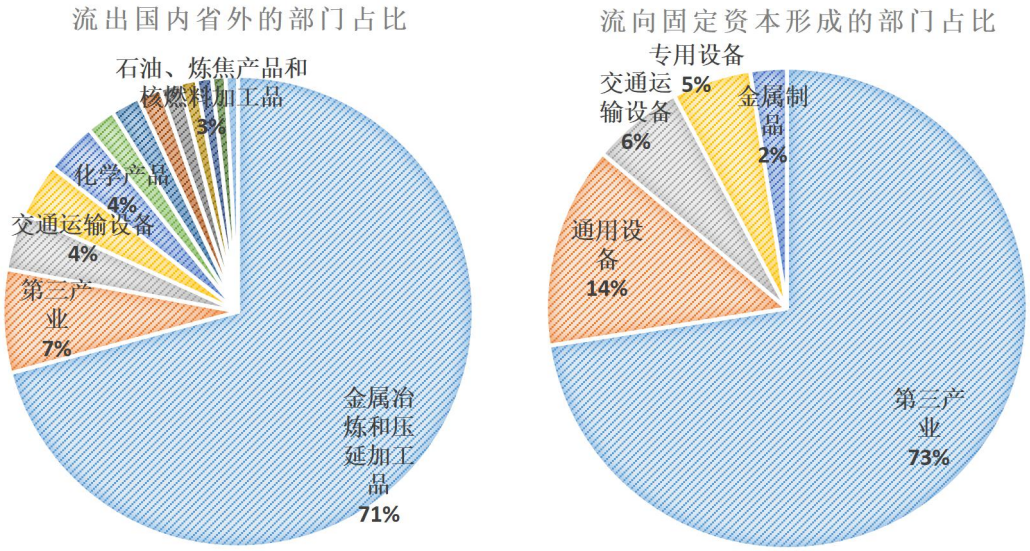


图 25 流出国内省外和固定资本形成的能源消费来源部门
（数据来源：根据 2012 年河北省投入产出表绘制）

能源消耗最大的路径是 “国内省外流出→金属冶炼和压延加工品”，即钢铁输出产业链条，占总能源使用量的 18.27%，超过 4000 万吨标煤。能源消费最大的路径向上游部门追溯可以发现大部分生产链的上游部门落在金属生产和压延加工品行业，如通用设备和交通运输设备消费引起的上游金属冶炼和压延加工品生产能源消费，约占总能源消费的 2.22%。在主要的结构分析路径中，第三产业也是重要的能源消耗路径指向部门之一，“固定资本形成→第三产业”路径的能源消耗量占比为 3.52%，是第三大能源消费路径。此外“固定资本形成→第三产业→金属冶炼和压延加工品”、“国内省外流出→第三产业”和“政府消费→第三产业”等路径的能源消费占比也较大，累计能源消费占比为 4%左右。

正如前文所言，从最终消费类型来看，国内省外消费需求对河北省的能源消费拉动最大，占 56.04%。仔细看这部分能源消费，主要的驱动行业包括金属冶炼和压延加工品、第三产业、交通运输设备以及化学产品，这些行业均具有能源密集型特征。能源消费第二大最终消费类型是固定资本形成，占总能源消费的

14.52%，其中固定资本形成对第三产业的直接消费和间接消费引起的金属冶炼和压延加工品、通用设备以及交通运输设备是主要的能源消费行业。居民消费引致的能源消耗路径总量为 5.21%，结构路径分析结构显示没有较大的耗能路径。出口和政府消费引起的能源消费均在 2.5%左右，其中“出口→金属冶炼和压延加工品”路径的能源消费较大，约占总能源消费的 1.24%。

通过下面的部门代号对照表，可以明晰 2012 年能源消费结构路径分析图中左侧三列图柱不同色块代表的生产部门，以图中标记的最后一位数字来区分。例如“T1S14”代表的就是资源流经了金属制品加工业。

通过终端消费类型代号对照表，可以明晰 2012 年能源消费结构路径分析图中最右侧图柱不同色块代表的消费部门，同样以图中标记的最后一位数字来区分。例如“F7”表示最终产品流向了省外国内。

表 3 部门代号对照表

序号	部门	序号	部门	序号	部门	序号	部门
1	农林牧渔	8	纺织服装鞋帽皮革羽绒及其制品	15	金属制品	22	其他制造产品
2	煤炭采选产品	9	木材加工品和家具	16	通用设备	23	废品废料
3	石油和天然气开采产品	10	造纸印刷和文教体育用品	17	专用设备	24	金属制品、机械和设备修理服务
4	金属矿采选产品	11	石油、炼焦产品和核燃料加工品	18	交通运输设备	25	电力、热力的生产和供应

5	非金属矿和其他矿采选产品	12	化学产品	19	电气机械和器材	26	燃气生产和供应
6	食品和烟草	13	非金属矿物制品	20	通信设备、计算机和其他电子设备	27	水的生产和供应
7	纺织品	14	金属冶炼和压延加工品	21	仪器仪表	28	第三产业

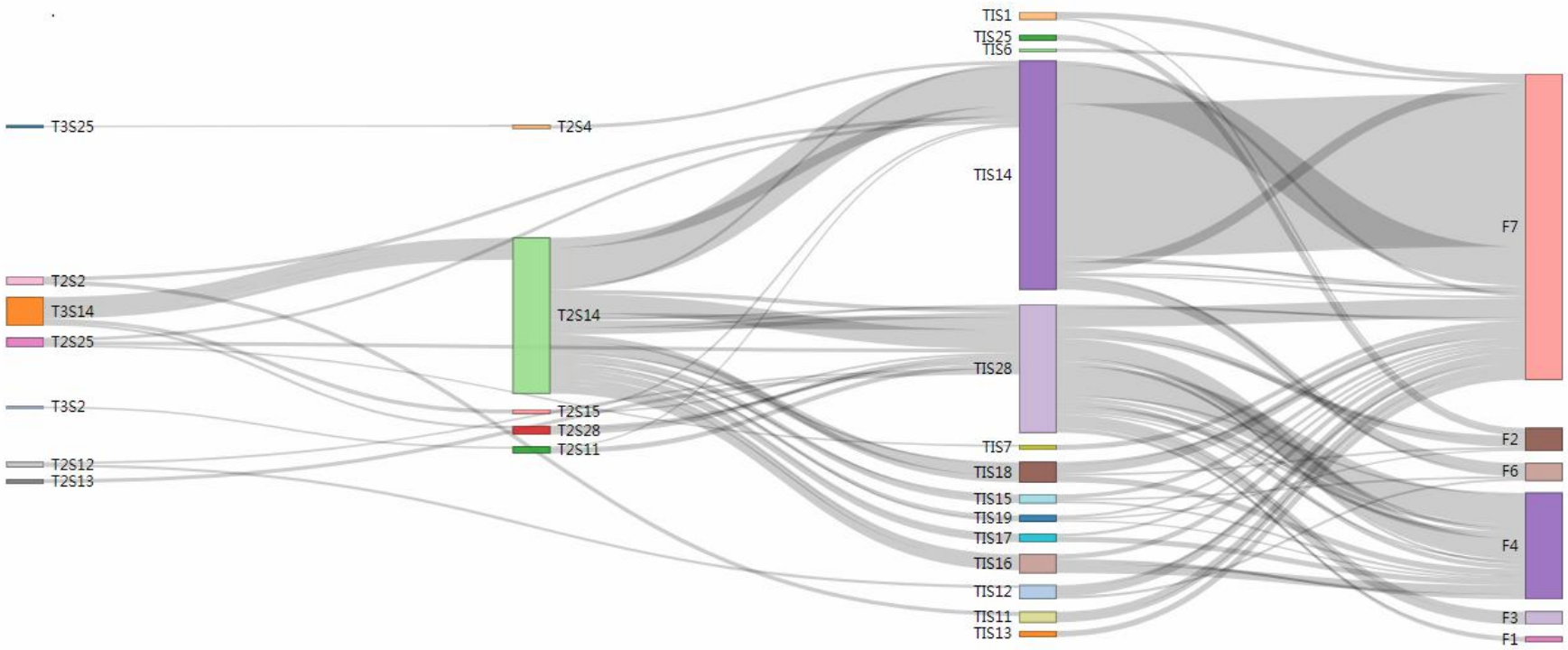


图 26 2012 年能源消费结构路径分析图
（根据 2012 年河北省投入产出表分析绘制）

表 4 终端消费类型代号对照表

序号	消费类型	序号	消费类型
1	农村居民消费	5	存货增加
2	城镇居民消费	6	出口
3	政府消费	7	流出国内省外
4	固定资本形成		

3.2.3 伴随农产品生产和贸易的省外出口是河北省水消费的主要流向

与分析河北省的能源流动一样，我们使用 SPA 路径分析方法，基于 2012 年的河北省投入产出表，计算其水资源消费的流向。可以发现，2012 年河北省的水资源消费总量中 11%用于社会生产的中间消耗，剩余的 89%全部用于最终消费。

在所有水资源的最终消费中，流出省外的水资源占主要部分，包括流出国内省外消费占 50%，出口消费占 2%；留在河北本省的能源最终消费占 37%，其中占比最大的是城镇居民消费 15%，固定资本形成占 13%，农村居民消费 6%，政府消费 3%，存货增加也是极少，不到全部水资源消费总量的 1%。

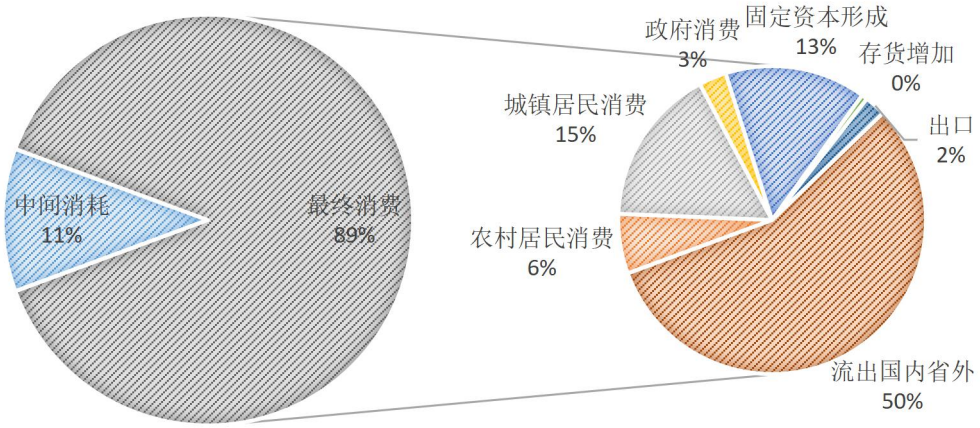


图 27 2012 年河北省水消费流向结构图
（数据来源：根据 2012 年河北省投入产出表计算绘制）

同样，在 150 条路径中根据路径水资源消费大小选出需求最大的 50 条路径，合计用水量为 155.03 亿吨，占河北省总用水量的 82.16%。

展开分析这 50 条路径的流经部门，可以发现，水资源最后一层的流经部门

依旧是农林牧渔产品和服务业，约占这 50 条路径消费总量的 59.6%，占河北省水资源消费量的 47.4%；其次是第三产业的水资源消费，占 TOP50 路径的 15.35%，占水资源总消费量的 12.20%；排名第三的是食品和烟草加工业，占 TOP50 路径的 13.0%，占水资源总消费量的 10.33%。除此之外，还有纺织品制造、纺织服装鞋帽皮革羽绒及其制品制造、金属冶炼和压延加工品制造业等部门也在 TOP50 的水资源消费中表现靠前，但占比明显不如前三名。

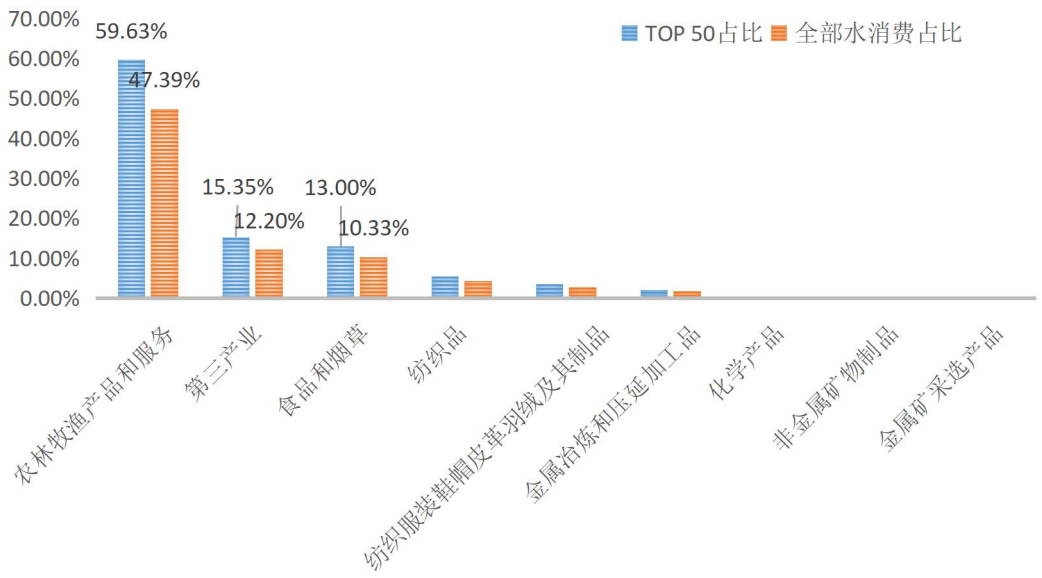


图 28 水消费路径 TOP 50 中的消费部门
（数据来源：根据 2012 年河北省投入产出表计算绘制）

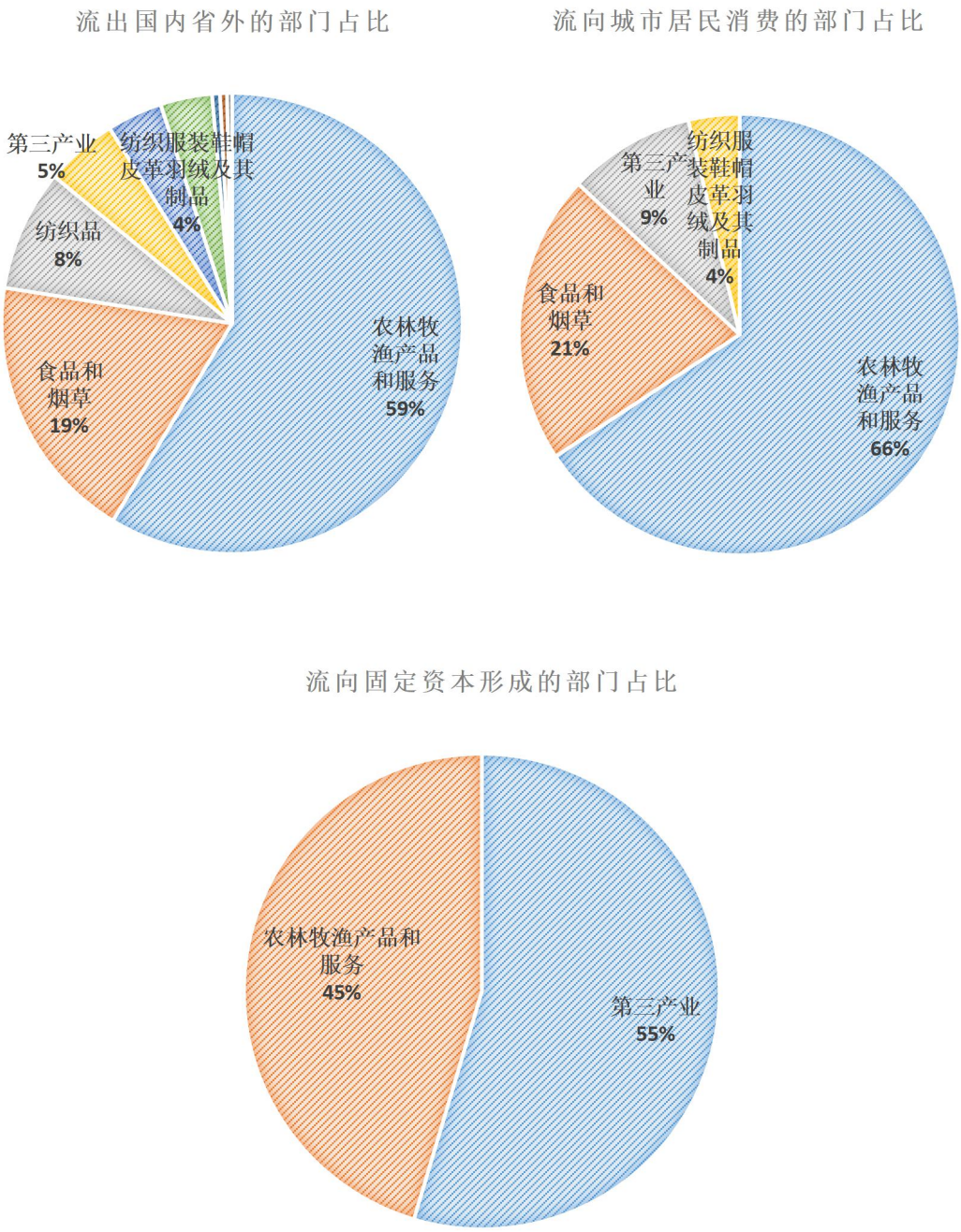


图 29 流出国内省外、城市居民消费和固定资本形成的水资源消费来源部门
（数据来源：根据 2012 年河北省投入产出表计算绘制）

分析单个需求路径，用水需求最大的路径为“国内省外流出→农林牧渔产品和服务”，河北省对国内其他省份的农产品供应消耗量了省内用水总量的24.02%，约 45.3 亿立方米；河北省作为粮食生产大省是国内重要的粮食输出地

区，作为京津地区的“菜篮子”，河北省供应了北京和天津超过 60%的农产品需求。此外，省外流出引起的间接农业用水如“国内省外流出→食品烟草→农林牧渔产品和服务”等产品生产链在河北省水资源使用中也有较高的占比，累计约为 17.01%。河北省第二大生产链耗水路径为“城镇居民消费→农林牧渔产品和服务”，占比约为 7.79%，出口消费和农村居民消费带来的“农林牧渔产品和服务”分别为 4.07%和 3.03%。

农业之外河北省主要的水资源消耗路径来自于第三产业，其中“出口→第三产业”的水资源使用占比为 4.68%，其次是“国内省外流出→第三产业”占比为 1.86%，河北省第三产业虚拟水的贸易流动整体呈输出型态势，而且第三产业的水资源主要消费路径集中在产品生产链的第一层级，其引致的上游行业水资源消耗量较少。

国内其他省份对河北省食品烟草、纺织品、服装制品等行业的需求也是河北省农业部门的高用水消耗居高不下的重要因素，累计占河北省用水总量的 16.31%。其他省外消费需求引起的水耗分布在第三产业、金属冶炼和压延加工品、化学产品等部门，占比均不超过总用水量的 2%。

与能源消费明显不同的是，水资源的最终消费类型流向中居民消费占比更加明显。其中，城镇居民消费引起的水资源使用量约为农村居民消费的 3 倍。城乡居民消费的主要水资源消费路径基本一致，最大的水资源消费均来自于对农产品的消费，合计占总用水量的 11%，其次是对食品烟草的消费引起的农业间接用水。城乡居民的第三产业消费需求引起的水资源消费在该类最终消费路径中也较大，约消耗了总用水量的 1.5%。固定资本形成的水资源消耗和城镇居民消费用水量大致相当，为 13.17%，主要来自于对农业和第三产业的消费需求，分别

为 5.5%和 7.4%，往上游部门追溯也并没有明显指向工业部门。出口消费引致的用水需求主要来自于“食品和烟草、纺织品、纺织服装鞋帽皮革羽绒及其制品”三个行业，用水量均在 0.5%以下。政府消费引起的用水也主要分布在农业部门和第三产业，且水耗都在 1%以下。

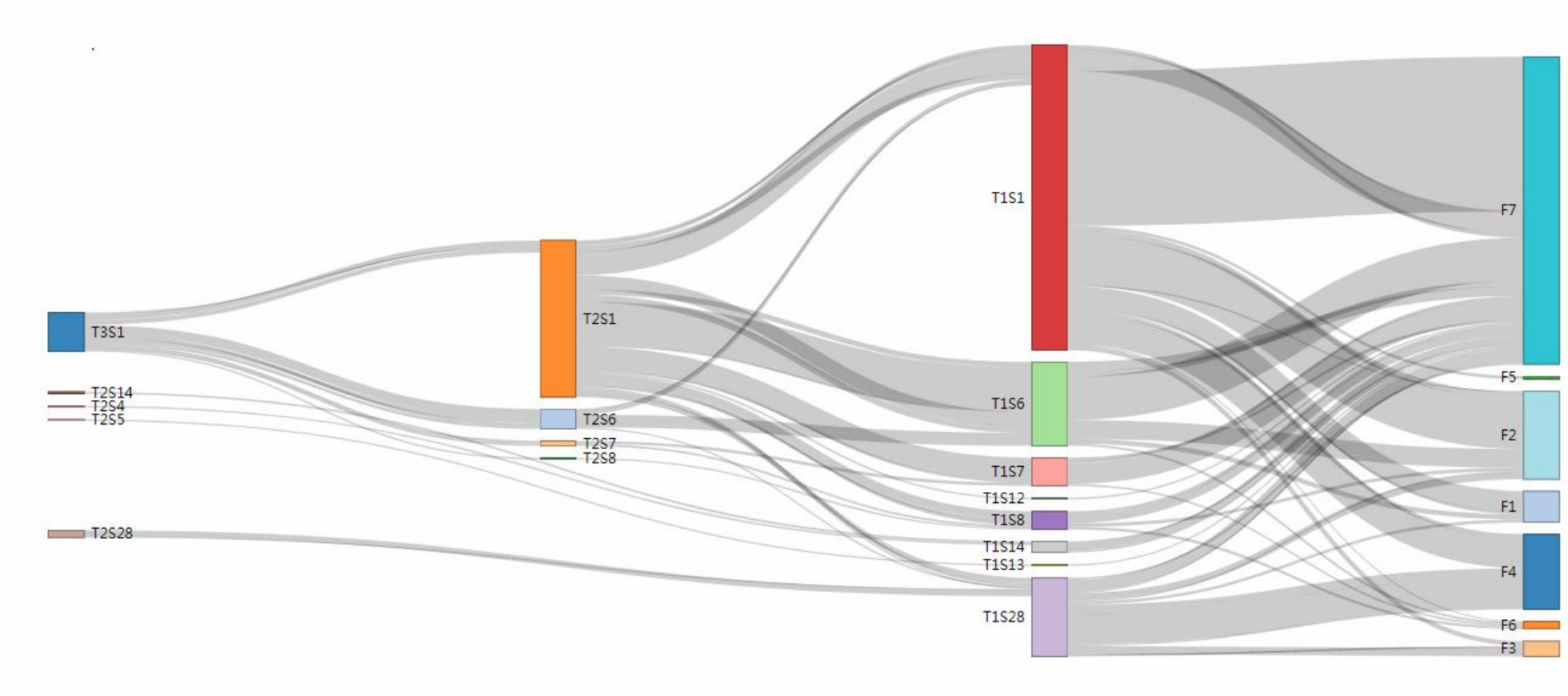


图 30 2012 年水资源消费结构路径分析图
（根据 2012 年河北省投入产出表分析绘制）

3.2.4 不考虑农业部门的水资源流动路径分析

考虑到农业在水资源消费中所占比例过大，占到最终消费的 71%，剔除农业来看水资源在最终消费部门中的分配，可以发现非农水资源中留在本省的最终消费超过了流出省外的部分，这部分约有 60%的水资源消费是用于省内生产生活，约 40%则流出了向省外（包括出口部分）。也就是说，所有水资源中，约有 11%的水资源用于非农业部门的固定资本形成、政府消费、城镇居民消费、农村居民消费和存货增加，约有 7%的水资源用于非农业部门的流向国内省外和出口。

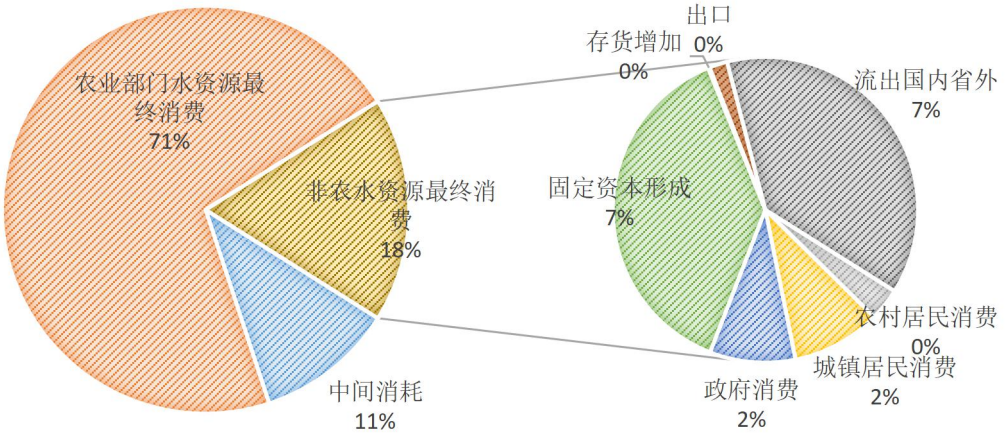


图 31 2012 年河北省非农水资源消费流向结构图
（数据来源：根据 2012 年河北省投入产出表计算绘制）

由于不考虑农业部门在整个水资源流动中的消费，TOP 50 路径的非农水资源在最后一层流经的部门分配占比如下图所示，第三产业是占比最大的部门，在非农水资源消费中占了 48.01%，用水总量占比约是 12%；金属冶炼和压延加工品制造业排在第二位，在非农水资源消费中占 9.24%，用水总量占比是 2.25%。其它的还有非金属矿物制品、化学产品、食品和烟草加工业等，这些部门的用水

量占比整体很小。

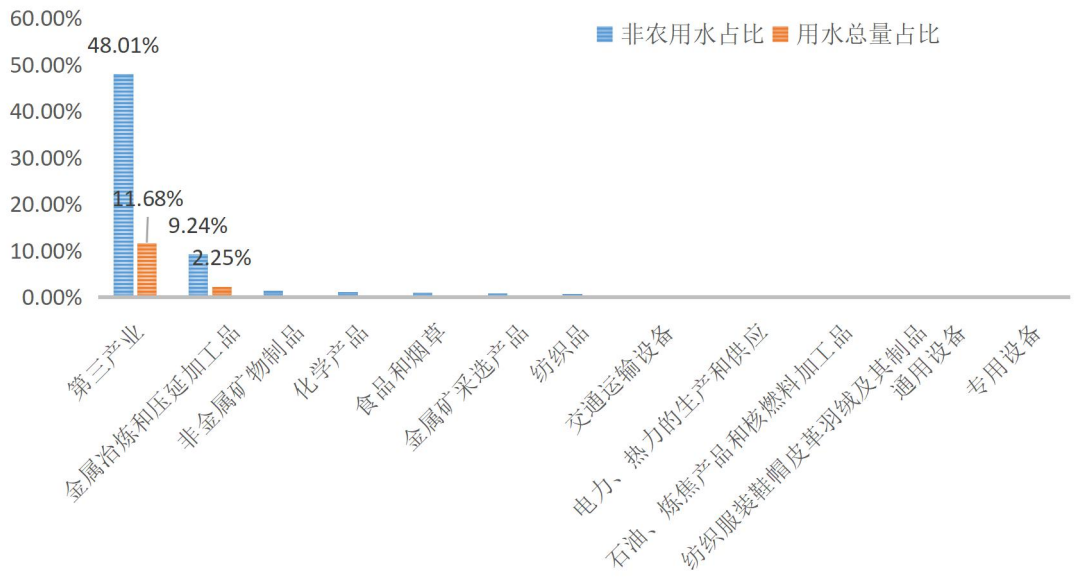


图 32 非农水消费路径 TOP 50 中的消费部门
（数据来源：根据 2012 年河北省投入产出表计算绘制）

如果简单直接地削减关键部门的用水量，受影响最直接的是该部门自身的产出。虽然能够用这种办法来达到控制用水总量、甚至是减少用能总量从而达到关键部门的目标，但是从全社会来看，一方面经济发展可能会受到影响，居民生活发展水平也可能受到限制，另外一方面是受关键部门牵连的其他部门有可能会有产出的变化，从而影响全社会整体用水和用能总量，甚至向相反方向变动，碳排放也由此而变化不明。

为了解决这个问题，下一节将对可能采用的方法进行分析，并讨论它们的有效性。

4 基于省级能源与水耦合关系的水资源压力解决路径

正如上一节最后结论所言，为了能够更加清晰地探索河北省能源与水的关系，识别减少水资源缺口、水资源高效管理和协同碳减排的路径，识别出真正能够实现政策目标的抓手，下面的研究将继续围绕实现节水节能和减排三个目标同时实现来开展。

4.1 路径一：调整产业结构

在 2012 年河北省投入产出表的基础上，我们对河北省的产业结构进行分析，通过调整产业结构来实现“节水、节能和减排”的三个目标。

在第三部分研究的基础上，可以看出河北省的用水量很大一部分被第一产业消费，节水潜力巨大。考虑到实际情况中，第一产业，特别是农业部门灌溉用水很多是通过河流引流的自取水，即使通过一定办法来节约，这部分水也很难直接转移到其它部门来使用；同时也考虑到农业部门能源消费较低，因此在以下研究中，将重点研究二三产业的水能关系，暂将第一产业除外。

4.1.1 二三产业结构调整是河北省实现节水节能的主要方式

根据 2012 年河北省投入产出分析，研究发现整体压缩第二产业、提升第三产业是节水节能的主要发展方向。

整体来看，通过二三产业结构调整，能够实现用水总量下降 5.00%的目标，减少用水量 2.29 亿立方米，同时还可以推动全社会的平均用水强度下降 4.72%，由 19.56 立方米/万元下降到 18.64 立方米/万元；对能源部门的影响也是显著的，

能源消费总量下降 5.39%，减少能源消费 1200 万吨标煤，能源强度下降 5.11%，由 0.95 吨标煤/万元下降到 0.90 吨标煤/万元。

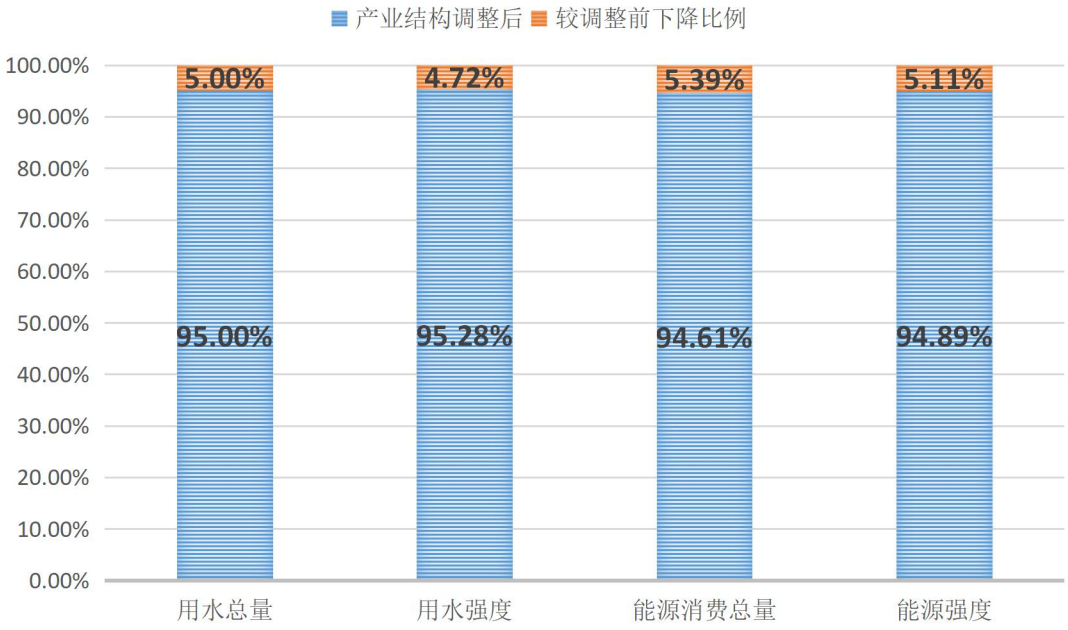


图 33 通过产业结构调整可能实现的节水和节能成效
（数据来源：根据 2012 年河北省投入产出表计算绘制）

分产业来看，第二产业是用水总量和能源消费总量下降的主要贡献者，换句话说，为了保障社会总产出仍旧维持在 2012 年水平，产业结构调整过程中，压缩的第二产业成为完成用水下降目标的主要贡献者，而第三产业因为扩张则在一定程度上增加了对水和能源的消费。

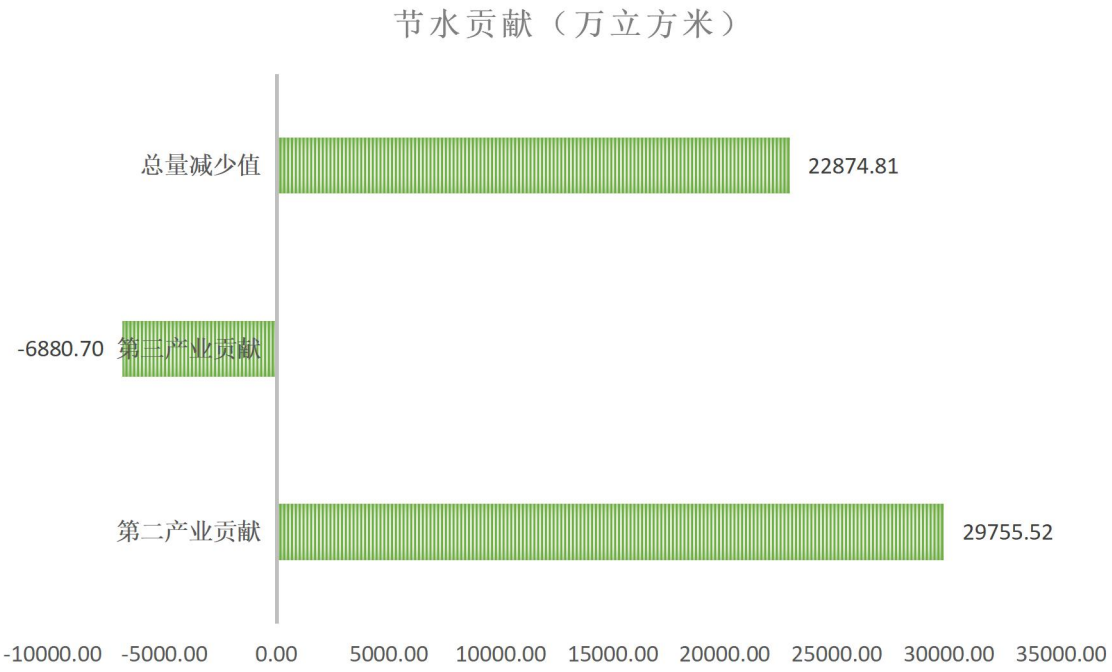


图 34 第二产业和第三产业对节水成果的贡献
（数据来源：根据 2012 年河北省投入产出表计算绘制）

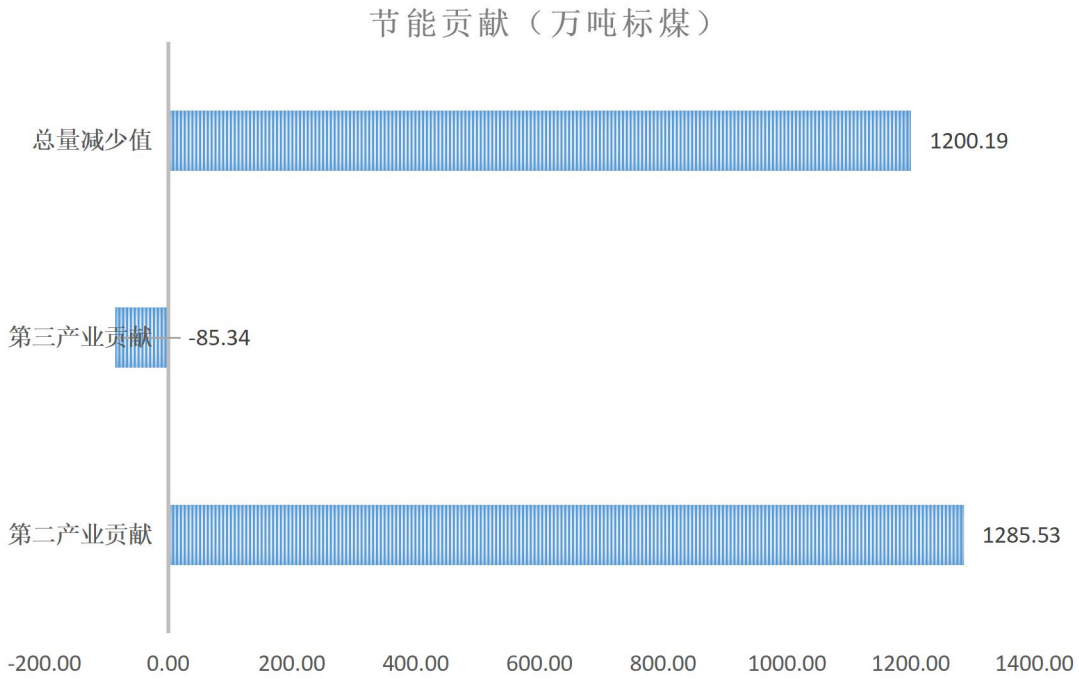


图 35 第二产业和第三产业对节能效果的贡献
（数据来源：根据 2012 年河北省投入产出表计算绘制）

4.1.2 第二产业是节水节能路径实现的关键

通过研究发现，产业结构调整能够带动的第二产业节水和节能效果明显。在结构调整之前，2012 年河北省第二产业的用水总量是 28.90 亿立方米，能源消费总量是 2.04 亿吨标煤；在产业结构调整之后，第二产业用水总量是 25.92 亿立方米，下降 10.30%，能源消费总量是 1.91 亿吨标煤，下降 6.29%。

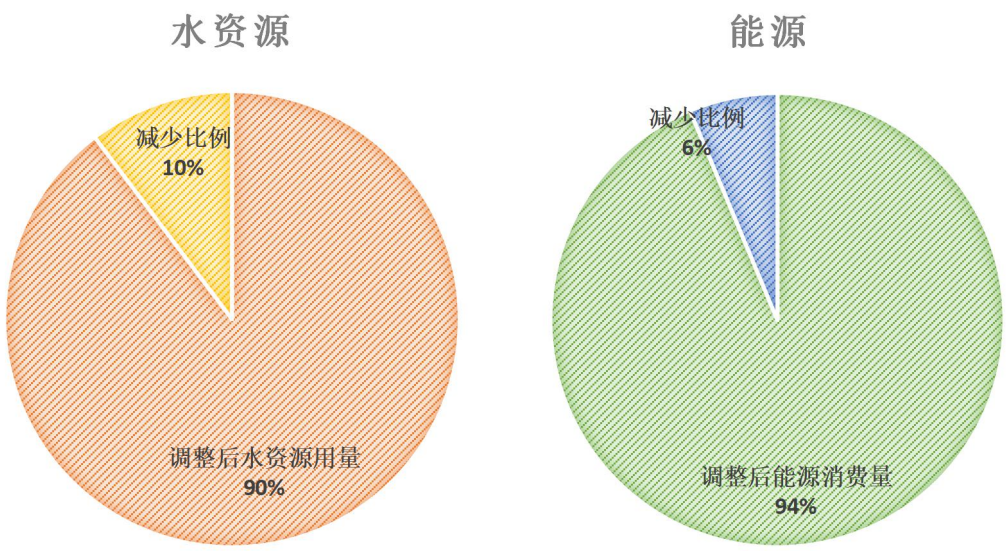


图 36 产业结构调整后第二产业水资源和能源消费量的变化情况
（数据来源：根据 2012 年河北省投入产出表计算绘制）

进一步分析第二产业内的部门变化，可以发现，由于单个部门的用能强度和用水强度与调整前保持一致，各部门能源和水资源消费总量的变化等同于起产值变化。也就是说，水资源和能源消费总量的变化与部门产值变化直接相关。基于本研究是在河北省水资源紧张的背景下开展，目标是探索哪些关键部门是具有节水行动的关键领域，因此可以得出，在产业结构调整后的压缩部门即是节水领域下一步应该重点关注的对象，它们包括金属冶炼和压延加工品业、建筑业、金属矿采选产品业等 12 个部门。

由于第三产业在产业结构调整中呈现整体全面扩张的趋势，因此其消费的水资源和能源也出现增长。其中，在结构调整之前，2012 年河北省第三产业的用

水总量是 16.85 亿立方米，能与消费总量是 1835 万吨标煤；在结构调整之后，第二产业用水总量是 17.54 亿立方米，增长 4.08%，能源消费总量是 1921 万吨标煤，增长 4.65%。

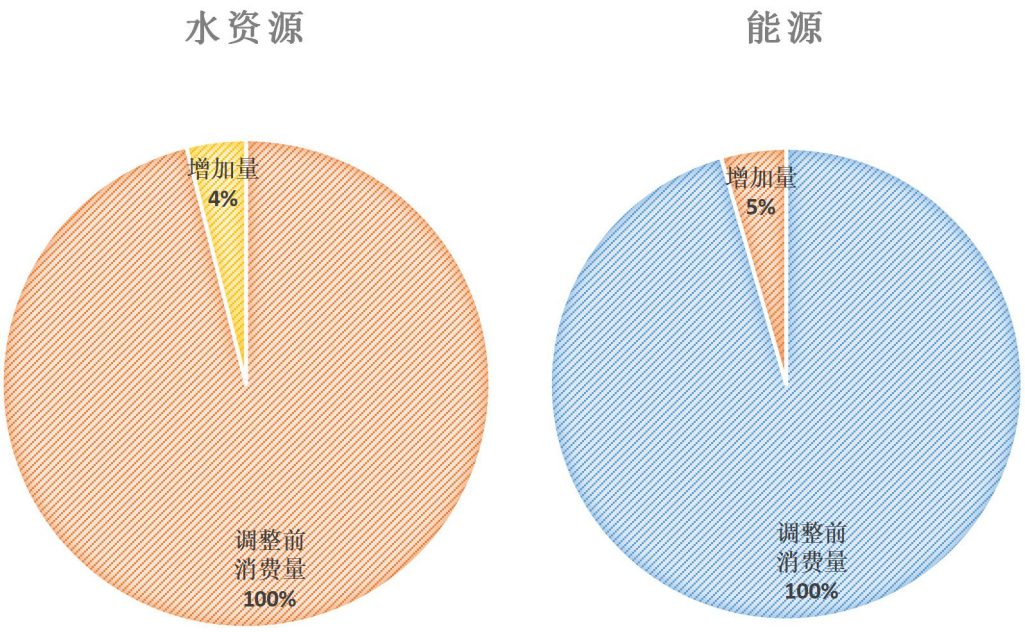


图 37 产业结构调整后第三产业水资源和能源消费量的变化情况
（数据来源：根据 2012 年河北省投入产出表计算绘制）

4.1.3 金属冶炼和压延加工品业等产业是通过控水限能的关键部门

具体来看，第二产业总体产出有所下降，但其中产业部门的变化也不尽相同，根据产出变化方向和对节水、节能的贡献度，可以将第二产业部门划分为压缩类和扩张类两大类。其中，压缩类的产业部门如下图所示。

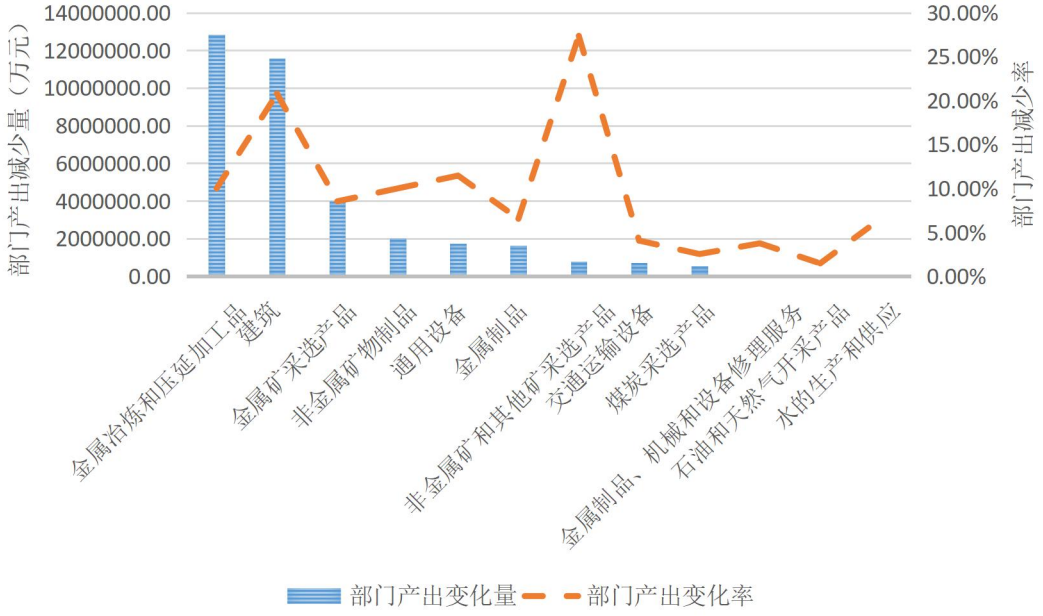


图 38 需要压缩的第二产业部门
（数据来源：根据 2012 年河北省投入产出表计算绘制）

可以发现，需要缩减产出的部门包括金属冶炼和压延加工品业、建筑业、金属矿采选产品业等 12 个部门。其中，金属冶炼和压延加工品业需要缩减的总量最大，超过 1200 亿元，建筑业紧随其后，需要 1157 亿元。而从产业变化率来看，非金属矿和其他矿采选产品业则占据第一位，需要减少 27%的产能，建筑业排在第二位，需要压缩 21%。

需要扩张的部门比需要缩减的部门多，共 15 个。其中食品和烟草行业在产出总量增加值上排名第一，超过 400 亿元；化学产品业排名第二，超过 200 亿元；紧随其后是纺织品业和纺织服装鞋帽皮革羽绒及其制品业。

虽然扩张部门比缩减部门多，但明显的是缩减部门的整体缩减量级远大于扩张部门，这也是导致整体第二产业需要收缩的原因。

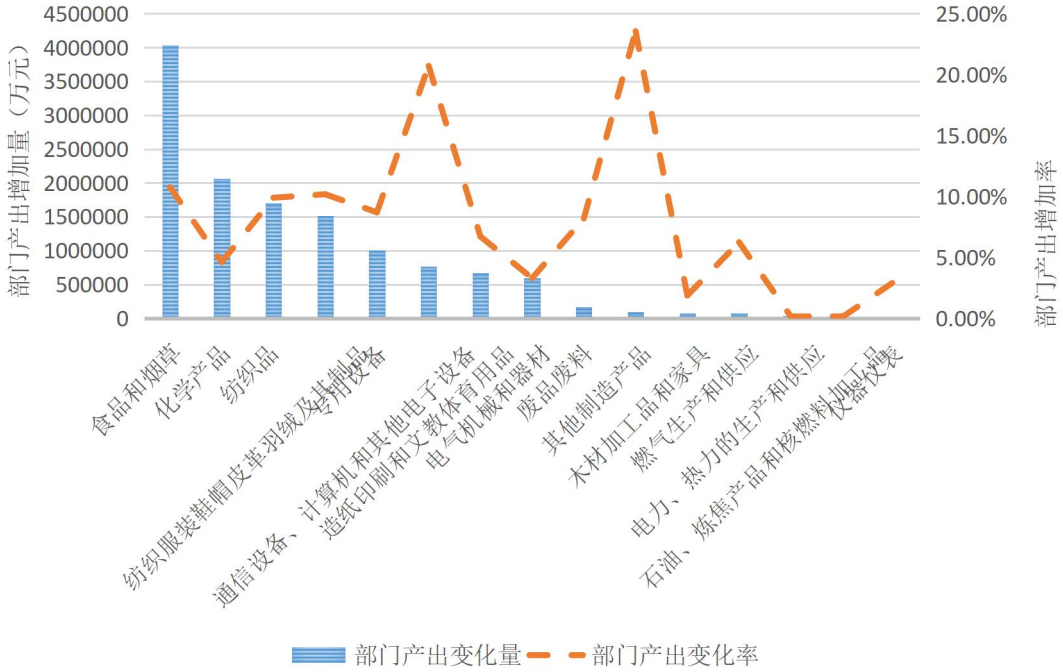


图 39 需要扩张的第二产业部门
（数据来源：根据 2012 年河北省投入产出表计算绘制）

4.1.4 第三产业的整体扩张需要以批发零售业等产业部门为主力

再看整体扩展的第三产业，从模型计算来看，大部分的第三产业行业都可以通过扩张来完成整个社会产业结构变革，从而在不影响经济发展水平和社会总产出的前提下来实现节水节能和碳减排目标的实现。从总量上看，批发零售业、交通运输仓储和邮政业、房地产业是需要扩张最大的三个行业。从比率上看，房地产业、卫生和社会工作行业及信息传输、软件和信息技术服务业是需要扩张比率最大的行业。

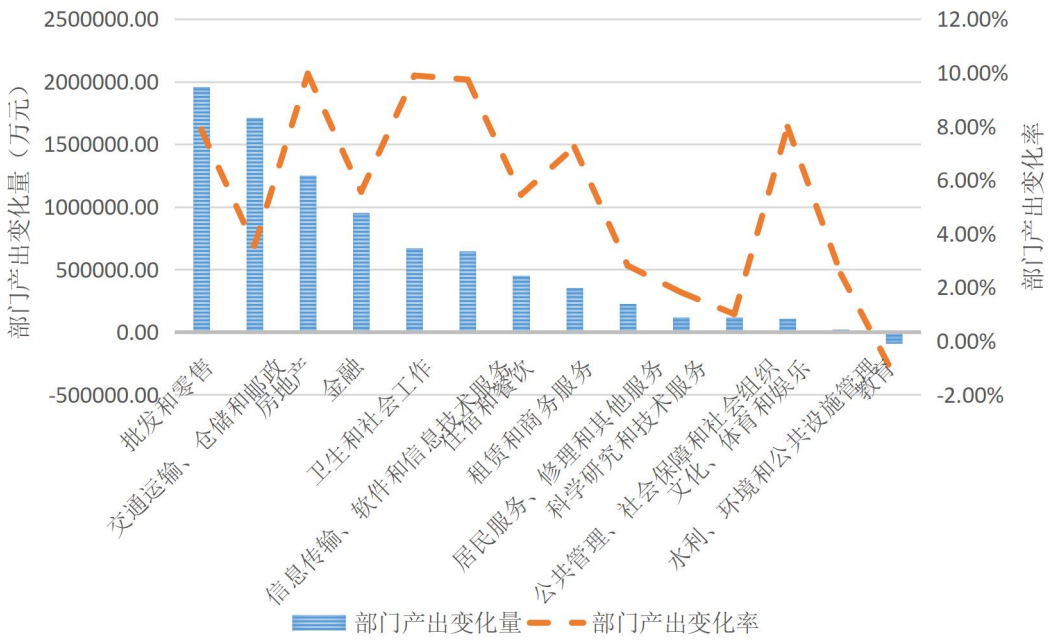


图 40 第三产业各部门变化情况图
（数据来源：根据 2012 年河北省投入产出表计算绘制）

4.1.5 产业结构调整是节水、节能减排的可用手段之一

通过前面的分析研究已经得出了通过产业结构调整，能够实现河北省全社会节约用水量 5%的目标，同时能源消费总量下降了 5.39%。在不考虑能源结构变化的情况下，可以认为河北省的碳排放能够通过这种调整从而下降 5.39%。依据 ceads 团队的计算数据，2012 年河北省的碳排放为 6.42 亿吨，下降 5.39%就意味着有 3460 万吨 CO2 能够从源头实现减排。

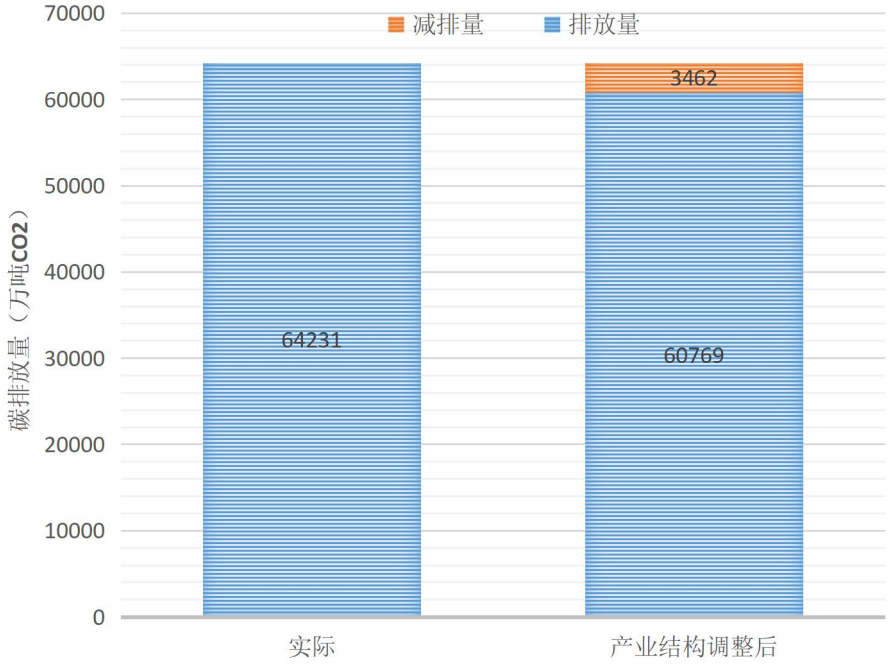


图 41 以节水为目标的河北省产业结构调整能够实现的碳减排效果
（数据来源：ceads 数据库及研究计算）

4.2 路径二：节水效率提升

除了调整产业结构来实现节水目标，提升用水技术和节水效率也是我国一直以来大力推行的举措之一。下面就以节水技术的发展作为应用场景，来分析这种路径下节水目标的实现是否能够有助于促进碳减排目标的达成。

4.2.1 节水效率提升能够实现显著节水成效

节水效率的提升能够显著减少我国的用水总量，缓解我国水资源供给不足的严峻局面。根据 2012 年的河北省投入产出表计算，在不考虑第一产业的情况下，提升其它产业的节水效率，在全社会平均用水强度下降约 5%（拟合过程中实际下降为 4.88%）的水平下，河北省二三产业用水总量能够实现 9.75%的下降，也就是说，如果通过节水效率提升，推动用水强度从 18.58 立方米/万元下降到 17.68 立方米/万元，二三产业的用水总量可以实现节约 4.46 亿立方米的成效。

同时，节水效率的提升也带来了能源使用优化的协同作用，河北省二三产业的用能总量下降 2.65%，减少能源消费 589 万吨标煤，能源强度下降 2.52%，从 0.95 吨标煤/万元下降到 0.93 吨标煤/万元。

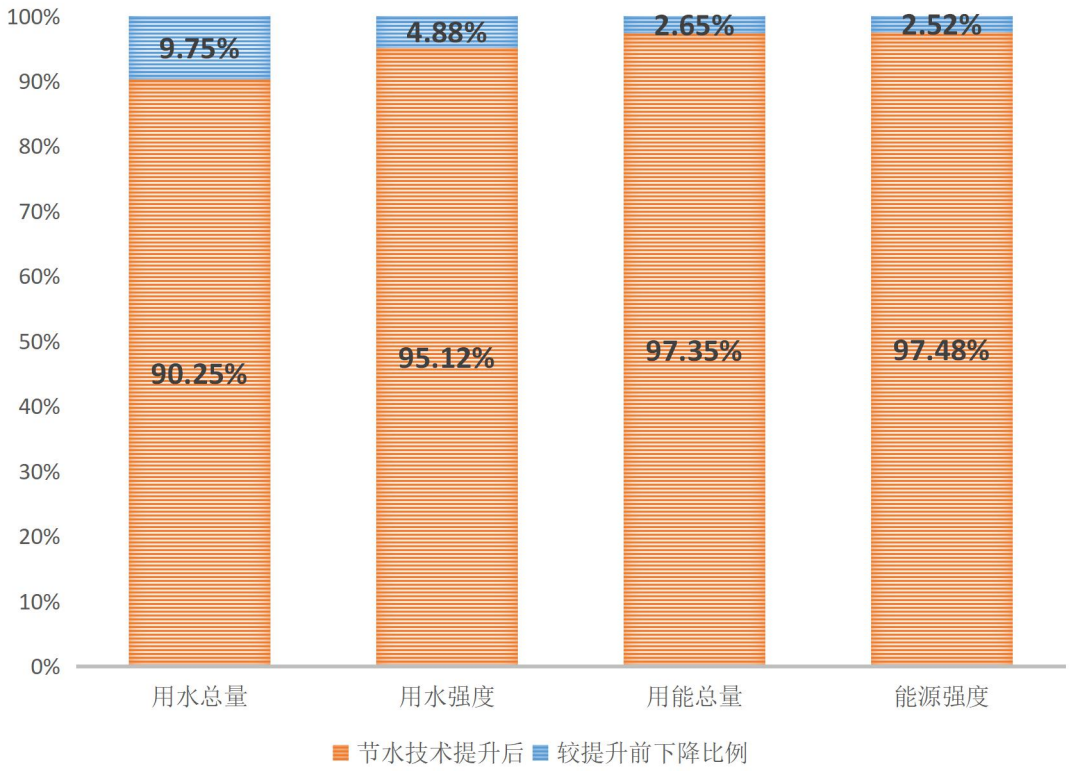


图 42 通过节水效率提升可以实现的节水、节能成效
（数据来源：根据 2012 年河北省投入产出表计算绘制）

这里需要说明的是，即使是通过节水效率的提升来优化改善河北省二三产业的水资源消费情况，节水效率自身的改变也能够引起产业结构的被动自发变化，这也就是为什么节水效率提升不到 5%，而用水总量的下降值却能够达到将约近两倍的原因。

与此同时，虽然能源消费总量和能源强度也有所下降，但其下降效果小于直接通过以主动产业结构调整为手段的方法所实现的下降幅度。这里需要说明的是，节水效率的提升作为假设前提，并没有同步假设这种节水效率提升所需要的设备改进所需要的能源使用有所变化。也就是说，在只提升节水效率、能源使用效率不变的情况下，节水技术带来的能源消费降低约为用水效率变化率的一半。

而在很多时候，节水效率的提升可能需要额外能源的消费作为代价，如此情况之下，能源消费总量的下降值会更加减少，甚至有可能反向增加，从而使得碳

排放量上升。这种情况较为复杂，在此我们暂不做讨论。

现在让我们回到我们的假设，节水效率的提升并没有引发额外的能源消费，这种情况下，与主动调整产业结构的手段相类似，通过提升节水效率从而实现水资源消费与能源消费下降，第二产业都是最主要的贡献者。由于节水效率的提升，第三产业的节水贡献也颇为显著，但在节能方面，第三产业的能源消费量是上升的。

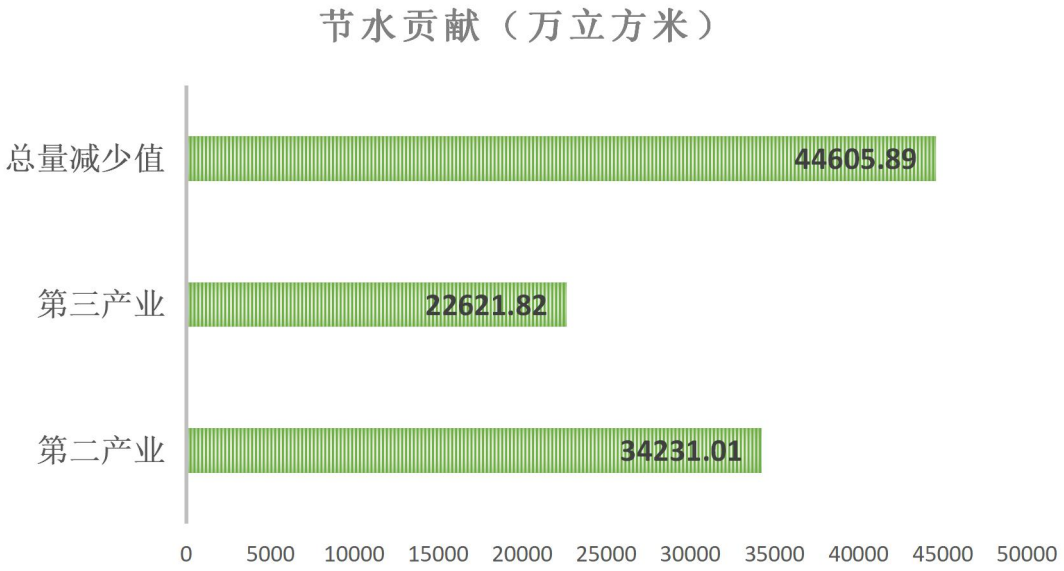


图 43　第二产业和第三产业节水贡献情况
（数据来源：根据 2012 年河北省投入产出表计算绘制）

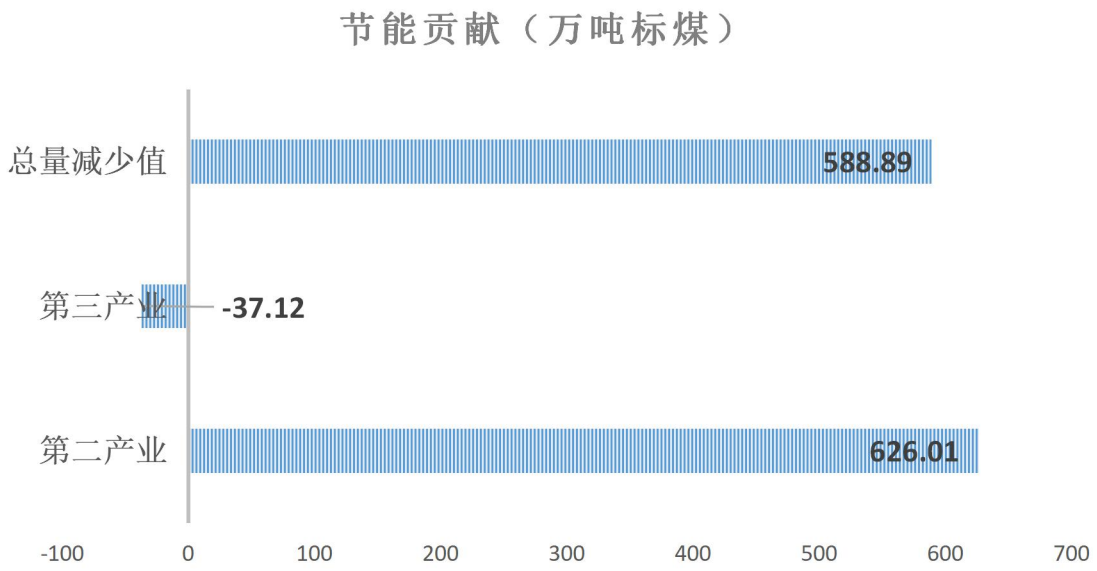


图 44 第二产业和第三产业节能贡献情况
（数据来源：根据 2012 年河北省投入产出表计算绘制）

4.2.2 节水效率提升能够帮助二产实现显著节水目标，节能目标却相较有限

节水效率的提升对于第二、第三产业内部而言有不同的作用。对于第二产业，提升节水效率能够实现显著的节水成效，附带些许节能效果；对于第三产业，提升节水效率会带来与之规模相当的节水成效，在节能方面却有相反效果。

比较节水效率提升前后第二产业的用能和用水总量，可以发现，第二产业用水效率提升 5%，能够实现 12%的整体节水率，3%的节能效果。

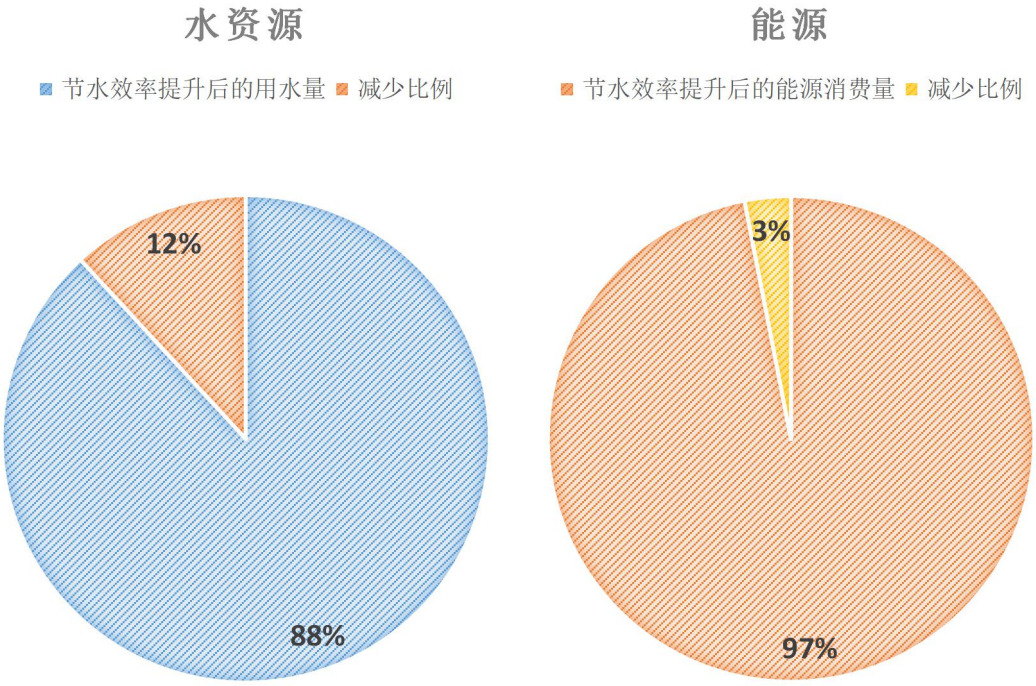


图 45 用水效率提升后第二产业水资源和能源消费量变化情况
（数据来源：根据 2012 年河北省投入产出表计算绘制）

比较节水效率提升前后第三产业的用能和用水总量，可以发现，第三产业用水效率提升 5%，能够实现 6%的整体节水率，但节能方面却有相反的效果，能源消费反而比之前增加了 2%。追溯原因，节水效率提升产生的被动产业结构调整使得第三产业规模扩大，能源消费量有所增加。

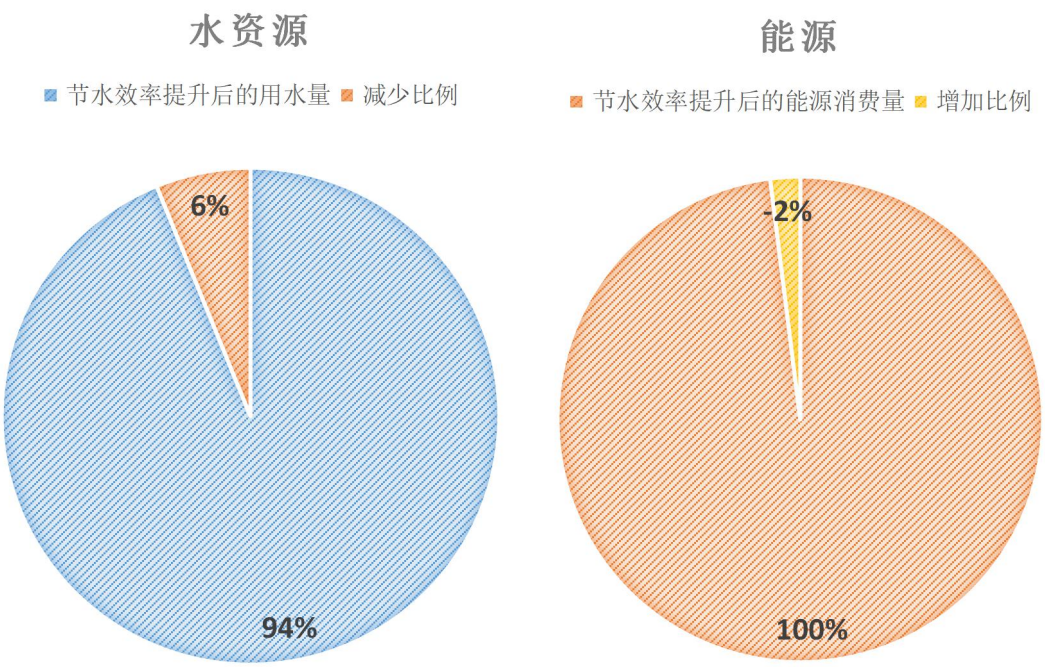


图 46 用水效率提升后第三产业水资源和能源消费量变化情况
（数据来源：根据 2012 年河北省投入产出表计算绘制）

4.2.3 建筑业和金属冶炼和压延加工品制造业的节能节水效应最为明显

受节水效率提升引发的被动产业结构变化的影响，在第二产业内部，8 个行业由于节水效率提升而实现用水量减少，18 个行业的用水量反而增加。同时，从图中可以看到，大部分的二产行业用水量变化并不大，大部分波动主要集中在建筑、非金属矿和其它矿采选产品业等行业。用水减少的行业比增加的行业在体量上也具有绝对优势，这也是促使第二产业整体用水量有显著下降的主要原因。

用水减少量最多的行业前三名是建筑业（8994 万立方米）、非金属矿和其他矿采选产品业（7834 万立方米）、和金属冶炼和压延加工品业（2662 万立方米），增加最多的行业前三名分别是化学产品制造业（447 万立方米）、食品和烟草制造业（442 万立方米）、纺织品业（220 万立方米）。

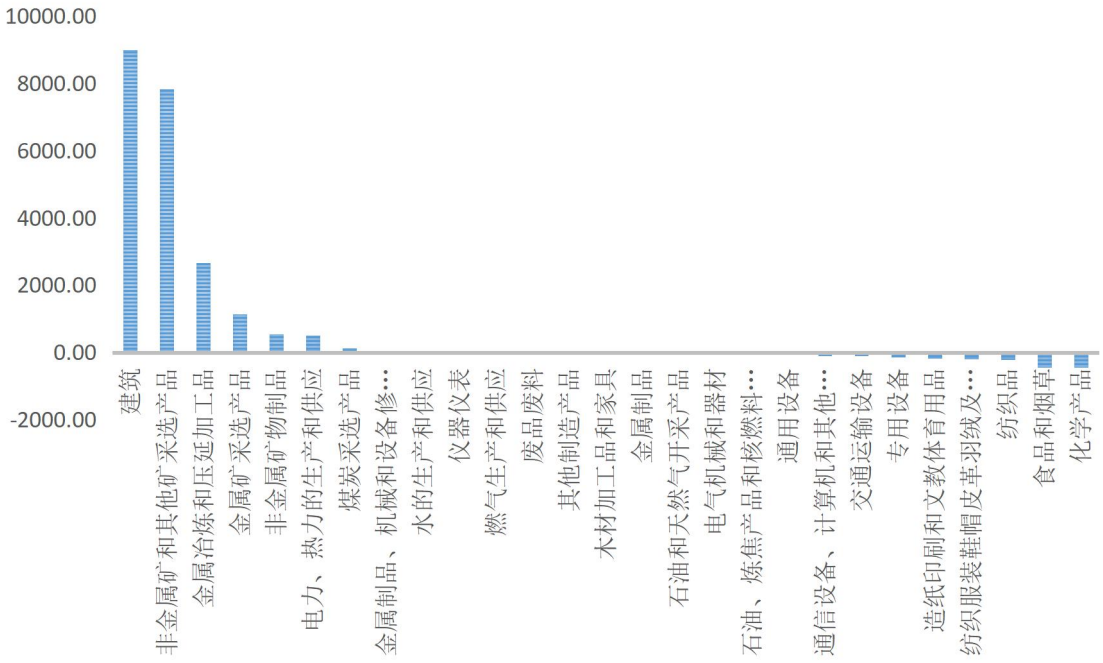


图 47 用水效率提升后第二产业各行业的用水减少量情况
（数据来源：根据 2012 年河北省投入产出表计算绘制）

再看用水效率提升后的行业能源消费变化情况。受节水效率提升引发的被动产业结构变化的影响，在第二产业内部，9 个行业由于节水效率提升而实现能源消费减少，18 个行业的能源消费反而增加。同时，从图中可以看到，与用水量变化相似，大部分的二产行业能源消费变化并不大，主要集中在金属冶炼和压延加工品业、非金属矿物制品业等行业。图中比较清晰的展示了能源消费减少的行业比增加的行业在体量上也具有绝对优势。

能源消费降低最多的行业前三名是金属冶炼和压延加工品（529 万吨标煤）、非金属矿物制品业（71 万吨标煤）、和建筑业（42 万吨标煤），增加最多的行业前三名分别是化学产品制造业（34 万吨标煤）、食品和烟草制造业（17 万吨标煤）和通用设备制造业（11 万吨标煤）。

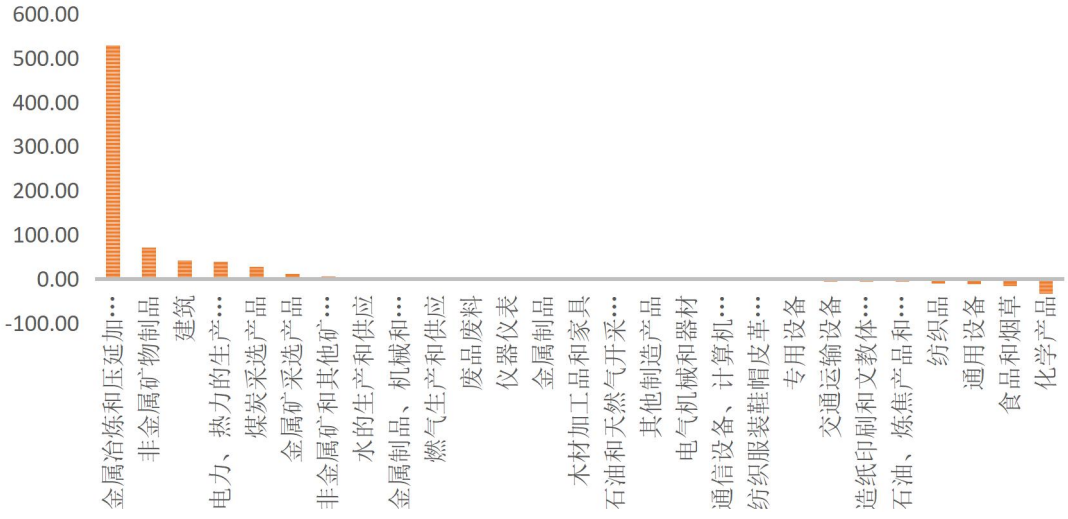


图 48 用水效率提升后第二产业各行业的能源消费减少量情况
（数据来源：根据 2012 年河北省投入产出表计算绘制）

比较节水效率提升在第二产业内部引发的不同节能节水效果，可以发现有些行业部门对于节水效率的提升有较为明显的节水节能效应，有些部门则相反。可以说，建筑、非金属矿和其他矿采选产品、金属冶炼和压延加工品、金属矿采选产品、非金属矿物制品、电力、热力的生产和供应和煤炭采选产品这七个部门对于节水效率提升都有明显的正反馈，能够实现大规模节水效果的同时亦达到节能的目标。其中，尤其以金属冶炼和压延加工品、非金属矿物制品和建筑业最为显著。

与之相反，部分部门对于节水效率提升的反馈并不明显，甚至会出现负的反馈，用水量和能源消费都有所抬升，以化学产品制造业、食品和烟草制造业为代表。

表 5 对于节水效率提升有显著反馈的第二产业部门

强正反馈	弱负反馈
金属冶炼和压延加工品制造业	化学产品制造业
非金属矿物制品制造业	食品和烟草制造业
建筑业	纺织品业

4.2.4 第三产业实现的节水部门多，节能部门少

在前面我们分析过，受农业灌溉的影响，第一产业的节水效应难以转移到二三产业的发展上来。二三产业相比，第三产业明显占据更低的用水强度和用能强度的优势，经济结构大力向促进三产发展本身就是提升经济水平并减小资源消费代价的最重要的方向之一。

接下来，我们将分析在一二三产中最具比较优势的第三产业内部，哪些行业部门对节水效率提升更加敏感。

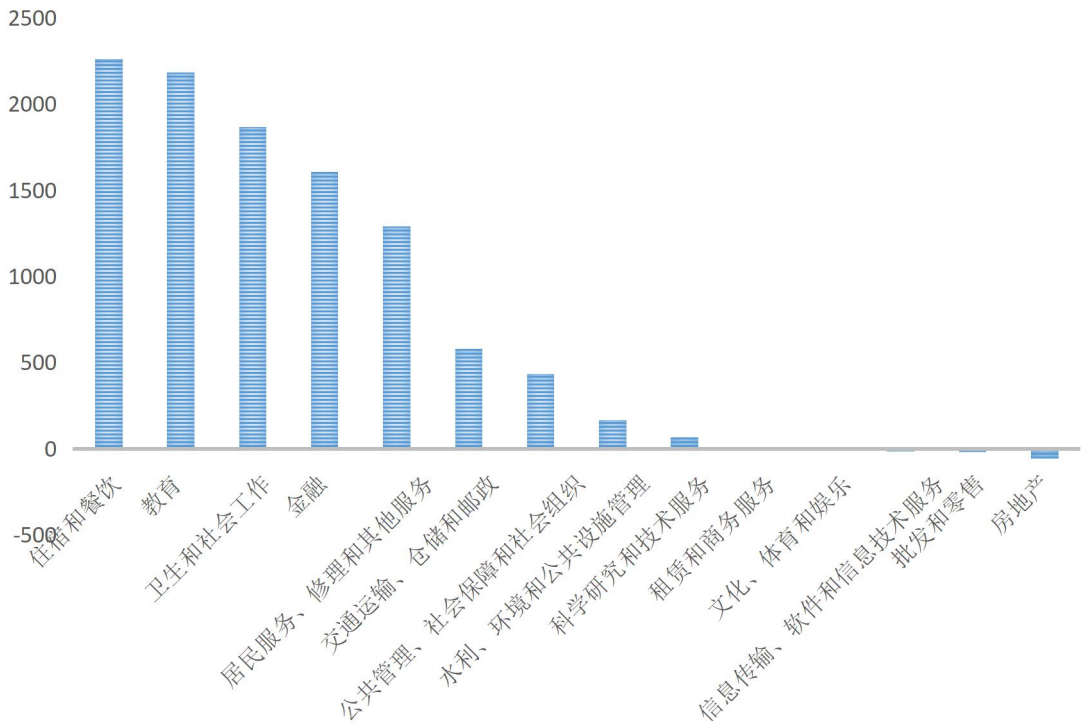


图 49 用水效率提升后第三产业各行业的用水减少量情况
（数据来源：根据 2012 年河北省投入产出表计算绘制）

从上图可以看出，用水效率提升后，第三产业的多数行业的节水效果是比较明显的，有 11 个行业水资源消费减少，只有 3 个行业的水资源消费反而略有增加。整体来说，水资源消费减少的行业的节水量从部门数量和节水总量上都具有绝对优势。其中，住宿和餐饮（2261 万立方米）、教育（2183 万立方米）、卫生和社会工作（1867 万立方米）是节水量最大的三个部门，房地产业（57 万立方米）、批发和零售业（18 万立方米）、信息传输、软件和信息技术服务（15 万立方米）是用水增加的三个行业。

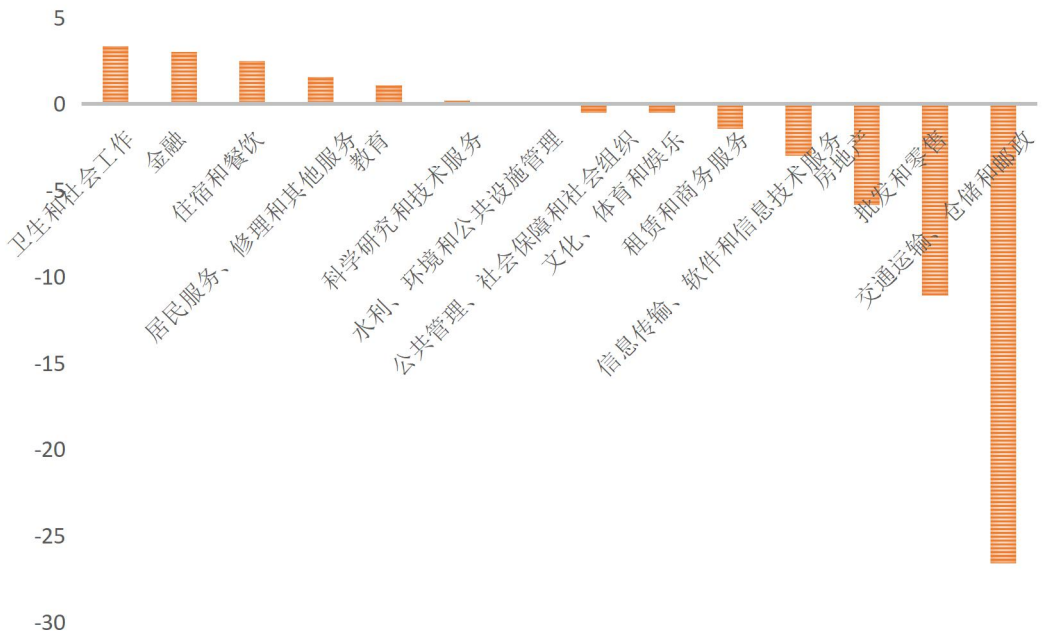


图 50 用水效率提升后第三产业各行业的能源消费减少量情况
（数据来源：根据 2012 年河北省投入产出表计算绘制）

用水效率提升后，第三产业行业的能源消费却又不同表现。有一半行业的能源消费减少，另外一半行业的能源消费增加，虽然整体变动水平都比较小。其中，卫生和社会工作（3.3 万吨标煤）、金融（3.0 万吨标煤）、住宿和餐饮（2.5 万吨标煤）是节能效果最大的三个部门，交通运输、仓储和邮政业（57 万立方米）、批发和零售业（18 万立方米）、房地产业（15 万立方米）是能源消费增加最多

的三个行业。就能源消费变化的绝对值来看，交通运输、仓储和邮政业和批发零售业是最大的。

比较第三产业内各行业的节能节水效果，可以发现，第三产业内对节水效率的提升比较敏感的行业如下表所列。

表 6 对于节水效率提升有反馈效应的第三产业部门

弱正反馈	弱负反馈	强负反馈
住宿和餐饮	房地产	交通运输、仓储和邮政
卫生和社会工作	信息传输、软件和信息技术服务	批发和零售

4.2.5 节水效率提升能够带来的碳减排效果较弱

可以看出，节水技术发展带来的节水效率提升能够显著推动生产用水的下降，对能源消费下降的促进作用比较有限。在不考虑新节水技术可能引发的额外的能源需求的情况下，节水效率提升能够现实的碳减排效果与能源消费总量的下降值一致（不考虑能源结构变化），都为 2.62%，约为 1683 万吨 CO2。

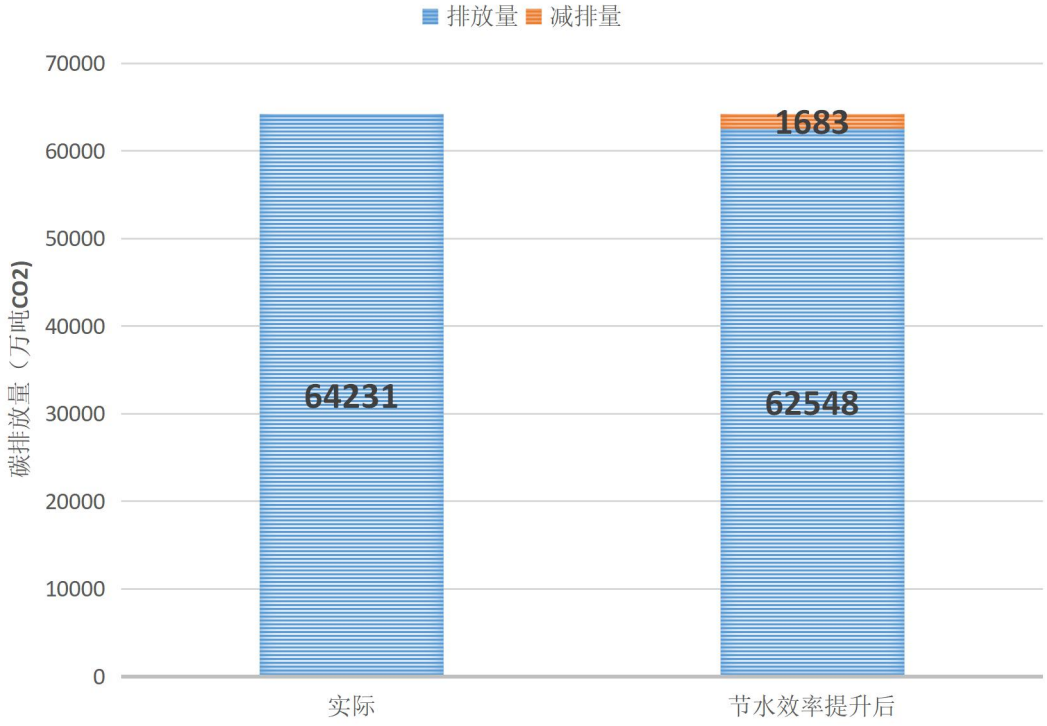


图 51 以节水为目标的河北省节水效率提升能够实现的碳减排效果
（数据来源：ceads 数据库及研究计算）

4.3 路径三：能源结构调整

河北省是煤炭生产大省，也是用煤大省。之前的研究已经提过，河北省在2017年能源生产总量为6778.54万吨标煤，其中原煤是一次能源生产的主要品种，占70%左右。而河北省的能源消费中超过80%以上都是煤炭，河北又是一个能源对外依存大省，煤炭消费的能源缺口一直持续攀升。因此，河北省的能源转型潜力巨大。

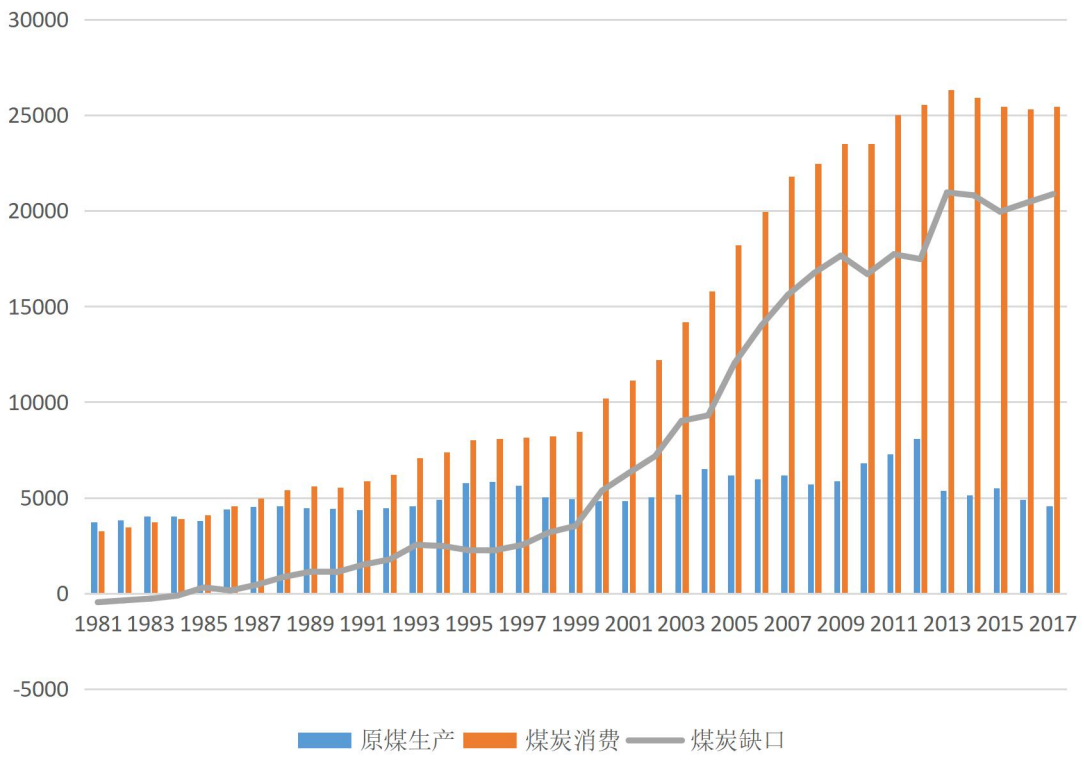


图 52 1981-2017 年河北省原煤生产与消费（万吨标煤）
（数据来源：河北省经济年鉴 2018）

4.3.1 研究能源结构变化对水资源消费影响的基本假设

煤炭的生产过程需要消耗大量的水资源，如果河北省能够减少煤炭的消费需求，降低煤炭部门的生产量，将能够实现可观的水资源节约效应。以2012年为例，煤炭采选产品业的水资源消费量是8563万立方米，占第二、第三产业总水

资源消费量的约 2%。也就是说，通过能源结构转型升级，用可再生能源代替部分煤炭消费（如光伏发电），例如关闭河北本地的煤炭生产部门，将能够直接减少 2%的水资源消费量（在不考虑第一产业的情况下）。

如果进一步进行能源结构调整，将河北省进口的煤炭也用光伏等可再生能源来替代，则对于这些煤炭的出口地区，水资源的消费也会有显著下降。

下面我们就以此为假设基础，来探索能源结构变化将会带来怎样的节水和节能效果。在正式开始之前，考虑到现实情况中不同部门能源与水资源在生产和消费过程中耦合关系的复杂性，我们将研究对象进行简化，增加几个假设条件，以方便我们聚焦在主要关心的问题上。

假设条件 1 研究只考虑煤炭生产部门的用水情况变化，以煤炭部门的收缩来同比例控制相应水资源的消费，不考虑生产中的规模效应；

假设条件 2 研究不考虑由于煤炭部门的收缩所引起的其他部门的水资源消费变化情况；

假设条件 3 不考虑因为能源结构调整所产生的社会 GDP 变化，假设因能源转型的煤炭部门缩减产生的 GDP 下降已经由新的能源生产部门所弥补；

假设条件 4 河北省煤炭进口地的煤炭生产部门的水资源消费强度与河北省本地水平一致。

一起简单回顾一下河北省的能源消费和能源结构情况。依旧是以 2012 年作为研究年份，河北省碳排放量是 6.42 亿吨，能源消费总量 28762 万吨标煤，其中，煤炭占比 89%、石油消费 7%、天然气 2%，一次电力及其他能源 2%。

表 7 2012 年河北省能源消费结构

年份	能源消费总量（万吨标准煤）	煤炭	石油	天然气	一次电力及其他能源
2012	28762	89%	7%	2%	2%

（数据来源：河北省经济年鉴 2013）

2012 年，河北省的煤炭生产部门共生产原煤 8085 万吨标煤，水资源消费量 8563 万立方米，占河北省二三产业水资源消费总量的约 2%，能源消费量 1764 万吨标煤，占二三产能源消费总量的 8%。

另外，电力、热力的生产和供应业在 2012 年总的能源消费是 2320 万吨标煤，水资源消费量 32354 万立方米。发电量中的火力发电占 94.5%（根据 2014 年和 2011 年中国电力工业统计资料汇编所公开的 2011 及 2013 年河北省火力发电占比数据取均数所得）。由于火力发电和其它能源种类发电的能源转换效率并不相同，2012 年河北省火力发电占比几乎占据所有发电量，同时热力行业数据获得受限，因此即使我们假设火力发电消费的能源量是 2320 万吨标煤，也并没有超过河北省自身的原煤生产量。这个分析的作用主要是为了说明在之后的情景分析中，被替换掉的煤炭中已经包含了在电力、热力的生产和供应业中的消费部分。

同时，如果假设火力发电和供热占该行业的全部产能，则其亦消费了全部的 32354 万立方米的水资源。

4.3.2 情景分析：压煤能够实现最显著的碳减排效益，但节水效果有限

为了研究不同变化下的能源结构能够对解决水资源缺口问题产生多大的影

响，以及对于碳减排的贡献，我们简单假设三个情景。需要说明的是这三种情景中，并未考虑除煤炭生产和电力热力供应部门外的其它部门因为能源转换而造成的水资源消费变化。

情景 1 河北省本地的煤炭生产全部替换为可再生能源，以光伏为例；

情景 2 河北省全部的煤炭消费中的 50%替换为可再生能源，其中除去本地生产的部分，还包括进口的煤炭消费也需要替换，依旧以光伏为替换品；

情景 3 河北省全部的煤炭消费中 70%替换为可再生能源，其中除去本地生产的部分，还包括进口的煤炭消费也需要替换，依旧以光伏为替换品。

经过计算可以发现，三个情景对应的水资源节约量和碳排放减少量如下表所示。总体来说，煤炭消费是河北省碳排放的主要来源，能源消费结构的变革能够从根本上改变。

表 8 三种情景下减少煤炭消费能够产生的节水节能效果

指标		情景 1	情景 2	情景 3
煤炭替换占全部煤炭消费的比重		38%	50%	70%
煤炭替换量（万吨标煤）		9849	12799	17919
节约水资源占比	省内	8.9%	8.9%	8.9%
	省外	-	0.6%	2.1%
水资源节约量（万立方米）		8563	11128	15579
碳减排占比	省内	38%	38%	38%
	省外	-	12%	32%
碳排放减少量（万吨 CO2）		24579	31941	44719

其中，折算率取值如下：

1 吨原煤 =0.7143 吨标煤； 1 吨 标煤 能够产生 0.68 吨碳； 1 吨碳 =3.67 吨 CO2

在以光伏为假设替换品的情景分析结束之后，我们已经得出了这种替换方法

能够有效减少碳排放量，虽然水资源消费也有较为明显的下降，但相比较煤炭替换占比而言，投入成本巨大的同时其变化幅度仍旧较低。如果用来替换煤炭的能源品种是其它可再生能源，比如当前热度呼声较高的生物质能，即使不用情景假设分析的方法，我们也可以知道这种替换同样能够实现大规模的减排效果，却在水资源消费上需要更多的增加。这是因为生物质能的诞生本身需要大规模的能源作物种植为原料，这本身就会产生一个巨大的灌溉用水需求。

除此之外，河北省部分城市在风能和地热能源方面具备良好的资源禀赋。风能与太阳能相似，而地热则作为地下水资源的一种，在开采利用中也会面临地面塌陷及沉降等问题，对水环境也有一定的影响。地热资源开发的情况比较复杂，其既是水资源又带有矿产资源的属性，因此这里暂不讨论。

4.4 三种解决办法的比较

本章前三节分别研究了通过产业结构调整、节水效率提升和能源结构变化三种方式来实现水资源消费总量降低的目标，并探讨在每种方式下的碳减排效果。可以发现，虽然三种方法都能够实现节水和碳排放减少的目标，但其效果差异巨大。综合考虑三种方法在实现路径上的差异，总结如下。

1 虽然没有具体讨论第一产业，从研究结果来看，产业结构调整的方法适合于全社会的水资源与能源消费量实现节约。

产业结构调整是每个经济体在经济发展中的必经之路，第二产业的雄起之后必然会带来第三产业的快速发展，二者在经济总量中的占比势必会越来越大，第三产业也必然会超越第二产业并愈加成为经济发展的主要动力。因此，这种产业

结构的升级是经济发展的自然规律，自然规律下发展的各产业部门自身会带动水资源和能源向更有效率的部门转移。

然而，一方面是考虑到我国仍处于发展中的经济阶段，河北省的经济体量必然会进一步快速增长，大量的水资源和能源依旧需要被投入到第二产业和第三产业的生产当中，水资源消费和能源消费在可见的短期未来时间内仍然有增加的趋势；另一方面，产业结构升级的自然规律在具体地区的经济发展中难免会面临迂回与曲折，需要宏观政策的指引指导，结合到生产要素投入效率提升、水资源消费和能源消费总量降低的具体目标，强有力的政策驱动则显得更为必要。

从研究结论出发，可以说，通过压缩第二产业、扩大第三产业能够实现在社会总产出基本不变的情况下，实现节水和节能的目标，进而实现与节水比例相当的碳排放减少。具体来说，金属冶炼和压延加工品业、建筑业、金属矿采选产品业等行业需要被压缩 10%左右，其中建筑业则需要达到 20%；第三产业中的批发零售业、交通运输仓储和邮政业、房地产业需要被进一步扩张。

要达到以上这些行业扩张或压缩的目标，必然需要通过几年甚至更长时间的政策推进，特别是需要压缩的第二产业部门中有多个是河北省的强势产业，新的经济增长点的培育、人口聚集的疏解问题和就业问题是政府需要同时面临的两大重要命题。因此，可以判断说，为了解决水资源生产要素不足而推进产业结构调整政策的出发点必然面临难度。

可以说，产业结构调整升级作为宏观经济发展的推进政策，具有可观的节水节能附带效果。对于决策者来说，产业结构调整的路径更偏向于长期的政策。这种方法对宏观政策要求较高，若想短期通过政策推动实现节水节能减排，难以实现。

2 节水效率提升更适合单个产业部门的节水节能减排工作，聚焦重点行业，对技术研发和成果转化要求较高。

通过对二三产业节水效率提升从而引发的用水总量和能源消费量变化的研究，我们发现节水效率提升本身能够带来显著的水资源消费下降的效果，第二、第三产业的水资源消费总体下降近 10%。可见，对于严苛水短缺的地区，提升节水效率是有效的缓解水压力的办法。由于节水效率的提升，使得水资源在不同产业间面临了重新分配，产业结构因为水资源分配的变化而有了被动的自发调整，从而引发了能源消费量的变化。但与显著的水资源消费下降不同，能源消费量的变化较小，只有不到 3%。因此可见节水效率的提升并不能带来强烈的协同减排作用。

不同的行业部门对于节水效率的提升存在差异性表现。如果用正反馈来表示节水效率提升引发了节水和节能的双重效果，用负反馈表示节水效率的提升引发了用水和用能增加的效果，则可以对第二、第三产业不同部门在节水效率提升后的表现进行大致的划分。可以发现，整体来说，第二产业对于节水效率的提升表现出较强的正反馈，这是由于第二产业内部的行业部门大多在节水效率提升后有显著的节水节能的表现，例如金属冶炼和压延加工品制造业、非金属矿物制品制造业和建筑业等，而少数部门呈现较弱的负反馈，例如化学产品制造业、食品和烟草制造业和纺织品业等。

第三产业则与第二产业不同，整体呈现出较强的节水效率提升负反馈迹象。第三产业下的行业部门主要可以分为三类：弱正反馈（如住宿和餐饮业、卫生和社会工作）、弱负反馈（如房地产业、信息传输、软件和信息技术服务业）和强

负反馈（如交通运输、仓储和邮政业、批发和零售业）。

因此，基于以上的基本分类，我们可以认为针对不同反馈类型的行业部门可以给予不同的节水政策。对于有强正反馈的行业，可以优先部署和推进比较强力的节水政策，例如直接给出用水总量和强度下降的目标、工艺流程更新标准等，这些行业节水效率的每一分提升都能够给河北省水资源消费形成显著的节省成效，同时还能够形成一定的能源消费降低。对于有弱正反馈的行业，比较适合温和的节水政策，且可以徐步图之，鼓励其在营业和生产中使用节水设施、提高用水效率，并附带产生一定的节能效果；而对于负反馈类型部门，则在当前不适合节水政策的推进，它们既不会因为节水措施的加载而产生明显节水效果，更不会有有效的节能减排间接成效。

表 9 对节水效率提升不同反馈下的产业部门的政策建议

	第二产业	第三产业	适应政策
强正反馈	金属冶炼和压延加工品制造业	-	优先强力的节水政策
	非金属矿物制品制造业		
	建筑业		
弱正反馈	-	住宿和餐饮	温和有序的节水政策
		卫生和社会工作	
弱负反馈	化学产品制造业	房地产	不适合节水政策
	食品和烟草制造业	信息传输、软件和信息技术服务	
	纺织品业		
强负反馈	-	交通运输、仓储和邮政	不适合节水政策
		批发和零售	

由于本研究在分析过程中并未考虑节水政策部署和落地运行可能产生的成本，因此即使是面对有强正反馈的部门，其部署成本仍需要在正式政策出台之前

进行衡量。这些成本是指广义的成本，包括每个部门在可预见时期内能够压缩的水资源消费量、工艺流程用水效率提升难易度、节水技术的开发水平、节水设施安装推广和运营的成本等要素。真正通过提升节水效率而实现行业部门层面的节水节能减排成效，对技术研发和设施落地要求较高。

3 能源结构变化对煤炭部门的水资源节约效果有限，但能够从根本上解决碳排放问题，对于碳减排来说，能源结构优化是终极手段，但其附带的节水效果也比较有限。

研究发现，能源结构的优化更适合于完成减缓气候变化的任务目标，其节水效果远不足以与之气候效果相媲美。将煤炭部门的能源消费不同程度地替换为太阳能，其水资源节约效果有限，一方面是因为河北省虽然地处中国煤炭基地，但其煤炭消费占比极高，大量煤炭资源需要依赖从外省进口调入。这就使得本地煤炭生产因为能源消费结构的优化而产生的节水效果面临生产总量的天花板（1.8%），电力和热力生产也存在水资源节约天花板（7.1%），持续上升的太阳能占比能够带来的节水效果由煤炭进口省份所获得。

另外一方面，研究中假设的是用太阳能来替代煤炭，这是一种较为理想化的假定。首先如此大规模的太阳能利用需要大量的土地利用功能变化和能源生产设备置换，其成本和难以程度可想而知，河北省的光照资源禀赋也未必能够支撑；另外如果加入其它可再生能源，例如生物能源是通过能源作物的种植来提供，反而会进一步加大水资源的需求，对河北省的水资源压力只增不减。

因此，通过调整能源结构来实现河北省水资源缺口的方法在具体实施中面临诸多困难，不可控因素较多，并不予以推荐。

表 10 不同路径方法对于解决河北省水资源压力及附带的减排效果比较

路径	建议
产业结构调整的方法	适合于全社会的水资源与能源消费量实现节约，特点是长期全面
节水效率提升的方法	适合重点行业部门的水资源与能源消费量实现节约，特点是精确调控
能源结构调整的办法	具有根本性的减排效果，但不适合用来考虑作为缓解河北省水资源压力的手段

5 城市能源与水耦合关系研究探索

城市层面的能源与水耦合关系研究一直较少，可能的原因大致有以下两个方面。

第一，在一个地级城市层面讨论能源与水资源的关系，是否具有深入研究的意义。一方面是因为城市政府对于能源与水资源的政策管控力较弱，管理手段有限；另一方面是普遍认为城市级别的能源与水的关系较为死板，可操作性不强。

第二，中国的地级城市虽然大部分都具有地方统计年鉴，逐年对外发布当地的经济、人口、社会、能源、环境等工作进展和数据，但对于水资源数据却并不是每个地方统计年鉴的标配指标，即使有关于水资源的统计，数据指标也较为单一；同样，能源数据也只提供简单的市级整体数据。这样就使得地级城市的能源与水关系研究没有基本的数据支撑，寸步难行。

因此，本章在之后的研究中主要聚焦在两个方面，第一是分析唐山市和承德市水资源与能源的基本关系，总结两个城市能水的基本特征；第二是探索解析地级城市能源与水关系的基本影响因素和逻辑关系，寻找能够突破城市能水关系的活动门。

5.1 唐山市和承德市的水资源与能源

5.1.1 唐山——“华北第一工业城市”

唐山市地处渤海湾中心地带。位于河北省东部，东经 117°31’-119°19’，北纬 38°55’-40°28’，东与秦皇岛市隔（滦）河相望，南临渤海，西与北京、天津毗邻，北依燕山隔长城与承德市接壤，总面积 13472 平方千米。唐山市地

处交通要塞，是华北地区通往东北地区的咽喉地带。铁路、公路、高速公路、港口相互交织。

唐山全市地表水资源量 15.41 亿立方米，为多年平均地表水资源量 105%;地下水资源量 11.75 亿立方米，为多年平均地下水资源量 81.9%。扣除重复计算量 3.23 亿立方米，2018 年全市水资源总量 23.93 亿立方米，为多年平均水资源总量 24.16 亿立方米 99%[10]。

2018 年，全市探明各类矿产 49 种，近 30 种被开发利用。唐山是著名的重工业城市，有“世界钢铁之都”的称号，受制于重工业经济结构，唐山市的能源强度和用水强度都表现突出。

5.1.2 承德——“京津冀水源涵养地”

承德位于东经 115°54′-119°15′，北纬 40°11′-42°40′，处于华北和东北两个地区的连接过渡地带，地近京津，背靠蒙辽，省内与秦皇岛、唐山两个沿海城市以及张家口市相邻。

承德市矿产资源丰富，已发现的矿产有 98 种，是我国除攀枝花外惟一的大型钒钛磁铁矿资源基地。除了重工业，旅游业也是承德的支出产业。承德是中国著名的历史文化名城和山水园林城市，连接京、津、冀、辽、蒙区域中心城市，具备独有的区位优势、资源优势、生态优势、文化优势，其发展定位是国际休闲旅游基地、国家钒钛资源利用产业基地和京北清洁能源基地[11]。

同时，承德生态良好，资源富集，森林覆盖率达 55.8%，是京津唐重要的

[10] 唐山市人民政府官网，http://www.tangshan.gov.cn/
[11] 承德市人民政府官网，http://www.chengde.gov.cn/

水源地和华北最绿的城市，被称为“华北之肺”，更是被习总书记定位为“京津冀水源涵养功能区”，是京津的生态屏障和重要水源地，每年供给京津冀 20.4 亿立方米水量[12]。因此，承德市虽然在水资源总量的供需层面并不紧张，但依旧面临严峻的水资源水环境保护责任。

5.1.3 唐山市与承德市水资源消费和能源消费的特征

根据河北省水资源公报数据，唐山市和承德市的城市用水量如下图所示。这里，城市用水量是指地级市的城区及近郊区的用水量[13]。公报数据显示，承德市的城市用水量稳中有降，一直在 2 亿立方米之下；而唐山市的城市用水量在 2016 年之前一直在 8 到 9 亿立方米的水平，在 2017 年迅速下降，降至 2 亿立方米左右的水平。用水量数据发生如此大的变化，主要是由于在 2017 年河北省水资源公报的城市用水量统计口径发生了变化，去掉了农业用水这一指标。

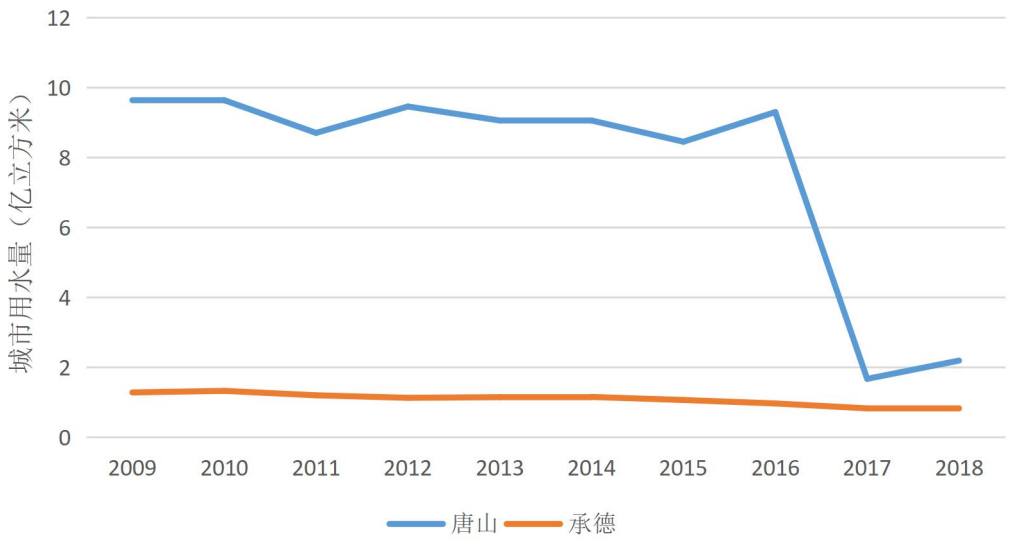


图 53 唐山市和承德市城市用水量
（数据来源：2009-2018 年河北省水资源公报）

[12] 《中共承德市委 承德市人民政府关于加快京津冀水源涵养功能区建设的若干意见》，来源网址 http://www.hehechengde.cn/news/cdnews/sz/2015-01-06/18790.html
[13] 2015 年河北省水资源公报，河北省水利厅

在调研中发现，无论是城市级别的水资源消费数据，还是能源消费数据都面临缺失。一方面。城市级别的水资源消费公开数据因统计口径变化而无法支撑定量分析，另一方面，虽然唐山市的全社会能源消费量数据可公开获取，但承德市却一直没有将该指标数据作为统计年鉴或国民经济与社会发展统计公报的公开指标。

唐山市与承德市明显的水资源与能源消费差异来源于其经济规模差异。唐山市地区生产总值规模和增长速度都高于承德市，经济体量到 2017 年约是承德市的 4-5 倍。

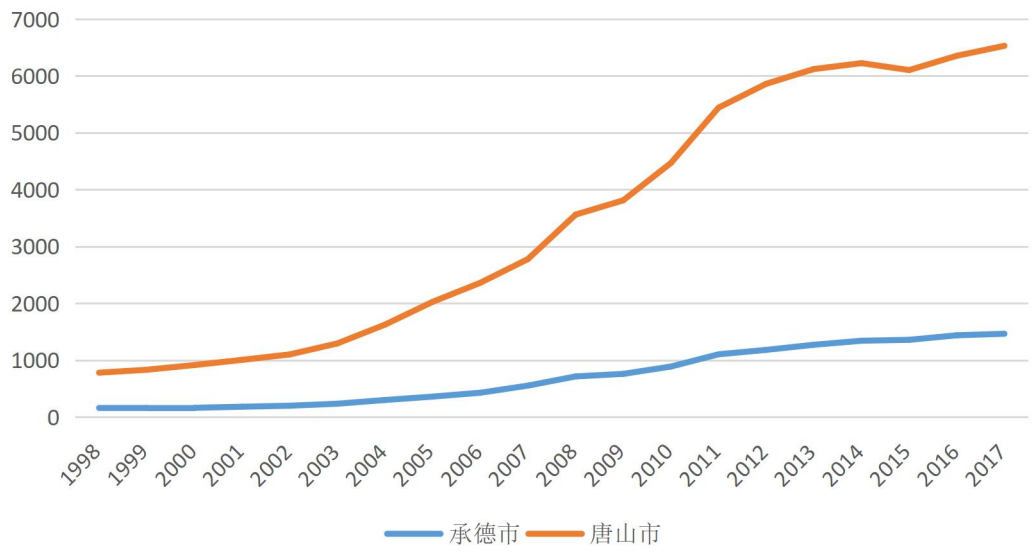


图 54 1998-2017 年唐山市与承德市的社会生产总值（单位：亿元）
（数据来源：河北省经济年鉴 1999-2018）

从经济产业结构来看，唐山市与承德市也存在着明显差异。对于唐山市，长期以来第二产业在社会生产总值中的占比较高，2017 年这一数值是 55.8%，承德市则是 41.6%；唐山市的第一产业和第三产业占比都要小于承德市，在 2017 年分别是 7.1%和 37.1%，而承德的数据是 16%和 42.3%。

高占比的第二产业结构在数据上支持了唐山市工业立市的定位，承德市快速发展的第三产业和快速降低的第二产业也凸显了地方政府对其“华北之肺”生态价值的保护。

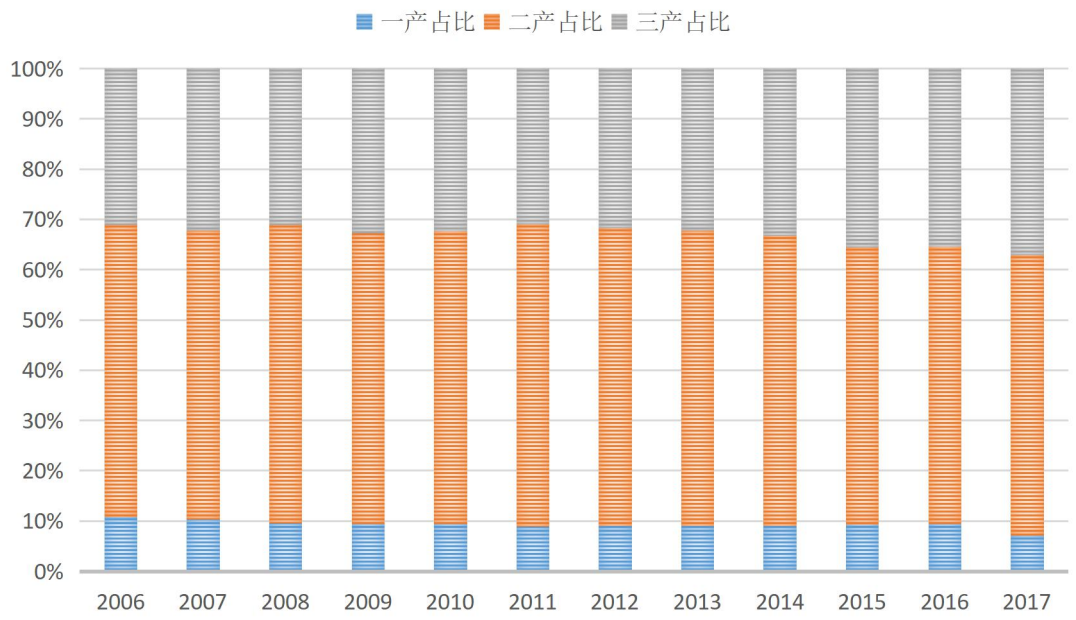


图 55 2006-2017 年唐山市产业结构图
（数据来源：河北省统计局，EPS DATA 数据库）

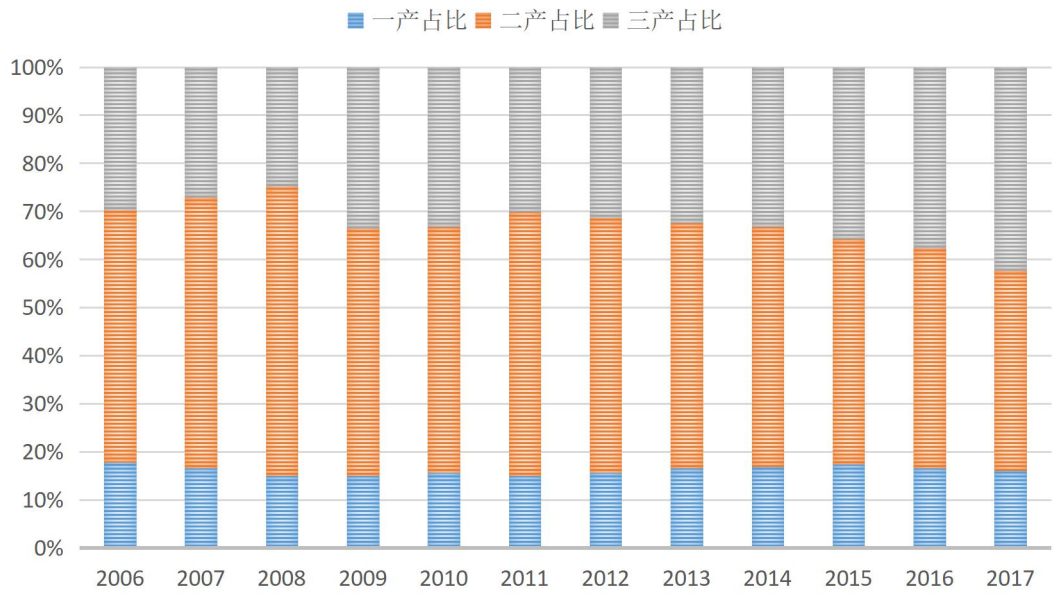


图 56 2006-2017 年承德市产业结构图
（数据来源：河北省统计局，EPS DATA 数据库）

根据唐山市和承德市各自的经济结构和发展特点来看，唐山市是典型的工业城市，是我国最大的钢铁生产基地，未来也将长期保持重工业为主要支柱产业。而承德市经济结构更为均衡，虽然也有钒钛等工业产业，其旅游业也是城市经济发展的重中之重，近年来第三产业占比迅速攀升。由此，可以看出，对于重工业型城市唐山和均衡型城市承德，能源与水的耦合关系显然也应该具有显著差异。

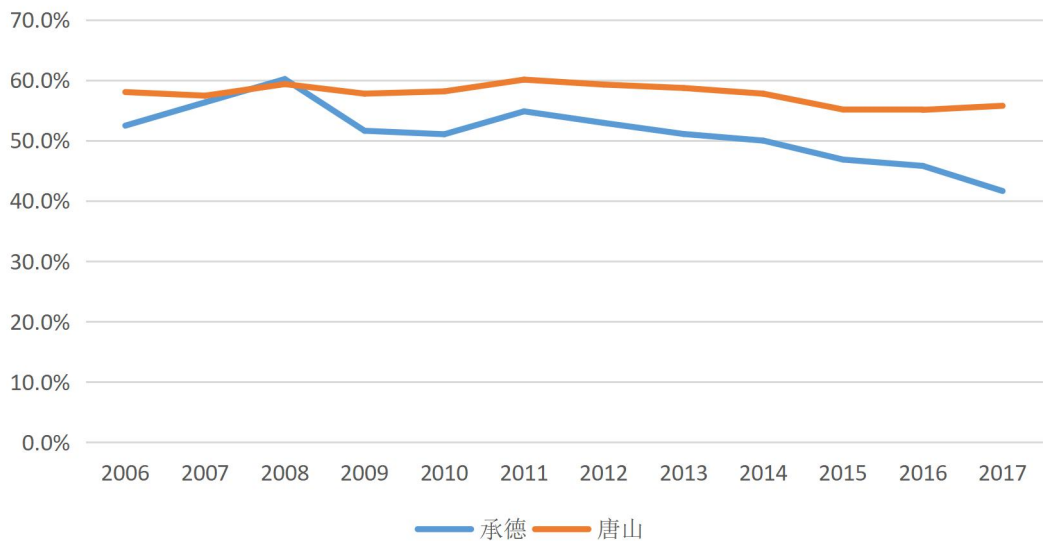


图 57 承德市和唐山市第二产业增加值在地区生产总值中的占比
（数据来源：河北省统计局，EPS DATA 数据库）

5.2 地级城市的能源与水相关关系研究

受数据缺失的限制，在地级市层面难以通过部门用能和用水数据来定量解析能源与水资源的关系，但可以从整体来判断二者在大产业尺度上的耦合关系是否具有统计学指标的支持。因此，从数据可获得性考虑，结合本研究的重点关切是在工业部门生产中的能源与水消费关系，以下将主要介绍唐山市和承德市的规模以上工业企业能源与水资源消费情况。

两座城市的规模以上工业企业能源消费量自 2006 年以来逐年攀升，从数值上来看，该指标唐山市是承德市的 7-9 倍。唐山市的规模以上工业企业能源消

费从 2006 年的 5289 万吨标煤，稳步增长到 2017 年的 7424 万吨标煤；承德市在 2006 年 580 万吨标煤，到 2017 年 967 万吨标煤。

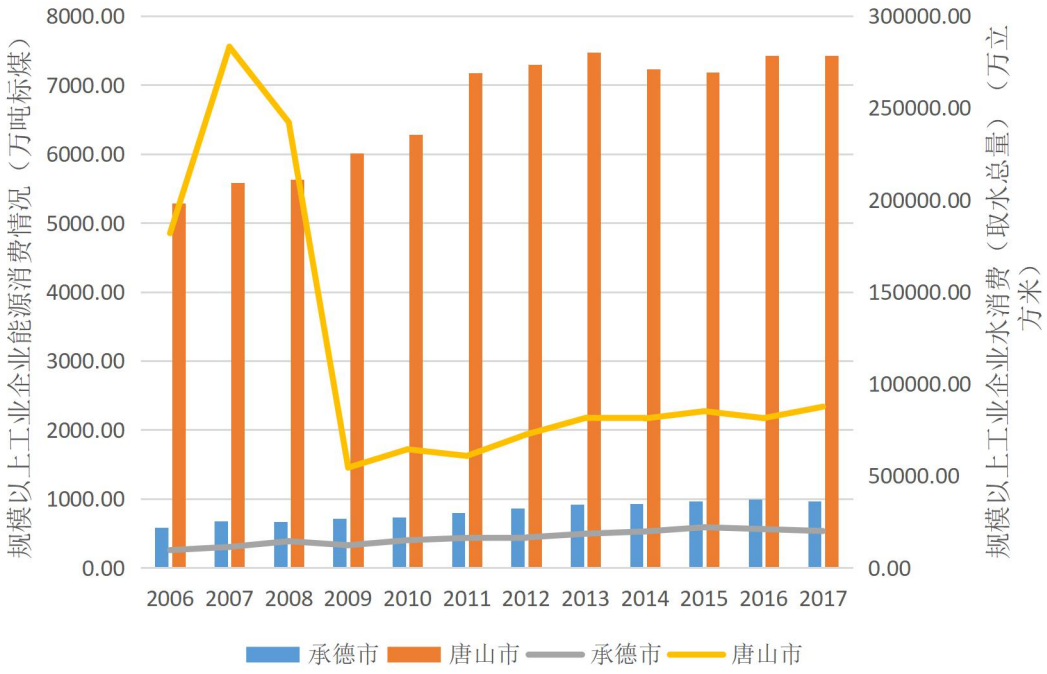


图 58 唐山市和承德市的规模以上工业企业能源与水资源消费情况
（数据来源：河北省统计局，由 EPS DATA 整理）

从水资源消费的角度看，唐山市和承德市的规模以上工业企业消费情况大不相同。承德市的水资源消费从 2006-2015 年稳步提升，之后略有下降；而唐山市则在 2008-2009 年经历了快速下跌，之后才又有所回升，尽管其规上工业能源消费总量仍旧远低于 2008 年之前。

分析两个城市规模以上工业取水和工业能源消费量的关系，可以发现唐山市和承德市的工业水能关系并不相同。依据公开数据，2006 年-2017 年唐山市的工业能源消费与取水量呈负相关关系，相关系数为-0.66；而承德市的工业能源消费与取水量呈正相关关系，相关系数为 0.96。

表 11 2006-2017 规模以上企业工业能源消费与劳动力、取水量和固定资产投资的相关系数

（根据 EPS DATA 整理的河北省统计局公开发布数据计算）

		劳动力	取水量	固定资产投资
工业能源消费	唐山	-0.31	-0.66	0.87
	承德	0.13	0.96	0.88

唐山市和承德市的规模以上的工业能源消费量与取水量呈现相反的相关关系，这与 2007 年至 2009 年唐山市规模以上的取水量剧烈下跌有关。但由于在调研中获悉其对外公开的数据并非全口径数据，并且也未得到这一数据大幅下跌的原因，我们将样本统计口径缩小，剔除掉 2009 年之前的数据，重新获得这些变量的相关系数。

表 12 2009-2017 规模以上企业工业能源消费与劳动力、取水量和固定资产投资的相关系数

（根据 EPS DATA 整理的河北省统计局公开发布数据计算）

		劳动力	取水量	固定资产投资
工业能源消费	唐山	-0.41	0.78	0.51
	承德	0.02	0.96	0.88

可以发现，统计口径的变化对唐山市规模以上工业能源与水关系的度量有明显影响，其农业能源消费与取水量的相关关系从负相关-0.66 变为正相关 0.78。

5.3 地级城市的能源与水定性关系研究

从城市层面来解构能源与水的耦合关系，我们依旧将能源与水作为两种重要的生产要素，其耦合关系依旧是依托在社会各生产部门的生产流程和最终产品中。考虑到产业结构、技术提升和能源消费结构的变化都会对能源与水的耦合关

系产生影响，依据本研究之前的分析，结合能够获得的数据，可以将工业部门的能水关系和关键要点梳理如下。

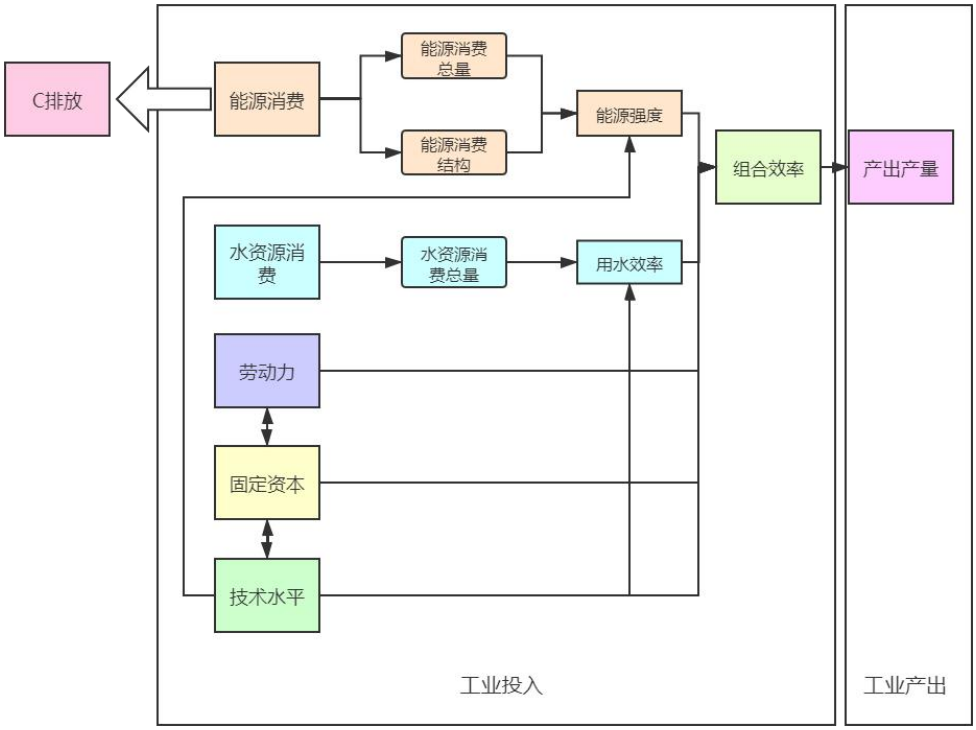


图 59 工业部门能源与水的耦合关系示意图

首先工业部门的总投入取决于工业产出的总需求。在保证工业产出不降低的前提下，需要提升工业生产组合效率，才能够实现工业投入的减少。换句话说，只有工业生产的组合效率提升，才有可能实现水资源消费的降低和能源消费的减少，从而实现工业生产的碳减排。

工业生产可以大致划分为能源消费、水资源消费、劳动力、固定资本和技术水平等五方面的投入要素来实现，其中能源与水资源都作为重要的物质资料。劳动力即参与生产的人力，固定资本这里可以看做用来实现工业生产的设备机械和厂房等，技术水平则代表了科学技术发展对工业生产的推动作用。

对应五种投入要素，组合效率也受这五种要素的影响，组合效率越高，代表

投入要素的数量越少，生产出的产品越多；效率越低，则反是。

可以看出，**能源与水资源的投入在工业生产中是并行关系**，也就是说，在一定的技术水平下，一种要素的使用效率的提升可能能够促进组合效率的提升，但并不一定能够实现另一种要素使用效率也同样提升，甚至可能会引起使用效率的下降。同时，固定资本和技术水平都是能源强度和用水效率在实际生产中的实现载体，这两者都对能源与水作为投入要素在生产过程中的消费产生重要的影响。

5.3.1 短期内城市层面优选节水效率提升

短期内的社会总需求不变将限制产业结构调整的空间，用水效率提升是缓解水资源压力的主要方式，但并不意味着一定带来碳减排效益。

（1）用水总量的下降意味着需要提升用水效率，推进组合效率提升。用水效率提升意味着技术水平上升，设备需要更新换代，需要固定资本投入上升，以及技术研发投入上升，技术成果转化效率提高等。

（2）组合效率的变化取决于各生产部门水能投入的变化。无论是能源还是水资源，其对组合效率的影响都是单向的，需要在节水效率提升的同时，控制能源效率提升，才可能使得能源消费下降。用水效率提升并不能够直接使得能源强度下降。

只有用水效率提升使得不同行业之间的竞争优势发生了变化，从而使得产业结构自动优化以适应新的用水效率的情况下，能源消费才会被动受到影响，但这种影响的方向是不确定的，有可能与水资源同向变化，也可能反向变化。

（3）如果想要降低能源消费从而实现碳减排，就必须同时推动能效提升或者优化能源消费的结构。与用水效率提升相似，这要求终端能源使用设备更新换

代，需要固定资本投入或者技术研发革新，以及促进科研成果的转移和转化。

（4）能源结构优化需要涉及能源部门变革，牵扯更加广泛，不仅包括终端设备革新、技术升级，还需要包括能源供应部门和使用部门的根本性变革，可能会引发经济产业结构的颠覆性变化，在此并不做深入探讨。

落实到城市层面，对于华北第一大工业城市唐山市来说，钢铁冶炼、机械制造等大型支柱产业在短期内难以转移，其产业结构调整的空间很小，能够有效缓解水资源压力的最佳途径就是提升水资源消费大户产业的用水效率。但是，正如前文对于河北省能水关系研究的结果显示，用水效率的提升并不能带来显著的能源消费降低，如果节水需要额外的设施来实现，反而可能会带来新增的能源消费，碳排放不降反升。因此，碳排放的降低还是需要靠能源效率提升来实现。

对于承德市，考虑到其“京津冀水源涵养地”和“华北之肺”的重要生态价值，承德市的水资源虽然比较充沛，其水资源压力较小，但因为要保护辖内水质，就使得其产业发展方向需要重三轻二，过去一段时间承德市的经济产业发展也呈现出了这样的特点。但对于承德市来说，工业例如钒钛产业属于其优势产业，必将长期存在。因此，一方面承德市的工业生产需要更高的净化技术，以达到额外严格的污水排放标准，从而保证水源洁净；另一方面，虽然短期内产业结构大幅度变化并不现实，但政府仍旧需要大力推动第三产业的发展。

5.3.2 长期内三种方法都可以用来缓解水资源压力

长期看，社会总需求的变化并不确定，产业结构调整和节水效率提升都是缓解水资源压力的重要途径，但是大幅度的碳减排还需要靠能源结构转型。

考虑到中国的人口现状、经济发展现状、资源利用效率以及未来的发展趋势，

总需求大概率可能是先升后降。在这个过程中，一二三产业的占比和结构会面临巨大调整，人口和经济发展会拉动全体产业部门需求的快速上涨从而加大生产要素的需求，科学技术水平的飞速发展和资源利用效率的提高则会在飞速推进生产率的同时降低要素投入量，双方之间的动态博弈深刻影响着能源与水在社会生产和生活中的耦合关系。可以预料的是这种关系在长期来看会呈现复杂的变化状态，当前难以预测。

但是可以明确的是，长期来看重工业部门中的许多产业可能会被淘汰或缩减，伴随第三产业的上升和科学技术水平的提升，无论是能源强度还是用水效率都将获得大幅度增长，这就使得水资源紧缺和高耗能生产导致的过量碳排放局面可以得到缓解。当然，也必须得到缓解。

最后，可以说，从长期来看，无论是产业结构优化还是用水效率提升，或者是能源结构调整，都是缓解城市用水压力、降低碳排放的可行措施和发展方向。

5.4 本章讨论

通过以上城市层面的能源与水关系分析，结合省级层面的研究结果，为了支持下一步更好的解构城市水能关系，缓解城市水资源压力，寻找更有效的减排路径，提出以下讨论和建议的要点。

1 受数据的可获得性约束，城市级别的能水关系研究需要下沉的具体行业中，获得一手数据来支撑

在整个城市层面的水能关系研究中，数据一直是困扰研究工作的最主要因素。即便是拿到一部分公开的数据，其背后的统计口径和历年变化也并不清晰，公开数据与实际需求数据相差较大。这就使得从城市层面研究水能关系面临无数

可依的局面，即便用数据勉强做分析，其结果的可靠性也并不十分值得依赖。

因此，如果想对城市层面的水能关系进行深入探讨，需要自下而上的研究方式，进入重点行业采集一手数据，才可能得到较为可靠的研究基础。

2 城市产业结构更加固化，节水技术是优先选择

无论是对于“京津冀水源涵养地”承德市，还是对于华北第一工业城市唐山市，其经济产业结构相比较省级层面的调整空间都更小，支柱产业在短期内很难有所改变。

对于唐山市而言，工业增加值占比较高，水资源压力巨大，快速推进工业节水水平，提升工业用水效率是较为快速可行的方式。这就需要一方面加快工业节水技术的研发，加大研究投入；另一方面从政策层面推动用水率趋严，倒逼企业进行生产工艺和流程的提升。

对于承德市，除了其工业部分亦需要提升用水效率，还要严格其污水排放的标准。另外，鉴于其第三产业过去几年的快速发展，承德市对旅游业未来的发展规划，短期内其第三产业仍然会面临较快发展，这本身也是承德市缓解水资源压力和减少碳排放的有益方向。

3 城市层面节水可能能够带动的节能效果未知，减排还是要靠提高能效和能源结构优化

回归本研究的主题问题，我们可以发现，在城市层面通过约束水资源消费较难实现节能减排的效益。原因有三，第一即在于产业结构调整空间有限，第二是用水效率提升未必能够促进能源使用效率的提升，或者用水效率提升反而会增加

额外的能耗，第三则是能源结构调整带来的水资源影响复杂且未知。

但是能源结构调整优化以及提升能源使用效率能够实现的减排效益是直接可靠的。因此，与省级层面一样，城市实现碳减排的主要途径还是需要依靠能源变革，从水能关系角度切入并非明智之举。

6 政策建议

最后，基于前几章所有的研究内容和结论，我们梳理了几条可供决策者和相关方参考的建议。

1 河北省能源与水在产业层面具有密切的耦合关系，总体来说，水资源管理政策的工具可以实现降低能源使用量和碳排放量的目标。

在研究中发现，通过控制 5%的河北省水资源总量，能够实现同等水平的能源消费总量下降 5%；提升行业用水效率 5%，能够带来更大比例的用水总量的下降 10%，一定比例的能源消费总量下降 3%。

2 水资源管理政策和产业发展政策相协同才能发挥节水节能的作用

水管理政策和产业发展政策的单独应用可能难以发挥较为理想的成效，需要两种政策配合使用才有可能实现节水节能的目标。

同时，从河北省能源与水最终消费流向来看，约半数能源与水资源消费凝结在钢铁、农产品等高耗能耗水产品中流向省外，其产业结构调整制约因素较多，其在现实中是一个长期过程。

3 通过技术手段在重点部门提升节水效率能够实现显著的节能减排效果

无论是在产业结构调整路径中，还是在节水效率提升路径中，金属冶炼和压延加工品业都是通过路径能够实现节能减排的关键部门，也就是说，钢铁行业作为河北省重要的支柱产业之一，有很强的节水节能潜力，在钢铁行业通过压缩行

业规模、提高节水效率，能够带动显著的能源与水消费降低的协同效果。

由于钢铁行业对于河北省的特殊意义，短期内压缩行业规模较为困难，提升钢铁行业的节水效率更具有应用前景。

4 不考虑其它部门能源用水的能源结构调整对于河北省降低水资源消耗没有呈现显著作用

通过简单的情景分析和替代计算，用光伏替代煤炭虽然能够产生水资源消费的降低，但投入成本巨大，相比较能源替代的投入，这种节水作用并不显著。

同时，在技术上，可再生能源也难以完全取代煤炭在钢铁生产过程中的作用，钢铁行业对于煤炭的需求具有不可替代，这是因为钢铁行业需要大量的工业过程用煤。

5 城市级别通过水资源管理手段来实现节水节能减排的难度更大

城市产业结构调整空间小，固化的产业结构不易调整，相比较而言，用水效率提升可能是缓解重工业部门水资源压力能够采用的主要方式。

附录

1 结构路径分析方法

结构路径分析（SPA）是一种基于投入产出的分析方法，通过利用投入产出数据中部门之间的流量交互关系来测算经济生产网络的流量。环境扩展的投入产出模型可以将水资源消耗系数引入模型，使用结果路径分析可以反映分部门产品在整个经济系统中不同生产供应链上各个生产阶段的水资源消耗量。SPA 作为一种经济网络分析的有效工具，在能源、资源和环境领域的使用不断拓宽，为经济活动中资源和能源流动的量化分析提供了科学的依据。SPA 在社会资源使用的分析应用侧重于通过将经济活动中的资源消耗总量分解到整个社会的产品生产供应链上，以揭示主要的资源流动去向。

对于水资源的消耗，基于投入产出表中部门之间的经济活动关联，SPA 可以将行业生产的总用水量分解为产品生产供应链上每一层级的用水需求，以此来揭示经济生产活动中主要的耗水产业、产品及生产阶段。SPA 方法已经广泛的应用于分析能源消费、空气污染排放、碳排放、水资源使用以及国际贸易等问题。

标准的投入产出模型可以根据投入产出平衡式(Leontief 1970)（1）推导得到表示为式（2），引入水资源消耗系数可以得到环境扩展的投入产出模型式（3）：

$$AX + Y = X \qquad (1)$$

$$X = (I - A)^{-1} \times Y = LY \qquad (2)$$

$$W = w \times (I - A)^{-1} Y = wLY \qquad (3)$$

这里 X（n×1）表示各部门总的经济产出向量；I（n×n）是单位矩阵；A（n×n）表示直接消耗系数矩阵；Y（n×1）表示各部门最终消费量，包括农村居民消费、城镇居民消费、政府消费、固定资本形成、存货增加和出口；$L = (I - A)^{-1}$是里昂惕夫逆矩阵；W 表示各部

门水资源使用矩阵，w 为各部门用水强度系数。

SPA 的实现方法是将式投入产出模型中的里昂惕夫逆矩阵进行幂级数展开(Patten and Bernard,1982)，以表示产品生产过程中的间接需求，即式（4）和式（5）：

$$L = (I - A)^{-1} = I + A + A^2 + A^3 + A^4 + \ldots + A^t, \qquad \lim_{t \to \infty} A^t = 0 \tag{4}$$

$$EM = F \times (I - A_d)^{-1} Y_d = FIY_d + FA_dY_d + FA_d{}^2Y_d + FA_d{}^3Y_d + \ldots + FA_d{}^tY_d \tag{5}$$

这里$FA_d{}^tY_d$表示生产链第 t 层的水资源消耗量，例如，如果我们把Y_d看做是汽车的消费需求，那么 FIY_d表示消费汽车的直接耗水量。而汽车的消费还会对制造汽车所需的上游产品产生新的消费需求，进而会其他部门一系列中间投入品产生需求，A_dY_d即表示这一生产层级的产品投入需求，FA_dY_d则对应这一级的生产活动带来的耗水量。以此类推，式（4）加和的各项代表生产链上各层级的耗水量，随着生产链的往上追溯，数据结果呈现树形图的结构，且生产越靠近上游，单个层级耗水总量越少。为了识别高耗水产业链，我们仅考虑耗水量量占比较大的经济活动层级，本文选取了前三层。

2 投入产出分析方法

投入产出法(I-O)是 Wassily Leontief 教授在 1946 年提出的，用来研究经济体系（国民经济、地区经济、部门经济、公司或企业经济单位）中各个部分之间投入与产出的相互依存关系的数量分析方法[2-4]。它是把一系列内部部门在一定时期内投入来源与产出去向排成一张纵横交叉的投入产出表格，根据此表建立数学模型，计算消耗系数，并据以进行经济分析和预测的方法[5,6]。基于投入产出的分析通常是从基于生产的角度或基于消费的角度进行的，它可以通过确定一系列的效应来显示直接的、间接的影响[7,8]。

投入产出的行模型是最基本的投入产出模型形式。它是能体现行平衡关系的投入产出模型。行平衡关系为中间使用和最终使用之和等于总产出。投入产出的行模型是投入产出分析的基本模型，能反映最终消费和各部门生产之间的关系。用数学公式可以表示：

$$\sum_{j=1}^{n} x_{ij} + Y_j = X_j \qquad (6)$$

其中：x_{ij}表示 j 部门对 i 部门的中间使用；Y_j表示 j 部门的最终使用；X_j表示 j 部门的总产出。

投入产出行模型可以基于部门间的中间交换建立起体现能量流的模型，能用来量化个别部门的具体能源使用[9，10]，所以近五十年来，越来越多的学者使用投入产出方法来量化基于消费的具体能源使用或碳足迹[11]，例如，Liu 等利用生态扩展投入产出模型来研究温室气体的综合排放和各产业的排放关系[12]。Li 等通过在投入产出分析的基础上建立二氧化碳流量模型来研究广东省的碳排放在产业间的分布[13]。

参考文献

[1] WASSILY LEONTIEF. APUNTES SOBRE UN VIAJE A CUBA. 1970, 30(117):5-21.

[2] ZHU B S B, LI Y. Input-output and structural decomposition analysis of India's carbon emissions and intensity, 2007/08 – 2013/14 [J]. Applied Energy, 2018, 230: 1545-56.

[3] MAX, MUNDAY, MALCOLM, et al. Input-Output Analysis: Foundations and Extensions [J]. Journal of Regional Science, 2011,

[4] FANG-RONG REN Z T, JINGJING LIU,YU-TING SHEN. Analysis of CO2 emission reduction contribution and efficiency of China's solar photovoltaic industry: Based on Input-output perspective [J]. Energy, 2020, 199: 25-38.

[5] MACHADO G, SCHAEFFER R, WORRELL E. Energy and carbon embodied in the international trade of Brazil: an input–output approach [J]. 2001, 39(3): 409-24.

[6] AYDOGUS O, DEGER C, CALISKAN E T, et al. An input-output model of exchange-rate pass-through [J]. Economic Systems Research, 2018, 30(3): 323-36.

[7] HE P, NG T S, SU B. Energy-Economic Resilience withMulti-Region Input-Output Linear Programming Models [J]. Energy Economics, 2019, 84: 27-39.

[8] KIM K, HEWINGS G J D. Bayesian estimation of labor demand by age: theoretical consistency and an application to an input–output model [J]. Economic Systems Research, 2018, 1-26.

[9] CHANG Y, RIES R J, WANG Y. The embodied energy and environmental emissions of construction projects in China: An economic input-output LCA model [J]. Energy Policy, 2010, 38(11): 6597-603.

[10] Truncation error in embodied energy analyses of basic iron and steel products [J]. Fuel & Energy Abstracts, 2001, 25: 577-85.

[11] ANNE OWEN P B, LINA BRAND-CORREA,LUKAS BUNSE,MARCO SAKAI,JOHN BARRETT. Energy consumption-based accounts: A comparison of results using different energy extension vectors [J]. Applied Energy, 2017, 190: 45-78.

[12] LIU L, HUANG G, BAETZ B, et al. Integrated GHG emissions and emission relationships analysis through a disaggregated ecologically-extended input-output model; A case study for Saskatchewan, Canada [J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2019, 106(5): 97-109.

[13] LI J, HUANG G, LIU L. Ecological network analysis for urban metabolism and carbon emissions based on input-output tables: A case study of Guangdong province [J]. Ecological Modelling, 2018, 383: 118-26.

研究团队

北京师范大学 中国绿色发展协同创新中心

张九天　刘兰翠

张　璐　宋香静　刘育盛　蔚艳艳　钟　超