

刘 宁 著

# 京津冀水资源优化配置

## ——基于水足迹视角



# 京津冀水资源优化配置 ——基于水足迹视角

刘 宁 著



同济大学出版社  
TONGJI UNIVERSITY PRESS

## 内 容 提 要

京津冀位于中国资源型缺水地区,以不足全国的 0.7%的水资源,承载着全国约 8%的人口、6%的粮食生产和 10%的 GDP,水资源问题制约着京津冀地区可持续发展。本书在核算了 1994—2013 年京津冀地区农业、工业、生活、生态环境和虚拟水贸易五个部门水足迹基础上,建立了水资源优化配置系统动力学模型,然后通过四种产业政策情景仿真分析,找出水资源优化配置方案,最后通过水分生产力排名,确定产业调整的种类与数量,促进京津冀地区水资源供需平衡。本书的读者对象是京津冀地区水资源相关管理部门。

## 图书在版编目(CIP)数据

京津冀水资源优化配置:基于水足迹视角 / 刘宁著.

—上海:同济大学出版社,2017.9

ISBN 978-7-5608-7413-5

I. ①京… II. ①刘… III. ①水资源管理—资源配置—优化配置—研究—华北地区 IV. ①TV213.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 223279 号

---

# 京津冀水资源优化配置——基于水足迹视角

刘 宁 著

责任编辑 陆克丽霞 责任校对 徐春莲 封面设计 陈益平

---

出版发行 同济大学出版社 [www.tongjipress.com.cn](http://www.tongjipress.com.cn)  
(地址:上海市四平路 1239 号 邮编:200092 电话:021-65985622)  
经 销 全国各地新华书店  
排 版 南京月叶图文制作有限公司  
印 刷 上海同济印刷厂有限公司  
开 本 787 mm×1092 mm 1/16  
印 张 7.75  
字 数 193 000  
版 次 2017 年 9 月第 1 版 2017 年 9 月第 1 次印刷  
书 号 ISBN 978-7-5608-7413-5

---

定 价 48.00 元

---

本书若有印装质量问题,请向本社发行部调换 版权所有 侵权必究

# 前 言

京津冀位于中国资源型缺水地区,以不足全国 0.7%的水资源承载着全国约 8%的人口、6%的粮食生产和 10%的 GDP,水资源问题制约着京津冀地区的可持续发展。本书在核算了 1994—2013 年京津冀地区农业、工业、生活、生态环境和虚拟水贸易五个部门水足迹的基础上,建立了水资源优化配置系统动力学模型,然后通过四种产业政策情景仿真分析,找出水资源优化配置方案,最后通过水分生产力排名,确定产业调整的种类与数量,从而促进京津冀地区水资源供需平衡。

本书的主要研究内容如下:

(1) 采用 CROPWAT 模型和用水定额法核算出京津冀地区水足迹。区域整体用水量发生颠覆性变化,水足迹总量为  $1\,770 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,是该地区实体用水的 7 倍,人均水足迹为  $1\,383 \text{ m}^3/\text{a}$ ,是人均实体用水的 5 倍。地区之间差距巨大:河北省水足迹为  $1\,523 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,北京市为  $138 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,天津市为  $108 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,分别是三地实体水用量的 8 倍、4 倍和 5 倍;人均水足迹河北省为  $2\,226 \text{ m}^3/\text{a}$ ,在全国 31 个省份中排名第二,天津市为  $999 \text{ m}^3/\text{a}$ ,北京市为  $941 \text{ m}^3/\text{a}$ ,均低于中国平均水足迹值。产业之间同样差异巨大:农业用水比例为 75.4%,生态环境用水比例为 18.3%。其中,肉类、禽蛋类和粮食类产品水足迹是农业用水主体,植树造林水足迹为生态环境用水主体。

(2) 构建了基于水足迹的京津冀地区水资源配置系统动力学模型。模型划分为六个子系统,即供水子系统、农业子系统、工业子系统、生活子系统、生态环境子系统和经济子系统,涉及 70 个变量,模型通过了系统一致性检验、历史数据检验和灵敏度检验,能够反映出京津冀地区水资源配置时空变化规律。

(3) 农产品总量下降 50%情景是最优水资源配置方案。该情景下,2030 年京津冀地区可实现水资源供需平衡,虚拟水贸易在该地区水资源供应中占据重要地位,农业部门用水下降 8%,可节约用水总量  $791 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。

基于上述研究结果,产业结构调整政策建议为:①预测期内畜产品实现进口 50%为合理目标;②粮食产品在考虑地区安全情况下,可通过改良灌溉方式实现节约用水 85%;③棉花产品应逐步退出本地区,实现全部进口;④改进植树造林树种结构,模拟自然林生长环境,减少水足迹。

# 目 录

## 前言

|                     |    |
|---------------------|----|
| 第 1 章 绪论 .....      | 1  |
| 1.1 研究背景 .....      | 1  |
| 1.2 研究目的与意义 .....   | 2  |
| 1.2.1 研究目的 .....    | 2  |
| 1.2.2 研究意义 .....    | 2  |
| 1.3 科学问题与研究内容 ..... | 3  |
| 1.3.1 科学问题 .....    | 3  |
| 1.3.2 研究内容 .....    | 3  |
| 1.4 技术路线与研究方法 ..... | 4  |
| 1.4.1 技术路线 .....    | 4  |
| 1.4.2 研究方法 .....    | 5  |
| 1.5 创新性研究成果 .....   | 6  |
| 第 2 章 文献综述 .....    | 7  |
| 2.1 水资源研究现状 .....   | 7  |
| 2.2 水足迹理论 .....     | 10 |
| 2.2.1 概念辨析 .....    | 10 |
| 2.2.2 水足迹研究现状 ..... | 12 |
| 2.2.3 水足迹核算方法 ..... | 20 |
| 2.3 水资源配置研究现状 ..... | 27 |
| 2.4 系统动力学理论 .....   | 29 |
| 2.4.1 系统动力学简介 ..... | 29 |
| 2.4.2 建模过程 .....    | 30 |
| 2.5 小结 .....        | 32 |

|                           |    |
|---------------------------|----|
| <b>第3章 京津冀地区水资源现状分析</b>   | 33 |
| 3.1 京津冀地区水资源供给现状          | 34 |
| 3.1.1 京津冀地区水资源概况          | 34 |
| 3.1.2 京津冀地区供水状况分析         | 35 |
| 3.2 京津冀地区水足迹分析            | 39 |
| 3.2.1 区域整体水足迹             | 39 |
| 3.2.2 分地区水足迹              | 41 |
| 3.2.3 分部门水足迹              | 43 |
| 3.2.4 分产业水足迹              | 49 |
| 3.3 小结                    | 59 |
| <b>第4章 系统动力学模型构建</b>      | 60 |
| 4.1 系统界定及边界               | 60 |
| 4.1.1 系统概念图               | 60 |
| 4.1.2 系统边界                | 61 |
| 4.1.3 假设条件与初始参数           | 63 |
| 4.2 模型构建                  | 64 |
| 4.2.1 模型因果关系分析            | 64 |
| 4.2.2 模型流图构建              | 68 |
| 4.2.3 基于水足迹的水资源配置系统动力学模型  | 73 |
| 4.3 模型检验                  | 76 |
| 4.3.1 系统结构一致性检验           | 76 |
| 4.3.2 历史数据检验              | 76 |
| 4.3.3 灵敏度检验               | 81 |
| 4.4 小结                    | 82 |
| <b>第5章 京津冀水资源优化配置情景分析</b> | 83 |
| 5.1 现行产业结构情景模拟仿真          | 84 |
| 5.1.1 缺水程度的动态仿真           | 85 |
| 5.1.2 供水结构动态仿真            | 85 |
| 5.1.3 用水结构动态仿真            | 88 |
| 5.2 水资源优化配置情景设计           | 90 |

|                               |            |
|-------------------------------|------------|
| 5.2.1 方案一:农产品总量保持不变情景 .....   | 90         |
| 5.2.2 方案二:农产品总量下降为零情景 .....   | 93         |
| 5.2.3 方案三:农产品总量下降 50%情景 ..... | 96         |
| 5.3 优化配置方案的选择 .....           | 98         |
| 5.4 水足迹减量目标 .....             | 100        |
| 5.5 政策调整分析 .....              | 102        |
| 5.6 小结 .....                  | 103        |
| <b>第 6 章 结论与建议 .....</b>      | <b>105</b> |
| 6.1 结论 .....                  | 105        |
| 6.2 建议 .....                  | 106        |
| 6.3 研究不足与展望 .....             | 108        |
| <b>参考文献 .....</b>             | <b>109</b> |

# 第 1 章

## 绪 论

### 1.1 研究背景

京津冀地理位置相接,气候特征相近,资源禀赋同源共生,经济发展优势互补,水资源体系一脉相承,北京、天津地区全部位于海河流域,河北省大部分地区位于海河流域,一部分则位于滦河流域。近年来,海河流域五大支流中下游出现河道干涸、湖泊洼淀等自然湿地大面积萎缩、入海河道淤泥堆积、地下水位下降,漏斗区面积超过 1 000 km<sup>2</sup>,水污染严重等现象。故京津冀已成为我国水资源最为短缺的地区之一,多年平均水资源量不足全国的 0.7%,却承载着全国约 8%的人口、6%的粮食生产和 10%的 GDP。2013 年京津冀地区水足迹统计显示,农业部门用水超过京津冀地区全年用水的 70%,而第一产业产值仅占 GDP 的比例为 4.8%,水资源配置极为不合理。

水足迹反映了人类社会生产、消费所需要的最真实的水资源,从产品全生命周期角度衡量间接的虚拟水与直接的实体水的总和。同当前统计年鉴中对实体水的统计不同,水足迹使得人类社会水资源使用量的衡量方式发生了变化。水足迹的核算方式天然反映了水资源在国民经济各部门的配置关系与配置量,因此被当前研究视为解决区域水资源短缺的新思路。系统动力学是一门在系统科学指导下的,用来研究系统内部各要素之间相关关系及其动态变化规律的研究方法。系统动力学适用于解决复杂性、周期性和非线性等问题,其建立的模型可以结合情景分析法,设定政策响应方案,找出优化决策,适用于解决水资源配置不合理问题。

为保护开发京津冀地区有限的水资源,促进京津冀地区水资源优化配置,将水足迹概念同系统动力学方法相结合,解决京津冀地区水资源短缺和水资源配置不合理问题,是本书拟解决的关键问题。

## 1.2 研究目的与意义

### 1.2.1 研究目的

本书研究目的在于:论证水足迹策略在京津冀地区水资源优化配置过程中发挥的作用。具体是通过核算京津冀地区水足迹,反映京津冀地区水资源配置最真实的配置现状,通过构建基于水足迹的水资源优化配置系统动力学模型,模拟水资源在各部门间配置关系的时空变化状况,通过产业政策变动情景仿真,找出优化京津冀地区水资源配置的策略,最终通过具体的产业结构调整方案,实现京津冀地区水资源供需平衡。

### 1.2.2 研究意义

理论意义在于将水足迹理论同系统动力学方法相结合,解决水资源配置问题。水足迹理论的创新之处在于从产品生产的供应链角度统计水资源使用量,是产品甚至产业、区域最真实用水的体现,调整水足迹本质是调整产业用水结构;系统动力学是一种还原真实世界大系统内部各要素动态的、相互关系的有效方法,既量化系统内部各要素之间的相互关系,又体现了整个系统的联动关系,适用于研究水资源配置问题。二者相结合,是将水足迹作为连接产业结构调整和水资源配置的纽带,也作为优化京津冀地区水资源配置的新手段。

现实意义在于对京津冀地区水足迹进行核算,有别于当前统计年鉴中对该地区实体水的核算,能够对京津冀地区水资源配置现状进行最真实的反映。在此基础上通过系统动力学模型模拟水资源配置关系的动态变化规律,找出水资源优化配置的最佳方案,并通过产业结构调整最终实现京津冀地区水资源平衡。同时,也为保护京津冀地区有限的水资源,增加水资源供给,促进京津冀地区水资源优化配置提供有力依据。在一定程度上,也对京津冀地区其他资源环境要素如能源、土地、交通运输和空气治理等的协同发展提供参考。

## 1.3 科学问题与研究内容

### 1.3.1 科学问题

如何从水足迹角度对京津冀地区水资源优化配置问题进行研究是本书的主要研究内容。具体来说,有以下三个子问题:

- (1) 从水足迹视角核算京津冀地区水资源配置现状,由此判断该区域目前的产业用水结构是否合理。
- (2) 建立基于水足迹的京津冀地区水资源配置系统动力学模型。
- (3) 通过模拟仿真产业结构调整政策,找出水资源优化配置最佳方案,以达到水资源供需平衡的目的。

### 1.3.2 研究内容

本书的主要研究内容体现在以下三方面:

(1) 核算京津冀地区水足迹,分析该区域水资源供需现状。京津冀地区供水来源于地表水、地下水、南水北调工程、污水回收和通过产品贸易进口的虚拟水。在统计年鉴划分传统用水部门基础上,增加虚拟水出口用水部门,将京津冀地区用水分为农业部门、工业部门、生活部门、生态环境部门和通过产品贸易出口的虚拟水。通过对京津冀地区真实供水、需水系统的统计核算,了解京津冀地区供水结构与需水结构,对供需现状有一个明晰的掌握,为下一步建立系统动力学模型提供了边界参考和数据基础,同时也为建立的基于水足迹的京津冀地区水资源配置系统动力学模型对现实的模拟提供参照。

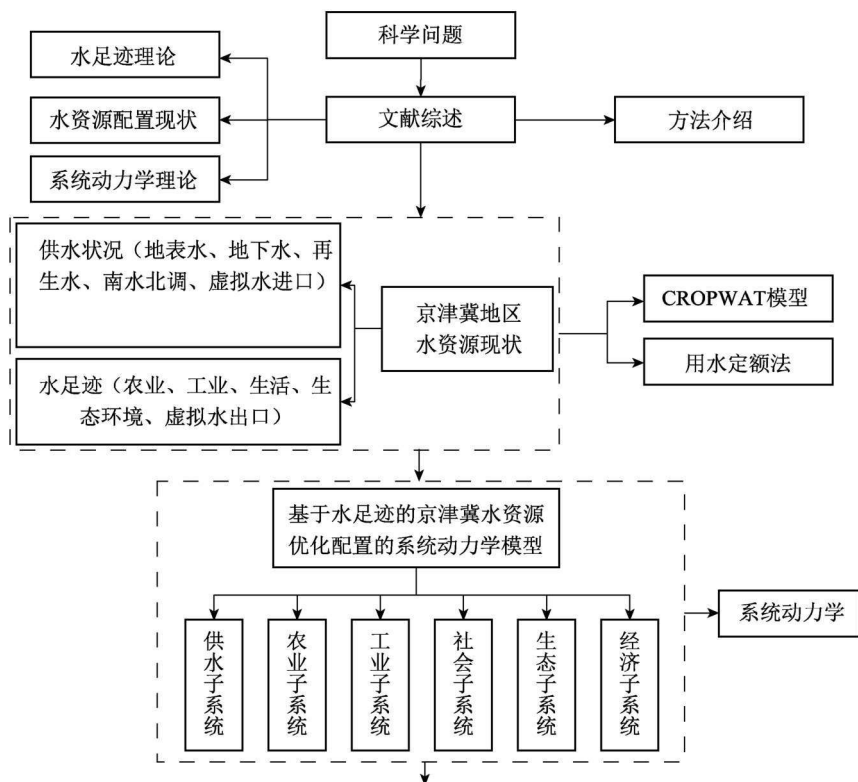
(2) 构建基于水足迹的京津冀地区水资源优化配置的系统动力学模型。通过设定供水子系统、农业需水子系统、工业需水子系统、社会生活需水子系统、生态环境需水子系统 and 经济子系统,采用 70 个变量,通过变量之间的相互关系,有效地模拟出水资源在京津冀各地区各部门的配置状况和动态变化状况,最后对模型进行了系统一致性检验、历史数据检验和灵敏度检验,说明所建的模型能够反映出京津冀地区水资源配置基本现状和动态变化状况,为下一步政策模拟仿真提供依据。

(3) 确定水资源优化配置最优方案。通过情景分析法,分析四种情景下水资源配置仿真结果。首先,分析经济自然发展状态下缺水程度、供水结构和用水结构的动态仿真结果;然后,设定三种水资源优化配置方案,即:农产品总量保持不变情景、农产品总量下降为零情景、农产品总量下降50%情景,通过农业部门农产品数量控制,动态模拟出三种情景下京津冀地区的缺水程度、供水结构和用水结构。最后,对比分析四种情景结果,最终确定最优方案,并提出相应产业政策调整建议。

## 1.4 技术路线与研究方法

### 1.4.1 技术路线

本书所采用的技术路线如图 1-1 所示。



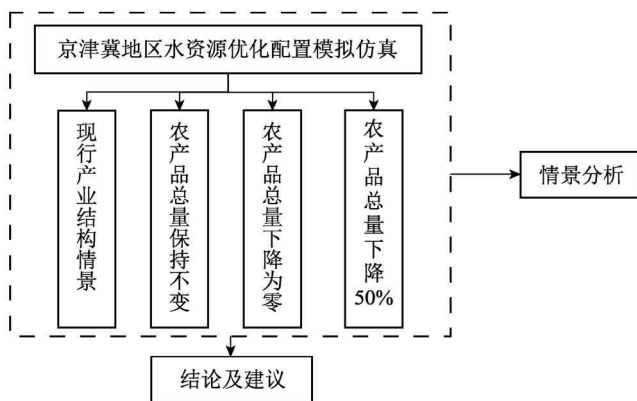


图 1-1 技术路线图

### 1.4.2 研究方法

本书根据三大研究内容,采用相应的研究方法,文献综述部分采用资料收集法;对京津冀地区水资源核算部分采用彭曼公式和用水定额法;构建系统动力学模型过程中采用系统分析方法,构建了因果关系图、系统流图;在最后政策模拟仿真部分采用了情景分析法。

#### 1. 文献资料收集法

运用中国知网(CNKI),首先以“水资源”为关键词,检索出引用频率较高的经典文献和最新文献,以此确定文献的学科分类和研究机构。其次,将近 10 年中文文献按照出现频次进行排名,归纳出水资源的五个研究热点,它们分别是水资源承载力、水资源安全、水资源生态问题、虚拟水和水足迹。再次,以水足迹为关键词重新进行检索,筛选出获得中国国家自然科学基金和社会科学基金资助、高引用率(30~614 次)和最新文献共 146 篇;在 SCI 数据库和 Elsevier 数据库检索外文文献 52 篇。

通过对中文文献和外文文献的归纳整理及评述,得到虚拟水国内外研究现状、水足迹国内外研究现状、水资源配置相关理论以及系统动力学模型建立、仿真等相关理论的现有研究成果。

#### 2. CROPWAT 模型

对京津冀地区水足迹核算主要运用 CROPWAT 模型,CROPWAT 模型的基础为标准彭曼公式,它主要被应用于农业部门用水、虚拟水贸易两大部门的核算。标准彭曼公式(the Penman-Monteith Method)是联合国粮农组织推荐,用于计算参考作物生长期内的蒸发蒸腾量。

### 3. 用水定额法

对京津冀地区工业部门用水、生态环境部门以及生活部门用水核算采用定额法,依据国家规定的单位 GDP 用水定额、单位环境用水定额、居民用水定额,核算该区域年度用水数量。

### 4. 系统分析法

建立系统动力学模型首先须明确研究对象的边界与范围,把研究的对象看作具有复杂结构的、随时间变化的动态系统。通过系统分析绘制出系统流图,构建系统结构、表征系统的动态特征,然后确定量化变量之间的关系,建立系统的结构方程式,最后进行模拟试验,根据以上原理建立了基于虚拟水的京津冀水资源配置系统动力学模型。

### 5. 情景分析法

情景分析法是在推测的基础上,对可能出现的未来情景加以描述,本书从农产品产量增长速度控制角度研究京津冀地区水资源短缺程度、供水结构和用水结构,在设定的四种情景下观察以上三个变量的动态仿真模拟结果,提出适合京津冀地区的有效节水政策实施方案。

## 1.5 创新性研究成果

(1) 核算出京津冀地区水足迹。通过 CROPWAT 模型和用水定额法核算出京津冀地区水足迹总量,各地区、各产业部门内部水足迹配置状况。

(2) 构建出基于水足迹的京津冀地区水资源配置系统动力学模型。将水足迹作为变量引入到系统动力学模型的反馈系统中,把各行业的水足迹作为水资源系统重要的子系统,通过系统动力学模型,模拟京津冀水资源的时空变化规律。

(3) 获得京津冀地区水资源优化配置方案。通过对产业政策进行模拟仿真情景分析,获得水资源优化配置政策的具体调整对象与数量方案。

## 第 2 章

# 文献综述

### 2.1 水资源研究现状

中国是世界上 13 个贫水国家之一,水资源短缺、时空分布不均是中国存在的典型水资源问题。中国人均水资源占有量仅为世界人均水资源占有量的  $1/4$ ,但人均综合用水量却是世界人均用水量的 2 倍。另外,水资源短缺严重,南北方水资源量差距又十分巨大,北方仅为南方的  $1/3$ 。为缓解北方用水压力,截至 2015 年 1 月底,南水北调东、中线一期工程累计耗资达 2 557.8 亿元。水资源问题已经成为中国学术研究重点领域,其研究阶段和研究水平直接影响中国解决水资源问题的能力。

运用中国知网(CNKI)指数功能搜集文献。首先,以“水资源”为关键词,检索出引用频率较高的经典文献和最新文献,以此确定文献的学科分类和研究机构。其次,将近 10 年的中文文献按照出现频次进行排名,归纳出水资源的五个研究热点,它们分别是水资源承载力、水资源安全、水资源生态问题、虚拟水和水足迹。再次,以这五个研究热点为关键词重新进行检索,筛选出获得中国国家自然科学基金和社会科学基金资助、高引用率和最新文献共 146 篇。水资源热点研究领域的理论、方法和研究内容如图 2-1 所示,通过分析评述水资源五个研究热点的理论、评价方法、主要研究内容和研究发展方向,总结出与水资源相关的理论和方法研究在中国的发展趋势。

(1) 中国对水资源承载力研究处于在理论指导下进行实证分析阶段,从“经济-水资源-生态环境”综合体系出发,注重整体性、协调性,评价方法多样化,主流评价方法

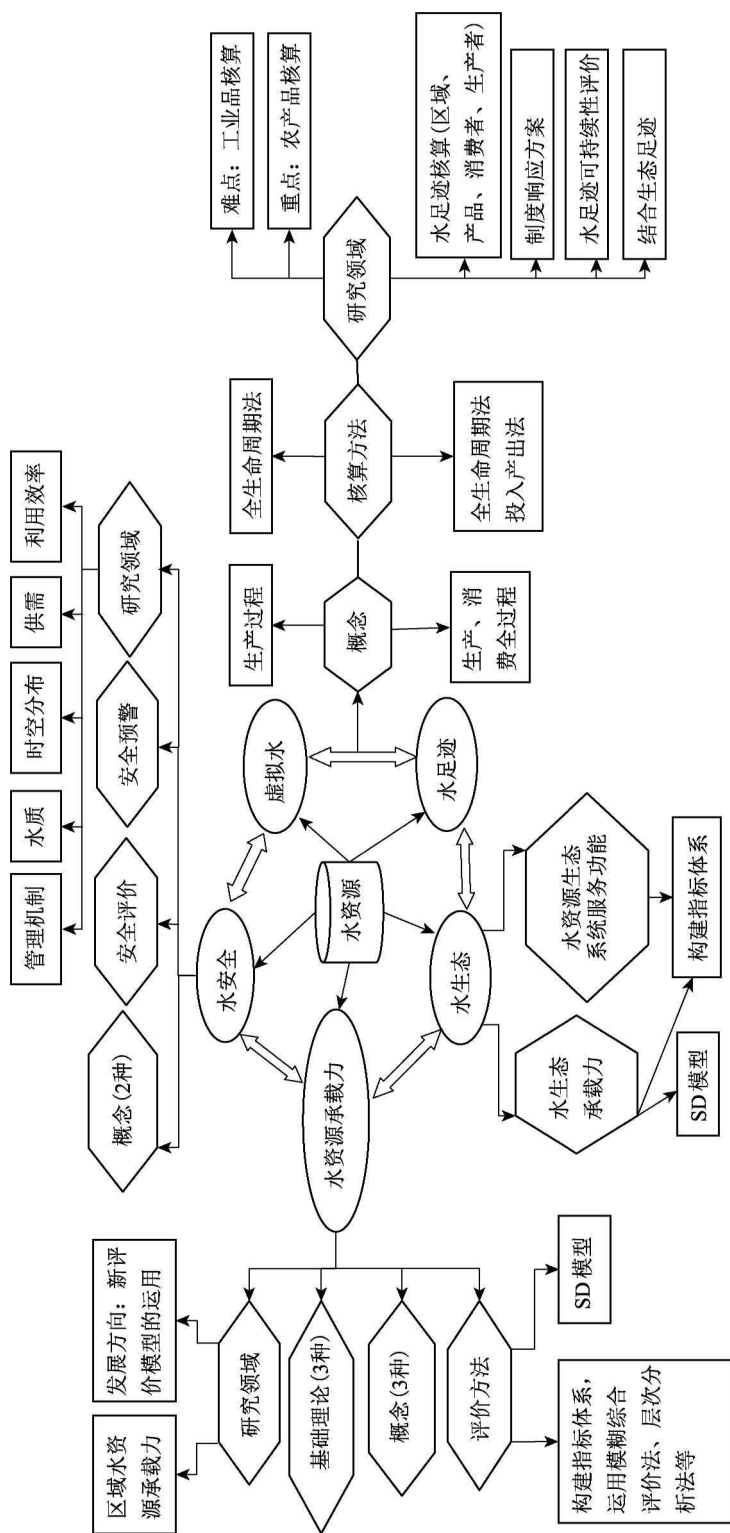


图 2-1 水资源热点研究领域的理论、方法和研究内容

注：图 2-1 包含四个层次，第一层次的核心词为水资源，以  表示；第二个层次是水资源研究的五个热点，以  表示，五个关键词之间相互联系，相互共通；第三个层次描述五个研究热点的理论、概念、评价方法，以  表示；第四个层次是对第三层次研究内容的详细说明，以  表示。

主要有指标体系综合评价法和系统动力学模型,主要包括层次分析法(AHP)、模糊综合评价法(Fuzzy)、可拓物元模型、数据包络模型、灰色评价模型等。指标选取过程中采用的专家打分法是研究中有待科学化的部分。

(2) 通过对水资源安全文献研究可知,水资源安全评价指标体系既考虑了“经济-水资源-生态环境”综合体系,又考虑了水资源供需平衡和水资源配置,能够全面反映影响水资源安全的各方面因素。主流评价方法主要包括层次分析法(AHP)、模糊综合评价法(Fuzzy)、灰色评价模型、压力状态响应模型、熵变加权法等定量计算方法。系统动力学、一般均衡模型(CGE)等方法的运用则有待进一步深化。

(3) 陆地水生态服务功能评价指标体系研究取得了较多成果。指标体系充分考虑“提供产品、调节功能、文化功能和生命支持”四个方面综合因素,能够全面反映陆地水生态服务功能价值。

(4) 虚拟水研究在以下三个领域还有待进一步研究。第一,加强同水资源承载力、水资源安全、水资源战略相关领域的交叉研究,将虚拟水总量、虚拟水贸易差作为影响指标,对区域水资源开发利用状况进行重新评价;第二,虚拟水贸易对区域或者国家产业结构的引导效果方面,一味提倡实施虚拟水“净进口”策略是不科学的,如何在保障出口顺差前提下,引导产业结构调整,降低国际贸易对水资源的消耗和污染,是一个重要课题;第三,由于数据限制,工业品虚拟水贸易是中国目前研究薄弱之处,解决方法在于运用投入产出分析模型,编制区域核算矩阵。

(5) 水足迹研究集中在区域或产品水足迹核算、水足迹强度研究以及与水资源承载力交叉研究等方面。

综上所述,水资源承载力、水资源安全、水生态、虚拟水与水足迹五个方面的研究相互联系,相互交叉。其中,核心是水资源安全,而水资源承载力和水生态环境又是水资源安全中重要的研究内容,虚拟水和水足迹则是通过虚拟水贸易来优化配置水资源以保障水资源安全,虚拟水与水足迹研究相互交叉,二者既有联系又有不同,都是解决地区缺水的有效手段。

京津冀地区水资源承载力、水资源安全、水生态等问题已有成熟研究(封志明, 2006; 谢剑峰, 2009; 王一文, 2015),而对虚拟水和水足迹的研究只集中于农作物方面,以农作物虚拟水总量代表京津冀地区水足迹(曹永强, 2010; 严立冬, 2011; 姜莉, 2011)。目前,尚未有全面、系统的对京津冀农业、工业、生活、生态水足迹总量以及虚拟水贸易的研究,因此,京津冀地区水足迹仍有很大研究空间。

## 2.2 水足迹理论

### 2.2.1 概念辨析

#### 1. 虚拟水

Allan(1990)提出了农业生产中“嵌入水”的概念。“嵌入水”即隐含在农产品中无形的、看不见的水。Allan(1993)正式提出“虚拟水”的概念,即生产农产品所需用水量,1996年又将虚拟水的概念从农业拓展到全部商品和服务中,即生产产品和服务过程中消耗的水资源。虚拟水核算的是产品全生命周期中、产业链上消耗的全部水资源,单位为立方米/千克( $\text{m}^3/\text{kg}$ )或者立方米/吨( $\text{m}^3/\text{t}$ ),与统计年鉴中核算的直接用水有本质区别。

例如,1990年世界平均水平条件下,生产1 t大米虚拟水含量为1 408  $\text{m}^3$ ,生产1 t牛肉虚拟水含量为13 500  $\text{m}^3$ (Zimmer, Renault, 2003)。以牛肉为例,从种植牧草时期算起,牧草种植时期的雨水与灌溉水,牧草制成饲料时的添加水,饲养肉牛时期牲畜饮用水、清洗牛舍用水,运输过程的车辆冷却水,肉食加工过程的添加水,售卖商家的饮用水,全部生产产业链过程中水资源的累计就是牛肉虚拟水(图2-2)。由此可知牛肉中不仅包含直接加工过程中的直接水,还包括了来自产业链上的间接水,其中间接水占据牛肉所需水量的98%,而动物饮用水(1.1%)、加工添加水(0.03%)、服务饮用水(0.8%)等直接水仅占全部用水量的一小部分(Hoekstra, Chapagain, 2012a)。因此,虚拟水与仅统计直接用水相比,产品需水量发生了颠覆性变化。

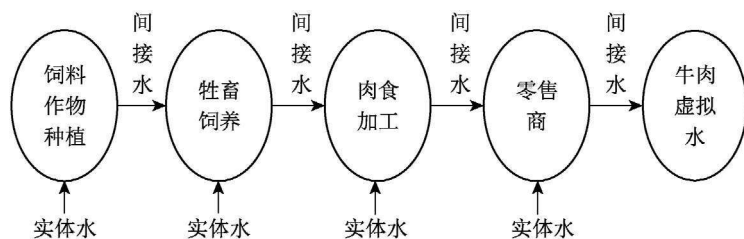


图 2-2 牛肉虚拟水核算

资料来源:根据 Hoekstra(2012)修改。

#### 2. 虚拟水贸易

Allan(1996)提出了“虚拟水贸易”的概念,即虚拟水的国际流动,国际(区域之间)