



区域水资源配置

—主多从对策模型及应用

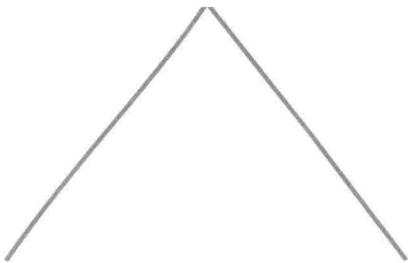


涂 燕 / 著

QUYU SHUIZIYUAN PEIZHI
YIZHUODUOCONG DUICE
MOXING JI YINGYONG



四川大学出版社



区域水资源配置

—主多从对策模型及应用



涂 燕 / 著

QUYU SHUIZIYUAN PEIZHI

YIZHUDUOCONG DUICE

MOXING JLYINGYONG



四川大学出版社



项目策划: 唐 飞
责任编辑: 唐 飞
责任校对: 段悟吾
封面设计: 墨创文化
责任印制: 王 炜

图书在版编目(CIP)数据

区域水资源配置—主多从对策模型及应用 / 涂燕著.
— 成都: 四川大学出版社, 2018.9
ISBN 978-7-5690-2439-5
I. ①区… II. ①涂… III. ①区域资源—水资源管理—研究 IV. ①TV213.4
中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第227253号

书名 区域水资源配置—主多从对策模型及应用

著 者	涂 燕
出 版	四川大学出版社
地 址	成都市一环路南一段24号(610065)
发 行	四川大学出版社
书 号	ISBN 978-7-5690-2439-5
印 刷	四川盛图彩色印刷有限公司
成品尺寸	170mm×240mm
印 张	11.25
字 数	213千字
版 次	2018年9月第1版
印 次	2019年5月第2次印刷
定 价	48.00元

版权所有 ◆ 侵权必究

- ◆ 读者邮购本书, 请与本社发行科联系。
电话: (028) 85408408 / (028) 85401670 /
(028) 86408023 邮政编码: 610065
- ◆ 本社图书如有印装质量问题, 请寄回出版社调换。
- ◆ 网址: <http://press.scu.edu.cn>



四川大学出版社
微信公众号

前 言

水资源作为一种有限的可再生资源，在人类的生存和发展中扮演着举足轻重的角色，在工业发展、农业灌溉以及生态环境维护方面具有不可替代的地位。纵观全球，由于世界人口的急速增长，造成了水资源需求量的大幅度增加、水资源浪费现象愈发严重、水资源过度开发以及水污染现象日益严重等一系列问题，许多国家和地区都处在中高度水资源压力当中。中国人口众多，人均水资源占有量大大低于世界平均水平，同时由于水资源地理分布不均，水资源的供需矛盾非常严重。《中共中央关于制定国民经济和社会发展第十三个五年规划的建议》强调，实行最严格的水资源管理制度，以水定产、以水定城，建设节水型社会。此建议的提出意在优化水资源利用，以实现社会的可持续发展。因此，如何进一步审视和优化水资源配置决策意义重大，备受世界各国政府和学者的广泛关注。在此背景下，本书借鉴已有研究成果，对区域水资源配置决策问题进行了研究。

(1) 分析了区域水资源配置系统多层主体间的决策冲突关系。区域水资源配置系统涉及区域水管理局、子区域及众多用水部门（工业、农业和市政用水）等多层巨量子系统。传统的区域水资源决策鲜有综合考虑层级系统中多层参与主体之间的冲突关系，而由单个参与主体做出决定。比如，区域水资源管理者在各子区域间决定水资源分配以实现经济效益最大化，这样就会出现水资源往能取得高效益的子区域流动，而经济效益较低的子区域无法得到充足的水的现象，从而导致较大的区域发展失衡，引发社会的不稳定性。由此可见，如果继续沿用以往的单层模型描绘区域水资源配置决策问题，就意味着单个参与主体将控制所有的决策变量，未考虑水资源配置系统中的其他参与主体的反应，这显然不符合实际情况。因此，本书采用主从对策的研究方法处理多个决策主体参与的区域水资源配置问题，针对不同的区域水资源配置问题，构建单目标主从对策模型或者多目标主从对策模型，从而实现参与主体间的互利共生。

(2) 研究了水资源配置决策中存在的复杂高阶不确定性。水资源配置管理系统非常复杂,其受到社会、经济、政治和环境等多方面的影响,导致水资源配置决策存在复杂的高阶不确定性,主要存在两类不确定情况:①水资源系统中存在的随机性。从系统的输入与输出关系来看,由于系统环境的变化可能会影响系统功能的变化,这种变化常常表现为随机性。比如,流域降雨径流量的大小会随着降雨的随机变化而变化,从而表现为随机性。从系统结构及内部状态来看,由于水结构的复杂性,使得人们对水文规律的认识和参数的获得常常带有随机性。比如,对水资源配置参数的试验,常常是随机地选择试验位置,这样得到的参数也存在一定的随机性。②水资源系统中存在的模糊性。水资源系统是一个复杂的系统,在系统输入与输出、系统结构与状态等方面,很多有关的概念界限不分明。比如,我们常说的“洪水季节”与“枯水季节”、“稳定流”与“非稳定流”、“含水层”与“隔水层”等,都是界限不分明的模糊概念。然而在某些情况下,很难采用简单的单个模糊或者单个随机的变量对环境进行描述,而需要同时考虑环境中模糊和随机集合的双重不确定情况,本书根据实际情况,对区域水资源配置模型中的某些参数进行双重不确定的描述,包括水流、调水损失率的模糊随机性,水需求、用水效益以及供水能力的随机模糊性,并全面展示了处理这些双重不确定的方法。

(3) 建立了复杂不确定—主多从对策规划模型并设计了相应的求解算法。本书针对不同的区域水资源配置问题,识别各参与主体的决策层次,确定多层结构中上下层的决策目标以及各自的决策变量,并找出上下层是通过什么决策变量和约束条件进行关联与传递的。通过严密的推理和反复的推敲,构建了求解区域水资源配置问题的一主多从对策模型。在建立了相应的模型之后,需要对模型进行求解,通过求解区域水资源配置决策模型找到令所有决策主体满意的最优解,对于指导水资源配置实践会产生重大的影响。因此,本书设计了改进的遗传算法、粒子群算法、人工蜂群算法及其相结合的方法,并根据模型的特点,设计改进了表达方式和更新方式,在实证应用中取得了良好的效果。

本书是在笔者博士论文的基础上修改完成的,在此衷心感谢导师徐玖平教授的悉心指导和无私帮助。徐老师敏锐的学术洞察力、严谨的治学态度以及孜孜不倦的研究精神,使我终身受益。感谢陈爱清、姚黎明、周晓阳、江军、李宗敏博士,他们在本书的写作和出版过程中给予我诸多有益的启发和帮助。

本书的出版得到了国家自然科学基金项目(编号:71801177);教育部人文社科基金项目(编号:18YJC630163);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(编号:2018VI068;2019IVB001)的资助。

在本书的写作过程中，参考了国内外许多同领域学者的著作以及文献，已尽可能地把诸位学者的成果在参考文献列表中标注，但难免挂一漏万，特向从事本领域研究的同行表示诚挚的感谢，因为有他们先导性的研究才催发了本书的诞生。

与此同时，我的亲人在著书期间给予了最大的支持，谨向我的亲人表达深深的谢意！

作 者

2018年9月7日

目 录

第 1 章 引言	(1)
1.1 研究背景	(2)
1.2 研究现状	(8)
1.3 研究内容	(18)
第 2 章 理论基础	(23)
2.1 主从对策	(23)
2.2 智能算法	(34)
第 3 章 缺水控制—主多从对策模型及应用	(43)
3.1 问题描述	(44)
3.2 模型构建	(45)
3.3 Chaos-based aPSO-eGA 算法	(57)
3.4 咸阳市区域水资源配置	(65)
3.5 小结	(72)
第 4 章 供需分析—主多从对策模型及应用	(73)
4.1 问题陈述	(74)
4.2 模型架构	(76)
4.3 IABC 算法	(89)
4.4 四川渠江盆地水资源配置	(95)
4.5 小结	(103)
第 5 章 市场调控—主多从对策模型及应用	(105)
5.1 问题概述	(106)
5.2 优化建模	(108)
5.3 基于交互的 GLN-aPSO 算法	(117)
5.4 江西赣抚平原水资源配置	(124)
5.5 小结	(139)

第 6 章 结 语.....	(140)
6.1 主要工作	(140)
6.2 本书创新	(142)
6.3 后续研究	(144)
附录 A 定理的数学形式证明	(145)
参考文献.....	(149)

第1章 引言

水资源是人类赖以生存的基本要素，也是人类社会经济—生态环境之间协调发展的战略性资源。随着中国人口的持续增长和经济的快速发展，水资源的供需缺口逐渐扩大，水资源生态环境压力日益凸显，水资源已逐步成为中国最为稀缺的自然资源之一。如何合理地分配水资源，达到水资源的高效利用是处理水资源短缺问题的关键。区域水资源配置需要多个子地区进行政治协商，多个用水部门（主要有农业用水、工业用水、居民市政用水以及生态环境用水）共同参与，并且需要水利工程技术的支撑，在综合考虑经济—社会—生态多目标的条件下，进行系统决策。水资源分配非常注重效率性、公平性和持续性。党的十七大报告中指出，在考虑生态环境维持的条件下，进行水资源的初次分配和再分配都要处理好效率性和公平性的关系，再分配的过程需要更加注重公平性。区域水资源配置过程主要分为三个阶段：第一阶段，区域水管理部门根据各子地区经济社会与水资源情况，提出初步的技术分配方案。第二阶段，各子地区、各用水部门对区域水管理部门制定的初步分配方案进行协商，然后将协商结果反馈给区域水管理部门。第三阶段，由区域水管理部门进行评判。如果区域水管理部门接受协商结果，分配方案即得到确定；如果区域水管理部门不接受协商结果，就回到第一阶段。区域水管理部门重新制定分配方案，进行三个阶段的循环，直到确定最终的分配方案。

从长期规划配置的观点来看，开发新的水资源可以满足不断增长的水资源需求，然而，开发过程中产生的巨大社会、经济和环境的影响可能导致这个方法失效，同时不良的水资源配置会导致更加严重的水资源短缺危机。区域水管理部门在分配水资源给各个地区之后，各个子地区为市政、工业以及农业部门提供水。当各部门的水资源需求在一段时间内都处于迅速增长过程中时，水资源的可利用程度是一个尤为重要问题。因为水资源既是人类赖以生存的基本要素，也是人类社会经济与生态环境之间协调发展的战略性资源。

提高水资源的可利用程度的一个重要的举措就是进行水资源的合理配置，

然而进行水资源配置面临着多个方面的问题。一方面,由于人口快速增长和经济发展,在不同的水资源使用者中存在着用水冲突。例如,同区域内的许多旅游景点吸引了越来越多的游客,同时促进了交通、饮食和服务业的发展,从而提高了对水的需求量,当这一部分的水得到满足时,其他的水资源使用者所能获得的水量势必会相应减少,从而不利于其他水资源使用者的发展;同时由于社会—经济—生态环境之间协调发展的要求,水资源的分配需要权衡多个角度的要求。另一方面,水资源管理系统非常复杂,其中包括经济与技术数据的不确定性、系统组成部分的动态变化、水资源的随机性、水资源分配的政策变动,还有资源的有限性、污染容纳能力的限制等。例如,水资源的可利用程度随着河流径流量动态波动,工业与农业的不同生产要求导致对水资源需求的不确定。

综上所述,多种决策层次结构、多个决策目标越来越多地在区域水资源分配中被充分体现,并且除了决策者的多层次性、决策目标的多样性之外,水资源分配问题中的另一个重要特征就是输入信息的不充分。根据信息论,信息的不充分是绝对的,充分是相对的。信息的不充分表现为不确定性,具体表现形式有随机性、模糊性以及其他的多重不确定性等。在现实决策过程中,信息的不确定性既有缺失客观数据所造成的随机性,也有由于决策者主观意识带来的模糊性,因此仅仅考虑某一方面都是有失偏颇的。由此可见,考虑区域水资源配置中的多层次、多目标以及双重不确定环境问题成为必然。

1.1 研究背景

水资源是生态环境的重要组成部分,是一种有限的可再生资源。水资源在人类的生存和发展中扮演着举足轻重的角色,它在工业发展、农业灌溉以及生态环境维护方面具有不可替代的作用。自20世纪中叶以来,由于世界人口的急速增长,造成了水资源需求量的大幅度增加、水资源浪费在现象愈发严重、水资源开发过度以及水污染现象日益加重等一系列问题。如今,全球淡水资源的供需已经存在巨大的缺口,由于区域水资源的时空分配不均,水资源供给矛盾成为水资源日益匮乏地区经济发展的主要瓶颈^[38]。水资源问题已经成为世界各国政府和学者广泛关注的问题。

随着社会经济的发展,越来越多的人已经意识到水资源对于社会发展的价值,现在已经有非常多的国家,无论是水资源相对丰富的国家还是水资源相对贫乏的国家,都在全方位地进行水资源有效管理方面的研究,以解决有限的

水供给和日益增长的水需求之间的矛盾。从水资源的规划历程来看（见图1.1），在历史前期，由于水资源的含有量相较于水需求有相当大的盈余，人们进行水资源的基础设施建设，加强水开发等措施，即“开源”，使得可用水的数量增加，以满足人们日益增长的水需求。但是，由于人们对水需求的持续增长，通过水资源的开发已经达到瓶颈，并且只通过水资源开发容易造成水资源的严重浪费，因此，人们开始寻求另外一种水规划方案，以促进水资源合理分配，进行水资源需求管理，即“节流”，通过这种方式寻求有效的水资源优化配置方案，刺激社会各界形成自发的节水理念，用有限的水资源促进社会、经济和环境健康平稳和持续发展，实现水资源的可持续利用。

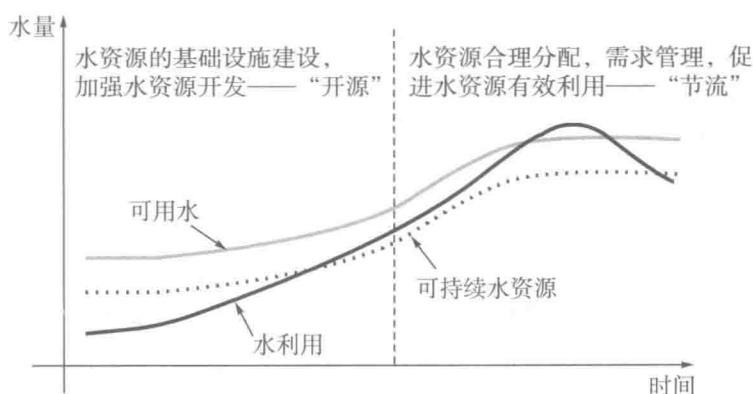


图 1.1 水资源规划的变化历程

中国作为世界上最大的发展中国家，水在经济发展过程中起到了关键性的作用，中国经济快速平稳发展，水需求的需求和消耗非常的巨大。同时，中国也是一个人口超级大国，对于水需求的需求量相较于其他国家要多得多。在现阶段，中国的水资源主要呈现以下几个方面的特征。

1.1.1 水资源缺乏成为经济发展的制约因素

我国现在正在面临越来越严重的水资源匮乏问题^[122]，国民经济的增长、城市化水平的提高、人口总数的增加以及气候变暖等因素使得对水需求的需求量不断增加，然而由于我国特定的地理条件和气候条件、水资源开发建设活动扩大、对水资源保护不力、缺乏对水资源的有效管理、水资源浪费污染严重、缺乏水资源的优化配置策略等，使得水资源的供需缺口越来越大，水资源日益缺乏，水质污染等情况的日益加剧，饮用水不洁导致民众患病的情况时有发生，河流的开发利用率已超过 30%~40% 的国际生态警戒线，不论城乡、地下水

都已经出现严重的超采现象，水资源的匮乏已成为制约我国经济发展的重要因素之一^[3]。

根据 2011 年中国水资源公报，中国的水资源总储量排在巴西、俄罗斯、加拿大、美国、印度尼西亚之后，位居世界第六位。但是由于我国人口基数很大，我国人均水资源量约为 2100 立方米/人，只能达到世界平均水平的 1/4（见图 1.2），相当于美国人均水拥有量的 1/4，印度尼西亚人均水量的 1/6，马来西亚人均水量的 1/10，世界排名 100 多位，属于水资源贫乏的国家。

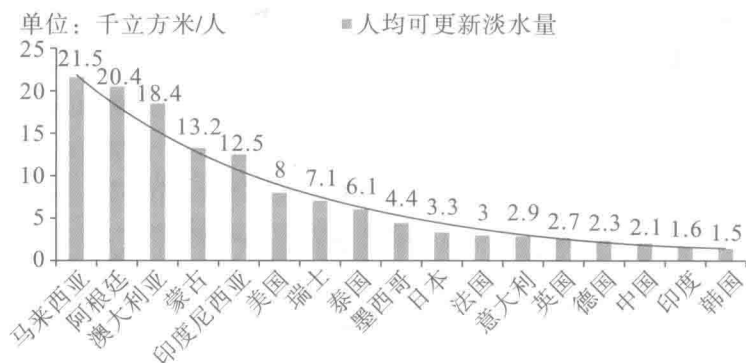


图 1.2 世界人均水资源拥有量

我国人均水资源拥有量小。由于人口基数大，我国人口还在不断地增长。据统计，1978 年中国人口总数为 9.63 亿，到 1998 年人口总数增加到 12.5 亿，净增加总人口数 2.9 亿，此后人口仍不断增加，到 2016 年已超过 13.8 亿。由于水资源的总量常年基本保持不变，加之水污染现象不断加重，可用的水资源总量还有降低的趋势，人口的增多加剧了我国水资源缺乏的问题。下面从水资源的三个主要用水部门进行分析：从农业用水方面看，由于我国人口的增长，人们对于粮食的需求增加，对于粮食的生产就有更高的要求。据统计，1978 年，我国的粮食产量约为 3.0 亿吨，2011 年这个数字达到 6.16 亿吨，增长幅度高达 105.3%。由于农业灌溉用水本身需求量高，农业用水的经济效益相对其他产业较低，所以会发生其他产业挤占农业用水的情况，加之农业用水需求量的增加，因此农业缺水情况一直比较严重，这就限制了我国农业生产的发展。从城市居民用水方面看，我国城市化进程在改革开放之后得到了飞速的发展，1978 年我国城市化水平只有 17.92%，2016 年我国城市化水平约为 1978 年的 3.2 倍，达到 57.4%。因此，城市居民用水的需求也随着城市化进程有了大幅度的增长。2011 年我国城市的全年总供水量为 580.7 亿立方米，较 1990 年的 382.3 亿立方米增长了 51.9%。从这组数据可以看出，城市人口

的增长幅度比全国城市总供水量的增长幅度大得多，说明城市居民水资源的人均拥有量也在逐年减少。水资源的缺乏无疑越来越影响着城市居民的用水情况。从工业用水方面看，20 世纪以来，我国工业用水量一直在不断增加，2000 年我国工业用水量为 1139.1 亿立方米，2016 年增加到 1380.6 亿立方米，增长了 21.2%。由于工业生产在我国经济发展中扮演着重要的角色，因此，若工业用水缺乏，将严重影响我国经济的发展。综上可知，人口的增加加重了水资源的缺乏，而水资源缺乏严重影响着农业用水、城市居民用水以及工业用水情况，成为制约我国可持续发展的因素。

1.1.2 水资源南北分布极不平衡

我国幅员辽阔，各个地区的降水量具有较大的差别，地表水和地下水分布不均衡；同时，由于各地区发展情况不一，水利工程水平不同，不同地区的水土保持能力差距很大。各省水资源的分布也很不平衡^[21,31]。从水资源人均拥有量方面看，在经济欠发达、人口较稀少的地区，水资源人均拥有量相对较多，西藏地区水资源人均拥有量为 15.3 万立方米/人，青海地区为 1.2 万立方米/人；而在一些经济发达、人口密集的地区，比如北京、天津、河北、上海、山东等地区，水资源人均拥有量非常少，这些地区水资源人均拥有量均低于 500 立方米/人，其中天津仅为 103.3 立方米/人。按照国际公认的标准，水资源缺乏等级可见表 1.1。由此可知，北京、天津、河北、上海、山东等地区都低于极度缺水线，属于极度缺水地区。

表 1.1 缺水等级

序号	1	2	3	4
人均水资源量	<3000 立方米/人	<2000 立方米/人	<1000 立方米/人	<500 立方米/人
缺水等级	轻度缺水	中度缺水	严重缺水	极度缺水

我国水资源分布极不均衡。水利部 2016 年水资源公报显示，全国北方 6 区 2016 年水资源总量为 5592.7 亿立方米，占全国水资源总量的 17.2%，但总用水量却占全国的 45.5%，而南方 4 区 2011 年水资源总量为 26873.7 亿立方米，占全国水资源总量的 82.8%，但总用水量只占全国的 54.5%（见表 1.2）。

表 1.2 2016 年北方 6 区及南方 4 区的水资源分布

水资源一级区	地表水资源量 (亿立方米)	地下水资源量 (亿立方米)	地下水与地表水不重复量 (亿立方米)	水资源总量 (亿立方米)	比例 (%)	总用水量 (亿立方米)	比例 (%)
全国	31273.9	8854.8	1192.5	32466.4	100	6040.2	100
北方 6 区	4577.3	2704.4	1015.4	5592.7	17.2	2748.9	45.5
松花江区	1278.8	497.0	205.2	1484.0	4.6	500.7	8.3
辽河区	385.3	212.0	104.4	489.8	1.5	197.3	3.3
海河区	204.0	259.9	183.9	387.9	1.2	363.1	6.0
黄河区	481.0	354.9	120.7	601.8	1.9	390.4	6.5
淮河区	732.6	428.2	277.0	1009.5	3.1	620.4	10.3
西北诸河区	1495.6	952.4	124.2	1619.7	5.0	677.0	11.2
南方 4 区	26696.6	6150.4	177.1	26873.7	82.8	3291.3	54.5
长江区	11796.7	2706.5	150.3	11947.1	36.8	2038.6	33.8
其中：太湖流域	404.4	68.0	34.8	439.2	1.4	335.8	5.6
东南诸河区	3102.2	636.1	11.3	3113.4	9.6	312.2	5.2
珠江区	5913.4	1394.7	15.5	5928.9	18.3	838.1	13.9
西南诸河区	5884.3	1413.1	0.0	5884.3	18.1	102.4	1.7

数据来源：2016 年水资源公报。

1.1.3 水资源污染现象仍然严重

根据我国环境保护局的统计，我国 1/3 的水体已经不能直接使用，重点流域 40% 以上的水质已经不达标，由于工业生产用水以及城市居民用水污水的大量排放，流经城市的河流已经普遍受到了污染，近海水域也接受了许多未经处理而排放的污水，因此经常发生赤潮。除了城市地区，农村的水污染情况也不容乐观，有许多农产品受到了污染，我国有相当一部分农村人口无法得到合格的饮用水。

另据全国人大常委会的执法调查，全国七大水系中劣五类水体占 30% 左右，这意味着水体已经失去使用功能，其中污染最严重的淮河，五类水已占 60% 以上。另有专家对 180 个城市进行的调查分析，全国地下水已经被普遍污染。水污染问题加剧，是因为高消耗、高污染行业盲目扩张，污染处理不力，

以及执法不严。2014年,全国废水排放量716.2亿吨,其中,工业废水排放量205.3亿吨,占废水排放总量的28.7%;生活污水排放量510.3亿吨,占废水排放总量的71.3%(见表1.3)。

表 1.3 2014 年全国废水及其主要污染物排放情况

类别	排放源				
	合计	工业源	农业源	城镇生活源	集中式污染治理设施
废水/亿吨	716.2	205.3	—	510.3	0.6
化学需氧量/亿吨	2294.6	311.3	1102.4	864.4	16.5
氨氮/亿吨	238.6	23.2	75.6	138.1	1.7

注:①农业源包括种植业、水产养殖业和畜禽养殖业排放的污染物。

②集中式污染治理设施排放量指生活垃圾处理厂和危险废物(医疗废物)集中处理厂垃圾渗滤液/废水及其污染物的排放量。

2011年,松花江区、辽河区、海河区、黄河区、淮河区、长江区、珠江区、东南诸河区、西南诸河区和西北诸河区十大流域废水排放量分别为25.9亿吨、27.9亿吨、67.1亿吨、40.9亿吨、90.3亿吨、213.9亿吨、110.9亿吨、64.1亿吨、6.1亿吨和12.2亿吨,其中工业源排放与生活用水排放的比例可见图1.3。由图1.3可知,各地区生活用水排放的比例普遍较工业源排放污水比例要高。其中,工业废水排放量、城镇生活污水量排放居第一位的均为长江区,分别占十大流域片工业废水排放量、城镇生活污水量的30.7%、33.4%。

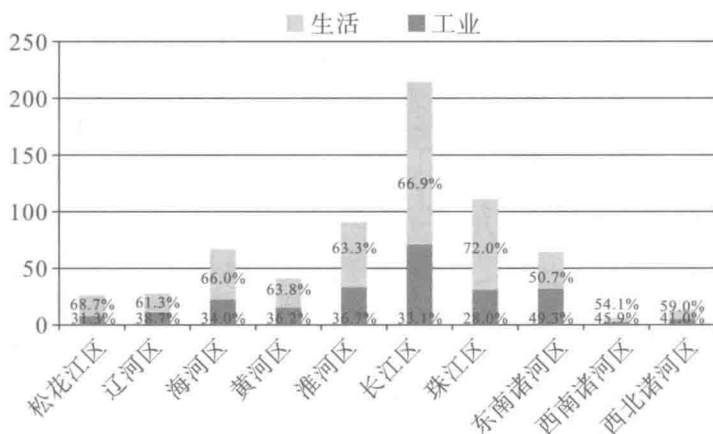


图 1.3 十大流域工业废水排放与生活污水排放比例

由以上内容可知,水资源污染对于生产和生活各个方面都产生了影响,造成了水质性缺水的问题,因此,我国水资源配置需要同时考虑水量性缺水和水水质性缺水两个方面,这增加了水资源配置的难度。本书旨在通过建立合理有效的水资源配置方案,以尽量减小水量性缺水的问题,同时在配置过程中考虑水污染控制,以减小水污染造成的水质性缺水情况。

1.2 研究现状

由于本书主要研究区域水资源配置—主多从对策问题,而一主多从对策问题是类主从对策问题,因此,下面分别对区域水资源管理以及主从对策问题两个部分进行分析。通过对现有的文献汇总分析,对这两方面的研究现状以及研究热点进行总结,分析文献时,采用基于 NotExpress 与 NodeXL 软件的系统化文献研究方法(NN-SRM)对相关文献进行梳理。该文献研究方法分析流程如图 1.4 所示。

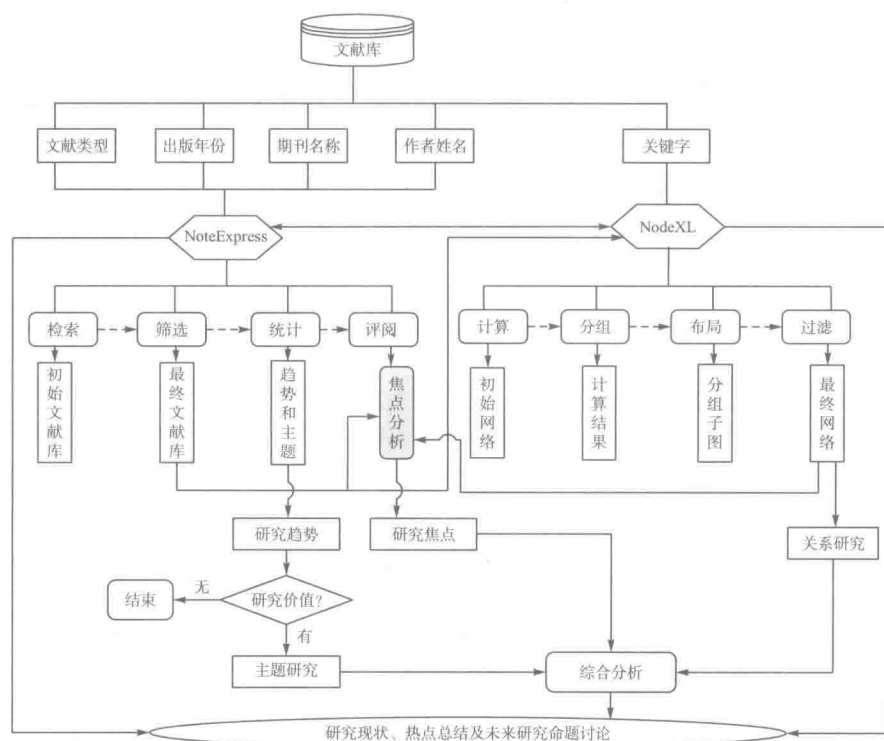


图 1.4 基于 NoteExpress 与 NodeXL 软件的系统化文献研究方法

1.2.1 水资源配置

水资源的合理配置在水资源的可持续利用与人类社会的协调发展中起着至关重要的作用。近一个世纪以来,随着水利工程技术的提高以及社会经济的不断发展,水资源管理呈现合理化、多样化以及集约化的态势,这种发展变化在我国的农业灌溉管理方面的表现尤为明显。随着日益增加的水利工程,水资源配置的基础设施建设以及管理手段得到了进一步完善。与此同时,我国在水资源系统优化调度和分配、水环境保护战略以及节水措施制定与完善等方面都取得了很大的进步,这些改变使得水资源的合理配置成为可能。水资源合理配置问题对于解决水缺乏危机的关键性和重要性吸引着众多学者为之不断探索。

对水资源合理配置的研究源于20世纪40年代,Masse首先提出了水库优化调度问题。之后水资源配置研究中引入了系统分析理论和优化技术,并且采用计算机技术进行计算求解,使得水资源系统模拟模型技术得到了广泛的研究以及应用。由于水资源系统中包含各类社会政治等非技术性因素,水资源决策系统非常复杂,决策者个人偏好等原因增加了水资源系统的复杂性。因此,采用简单的优化技术并不能很好地把握全局,得到预期效果,而水资源的模拟模型技术可以详细地描述水资源系统内部非常复杂的关系,通过采用计算机技术进行有效的计算与分析,最终获得满意的结果,为水资源系统的实际调度运作以及水资源合理规划提供科学依据。

水资源的模拟模型的研究起始于1953年,美国陆军工程师兵团(USACE)设计了水资源模拟模型以解决美国密苏里河流域6座水库的运行调度问题^[107],随后采用数学模型的方法描述水资源系统问题更为普遍。例如,1973年,Cohon和Marks对水资源多目标问题进行了研究^[70];1974年,Mulvihill和Dracup针对洛杉矶的水资源系统建立了合作运营的城市用水与污水系统的数学模型^[173];1982年,针对渥太华(Ottawa)流域及五大湖(Great Lakes)系统的水资源规划和调度问题,加拿大内陆水中心(CCIW)设计了一个线性规划网络流算法对其进行了解决;1983年,Sheer采用优化和模拟相结合的技术建立城市配水系统,将其运用到了华盛顿特区中。

随着对水资源配置研究的不断发展,自20世纪70年代末以来,西方国家就开始对水资源配置过程中,社会—经济—环境的协调发展予以了密切关注。我国对于水资源合理配置问题的研究起步较晚,但是发展相对迅速。我国对于水资源分配的研究始于20世纪60年代,最早进行了水库优化调度的研究。经过近20年的发展,以华士乾教授为首的研究团队利用系统工程的方法对北京