

# 基于可持续发展的城市 水循环系统规划与评价研究

Research on the Planning and Evaluation of City Water Cycle  
System Based on Sustainable Development

徐 瑾 著

天津出版传媒集团

 天津科学技术出版社



## 作者简介

**徐瑾**，1980年9月生，汉族，原籍安徽定远。天津大学管理科学与工程专业博士研究生毕业，获管理学博士学位，2006年至今任天津理工大学管理学院教师，期间曾作为访问学者赴新加坡国立大学研修。

主要从事可持续环境战略规划与发展、水资源系统优化管理与决策方面的研究，近年主持国家自然科学基金项目“基于可持续发展的城市水安全-水循环耦联系统综合评价及管理规划研究”、教育部人文社科基金项目“基于PSO-BP与NSGA-II的城市水循环系统可持续发展规划研究”、国家科技支撑计划“原有工业建筑功能提升与生态改造关键技术与示范子课题”等10余项科研项目；在国内外杂志发表高水平论文10余篇。2012年获天津市“131”创新人才称号。

# 基于可持续发展的城市水循环 系统规划与评价研究

Research on the Planning and Evaluation of City Water Cycle System  
Based on Sustainable Development

徐 瑾 著

天津出版传媒集团

---

 天津科学技术出版社

**图书在版编目 (CIP) 数据**

基于可持续发展的城市水循环系统规划与评价研究 /  
徐瑾著. —天津: 天津科学技术出版社, 2013. 4  
ISBN 978-7-5308-7830-9

I. ①基… II. ①徐… III. ①城市用水—水循环系统  
—系统规划—研究 IV. ①TU991. 31

中国版本图书馆CIP数据核字 (2013) 第065225号

---

责任编辑: 房 芳  
编辑助理: 杜宇琪  
责任印制: 兰 毅

---

天津出版传媒集团

天津科学技术出版社出版

出版人: 蔡 颢

天津市西康路 35 号 邮编 300051

电话 (022) 23332397

网址: [www.tjkjcs.com.cn](http://www.tjkjcs.com.cn)

新华书店经销

天津午阳印刷有限公司印刷

---

开本 787×1092 1/16 印张 9.5 字数 140 000

2013 年 4 月 第 1 版第 1 次印刷

定价: 45.00 元

# 前 言

随着城市规模的不断扩大，水资源短缺问题日趋严重，水环境质量的恶化制约了城市的发展和人民生活水平的提高。应以可持续发展的战略高度对城市水循环系统进行科学的建设，合理配置各种水资源，并采用适宜的评价方法对城市水资源可持续利用系统进行定量分析和评价。

本书以城市水循环系统为研究对象，探讨了在可持续发展理论原则下的城市水循环系统发展规划与评价体系研究的若干问题。在系统分析城市水资源需求结构与变化特点的基础上，科学的预测城市需水量，运用价值工程理论制定了城市水循环系统的可持续发展性的评价指标体系，构建了城市水循环系统的不确定规划模型。

本书针对城市的用水结构特点和影响因素提出了对城市需水量进行预测的综合性方法。采用规范指标法、季节指数平滑法以及 PSO-BP 算法等方法对城市的综合生活需水量进行预测，采用万元产值耗水量指标法和单位用地耗水量法等方法对工业需水量进行预测，并对各种预测方法进行了对比分析，为城市水循环系统规划提供了依据。

本书构建了城市水循环系统可持续发展性评价指标体系，并基于城市需水量随机变化的特性，构建了城市水循环系统的不确定规划模型。依据可持续发展原理的规划原则，在规划模型中综合考虑经济、社会与环境的协调性，构建了多目标规划模型。采用蒙特卡罗方法模拟模型中的不确定变量，并将其嵌入改进的非支配排序遗传算法从而对模型进行求解。

本书以华北某沿海城市的水循环系统为实际案例，综合运用相关的理论知识与研究成果，对该规划城市的水循环系统进行了可持续发展性评价，并通过构建与求解规划模型，为该城市的水循环系统的科学建设提供有效的决策支持。

本课题是国家自然科学基金资助项目：基于可持续发展的城市水安全—水循环耦联系统综合评价及管理规划研究（项目编号：71203158）和教育部人文社科基金资助项目：基于 PSO-BP 与 NSGA-II 的城市水循环系统可持续发展规划研究（项目编号：12YJC630248）的阶段性成果和重要组成部分。

# 目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 引言	1
1.1.1 城市水循环简介	1
1.1.2 研究背景	3
1.1.3 研究意义	6
1.2 国内外研究现状	7
1.2.1 国外城市水循环系统研究综述	7
1.2.2 国内城市水循环系统研究现状与不足	10
1.3 研究内容	12
1.4 创新点	13
第 2 章 城市水循环系统研究的相关理论	15
2.1 基础理论	15
2.1.1 可持续发展理论	15
2.1.2 水循环理论	20
2.2 城市水循环系统可持续发展评价体系的相关理论	23
2.2.1 价值工程理论	23
2.2.2 综合评价方法综述	26
2.3 不确定规划的相关理论	33
2.3.1 不确定性理论基础	33
2.3.2 不确定规划模型综述	34
2.3.3 不确定规划求解的算法概述	36
2.4 小结	38

第 3 章 城市水循环系统需水量预测研究	40
3.1 研究现状	40
3.1.1 国内外需水量预测研究进展	40
3.1.2 需水量分类	42
3.1.3 需水量预测方法分析	42
3.2 综合生活需水量预测方法	44
3.2.1 PSO-BP 算法	44
3.2.2 规范指标法与统计资料分析法	48
3.2.3 季节指数平滑法	48
3.3 工业建筑仓储需水量预测方法	50
3.4 市政杂用需水量和其他需水量预测方法	51
3.5 案例分析	52
3.5.1 华北某沿海城市水循环系统概述	52
3.5.2 城市用水结点划分	53
3.5.3 需水量预测	53
3.5.4 水资源供需水量综合分析	62
3.6 小结	64
第 4 章 城市水循环系统可持续发展评价指标体系及方法研究	66
4.1 研究现状	66
4.2 城市水循环系统可持续发展评价指标体系的构建	67
4.2.1 评价指标的设置与筛选原则	67
4.2.2 评价指标体系的构建	70
4.3 城市水循环系统可持续发展评价方法研究	74
4.3.1 常用评价方法的比较研究	74
4.3.2 评价方法的选择	76
4.4 基于 FANP 的城市水循环系统可持续发展价值工程评价模型	77
4.4.1 FANP	77
4.4.2 FANP 评价模型原理	78
4.4.3 FANP 评价步骤	79

4.5 案例分析	84
4.5.1 规划城市水循环系统可持续发展评价指标体系	85
4.5.2 规划城市水循环系统可持续发展 FANP 模型	86
4.5.3 构造判断矩阵进行一致性检验	87
4.5.4 计算超矩阵、加权超矩阵和极限超矩阵	88
4.5.5 规划城市水循环系统可持续发展 FANP 评价值的计算	91
4.5.6 规划城市水循环系统可持续发展 FANP 评价结果及分析	92
4.5.7 政策建议	94
4.6 小结	95
<b>第 5 章 城市水循环系统的不确定规划研究</b>	<b>97</b>
5.1 研究现状	97
5.2 城市水循环系统不确定规划模型构建	98
5.2.1 规划原则	98
5.2.2 目标函数构建	99
5.2.3 约束条件构建	101
5.2.4 不确定规划模型构建	101
5.3 基于非支配排序遗传算法求解多目标规划模型	104
5.3.1 多目标规划模型的 Pareto 最优解	104
5.3.2 非支配排序遗传算法	105
5.3.3 NSGA-II 算法原理	105
5.3.4 NSGA-II 算法步骤	107
5.4 不确定规划求解中的蒙特卡罗模拟	108
5.4.1 蒙特卡罗模拟的原理	109
5.4.2 蒙特卡罗模拟的步骤	109
5.5 不确定规划模型求解	110
5.5.1 基于蒙特卡罗方法模拟城市需水量	110
5.5.2 嵌入蒙特卡罗模拟的非支配排序遗传算法	111
5.6 案例分析	113
5.6.1 水循环系统不确定规划模型构建	114

5.6.2 模型参数的确定·····	116
5.6.3 模型的结果与分析·····	119
5.7 小结·····	121
第 6 章 结论与展望·····	123
参考文献·····	126
附录·····	135

# 第1章 绪论

## 1.1 引言

水是一种极其重要的资源，水资源是人类社会无法或缺的、赖以生存的一切社会生活和经济活动最基础最重要的物质保证。在人类文明不断发展的历史进程中一直作为农业发展的灵魂、工业进步的动力，同时也是城市逐渐形成和不断发展的重要条件。城市是世界上一切人类生活和所有社会活动的载体，同时也是经济发展的中心。城市作为人类社会发展的中心对水资源的需求量大，并且对水质的要求很高。

随着社会经济的发展，城市规模的不断扩大，城市所在地区的水环境已经发生了翻天覆地的变化：供给城市及城市内人类社会生活用水水系不断减少，河流水体富营养化进一步加重，水资源、水环境质量日益恶化，水生态、水循环系统日趋衰退，城市整体人居环境显著下降。不可否认，城市化进程的加快、城市的飞速发展使经济变得更加繁荣，也见证了人类改变大自然、创造美好生活的成就。可是一旦被经济表面的繁荣所蒙蔽，对水环境、水循环系统恶化带来的一系列负效果不加以重视，其后果将是在很大程度上阻碍城市发展的脚步。如果一旦发生水生态、水环境和水资源危机，城市的繁荣和发展将不复存在，城市众多居民最基本的生存问题都将难以得到保障，所以城市的管理者应当高度重视城市的水问题。因此，在重视社会进步、经济高速发展的同时，也应该将人口、资源和环境相和谐的可可持续发展战略作为城市发展的指导原则，将水资源、水环境、水循环问题作为城市可持续发展的首要问题来考虑。

### 1.1.1 城市水循环简介

城市水循环分为自然、人工、经济和社会水循环四类。图 1-1 为城市水循环系统示意图。

自然水循环是指将大气和地下水与城市水通过蒸发、蒸腾、降水、地面径流、土壤渗透和补给运动联系起来的过程<sup>[1]</sup>。自然水循环主要考虑在水循环大系统中运用自然因素，通常是相对水环境恢复而言的。

人工水循环是指通过部分水量的消耗、污水的产生与处理等手段来达到水的循环利用。人工水循环是由城市的给水、用水、排水和处理等部分组成的。在人工水循环系统中，城市用水部分蒸发合成大气水，部分经过利用后变为污水。社会活动产生的污水经过环境工程和生态工程的处理后，部分又作为回用水资源。其余部分则渗滤进入地下成为地下水资源或者通过蒸发降水过程又成为城市水资源，剩余部分排入水体中。水资源的上述变化和发展过程形成城市人工水循环系统。人工水循环对水资源、水环境的贡献主要表现在污水深度处理和回水循环利用方面<sup>[2]</sup>。

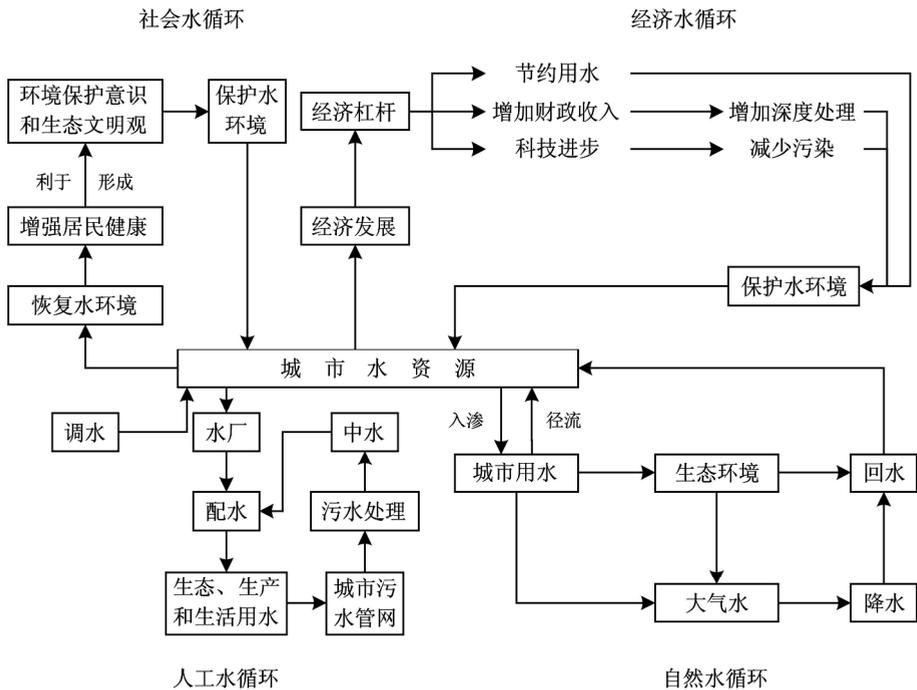


图 1-1 城市水循环大系统总图

社会水循环是指在尊重水的自然运动和自然变化规律的前提下，适度合理地使用水资源。将废水经过再生净化加以回用，使上游水域的用水循环不影响下游

水域的水体功能。社会水循环通过增强人在水资源、水环境保护方面的意识,促进水环境恢复与保护、水循环系统的完善与发展。从而使已经恶化或循环利用效用低下的城市水循环系统逐步地良性运转,使城市水资源在一定程度上有所增加,从而进一步促使的水环境良性循环和水资源可持续利用。从根本上说社会水循环是人工水循环和自然水循环建立的保障。在社会水循环中,起到净化城市污水,制造再生水的作用污水处理厂是维持水社会循环得以健康发展的关键所在<sup>[3][4]</sup>。

经济水循环是指通过产业结构调整及一系列经济杠杆,从而起到规范社会取水量、促进水污染控制技术的发展和进步。以经济杠杆等方法增强自然水循环,恢复水环境,以产业调整的手段增加城市的水资源以达到经济水循环的良性发展,最终促进整体社会和经济的可持续发展。

### 1.1.2 研究背景

城市水循环系统由城市水资源环境、水源、供水、用水、节水、排水、水处理与回用等部分构成,从城市自然水循环系统和经济社会用水系统的联系与交互作用上各部分之间既有有机联系又互为消长。其核心思想都是要促进城市水的健康循环。但目前我国大多数城市水循环系统中都存在水量短缺或是水循环系统可持续运行效率低下,或者是缺乏科学有效地可持续发展规划及管理等问题。以下几方面的问题仍亟待解决:

#### 1. 城市需水量需要进行准确与可靠的预测

随着世界人口的快速膨胀和经济的飞速发展,城市水资源短缺问题已成为一个世界性问题,也成为水资源、水环境研究领域的热点问题。2002年8月28日,在南非举行的可持续发展世界首脑会议上“世界性水危机”被列为人类未来10年面临的最严重的挑战之一<sup>[5]</sup>。我国水资源短缺问题则更为严重,水资源总量已从2006年的25 330亿 $\text{m}^3$ ,下降到2010年的24 130亿 $\text{m}^3$ 。这个资源总量用人口数字一摊,仅在230 $\text{m}^3$ 上下,列世界第88位,并被列为13个贫水国家之一。我国目前有18个省(自治区、直辖市)人均水资源量低于联合国可持续发展委员会审议的人均占有水资源量2 000 $\text{m}^3$ ,其中有10个省(自治区、直辖市)低于1 000 $\text{m}^3$ 最低限。世界人均水资源量为12 900 $\text{m}^3$ ,我国不到世界人均水资源量的四分之一,只是美国的五分之一、俄罗斯的七分之一。我国660个城市中有400多个城市供水不足(其中100多个城市严重缺水),2 000多万人口饮水困难,年缺水

量约 60 亿  $\text{m}^3$ 。水资源的短缺直接影响到我国国民经济的可持续发展。

与水资源匮乏同时出现的是对水资源需求的不断增长。近几十年来随着我国城市化进程的逐步加快，城市人口的增加、城市范围的扩大、工业生产总值的增长以及人民生活水平的不断改善使得城市需水量不断增长，城市水循环系统服务范围快速扩大，系统的复杂性不断提高，这对城市需水量预测方法的研究提出了新的要求。

城市需水量预测是城市水循环系统规划等工作的基础与前提。在城市水循环系统规划研究过程中，一般包含以下几个步骤：规划年限内的城市需水量预测；城市水循环系统规划模型的建立；规划模型的求解与决策。无论采用何种方法建立规划模型并进行求解，城市的需水量预测环节都是后两个步骤的基础与前提。需水量预测的准确性直接关系到规划模型的有效性和模型结果的可靠性。如果需水量的预测值与实际值存在较大的偏差，则会导致规划模型结果与决策的偏差。只有在对需水量进行可靠预测的前提下，才能进一步探讨供水系统中相关的系统运行、水资源分配、优化调度以及数字化管理等具体问题。因此，需水量预测在城市水循环系统规划建设中是一项重要的基础工作。

由于需水量预测的重要性，用于进行预测的相关的理论方法的研究也逐步受到重视。然而现有的用于实际生产和规划建设过程中的需水量预测方法多数建立在经验方法基础上，具有一定的主观性和局限性。研究人员对需水量预测进行了很多相关的研究，但真正能够应用于实际生产与系统规划的方法则较少，如何同时保证预测方法得到结果的准确性与预测方法的实用性，是一个需要进一步探讨的问题。城市中影响需水量的因素很多，如自然条件、经济发展水平等。传统的基于时间序列方法的预测模型没有考虑需水量相关因素的影响，也存在一定的局限性。

## 2. 城市水循环系统的可持续发展需要有效的评价方法

可持续发展战略是我国的长期战略，其核心是以人口、资源、环境相互协调为支撑的社会经济持续、稳定、健康发展。对资源、环境的不合理开发将导致人类赖以生存和发展的自然环境或生态系统结构和功能的退化和失衡<sup>[6]</sup>。生态环境是人类生存、社会经济发展的基本物质基础，要保持社会经济的可持续发展，就要将社会经济的方法控制在生态系统的承载力范围之内，合理利用自然资源，使

人口、资源、环境三者相互协调统一。

要保持社会经济的可持续发展,就需要制定一套全面而有效的可持续发展评价指标体系并建立相应的评价方法,从而评估系统的可持续发展水平或能力<sup>[7]</sup>。可持续发展的评价涉及人类的社会活动、经济增长以及自然资源和环境保护,自然环境的可持续性为系统持续发展的基础条件,经济发展的可持续性为系统持续发展提供动力与保障,社会环境的可持续性是社会进步的最终目标。可持续发展评价指标体系需要能够反应他们彼此之间相互影响,互相制约,互相适应的关系。城市水循环系统是一个复杂系统,要确定城市人口、水资源、水环境、经济与社会系统的相互关系和综合发展水平,必须借助科学合理、切实可行的评价方法。

### 3. 城市水循环系统需要进行合理的规划

我国城市水循环系统的规划建设水平还有待进一步提高。当前我国水资源利用效率偏低。据统计,我国2004年万元GDP用水量 $399\text{ m}^3$ ,是发达国家的5~10倍;万元工业增加值用水量 $196\text{ m}^3$ 约为发达国家的5倍(发达国家一般在 $50\text{ m}^3$ 以下);工业用水重复利用率约为60%~65%,发达国家一般在80%~85%以上<sup>[8][9]</sup>。农业灌溉用水的利用率仅为43%,低于发达国家的70%~80%;节水灌溉面积占有效灌溉面积的比例为35%,发达国家一般为80%以上,灌溉水有效利用系数为0.4~0.5,一些发达国家用水效率能达到0.7~0.8之间。另一方面,我国城镇综合生活用水方面存在严重的浪费问题,并且由于严重缺乏节水器具和设施导致用水效率偏低。我国城市供水漏失率平均为9.1%,其中40%的特大城市供水漏失率在12%以上,一些城市的管网漏损率平均达21.5%。更由于严重的供水管网漏损,全国城市供水年漏损量近100亿 $\text{m}^3$ <sup>[10]</sup>。

当前我国大多数城市水循环系统中污水处理与再生水回用环节的规划建设还较为薄弱。据2004年统计,全国城市污水处理率仅为45%,全国几百座地级市中,还有很多城市的污水处理率为零。一些城市污水处理率和污水处理达标排放率均较低,仅有为数不多的城市开展了中水利用<sup>[4]</sup>。城市水循环系统是一个有机的整体,系统中取水、供水、用水、排水及相应的水处理、中水利用、节水等环节应是相辅相成的,任何环节的缺失或忽视都会直接影响整体水循环的健全性。

因缺乏水资源的统一配置与规划,目前我国还有许多城市大量超采地下水,使局部地区形成地下漏斗区,造成地面沉降和海水入侵等问题。我国有近20多个

省（自治区、直辖市）存在不同程度的地下水超采问题，主要分布在黄海和淮河流域。目前已形成区域地下水漏斗区 100 多个，漏斗区面积达 19 万 km<sup>2</sup>。超采地下水直接造成了部分城市的区域性地下水位下降，甚至危及供水安全和饮用水安全，还诱发了地面沉降、地面塌陷、海水入侵、土壤盐碱化等生态环境问题。

这些问题的解决除了依靠各行业提高用水效率，强化节水措施之外，更重要的是需要将城市的各个用水环节纳入城市水循环系统，对整个系统进行合理的规划，对水资源进行统一的综合优化配置。

### 1.1.3 研究意义

我国城市的持续高速发展对水循环系统的规划建设提出了更高的要求，提供优质、安全、可靠的水资源保障显得尤为重要。为此，应从战略高度对城市水循环系统进行科学的建设、科学预测需水量、综合配置各种水资源、优化水循环系统布局，对城市水循环系统及其中的各个环节进行深入研究，为城市水资源管理提供决策支持。

城市化对水系统的负面影响可以通过科学合理的水循环系统规划部分降低或消除。城市水系统规划对城市的经济发展和社会稳定具有积极重要的意义。居民饮用水安全，工业用水的保障，防洪和雨水的利用，废水污染的控制等等，每一项都事关国计民生，城市水系统的规划可谓责任重大，同时为城市水循环系统的和谐与可持续发展提供保障。

水资源作为城市经济和环境资源协调发展的重要支柱，必须以可持续发展理论为基础，在规划建设过程中将资源利用、经济增长、环境保护和社会发展协调一致，从水循环系统的各个层次上审视和规划整个系统中的各个环节，从而为社会经济环境可持续发展提供保障。

传统城市的水资源利用以发展经济为主，虽然考虑了环境保护和污染的防治问题，但对环境影响的重视仅以可接受的程度为限。传统城市的水资源利用并不强调经济环境的协调发展，尤其是经济持续发展能力增强，以及协调型循环利用系统的建立。可持续发展理论强调资源、经济、环境和社会发展必须协调一致，既满足当代人的需求又不损害后代人满足其需求，已达到人类社会的永续和谐发展。作为城市经济和环境资源协调发展重要支柱的水资源，也必须以可持续发展理论为基础。而城市水资源的可持续利用评价就成为了城市水资源可持续利用理

论和实现城市水资源可持续良性循环的联系和纽带。

为了给城市水资源可持续利用提供强有力的理论和技术支持，建立反映城市水资源发展水平、以及反应其同社会、经济系统协调程度的指标体系显得尤为重要。第二个亟待解决的问题就是选择并采用符合目标城市实际发展情况的评价方法从而对城市水循环系统进行定量、或是定性的分析和评价。可持续发展的核心是协调一致，如果没有城市水循环系统可持续利用评价指标体系，没有衡量区域水资源可持续利用状况的方法，人们只能根据对城市水循环系统可持续利用的不同理解来指导自己的行动，其结果必然是难以协调，难以实现城市水资源可持续利用。所以只有建立符合城市可持续发展需要的评价指标体系，对城市水循环系统进行客观、全面和科学的评价，才能认清城市水资源开发利用中存在的问题，进而相应地制定与水资源相协调的社会、经济和环境发展战略。

## 1.2 国内外研究现状

### 1.2.1 国外城市水循环系统研究综述

19世纪末以来系统的水文学得到长足的发展，国外在水循环规律和水资源的循环利用以及水循环系统方面的评价研究已经历了很长的发展历程，取得了一定的进展也得出了比较丰富的研究成果。20世纪中期之后在联合国世界水会议的号召下，多数国家已展开大量地区水资源、水环境的评价活动。各国的实践领域包括：水资源、水系统评价，开发利用水资源和水生态环境保护及税务管理等方面进行了大量创造性的工作，切实做到了运用水资源、水环境领域的研究理论指导和改造自然界。与此同时，在联合国教科文组织和世界气象组织等机构的协调和推动下，各国举行了一系列重要的国际学术讨论会议，围绕共同关心的水资源问题，相互协作、求同存异。并在此基础上逐步建立了比较成熟的水资源评价理论和方法（陈家琦等<sup>[11]</sup>，2003；陈志恺<sup>[12]</sup>，1990）。美国于1965年确立对水资源评价的地位和要求，这一地位的确认是通过“水资源规划法案”的通过来实现的。同时美国水文科学国家委员会在1919年提出世界性水文科学研究的五大问题之一是：人类活动、人类改造自然界的一切社会经济活动对水文效应的影响，当然这其中包括正效应和负效应。日本水文与水资源学会分别建立了水量水循环的模拟模型和水质水循环的模拟模型（Toshiharu Kojiri，2003）。许多国家也研究水在