



中国城市规划设计研究院50周年院庆专版  
50<sup>th</sup> Anniversary of CAUPD

# 城市水系统控制与规划原理

邵益生

**【摘要】**城市水资源的开发利用和保护涉及自然科学、社会科学和工程技术的许多领域，是一项非常复杂的系统工程。本文试图以系统科学理论为指导，构建城市水系统的理论框架，对城市水系统的内涵、要素、结构、功能和特征等进行分析，对城市水系统控制的依据、途径、类型和战略等进行探讨，并提出了加强城市水系统规划的建议。

**【关键词】**水系统；控制；规划；城市

CONTROL AND PLAN OF CITY WATER SYSTEM

SHAO Yisheng

ABSTRACT: To construct an academic framework of city water system under the guide of systematic theories, this paper analyzes the concept, elements, structure, function and characteristics of city water system. Then it discusses the base, approaches and strategies of control on city water system.

KEYWORDS: water system; control; planning; city

## 1 引言

水是生命之源，也是文明之本。水为人类的繁衍生息和社会的文明进步作出了重要贡献，但长期以来却没有得到人类应有的珍惜和善待。人们对水的偏见、误解和滥用破坏了水资源的平衡，引发了水资源危机，与此同时，人类也为此付出了惨重的代价。由于人口增加、经济增长和用水不当而导致的区域性水源短缺、水质污染和环境恶化，不仅制约了经济与社会的发展，还严重威胁着人类的健康与生存。据联合国的统计资料，全世界有10亿人口得不到足够数量和安全卫生的饮用水，21亿人没有安全的排污设施，每年

有400多万儿童因此而死去，他们中几乎所有人都生活在发展中国家。

我国是世界上最大的发展中国家，也是水资源最短缺的国家之一，人均水资源占有量仅为世界平均水平的1/4。随着社会经济发展和城市化进程的加快，水的供需矛盾将更加突出。根据预测，未来几十年内，我国新增的用水需求将主要集中在城市地区，城市将面临水资源短缺、水环境恶化、提高供水质量的多重挑战，这是摆在我们面前的重大研究课题，需要从理论和方法的层面上加以研究，开展对城市水系统控制及规划原理的探讨便是其中的尝试之一。

## 2 城市水系统分析

### 2.1 城市水系统的基本内涵

城市水系统的客体是城市水资源。城市水资源作为城市生产和生活的最基础的资源之一，除了它固有的本质属性和基本属性外，还具有环境、社会和经济属性。

水的环境属性源于其本身就是环境的重要组成部分，它决定了水在自然环境中的特殊地位以及水的质量和状态受环境影响的必然性；水的社会属性决定了水资源的功能，主要体现在水的被开发利用上，而开发利用的行为方式又取决于社会对水的需求程度和认识水平；水的经济属性是水资源稀缺性的体现，它是由水的社会属性衍生出来的，社会的需求是产生水经济价值的根源，水的功能和价值只有通过开发利用和保护这一社会活动才能得以实现。因此，水资源的功能和价值的实现过程实际上就是水资源的开发利用和保护过程。由此可见，城市水系统就是在一定地域空间内，以城市水资源为主体，以水资源的开发利用和保护为过程，

62

2004年第1期

【文章编号】1002-1329  
(2004)10-0062-06

【中图分类号】TU991 TU984

【文献标识码】A

【作者简介】

邵益生(1958-),男,中国城市规划设计研究院副院长,研究员,理学博士,兼任建设部城市水资源中心主任,建设部城市供水水质监测中心主任,中国城镇供水协会副会长。

【收稿日期】2004-08-23

并与自然和社会环境密切相关且随时空变化的动态系统。从这个意义上说,城市水系统的内涵已经远远超出了通常所说的“水资源系统”或“水源系统”的范畴,这个系统不仅包涵了相关的自然因素,还融入了社会、经济、甚至是政治等许多社会因素。

## 2.2 城市水系统的基本要素

城市水系统是由城市的水源、供水、用水和排水等四大要素组成的。这四大要素的相互联合构成了城市水资源开发利用和保护的一个循环系统,每个要素都对这个循环系统起着一定的促进或制约作用。

城市水源是城市水系统的基础要素。如果把供水视为一种特殊商品,那么水源便是该商品的原料。没有原料也就没有商品。

城市供水是城市水系统的开发或生产要素,它是在水源和用水要素之间架起的一座“桥梁”。如果没有供水要素,水源不能自动变为商品为消费者所利用。

城市用水是城市水系统的需求或消费要素,供给与需求是一对矛盾,既对立又统一,没有需求,就不必供给,而满足需求是供给的永恒主题。

城市排水是城市水系统中最敏感的要素,具有两面性,良性的排水(经净化处理后排放)可增加水源的补给量,不良的排水(未经净化处理直接排放)则污染水源水质,进而减少水源的可用水量。

## 2.3 城市水系统的谱系结构

系统分析表明,城市水系统具有明显的分层结构特征。如果把系统的四大要素都分别作为子系统来看待的话(因为系统和要素的界定是相对的),那么每个子系统也都包含有若干个组成自己的要素,于是系统、子系统和要素之间便形成了一个由较高层次向较低层次分解的三级谱系结构(图1)。不同层次之间相互联系,相互制约;同一层内的各子系统或要素之间既有联系,又有矛盾和冲突,因而需要在上一层次系统中加以综合与协调,以保持系统的整体性和稳定性。例如,水源、供水、用水和排水等四个子系统构成了水资源开发利用和保护的一个过程链,这个链的每个环节都是不可缺少的,彼此间相互影响,相互促进,相互制约。否则,水的功能和价值就得不到有效体现。如果其中某个链点出了问题,则需要在系统的最高层次上通过调整供需关系来达到子系统间的协调。

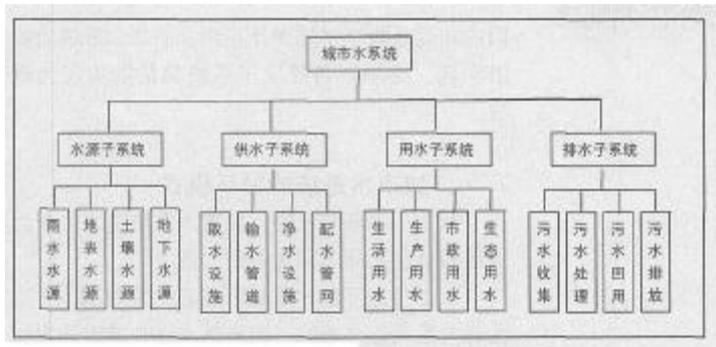


图1 城市水系统的三级谱系结构

Fig.1 Structure of water system

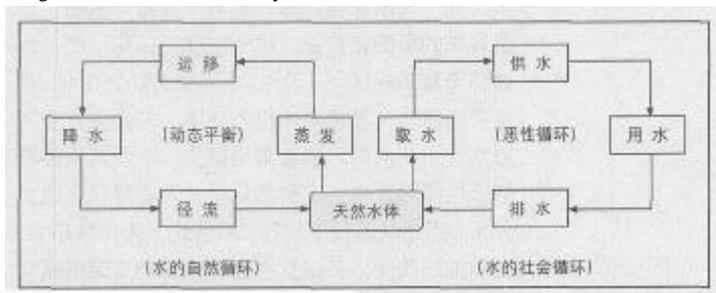


图2 城市水系统循环模式示意

Fig.2 Circulation of water

## 2.4 城市水系统的功能特征

根据系统论原理,系统的功能和结构是统一的,功能以结构为基础,也就是说结构决定功能。城市水系统的结构是分层次的,其功能也应该是分层次的。在系统层次上城市水系统的总体功能是满足城市社会经济和自然环境的用水需求,亦即生活、生产、生态等“三生”用水需求。考虑到城市水源是自然环境的重要组成部分,也可以将城市水系统的功能表述为:在一定的约束条件下,最大限度地满足城市社会经济的合理用水需求。这里所指的约束条件有三层含义:一是不能破坏水资源量的补排平衡;二是不能破坏水资源的质量状态;三是不能破坏水资源的赋存环境。

系统的上述功能在子系统层次上是彼此分离的。其中,水源子系统是水资源质与量的状态系统,是供水的源泉,其主要功能是为系统提供足够数量并符合一定质量标准的“原料水”;供水子系统的功能是开发、输送和加工“原料水”,使其成为符合一定的标准的“商品水”,并将其送至各类用户;用水子系统的主要功能是消费水和节约用水;排水子系统的主要功能是排放废水和净化污水。

在第三层次,即子系统的要素层次上,每个要素都有其自身的构成,在一定程度上也可被视为更次一级的子系统,并具有各自特定的功能。如取水设施的功能是提取原水;输水管道的功能是输送原水;净水设施的功能是净化水;配水管

网的功能是将净水配送至用户。总之，系统功能的实现，必须以各层次子系统功能的实现为前提。

### 2.5 城市水系统的循环模式

从水的循环特征看，城市水系统是水的自然循环和社会循环的耦合系统（图2）。

天然状态下的水循环系统在一定时期、一定区域内是动态平衡的，当天然水体被城市开发利用进入社会循环时，便组成了一个“从水源取清水”到“向水源排污水”的城市水循环系统，于是原来的平衡被打破，这个系统每循环一次，水量便可能消耗20%-30%，水质也会随之恶化，甚至变为污水，若将污水排入环境，又会进一步污染水源，从而陷入水量越用越少、水质越用越差的恶性循环之中。这种循环模式无论是从理论上分析，还是从实践中观察，都是处于失控状态的，必须加以改变。而改变水循环模式的关键措施之一便是加强对城市水系统的控制。

## 3 城市水系统控制

### 3.1 城市水系统的控制依据

目标、信息和反馈是城市水系统控制的三个重要依据。目标是控制行为的指南，信息是实施控制的基础，反馈是实现控制的手段。城市水系统的控制目标是调整水系统的循环模式，即尽可能减少循环过程中的水量消耗和水质退化，诱导水系统逐步进入良性循环状态。城市水系统的信息是指水量、水质、水价以及利用率、漏失率、处

理率等反映系统状态的参数或指标。城市水系统的反馈是一个不断根据信息修正误差的过程，其反馈机制是一个闭合回路（图3），在施行控制的过程中，围绕既定目标，每输入一个指令（或决策），各个子系统都应能及时得到信息的反馈，而这样的信息反馈正是施行下一步控制作用的依据。举例来说，如果某个指令是开发水资源的取水量（ $P_1$ ），那么经过系统的一个循环周期以后，至少有三个信息会得到反馈，那就是实际发生的供水量（ $P_2$ ）、用水量（ $P_3$ ）和排水量（ $P_4$ ）等三个参数。 $P_1$ 、 $P_2$ 、 $P_3$ 、 $P_4$ 之间的不同比例关系隐含着不同的利用率、漏失率等反映系统优劣状态的重要信息。同样的道理，与水质相关的信息也会得到反馈。这些信息将提示我们下一步控制的对象和重点是什么。

### 3.2 城市水系统的控制途径

新中国成立以来，伴随城市化进程在不同历史阶段的变化特征，我国城市水资源的开发利用战略先后经历了“以需定供，单纯开源”，“开源为主，提倡节水”，“开源与节流并重”和“开源、节流与治污并重”等多次调整。随着城市化进程的加快，水资源的供需矛盾将进一步加剧，水环境保护的难度也将进一步加大。理论分析和实践经验表明，“并重”战略不能适应新形势的需要。为此建议将“节流优先，治污为本，多渠道开源”作为我国城市水资源开发利用的新战略。该建议得到了广泛认同。

根据新战略的内涵，至少有三种控制途径有助于改良城市水系统的循环模式：

一是在城市水系统中增加“节水”子系统（图4a），不仅可减少取水量和污水排放量，还能减少供水、排水和污水处理设施的投资，进而降低企业的综合成本和消费者的水费支出，这是一种多赢的循环模式。

二是在城市水系统中增加“治污”子系统（图4b），可削减污染物，改善排水质量，有助于遏制水环境污染，保护水源水质。

三是在城市水系统中增加再生水“回用”子系统（图4c），相当于增加系统的供水能力和可用水量，同时也能减少取水量。

以上三种控制途径，虽然方法不尽相同，但都有助于促进城市水系统的良性循环。因此，加强节水、治污和再生水回用力度，重视再生水等非传统水资源利用，是建立城市水系统良性循环机制，实现城市水资源可持续利用的关键。

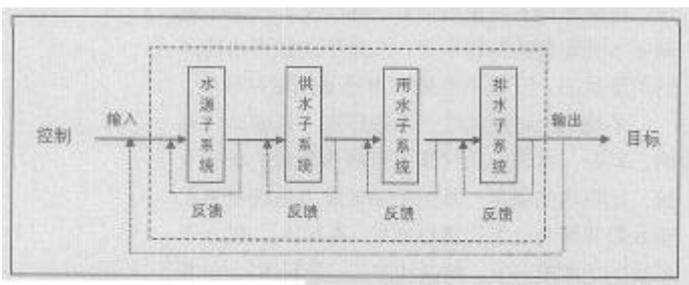


图3 城市水系统的反馈机制  
Fig.3 Feedback mechanism of water system

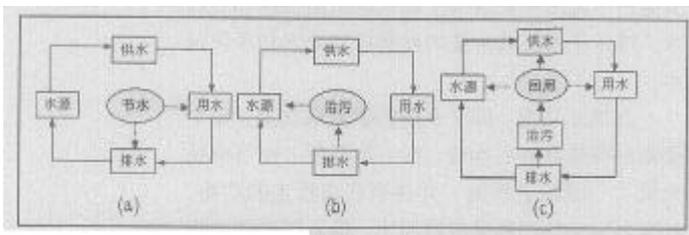


图4 城市水系统的改良模式  
Fig.4 Improved water system

### 3.3 城市水系统的控制类型

(1) 需求控制。在现实生活和生产活动中,不合理的用水和浪费水现象非常严重,长此下去,有限的水资源将被耗竭。因此,必须对用水需求进行控制。需求控制的对象是城市用水子系统,控制的主要手段有计划管理、定额管理、价格调控和宣传教育等。对于某些高耗水用户,有时也采用行政和法律手段强行限制用水。需求控制的目的是通过限制不合理的用水行为,杜绝浪费,从而满足合理的用水需求。

(2) 污染控制。控制的对象主要是城市排水子系统,当前控制的主要手段是建设污水收集系统和污水处理设施,尤其是要扩大建设城市污水集中处理厂,提高污水处理率,对污水进行末端治理。从未来发展趋势看,推行清洁生产,强化源头和过程控制,应是污染控制的主导方向。

(3) 渗漏控制。渗漏是城市供水和用水过程中的普遍现象,全国每年因此浪费的水量超过100亿 $m^3$ ,减少水费收入100多亿元。因此,加强渗漏控制不仅可节约水资源,还具有可观的经济效益。渗漏控制的对象主要是城市供水和用水子系统,如供水管网的渗漏控制和用水器具的跑冒滴漏控制等。控制的主要手段是技术和经济措施的结合。

(4) 节制控制。在用水子系统中,除了各种渗漏对水资源造成浪费外,不合适的用水器具和不合理的用水方式等也会造成水资源的巨大浪费。如我国现在普遍使用的抽水马桶每次冲水量都在10升以上,而比较先进的节水马桶只有3-6升;又如我国工业用水重复利用率不到50%,而发达国家高达80%-90%。充分挖掘节水潜力,便是一种节制控制。节制控制的主要途径是大力发展节水器具和节水型工艺,提倡一水多用,重复利用,提高用水效率。

(5) 补给控制。降雨对地表水和地下水的补给是城市水系统进入良性循环的基本前提,但由于城市化的发展和水土流失等原因,下垫面条件发生了很大变化,降雨对城市水系统的补给正在逐渐减少。另一方面,由于地下水的超量开采,许多地区已形成了大规模的地下水降落漏斗,客观上创造了能接纳更多降雨补给的条件,因此,可通过人为干预的方式增加降雨补给。补给控制的对象是城市水源子系统,控制的主要目的是采用技术、经济、行政和法律手段,限制地下水超采,增加人工回灌,扩大或诱导地下水的补给,涵养地表水源。

### 3.4 城市水系统的控制方式

(1) 预先控制是指对城市水资源开发利用和

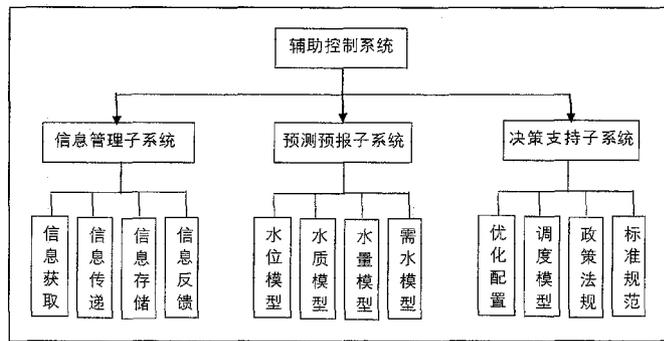


图5 城市水系统的辅助控制系统

Fig.5 Auxiliary control system of water system

保护行为的预防性控制(如需求控制),直接关系到供水和污水处理工程规模的确定。

(2) 过程控制是指对城市水资源开发利用和保护活动的程序性控制。污染控制、渗漏控制、补给控制和节制控制等都属于过程控制的重要内容。

(3) 反馈控制是水系统控制的一种普遍方式,也是施行控制的一种重要手段,任何控制都需要依靠信息反馈,否则控制就无从谈起。

(4) 目标控制是围绕目标的确定和实现而展开的一系列活动。由于系统功能目标是逐级分解的,因此,目标控制也是分层次的,任何一个子系统目标的失控,都会影响水系统总体目标的实现。

(5) 整体控制是指将控制对象作为一个完整的系统,从整体优化的目的出发而施行的控制方式。这种控制追求局部效果与整体效果的和谐统一,要求局部必须服从整体。

(6) 层次控制是基于系统的结构和功能的层次性而施行的一种控制方式。

### 3.5 城市水系统的控制系统

根据系统论和控制论原理,控制本身也是一个系统,实质上是控制“系统”的系统。城市水系统的控制系统由控制的客体和主体系统组成。客体系统由被控对象(即城市水系统)和控制环境(如自然、物资、技术、经济、政治、文化等)组成;主体系统由管理人员、管理机构、管理制度、管理技术和管理设施等五大要素组成。控制系统既有被控系统的一般特征,又有管理系统的某些特征,如自觉目的性、可调序列性、积极平衡性等。

城市水系统的动态特征决定其系统的控制需要在了解系统过去、掌握系统现状、预测系统未来发展趋势和优化决策的基础上进行,为此需要建立相应的辅助控制系统(图5)。



## 4 城市水系统规划

### 4.1 加强城市水系统规划的必要性

随着水源污染的加剧和用水需求的增加,我国城市水资源的开发利用和保护出现了一些新情况:有些城市因水源污染而被迫在净水厂前端设置污水处理设施对原水进行预治理;有些城市因缺水,需对污水处理厂的出水进行深度处理后,作再生水利用。在这些情况下,净水厂和污水处理厂已相互交织,成为一体,城市水源、供水、用水、排水等子系统之间的关系变得越来越密切,相互间的制约作用也越来越明显,客观上需要从系统总体规划的层面上加强协调与整合。一些城市出现重供水轻排水、重水量轻水质、重水厂轻管网和重地上轻地下等急功近利的倾向,在很大程度上也与缺乏系统规划的指导和约束有关。

在城市总体规划中,虽然也有给水工程、排水工程、水资源保护等专业规划,但许多是流于形式,各专业规划之间缺乏有机的联系,于是出现了如下现象:一方面,许多城市的水系统基础设施整体上严重滞后于城市的发展,而局部设施又过于超前,造成大量资金的积压,资源得不到合理配置和有效利用。如供水设施能力过于超前,设施利用率明显下降,不仅浪费资源,还限制了再生水的利用;污水处理厂过于集中在城市下游,增加了再生水利用的难度;排水及污水处理设施建设严重滞后,且厂网建设不配套,城市排水不畅,污水处理设施得不到有效利用,如此等等。另一方面,一些城市在水资源的开发利用和保护上,宁愿斥巨资开发新水源,甚至是不惜代价实施跨流域远距离调水,也不愿将有限资金投入在污水处理及再生水利用上,这不仅造成了新水源工程的闲置浪费,还在一定程度上助长了多用水、多排水的倾向,既浪费水资源,又加剧水环境的恶化。

总而言之,这些不协调甚至是无序的状态就是城市水系统失控的表现,再也不能任其发展下去了。既然城市水源、供水、用水和排水等是一个完整的系统,那么就应该按照系统控制的要求对其进行规划。

### 4.2 城市水系统规划必须与城市规划相协调

城市水系统规划是对一定时期内城市的水源、供水、用水、排水(污水处理)等子系统及其各项要素的统筹安排、综合布置和实施管理。规划的主要目的是协调各子系统的关系,优化水资源的配置,促进水系统的良性循环和城市健康

持续的发展。规划的主要任务是做好水资源的供需平衡分析,制定水系统及其设施的建设、运行和管理方案。

城市水系统既是城市大系统的一个重要组成部分,又是区域水资源系统的一个子系统。因此,城市水系统规划要与城市规划和区域水资源总体规划相协调,既要满足城市高质量、高保证率供水的需要,支持城市的发展,又要根据区域水资源的条件,对城市的发展提出调整和制约的要求。如果一个地区的水资源非常短缺,不能满足城市发展的需要,采取一定措施后仍不能达到供需平衡,那么这个城市的发展就应受到刚性制约,缺水城市不宜发展取水量或耗水量大、污染严重的工业。水资源紧张的地区应调整产业结构,建设节水、高效和防污的产业体系。在水资源没有保证的地区,不能盲目新建城市或扩大城市规模。

城市水系统的结构是分层的,城市水系统规划也应有明确的层次,并与不同阶段的城市规划内容相适应。在城镇体系规划阶段,城市水系统(控制)规划的主要任务是在宏观层面上,做好区域水资源的供需平衡分析,合理选择水源,划定水源保护区;在城市总体规划阶段,水系统(总体)规划的主要任务是研究城市规划区内的各类用水需求,优先满足生活用水,合理安排生产和生态用水,确定水源地、供水厂、污水处理厂及其管网设施的发展目标和总体布局;在城市详细规划阶段,水系统(详细或专项)规划的主要任务是确定规划期内水系统及其网络设施的建设规模、详细布局和运行管理方案。

鉴于当前我国的城市水系统建设中普遍出现的规划不协调、建设不配套、管理不统一等问题,规划中要特别注意厂网配套和供水、排水及污水处理能力的协调增长。

### 4.3 城市水系统规划的重点是城市水网

从城市水资源的空间分布和水资源利用设施的空间布局看,城市水系统的结构就像撒布在城市地域中的一张水网,这也就是水循环的载体,离开这个载体水的社会循环就无法实现。因此,城市水网的规划应当是城市水系统规划的重点,也是城市水系统基础设施建设和管理的依据。

城市水网通常由地表水网、地下水网、供水网络、排水网络、中水网络等组成:

(1) 地表水网由河道、水渠、湖泊、池塘等有形介质和水体组成,也就是地表水系。由于受区域的自然、气候和环境条件的影响,不同城市的地表水网的发育程度差异很大,如华北和西北

地区的多数城市发育较差,而南方地区的许多城市则水网密布。

(2) 地下水网由有形的地下水开采井群和无形的地下水渗流场构成。地下水网不仅是许多城市尤其是北方城市的主要供水水源和供水设施(如井群),而且也是影响城市地基稳定和市政基础设施安全的重要因素,如西安等城市出现的地裂缝和地面沉降等问题就与地下水网被破坏有关。

(3) 供水网络由取水口、输水管道、净水厂、配水管道和户内上水道等组成。供水网络遍布城市各地,进入千家万户,这是一张与其它市政基础设施关系最为密切,政府和市民也最为关注的公共网络,也可以说是城市的“命脉”。

(4) 排水网络由市政和企业的排水管道、户内下水管道、排水泵站和污水处理厂等构成。排水网络是城市生活和工业废水的排泄和净化系统,其总体覆盖范围与供水网络相似。

(5) 中水网络由废水或污水再生处理厂(站)和回用水管道或中水道组成。目前主要有两类系统,一类是建设在居民小区、宾馆饭店或工厂企业内部的小循环系统,通常叫中水系统或回用水系统;另一类是在城市集中式污水处理厂基础上建设的城市污水再生利用系统,目前尚处于试点和示范阶段,未来应有较大的发展空间。

从组成城市的要素特征看,城市实际上是一个由水网、电网、路网、供热网、燃气网、通讯网、消费网等许许多多小网络构成的大网络系统。在这个大网络中,水网是市政公用设施的重要组成部分,对城市的经济发展、社会稳定和环境改善起着至关重要的作用,但它不是孤立存在的,而是与其它许多网络相互交织、相互促进和相互制约的。如水网服务于消费网,却依赖于电网,也常常受制于路网,相关的网络间需要协调,否则,便可能存在安全隐患,或出现“管线打架”现象,进而导致市政工程建设的重复、返工、浪费等后果。显而易见,城市水网是城市大网络系统中不可分割的有机组成部分,应将其纳入城市大网络系统,统一规划、统一建设、统一管理。

## 5 结语

水危机已成为全球关注的焦点和热点问题之一,应对水危机需要适宜的理论指导。本文以当前我国城市中业已出现并有可能继续加剧的城市水危机为背景,试图从自然科学与社会科学的结合上,构建城市水系统及其控制与规划的理论框架,并期望对我国城市水资源的开发利用和保护

工作有所促进。这也是笔者近年来反复思考并一直在努力探索的问题之一。但由于问题本身的复杂性和自己知识的局限性,研究工作仍处于起步阶段,文中对城市水系统的分析还不够深入,对城市水系统的控制还缺乏定量的描述,对城市水系统的规划仅提出粗浅的建议,需要进一步探讨和研究的问题还很多,发表此文旨在抛砖引玉。

## 参考文献(References)

- 1 邵益生,钱易,主编.人与自然百科(人与水)[M].辽宁:辽宁出版社,2000.
- 2 刘昌明,钱易,邵益生,主编.中国工程院重大咨询项目:中国可持续发展水资源战略研究报告集第5卷——中国城市水资源可持续开发利用[R].北京:中国水利水电出版社,2002.
- 3 周干峙,邵益生,主编.中国工程院重大咨询项目:西北地区水资源配置生态环境建设和可持续发展战略研究城镇卷——西北地区城镇发展及水务对策研究[R].北京:科学出版社,2004-04.
- 4 邵益生.中国城市水资源管理理论体系的框架研究[J].城市发展研究,1996,(2).
- 5 高云福.城市化发展与水系统的演变[J].城市勘测,1998,(3).
- 6 邵益生.我国城市水可持续发展的战略对策[A].聂梅生,主编.中国水工业科技与产业[C].北京:中国建筑工业出版社,2000-11.
- 7 邵益生.城市水问题与城市水战略[N].中国建设报,2002-04-19.
- 8 邵益生.城市水系统与城市大网络[N].中国建设报,2002-06-14.
- 9 Shao Yisheng. Review and Prospects for Urban Water Strategies of China[A]. Chinese Academy of Engineering. Proceedings of International Conference on Engineering and Technological Science 2000[C]. Science Press 2000.