

文章编号: 0559 9350(2007) 09 1103 06

## 区域水资源配置系统网络图

魏传江, 王 浩

(中国水利水电科学研究院 水资源研究所, 北京 100044)

摘要: 本文分析了国内外水资源系统网络图的元素组成、系统构成、存在的不足和研究进展, 总结了水资源配置的主要特点, 提出绘制水资源系统网络图的基础是水量平衡原理、水资源天然和人工侧支循环演化二元模式、多水源联合调配、经济与生态和谐发展等方面。针对水资源配置供需平衡分析和耗水平衡分析, 将经济、生态环境、水资源系统简化和抽象为节点、计算单元水传输系统、流域单元水传输系统三类元素, 详细论述了构成系统网络图的基本原理, 各类元素的构成、功能、简化和抽象方法, 给出了系统网络图的定义、制作原理、方法、步骤和特点, 并进行了实例应用。本文提出的系统网络图绘制方法已应用于多个项目, 实践证明, 该方法是可行的。

关键词: 水资源配置; 水资源配置系统网络图; 二元水循环模式

中图分类号: TV213.9

文献标识码: A

### 1 水资源配置系统网络图概述

水资源系统是维持经济系统和生态环境系统健康的基础, 合理配置水资源才能实现水资源可持续利用, 达到人与自然和谐。水资源配置的基础工作之一是绘制水资源配置系统网络图(以下简称系统网络图), 即对复杂的水资源、经济、生态环境系统进行简化和抽象, 以节点、水传输系统构成的网状图形反映三大系统间内在的逻辑关系, 利用数学工具进行水资源合理配置。根据国内外的资料检索, 专门探讨系统网络图的文章并不多见, 大多在水资源配置模型的文章中有少量论述。国内早期水资源配置以供需平衡分析为主, 系统网络图的节点为计算单元、水库、引提水枢纽、输水交汇点、湖泊、湿地、水汇等, 不专门设置行政区断面、水资源分区(如三级区、四级区等)断面, 在直观上难以区分行政区、水资源分区, 地理位置也不清晰; 水传输系统为供水系统和弃水系统, 不区分人工渠系和天然河道, 将河道输水和计算单元排水作为弃水系统, 没有体现河道、计算单元地表生态环境用水理念<sup>[1~4]</sup>。相对而言, 国外在水资源模拟软件产品上处于领先优势, 模拟的基础也是水资源系统网络图。如丹麦水利与环境研究所(DHI)研制的 MIKEBASIN, 以河流水系为主干, 工程、用户以及分汇点等为节点和相应的水力连线构建流域系统图。其它软件, 如美国杨百翰与陆军工程师兵团共同开发的 WMS、奥地利环境软件与服务公司开发的 Waterware、美国农业部(USDA)开发的 Aquarius 等软件都采用类似的方法构建水资源系统网络图。从水资源系统网络图基本要素构成来看, 国内外无本质区别, 国外的比较简洁, 多用于水量丰富地区, 侧重于水资源供需分析, 对流域耗水分析显得不足。

我国水资源短缺、生态环境问题突出, 迫切需要适合我国国情的水资源配置方法, 缓解经济与生态环境的用水矛盾。随着水资源二元循环模式的提出<sup>[5]</sup>, 目前水资源配置将水资源、经济、生态环境三大系统作为一个有机整体, 进行供需平衡分析和耗水平衡分析<sup>[4,6]</sup>, 相应地系统网络图是水资源配置的基础。本文提出的系统网络图以水资源天然和人工侧支循环演化的二元模式为基础, 由供需平衡分析系统和耗水平衡分析系统组成。供需平衡分析以计算单元及相应的节点、水传输系统为基础, 耗水平衡分

收稿日期: 2006 10 18

基金项目: 水利部“948”计划项目资助(200701); 国家重点基础研究发展计划(973 计划)资助(2006CB403404)

作者简介: 魏传江(1962-), 男, 山东泰安人, 高级工程师, 博士, 主要从事水文水资源研究。E-mail: wei1962@bln.cn

析以流域单元(水资源分区)及其水传输系统为基础。

## 2 区域水资源配置系统网络图的基础

水资源配置的主要内容是区域间水资源的合理调配,保障经济和生态环境系统健康发展。随着经济社会的发展,经济系统对水资源需求不断增大,天然生态平衡被打破,流域(或区域)水资源循环演化在不同程度上也发生了变化。因此,掌握水资源配置的主要特征,理顺经济、生态环境、水资源系统间的关系,才能达到人与自然和谐,维持区域水资源可持续利用。

### 2.1 水资源配置的主要特征

2.1.1 水资源系统与经济、生态环境系统的平衡不断变化 经济系统是人类文明的产物,它打破了原始天然生态平衡。人类文明产生以前,水资源系统与生态环境系统和谐发展着。随着人类文明的产生,经济系统不断壮大,人类对水资源需求急剧增加,三大系统间的“平衡-不平衡-平衡”自适应恢复过程愈加困难。当经济系统对水资源需求超过自然界自适应恢复平衡临界点时,三大系统难以维持平衡状态,造成水资源减少、生态环境急剧恶化,对经济系统造成不可挽回的巨大伤害。如果任其发展,最终会严重损毁经济系统。目前,我国经济对水资源需求正处于急剧上升期,造成了部分地区生态环境的恶化。如果不抑制水资源的过度需求,三大系统不可能和谐发展,会失去平衡,造成不可逆转的灾难。因此,水资源配置要维持三大系统的和谐与平衡,既要在较大程度上满足经济系统对水资源的需求,又要有利于生态环境的健康发展。

2.1.2 水资源循环二元模式存在的客观性 经济系统改变了流域水资源循环演化模式。经济系统规模较小时,人类活动对水资源系统的影响很小,表现在水利工程少,开发利用程度低,水资源天然时空分布改变较小。随着水资源开发利用程度的提高,特别是干旱、半干旱地区,为满足经济需水,水利工程改变了原来水资源的时空分布,形成了天然和人工侧支二元水资源循环演化模式。严格说来,无论是湿润地区还是干旱地区,经济系统的出现都会在不同程度上改变流域水资源循环演化模式,只是二元结构所占比重不同。在解决水资源问题时,是否将其作为主要影响因素,反应在系统的简化和抽象上。

2.1.3 水资源配置的主观性 复杂的水问题产生了大量决策问题。由于水问题影响因素众多,需求预测、水文系列等的不确定性和随机性,大量半结构化、非结构化问题需要决策者判断和抉择,决策者的偏好会影响水资源配置格局。一般来讲,水资源优化配置难以做到,它是各相关利益方博弈妥协的结果。

2.1.4 经济、生态环境和水资源系统的复杂性 经济、生态环境和水资源系统的复杂性决定了分层次进行水资源配置。水资源配置属于水战略研究范畴,各级水行政管理部门关注水问题的侧重点不同,具有复杂性、层次性、主观性的特点。高层次管理部门主要关注区域水战略问题、水资源配置格局等,低层次级管理部门关注水问题的范围较小。由于关心的侧重点不同,需要按不同层次对复杂的经济、生态环境和水资源系统进行简化和抽象。层次不同,概化精度、解决问题的侧重点也不同。同时,要充分考虑基础数据的可获得性、可靠性,调整配置技术方法充分利用已有数据,体现数据决定方法的理念。

2.2 水资源配置系统网络图的基础 水资源配置系统网络图是水资源配置模型建立的基础,模型结果是否合理与系统简化和抽象密切相关。

2.2.1 水量平衡原理 流域是具有层次结构和整体功能的复合系统,水资源配置需要对复杂的经济、生态环境和水资源系统简化和抽象为能运用数学方法处理的节点和水传输系统,构建它们之间的逻辑关系。节点和水传输系统要遵循水量平衡原理和约束条件。经济用水与生态环境用水在供水上有较大的区别。经济供水表现为水利工程的直接或间接供给,其退水可供生态环境使用。生态环境用水在河道上表现为维持一定的流量,到下一个断面供国民经济使用和维持本断面的生态环境用水;河道尾间或湖泊表现为维持一定的水面,消耗一定的水量。经济与生态环境用水方式不同,在水资源配置时应以流域耗水平衡为基础,合理调配生态环境用水和经济用水。

2.2.2 水资源天然-人工侧支循环二元结构 水利工程的兴建改变了流域天然水循环,特别是干旱、半干旱地区河道的人工渠系化,流域下垫面发生较大的变化,改变了流域水循环的转化方式,造成了下

游河道尾间或湖泊萎缩、消失,引发了生态环境系统的恶化。在水资源配置系统概化时,应区分河流和人工渠系,遵循天然河道与人工侧支水循环的各自规律,客观地对经济、生态环境、水资源系统进行简化和抽象,重视计算单元、农业退水的去向。

2.2.3 多水源联合调配 经济用水与生态环境用水是多水源的,一般分为当地地表水、地下水、跨流域调水、污水处理回用水、微咸水、雨水、海水等。在水资源配置系统概化时,需要对多种水源进行简化和抽象,处理好多种水源之间的转化、传输关系,使其满足经济和生态环境用水的要求。

2.2.4 经济与生态用水的和谐 大多数流域水资源时空分布不均,要满足经济用水、保障生态环境健康,区域间水资源调配是常用的手段。水资源配置系统概化时,要设置控制断面,增加约束条件,从流域或区域上控制经济用水和生态环境用水的比例,保障两者用水和谐,维持区域水资源可持续利用。

### 3 水资源配置系统网络图的原理

3.1 系统网络图的原理 系统网络图要体现水资源天然和人工侧支循环演化二元模式,能进行水资源供需平衡分析和耗水平衡分析,是构建水资源配置模型的基础。经济、生态环境和水资源系统之间关系复杂、影响因素众多,必须对三大系统进行简化和抽象,建立主要影响因素之间的关系,利用现有技术构建水资源配置系统网络图。

从供需水方面看,经济、生态环境系统是需求方,水资源系统是供给方,供需双方通过水利工程和河道的水传输才能达到平衡。为简化计算,将流域划分为供分析计算的单元,假定计算单元均匀、同性。计算单元、经济用水户、水电站、湖泊、湿地等简化和抽象为需(用)水节点;水库、引水枢纽、提水泵站、地下水管井等构成了供水(或水源)节点;河流、渠系的交叉点,行政区间断面、水资源分区间断面等构成了输水节点。计算单元地表水供水系统、地下水管井供水系统、排水系统等,以及河流系统组成了计算单元水传输系统,它们按照系统网络的内在逻辑关系与各类节点连接,构成了以计算单元为基础的水资源供需平衡分析系统。通过水资源分区断面将水资源分区连接起来,构成了流域单元水传输系统,它是流域耗水平衡分析的基础。这样,三大系统简化和抽象为节点、计算单元水传输系统、流域单元水传输系统三类元素,共同构成了水资源配置系统网络图。系统网络图遵循水量平衡原理,从流域上游到下游水传输系统不能间断,终点为水汇,反映了三大系统间内在的逻辑关系和水资源供用耗排关系。

水资源配置系统网络图的定义:以节点、计算单元水传输系统、流域单元水传输系统三类元素描述经济、生态环境和水资源系统,以水量平衡原理、二元水循环模式作为制图依据,各节点通过若干条有向弧线表示的水传输关系构成的网状图形称为水资源配置系统网络图。

3.2 系统网络图的组成 系统网络图主要由节点(点)、计算单元水传输系统(线)、流域单元水传输系统(面)三类元素组成。

3.2.1 节点 分为水源节点、需(用)水节点和输水节点3类。

(1)水源节点。水库、引水枢纽、提水泵站、地下水管井、污水处理厂均为供水水源节点。在大型流域(如松辽流域)系统网络图中,一般将大型水库、重要的中型水库作为独立节点,中小型水库、塘坝概化为一个或多个虚拟水库节点;大型引水枢纽、提水泵站作为独立节点,中小型概化为一个或多个虚拟节点;地下水管井和污水处理厂以计算单元为节点,水源供本单元使用。中小型流域大多数水库、引水枢纽、提水泵站作为独立节点,概化的虚拟节点随流域规模的减小逐渐减少;地下水管井和污水处理厂与大型流域的处理类似。

(2)需(用)水节点。城镇生活、农村生活、工业及三产、农业、城镇生态、农村生态6个用水户和水电站、湖泊、湿地等均为需(用)水节点,其中6个用水户以计算单元为节点。

(3)输水节点。河流、隧洞、渠道及长距离输水管线的交汇点或分水点,行政区间断面、水资源分区间断面、水汇等均为输水节点。水汇是流域水循环最终水量的汇集处,流域内可概化多个水汇,如河流尾间湖泊、低洼地、沙漠、海洋等。

计算单元为水资源分区套行政区,一个或多个计算单元可以组成完整的行政区和水资源分区。计

算单元节点包含了水源节点中的地下水管井和污水处理厂、需(用)水节点中的6个用水户。

3.2.2 计算单元水传输系统 按照水资源利用分为地表水系统和地下水系统,按照流域水循环分为天然水循环系统和人工侧支水循环系统。系统网络图应完整反映两类水传输系统,配置结果要便于各类统计,符合水利行业的传统习惯和用户需求。

(1)按照水资源利用分类。①地表水系统:用水户、水利枢纽(包括蓄、引、提等工程)、人工渠系、天然河道、天然或人工排水系统等相互连接构成了地表水传输系统。②地下水系统:为简化计算,水资源规划常将计算单元内的地下水简化为一个地下水库,不考虑地下水库间的水力联系,供水对象限于所在单元,并假设水文地质单元与计算单元闭合。

(2)按照流域水循环分类。①当地地表水供水系统:各水利枢纽通过渠道、管道直接或间接供给各计算单元用水户的供水体系。②外调水供水系统:本质上与当地地表水供水系统完全相同,但其水源具有相对特殊的意义,如水价较高、工程投资大、效益影响决策因素敏感等,需要单独区别。③地下水供水系统:将计算单元内的地下水简化为一个地下水库,供本单元用水户使用,隐含在计算单元内。④污水处理回用系统:污水排放主要是城镇生活和工业产生的污水,农村生活产生的污水量小、分散,假定全部消耗。受污水处理厂处理能力的限制,污水有两个通道,一是直接入河道,二是进入污水处理厂。处理后污水一部分回用,一部分进入河道。该系统隐含在计算单元内。⑤提水系统:大多数流域不区分提水系统与地表水供水系统,但流域地形坡度小,引水、提水渠系犬牙交错,要单独设置提水系统,确定水流方向,如淮河流域中下游。⑥排水系统:是指概化在计算单元上未利用的水资源、灌溉渠系和田间退水量、回用水未利用量、未处理污水排放量等通过下游河道传输至下游节点的水流传输系统。⑦河流系统:是对实际河网系统的概化,它连接水利工程、接受计算单元的排水,反应了河道内生态用水状况。

当地地表水供水系统、外调水供水系统、地下水供水系统、污水处理回用系统、提水系统属于人工侧支水循环系统,河流系统属于天然水循环系统,排水系统属于人工侧支循环系统和天然水循环系统。

3.2.3 流域单元水传输系统 流域单元为水资源分区,如三级区、四级区等,由水资源分区内一个或多个计算单元组成。上游流域单元断面的出境水量是下游流域单元的入境水量,通过流域单元断面间水传输关系的连接,构成了流域单元间水传输系统。它反映了水资源分区间出、入境水量,调入、调出水量,经济和生态环境耗水量,蓄水变量变化等关系,是流域水资源循环转化耗水平衡计算的基础。

## 4 水资源配置系统网络图的绘制

4.1 系统网络图的制作原理 系统网络图是指导水资源配置模型编制,确定各水源、用水户、水利工程的相互关系,以及建立经济、生态环境、水资源系统的供用耗排关系,维持三者和谐健康的基本依据。它基于水资源配置系统的简化和抽象,按照系统网络的基本概念进行绘制。

系统网络图绘制的主要依据是水量平衡原理,任意一个节点必须满足式(1):

$$Q_i - Q_s - Q_l - Q_o = \Delta Q \quad (1)$$

式中:  $Q_i$  为节点上游来水量;  $Q_s$  为节点供水;  $Q_l$  为节点耗损水量,包括蒸发和渗漏补给地下水;  $Q_o$  为节点下游输水量;  $\Delta Q$  为节点蓄水变量。

节点的上、下游连线:①计算单元上游连线:地表水供水渠道、外调水供水渠道;下游连线:计算单元排水。②水库、引水枢纽、提水泵站、行政区断面、河流、渠道的交汇点等上游连线:河道输水、计算单元排水、地表水间接输水渠道、外调水间接输水渠道;下游连线:地表水供水渠道、外调水供水渠道、地表水间接输水渠道(间接供水或输水渠道为不直接与用水户相连接的渠道)、外调水间接输水渠道、河道输水。③流域单元断面上游连线:河道输水、计算单元排水;下游连线:河道输水。④湖泊、湿地、水汇上游连线:河道输水、计算单元排水、地表水供水渠道、外调水供水渠道;下游连线:河道输水或无连线。

各节点按照其上、下游连线的实际对应关系和逻辑关系,在任意两个节点间连接若干条有向弧线。渠道及管线由一组弧表示,反映地表水传输关系;河流由另一组弧表示,反映河流传输关系;跨流域调水及排水传输系统采用另外两组弧表示。水源经各类节点的供水、排水、河道输水后最终应汇集到水汇,

供水、输水、排水线路的组合必须是连续的,不能出现间断。这样,就形成了水资源配置系统网络图。

## 4.2 系统网络图的制作方法

4.2.1 系统网络图的制作方法和步骤 (1) 根据解决水问题的层次,以接近项目区实际地理位置绘出河流系统(包括主干河流和概化河流);(2) 在河流系统上确定和标出流域单元断面、行政区断面、水库、引提水枢纽、湖泊、湿地、水汇和计算单元;(3) 以计算单元、水库、引提水枢纽、湖泊、湿地等节点连接当地水供水系统、外调水供水系统;(4) 将计算单元的下游排水连线与河流的节点连接,形成排水系统,每个计算单元仅有一条排水连线;(5) 勾绘出流域单元的界限,每个流域单元仅有一个断面,通过流域单元断面连接流域单元间的水传输连线,一般为河流连线;(6) 检查、修改系统网络图,直至满足要求。

4.2.2 实例 图1为松辽流域浑太河水资源配置系统网络图。图中节点为:16个计算单元(四级区套地市)、4个流域单元(四级区)、4座水库、4个流域单元断面、5个引水枢纽、1个水汇(海洋)。计算单元水传输系统为:箭头细实线为当地地表水供水系统、箭头点划粗实线为跨流域调水供水系统、箭头虚线为计算单元排水系统。流域单元水传输系统:4个流域单元通过各自的断面由河流连接构成。

4.3 系统网络图的特点 (1) 将经济、生态环境、水资源系统简化和抽象为节点(点)、计算单元水传输系统(线)、流域单元水传输系统(面)三类元素。(2) 与早期系统网络图相比,增加了流域单元、行政区断面、流域单元断面、河流传输系统、流域单元水传输系统等。(3) 重新定义了原弃水系统。将水库弃水定义为水库下游河道输水,供河流生态环境用水。计算单元弃水定义为排水系统,计算单元间无弃水连线,排水系统仅在计算单元下游,直接进入河道,由经济退水、废污水和回用水退水、计算单元未利用地表径流等组成。(4) 建立了流域天然水循环和人工侧支水循环系统,以节点和计算单元水传输系统为基础进行水资源供需平衡分析,以流域单元水传输系统进行耗水平衡分析。(5) 系统网络图从整体上直观显示了流域经济、生态环境、水资源系统的供用耗排关系,具有直观、清晰、易懂、接近实际地理位置等优点。

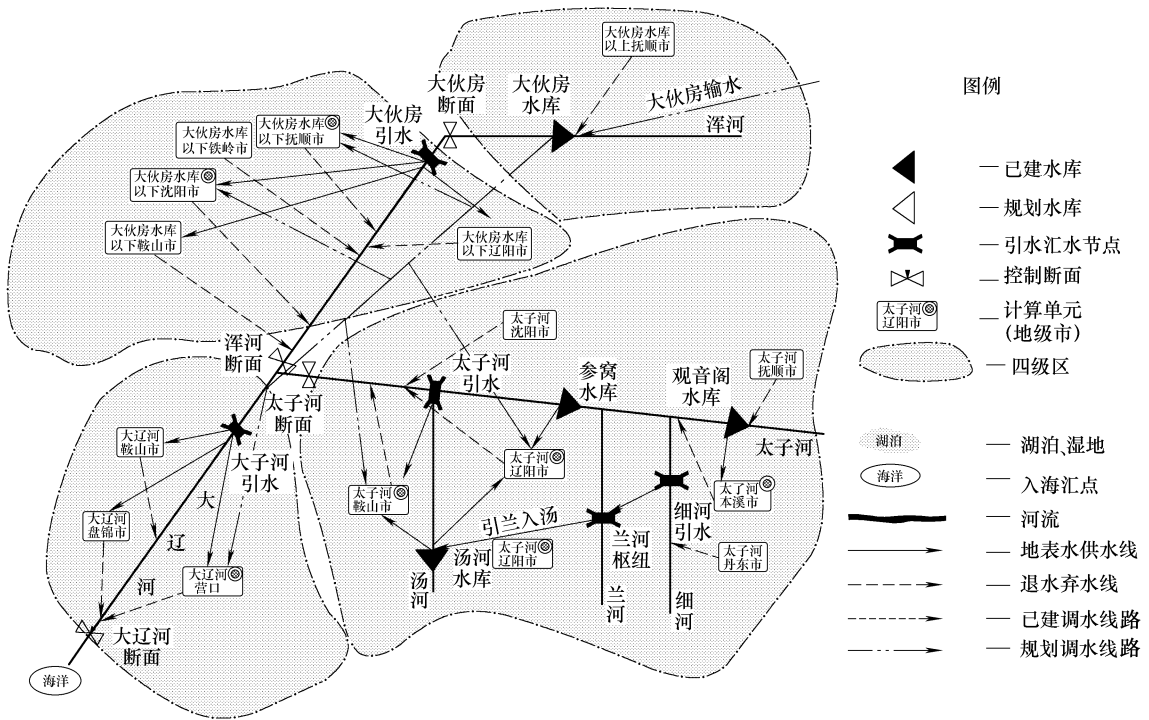


图1 松辽河流域浑太河水资源配置系统网络图

## 5 结语

流域或区域水资源规划的核心内容之一是水资源配置,其基础工作是绘制水资源配置系统网络图。系统网络图是各种水需求与供给、利用与排泄关系的综合反映,是水资源供需平衡和耗水平衡模拟计算的基础。通过水资源合理配置可以给出流域或区域水资源未来的供需态势,缓解水资源供需矛盾,遏制生态环境恶化的趋势,维持经济社会的可持续发展和生态环境的健康。本文提出的系统网络图绘制方法在松辽流域水资源综合规划、新疆水资源综合规划、吉林省中部城市引松供水项目建议书等项目中得到了广泛应用,取得了良好的效果。实践证明,该方法是可行的。

## 参 考 文 献:

- [ 1 ] 尹明万,谢新民,等.基于生活、生产和生态环境用水的水资源配置模型[J].水利水电科技进展,2004,24(2):5-8.
- [ 2 ] 谢新民,岳春芳,等.基于原水-净化水耦合配置的多目标递解控制模型[J].水利水电科技进展,2005,25(3):11-14.
- [ 3 ] 任政,郑旭荣,等.玛纳斯河流域水资源优化配置模型研究[J].水资源与水工程学报,2005,16(3):33-36.
- [ 4 ] 王浩,秦大庸,王建华.流域水资源规划的系统观与方法论[J].水利学报,2002,(8):1-6.
- [ 5 ] 魏传江.水资源配置中的生态耗水系统分析[J].中国水利水电科学研究院学报,2006,4(4):282-286.
- [ 6 ] 魏传江.利用水资源配置系统确定供水工程的建设规模[J].中国水利水电科学研究院学报,2007,5(1):54-58.
- [ 7 ] McKinney D C, Cai X. Linking GIS and Water resources management models: an object oriented method[J]. Environmental Modeling and Software, 2002, 17(5): 413-425.

## Generalization of regional water resources deployment network chart

WEI Chuarr jiang, WANG Hao

(China Institute of Water Resources and Hydro Paver Research, Beijing 100044 China)

**Abstract** This paper studies the status quo of generalization of regional water resources deployment network chart at home and abroad, analyzes their element components, system structures, existing deficiencies and the study advance. The principles of water balance, natural-artificial dualistic water cycle rules, multi-water source unified dispatch, harmonious deployment of economic system and ecosystem, etc. are the foundation of generalization of regional water resources deployment network chart. Based on the analysis of water consumption and supply versus demand equilibrium of water resources, the economy, ecosystem and water resources system are simplified into three kinds of elements: nodes (water source nodes, water consumption nodes and water conveyance nodes), calculation units and catchments units of water conveyance. The definition, principle, characteristics, approach and method of generalization of regional water resources deployment network chart, the components, functions, and the simplifying methods of the elements and their application are proposed. The case study proves that the generalization method is feasible.

**Key words:** water resources deployment; network chart generalization; dualistic water cycle rule

(责任编辑:王成丽)