

# 基于水联网及智慧水利提高水资源效能

王忠静<sup>1</sup>、王光谦<sup>1</sup>、王建华<sup>2</sup>、王浩<sup>2</sup>

(1 清华大学水沙科学与水利水电工程国家重点实验室)

(2 中国水利水电科学研究院流域水循环模拟与调控国家重点实验室)

**摘要:** 针对水资源系统“动态性、关联性、预期性、不确定性”，以信息技术最新发展和最具应用前景的物联网为基础，提出水联网及智慧水利概念，集物理水网、监测水网和市场水网一体，发展“实时感知、水信互联、过程跟踪、智能处理”等关键技术，实现水资源供需的准确预报、精准配送和高效管理，全面提高水资源效能，促进我国水资源高效利用水平的跨越式提升。

**关键词:** 水联网；智慧水利；水资源效能

## 0.引言

我国人口基数大、人均水量不足世界平均的 1/3，时空分布严重不均，“水脏、水浑、水多、水少”问题突出，构成了我国水资源基本情势。近年来，随着我国社会经济的快速发展，水资源供需矛盾日益加剧，极端水文气象事件的频繁发生，更加剧了我国水安全、粮食安全及生态环境安全的情势。2011 年中央一号文件从全局充分明确了新时期水利发展战略定位，强调水是生命之源、生产之要、生态之基。中央水利工作会议及 2012 年国务院三号文件，进一步强调了水利在现代农业建设、经济社会发展和生态环境改善中的重要地位，对加快水利基础设施建设、加强农田水利等薄弱环节建设、实行最严格的水资源管理制度等做出了战略部署。

水资源及其高效利用是世界各国普遍关注的问题，农业水资源效率的提升，更是水资源利用效率的重中之重。长期以来，农业水资源高效利用主要关注田间尺度的节水技术。然而，在气候变化和经济社会不断发展的条件下，农业用水在变化环境下面临着的不确定性增大，将极大增加灌区水资源系统调控的难度与风险，必须从流域层面着手解决。在供给和需求两端都面临巨大变化的条件下，传统的水资源管理范式难以满足“供用水安全维系”和“利用效率与效益充分发挥”的需求。特别是由变化环境所导致的“水文一致性”的丧

失，动摇了传统的水资源分析理论方法的科学基础，基于历史长系列数据的水资源优化配置技术面临严峻的挑战。

正是由于流域水资源系统的这种复杂性，流域水资源可持续利用的适应性调控就显得前所未有的重要，动态调整策略和适应性管理成为新的水资源管理准则，要求管理要建立在更多的观测数据及其未来情势变化的基础上。利用现代水利信息化技术，及时获取水资源系统的实时水状态信息，成为与现代水资源管理技术发展相平行的重要支撑技术问题。随着以云计算、Web2.0为标志的第三次信息技术浪潮的到来，具有“感知、互联和智能”等基本特点的物联网及其应用极大地改变了行业信息化服务的效率、易用性和行为范式，水利信息化技术和现代化迎来了良好契机。发展水联网和智慧水利，将成为水利现代化，快速提升水资源效能的强力抓手。

我国水资源利用效率低，缺水与浪费水并存。农业灌溉水的利用效率只有40%~50%，远低于发达国家的70%~80%；水资源效益（单方水GDP）也仅为世界平均水平的1/5。在利用效率低下的众多原因中，科学水管理的缺失不可忽视。其在技术措施上表现为用水过程和用水效果的粗放管理；在体制上和机制上表现为跨部门、跨地区、多个利益主体的水资源冲突与矛盾。由于不确定来水条件、多个利益主体的不同用水预期等水资源系统的固有复杂性，传统水资源配置很难全面反映水资源系统内多重供需关系的影响，不能真正实现水资源的高效利用。在水联网基础平台支撑下，水资源实时风险调度与精细化管理是通向水资源高效利用的必由之路。

## 1.基本概念

### 1.1 水联网

水联网 (internet of water) 是在物联网 (internet of goods) 概念基础上提出的，是基于水资源供需与配送具有物流的典型特征而发展的。但是，水流又不同于物流，其拉格朗日和欧拉双重描述的属性，使得水联网发展将呈现自身的特点和难点。在水联网上，需要同时表达水运动的物理过程和水信息的流通过程，需将不同来源、性质、尺度的水信息数据同化和转化以满足模拟、预报、调配、评价的要求，需将不同过程、要素、尺度的数学模型耦合集成以描述水资源系统变化，需以功能为中心、以事件驱动为后台、云端处理为支撑以综合模型计算和结果分析。水联网的技术核心将涉及水文学、水动力学、气象学、信息学、水资源管理和行为科学等多个学科方向，是新一代水利信息化的

集成发展方向。

“实时感知、水信互联、过程跟踪、智能处理”是水联网的技术标志，对应水资源供需关系的动态性、关联性、预期性和不确定性特点。我国水资源利用效率低的原因之一是跨部门、跨地区、多个利益主体的水资源冲突与矛盾。相应地，水系统及水资源观测分散在各有关部门和行业，缺乏统一的和可共享的水系统动态监测、水资源调度分配及水危机预警预报机制。因而难以满足国家和区域水资源高效利用、安全保障与预警预报的信息支撑要求，难以满足水资源的高效利用对水资源系统全局风险控制和效益优化的依赖要求。我国当前这种水系统及水资源监测信息的不足、分散和互不相同，阻碍了水资源相同的风险调度与精细管理，迫切需要精确、完整、互相匹配的水信息数据的全面支撑。建立实时、集成、动态、智能的水信互联系统，是水资源高效管理的必要支撑条件。

当前信息技术发展正在经历第三次浪潮——云计算与物联网技术突飞猛进并被广泛应用。以“超大规模、高可靠性、按需服务、绿色节能”为技术特点的云计算显示出其高效率、低成本的巨大优势，以“感知化、互联化、智能化”为技术特点的物联网直接推动了传统产业的升级。采用云计算技术和物联网思想建立“水联网”，可实现流域内自然和社会水循环（如大气水、河湖水、土壤水、地下水、植被水、工程蓄存水和调配供水等）的实时监测与动态预测，进而实现对水资源的智能识别、跟踪定位、模拟预测、优化分配和监控管理，为水资源的优化调和高效利用，快速提升水资源效能提供了可能。

## 1.2 智慧水利

智慧水利（smart water）是水联网的另一种表达，其通俗、易懂，更有号召力。后文中将水联网与智慧水利视为一体，互为代表。

## 1.3 水资源效能

水资源效能（water utilization efficiency）是对水资源利用效率（water utilization rate）与水资源生产效益（water productivity）的综合表达，是包含了水资源开发本身的内涵效率和水资源利用的外延效率。

水资源利用效率与通常所说的水资源开发利用率、渠道系数、渠系利用（效）率、灌溉水利用（效）率、供水管网损失率等一致，代表着水资源开发、输送及直接利用工程和设施本身的效率。如我国实施最严格水资源管理制度制定中设定的灌溉水利用系数在2030年达到0.60，就指的是水利工程本身的效率。一般情况下，水资源利用效率有上限且小于1（或100%）。的只有水资源

开发利用率在极端情况下可能大于1，而通常表征这一区域水资源开发利用进入超载状态。水资源生产效率与通常所说的水资源效益、单方水产出、单方水GDP和水资源生产力等一致，代表的水资源在参与经济生产活动中的乘数效率。如我国实施最严格水资源管理制度中设定的万元GDP用水在2030年要降到40元，就指的是个行业水资源利用的效率。

对于一个流域或区域乃至国家，水资源是一项基础资源，其服务目标是多重的，从生活、生产到生态。在不同的经济社会活动领域、不同的时间空间尺度、不同的自然环境背景下，水资源发挥的作用及效率各有侧重、各有所长，单一的水资源利用效率和水资源生产效益就显得不足，水资源效能因此而生。

目前，水资源效能尚未形成单一的指标，而是一个指标体系。在以农业用水为主的流域尺度，可用灌溉水利用系数和万元GDP耗（用）水量代表。提高水资源效能，既地表着提高灌溉水利用效率，也代表着降低万元GDP的耗（用水）量。其他情况类似，在此不再展开。

#### 1.4 水联网及智慧水利架构

水联网及智慧水利不同于现有水信息系统，它以水的守恒量为主体，直观追踪和监控水循环和水利用的全过程。通过水信息的实时在线和智能处理，支撑水资源供需关系的精确预报和风险控制，从而实现水资源的精细和高效管理。水联网及智慧水利架构，将包括物理水网（现实的河湖连通及供用水通道系）、虚拟水网（物理水循环通路及其边界的信息表达）和市场水网（水资源供需的市场信息、优化调配机制及交互反馈）。

总体上，水联网及智慧水利与物联网具有结构和功能的相似性，借鉴物联网的经验，可建立水联网及智慧水利平台的总框架。物理水网的建设，长期以往的跨流域、流域规划、工程规划及工程实践，已经提供了诸多宝贵的经验，有章可循，此处不再赘述。

虚拟水网是构建面向对象的水循环通路及其边界的信息模型和信息服务，包括了大气模式中不同时空分辨率单元的嵌套融合方法及其与地表交界面的数据交换模式，流域中不同土壤地貌和土地利用类型下的水文及水文地质模型建模方法，大江大河、水库湖泊等水体及其边界的表达方法，农业灌区水循环通路及其边界的表达方法，城市水循环的通路及其参数化方法。

市场水网在此基础上，建立和提供水循环中各类水需求和供给的信息服务。包括用水户与供水者之间、用水户与用水户之间、供水者与供水者之间，以及用水户、供水者和市场间的联系，使参与水资源开发与利用各个环节的相

关者，对需水、储水、配水、供水、输水，以及水量、水质、水价、水时间等信息清楚掌握，在水联网云计算云服务支持下，做出供用水最佳选择。

概括而言，水联网和智慧水利，就是基于监测水循环状态和用水过程的实时在线的前端传感器，实现“实时感知”；基于 Web2.0 的水信息实时采集传输，保障“水信互联”；基于拉格朗日描述的水信息表达，“过程跟踪”各种水的赋存形式（如大气水、河湖水、土壤水、地下水、植被水、工程蓄存水、工业用水、农业用水、城市用水等）；包含各种市场决策与拓扑优化的云计算功能，将“智能处理”各类水事事件，触发自动云服务机制，将用户订单水量适时准确推送给相关用户。

## 2.关键技术

当前，对水联网及智慧水利关键技术的认识集中在五个方面：一是面向水文预报及需水预测的云计算技术；二是基于水联网及智慧水利的水资源需求服务体系；三是基于智慧水利的多水源平衡配置技术；四是保障水资源精准配送的过程控制技术；五是不断标准化的水联网与水效能匹配评价技术。

### 2.1 水资源预测云计算

云计算以高速互联网为基础，对信息资源实施专业化管理，按需提取并透明消费的先进计算模式，是水联网发展的基石。水联网云计算主要针对复杂的水循环、水分配和和水调控过程的模拟和可视化再现，涉及水联网云计算标准研究、水文水资源数学模型及集成接口、水联网的数学模型参数管理、水联网数学模型服务标准及案例库等关键技术。

众所周知，水利信息化发展的一大瓶颈是数据、问题和模型的非结构化，使得水利信息化中标准化和工业级水平提升缓慢。水联网云计算的核心，就是针对水利的非结构化特点，加强信息的标准化和模型功能的集成化。如不同要素、不同过程模型在云计算体系内集成所涉及的技术难点和模型结构、数据接口，水模型集成的数学框架，多过程模型系统的耦合集成，各类模型的信息交互和传输方式、组件封装等。水联网云计算还要强调涉水数学模型的参数化管理，包括自传感器获取的实时水信息的参数化方法，多源、多时相、多尺度遥感数据融合，水文模型参数群的时空规律等。

基于加强的水文实时感知信息，通过水联网云计算，使得水资源预测能力在预见期和精度大大提高；基于加强的水市场实时感知信息，通过水联网计算，使得水资源配置的能力在预见期和准确度大大提高。

## 2.1 水资源需求云服务

云服务是水联网“智慧”的体现窗口和核心要求。与其他供需关系的市场一样，供水和用水是事件驱动的服务，既需要当下的需求请求，也需要预见期的储备和延时的供应。在云计算模式下，信息资源以云服务的形式实时提供给多用水户及其涉及的各个环节，管理和运行成本低，保障水平和使用效率高。

以灌区为例，灌溉制度大都是在水文年初制定的，是根据对来年的种植结构、来水预测和降水分析，按照作物需水量的计算得出。但是在实际运行中，种植的作物品种、种植的面积、现实的降水、来水及储水在时时刻刻都发生着变化，作物前期实际供水决定着其后期需水，前期长势决定着后期需水和收成，水文的不确定性和市场的变化，影响着用水者和供水者在各用水单元匹配资源的倾向。这充分表明，效益最大化的灌区水需求与水供给是大量的、随机的、博弈的决策过程，绝非程式化的灌溉制度，需要提供更加全面和实时的信息服务。

利用加强的水信息，以水信息的历史和实时数据为基础，利用云计算的充足能力，通过集成模拟和多目标参数优化，增加径流及需水预报（包括社会经济和自然生态的需水）的预见期、降低预报的不确定性。通过用户的广泛参与，接收用户掌握的水信息和用水需求，协调水供给与水分配，滚动优化、滚动预报、滚动服务。

## 2.3 多水源供给智慧调度

基于水联网的径流预报和需求预测，为多水源实时调配提供了重要的前提和基础。将实时径流预报与需求目标相结合，在考虑水库调度的基础上联合优化本地水与外调水、地表水与地下水、常规水与非常规水、新鲜水与再生水等多种水源，在实时管理的层面最大程度满足动态的用水需求。

多水源供给的智慧调度，涉及水库多目标实时调度、地面和地下水实时联合调度、非常规水源调度与管理及水资源中长期安全储备评估等。水库多目标实时调度需要对水库调度中存在的诸多权衡进行优化，包括时间尺度上的权衡（现在与未来）、空间尺度上（上下游水库之间）的权衡和目标尺度上的权衡（供水、防洪等目标之间），及其多维度的权衡和对不确定性风险的应对。地面和地下水联合调度，既要充分利用地下水的调蓄能力，又要考虑地下水开采对地下含水层和地下水恢复不可逆影响。对于污水、再生水、微咸水、雨水等非常规水源的调度和管理，需要从实时调度和管理策略两个层面考虑，包括标准与技术、非常规水源与常规水源互补调度及利用风险等。

水资源中长期安全储备评估，是针对气候变化带来的水文不确定性而提出

的。从中长期尺度来看，我国北方地区一些流域存在水资源总量不断衰减的可能性，极端干旱事件的发生频次增加，这使得跨流域调水和水资源安全储备的必要性不断增加。水联网的中长期监测和水资源预测，为水安全储备提供了信息基础，在考虑极端干旱频次和水资源衰减可能概率的基础上，从经济合理、技术可行的角度对应对水安全储备量和不同储备方式（如地下水存蓄和地表水库存蓄）进行定量评估，提出应对极端干旱和水资源衰减的应对措施，是国家水安全和水战略层面重要的关键技术，同时也可以提高极端事件情况下的水资源利用效率。

## 2.4 水资源管理精准投递

引入工业过程控制的思路，对水资源系统所有涉水过程进行实时的过程控制，使系统始终处于水资源高效利用的最优状态，使水包裹根据订单需求，准确送达指定目标，达到提高水资源效能的目的。

水包裹的精准投递，不同于其他物品的精准投递，必须要对复杂水资源系统响应过程正确模拟，需要建立起系统状态变量、控制变量和系统响应变量之间的关系，利用水情、墒情旱情、社会经济需求等诸多涉水过程的模拟预测方法，建立综合的互相耦合的水资源系统对外界条件和控制措施的系统响应模型。复杂水资源准确投递是多目标非线性系统的优化与模拟耦合的过程控制技术，尚存在高负荷运算和全局最优难以获得的难题，有待今后物联网和水资源系统分析技术的突破。

考虑复杂水资源准确投递的复杂性，目前的简化设想是通过水资源系统实时过程控制实践的评估，将用户用水计划分析、供水水源与供水路径分析、水量核算、投递效果等综合起来，不断寻找更加优化的投递路径、投递负荷和投递时机，不断趋向精准投递。

## 2.5 水效能评价过程控制

水联网体系下的水资源利用，将不同常规的水资源利用模式，对需水的时空分布和水量，以及用水准确性、及时性和高效性，都有新的要求。水资源利用效率的提高取决于水联网的性能及服务能力，水资源利用效能取决于配水的准确性和及时型，水资源利用的效益取决于在水资源保障可靠性下的用水对象结构。他们之间的相互支撑，决定着流域水资源高效利用的跨越发展可行性。因此，水联网的性能的分级评价、水资源利用效能的分级评价以及两者间匹配分级的联合评价，成为水联网体系建设下流域水资源高效利用发展的重要内容。

水联网是水利信息化建设的新概念，不仅强调的信息网络的硬件建设和数据管理，而且强调信息的覆盖面、连通程度、及时性和有效性等。这些指标的完善程度，将极大地影响着流域水联网的性能。通过系统分析不同程度水利信息采集与加工的实践，提出水联网的性能的评价指标和流域信息化管理提升空间。在水联网体系下，传统的水资源利用方式与管理方式不能按原来的轨迹缓慢进化，将有方向性的改变，这就要求有新的适应性的水资源利用效能指标引导和驱使这种方向性改变，初步设想从水资源利用最终消耗的效能出发，制定以水资源循环与利用过程中的经济效益、社会效益、生态效益和环境效益为根本的，以水资源循环与利用过程中水载体运动各种影响上述效益的物理、化学和生物要素为基础的评价指标体系，以及基于水循环与利用物理过程的水资源利用效率控制标准，如水循环次数、水输送途径、污染物累积过程、水服务价值分布等。

水联网性能与水资源利用效能是否匹配，是其是否能够跨越式提高水资源效能的又一关键。从不同水资源利用效率与效能的科技支撑的关系出发，分析不同的水联网性能所能达到的最大水资源利用效能，分析不同水资源利用效能所要求的基本的水联网性能，提出水联网效能和水资源利用效能的分级匹配标准和联合评价体系，引导流域水资源信息化建设和水资源利用效能提高的共同发展和共同达效。

### 3. 近期设想

#### 3.1 灌区智能管理系统

众所周知，滴灌、喷灌是集配水、计量与控制一体的灌水方法和灌溉设施，在与水源控制器和土壤墒情传感器联动时，可实现灌溉的智能化，在一些高新节水滴灌示范区内，已经有一些应用。但是，目前为止，喷灌、滴灌对水源的要求以及其对能源动力的要求，使得其应用推广限定在特定的条件下，

近年，在新一代土壤墒情传感器和测控一体化配水设施发展的基础上，世界一些水利发达的国家已经推出了面向自流灌区和常规灌溉方法灌区的生产阶段的灌区智能管理单元雏形。我们在国外学习先进技术的同时，尝试性地开展了常规灌溉方式灌区的智能管理实践研究，试点灌区选在甘肃省疏勒河流域南干渠灌区，通过引入量测与控制一体的自动化闸门及全程控制系统，配合多层墒情传感器，对灌区引水、供水、配水和耗水等进行最优控制，并同步监测灌区的用水量及经济效益，分析水资源效能的改善效果和关键环节。目前，该系



统的一期工程基本完成。

目前的初步评估看，建立智能灌区，首先要利用水联网的数据采集、传输和存储技术灌区基础数据采集设施体系，实时获取灌区水资源利用所需的水情、墒情旱情等信息；其次要充分发展社会经济供用水预报及水资源高效利用优化配置等模型，准确预报和优化调配各用水户的供用水需求，从末端到源头，少引少排，从时空上实施灌区高效配水，促进水资源利用效率的提高。

### 3.2 灌区水权交易系统

经济学原理告诉我们，任何一种资源在参与经济社会生产环节时将产生效益，但是这种效益在不同的生产行业是不同的，在相同的生产行业不同的生产部门也是不同的。当资源有限时，资源利用效益的差异化驱使资源的再次分配，从低效向高效方向转移。就水资源而言，就是水（量）权的再次分配。资源再分配可以是行政的、市场的和准市场的。

市场总量控制下的水资源开发利用，必将导致水权交易的充分活跃，也将引导者水资源配置与利用从低效能单元向高效能单元转移。水权交易系统将成为这种效能流的催化剂和媒介。我国东阳义乌的水权交易，内蒙古黄河南岸灌区及宁夏引黄灌区的水权转换，甘肃张掖的水权制度建设及甘肃省石羊河流域的全要素水量分配等，在客观上都强化了用水总量控制，同时也提高了水资源效能。

目前为止，我国的规模较大水权交易均是在水行政主管部门的主导下或协助下进行的，解决特定难题和引导示范性作用较强。一些自发的和小量的水权交易大都以水票的方式进行，交易量小，市场行为不规范，市场化动向难以监测。在水利部公益项目支持下，选择甘肃石羊河流域的为试点，借鉴澳大利亚水权交易系统，开发了石羊河流域（试点灌区）水权交易系统，将需水、订购、供水、配水和水权交易链接起来，初步建成水联网及智慧水利框架下的市场水网，促进水资源生产效率的提高。

## 4. 结论

水联网与智能水利，是当今世界发达国家正在兴起并即将蓬勃发展的水利信息化和现代化进程中革命性的方向，将是实施严格水资源管理制度的有力工具，将是提升大幅水资源效能的必然途径。

## 致谢

本文是在清华大学水沙科学与水利水电工程国家重点实验室《基于水联网

的水资源高效利用关键技术与示范》、中国水利水电科学研究院流域水循环模拟与调控国家重点实验室《国家智慧水网工程框架设计》和国家基金委材料与工程学部《粮食生产中的水资源高效利用》等建议书的基础上，以及中澳环境发展项目 ACEDP 工作成果撰写而成的，是集体工作的成果。在此向所有参与此上述工作的组织者和学者表示感谢。

**报告人简介：**王忠静，男，1963 年出生，博士，清华大学教授、博士生导师。1984 年、1995 年、1999 年分别获得清华大学水资源工程专业学士、水资源规划专业硕士和水文水资源专业博士学位；1984 年至 1995 年，在甘肃省水利科学研究院从事科研工作，历任助理工程师、工程师、高级工程师；1999 年至今，在清华大学从事教学与科研工作，历任清华大学水利系水文水资源研究所副教授/副所长、教授/所长，现任清华大学土木水利学院副院长。

主要研究方向为水资源可持续利用规划与管理的理论与方法研究，水文模型及其水资源应用基础研究，水资源管理信息系统、决策支持系统、数字流域研究与设计，节水灌溉政策、技术及实践、水权理论、水资源利用的环境历史等。主持过国家“九五”、“十五”科技攻关重大项目专题及“十一五”国家科技支撑计划课题，负责过国家“973”基础研究项目专题、国家自然科学基金课题、欧盟科技框架项目、中英、中澳、中荷合作项目以及省部级重点科研项目多项，主持设计并开发多个水资源决策支持系统，主持了石羊河流域重点治理规划、敦煌水资源合理利用与生态保护综合规划编制；提出了水资源承载能力情景分析方法、水资源利用与社会经济发展格局相互作用机制、绿洲稳定性、水文序列还原“失真”与“失效”、水权建设的关键技术问题及其水资源可持续规划与管理基础、数字流域框架及其应用、生态用水调度的生态库容等问题和研究方法；近年来获得过国家科技进步二等奖 2 项，省部级科技进步一等奖 2 项、二等奖 5 项，三等奖 2 项。发表论文 80 余篇，出版专著 2 部。

现任中国水利学会水资源专业委员会副主任委员、中国可持续发展研究会水问题专业委员会副主任委员、中国水利学会雨水利用专业委员会委员、中国自然资源学会水资源专业委员会委员。