

编者按:2015年1月9日,中共中央、国务院在北京召开国家科学技术奖励大会。由中国工程院院士、中国水利水电科学研究院教授级高级工程师王浩牵头,中国水利水电科学研究院、清华大学、中国农业大学和水利部海河水利委员会等单位共同完成的“流域水循环演变机理与水资源高效利用”科技成果荣获2014年度国家科学技术进步一等奖。王浩院士作为获奖代表出席国家科学技术奖励大会,并受到党和国家领导人的亲切接见。这是继2010年“黄河调水调沙的理论与实践”获奖以来又一个由水利部所属单位牵头获得的国家科学技术进步一等奖。本期特别邀请王浩院士及有关嘉宾,以对话形式介绍获奖项目并解读其取得的诸项重要成果。

对话王浩院士:

## 寻根施策缺水流域水“渴”望

主嘉宾:王浩 获奖项目首席科学家,中国工程院院士  
 嘉宾:曹寅白 获奖项目主要完成人,水利部海河水利委员会总工程师  
 王建华 获奖项目主要完成人  
 贾仰文 获奖项目主要完成人  
 刘家宏 获奖项目主要完成人  
 陆垂裕 获奖项目主要完成人  
 游进军 获奖项目主要完成人  
 牛存稳 获奖项目主要完成人  
 李建新 水利部海河水利委员会信息中心主任  
 郭宗信 河北省石津灌区管理局总工程师  
 主持人:轩玮 中国水利杂志记者



王浩  
 获奖项目首席科学家,中国工程院院士,  
 中国水利水电科学研究院教授级高级工程师

1948年,作家丁玲完成以农村土改为主题的长篇小说《太阳照在桑干河上》,以河北省涿鹿县城东的温泉屯为原型,她创造了一个“暖水屯”。在丁玲笔下,桑干河是土地的滋养者、革命的见证者。但当时的她不会想到,仅仅半个世纪后,丰饶的桑干河就头也不回地走向干涸,如同海河流域的不少河流。村民说曾经的“太阳照在桑干河上”变成了“太阳照在桑干河底了”。“有河皆干”已是极度缺水的海河流域不容回避的事实,甚至有人说“河北无河”。

海河的水都去哪了?隐藏在缺水问题背后的原因、机理、过程是什么?前不久,由王浩院士牵头,中国水利水电科学研究院、清华大学、中国农业大学和水利部海河水利委员会等单位经过5年联合攻关共同完成的“流域水循环演变机理与水资源高效利用”科技成果荣获2014年度国家科学技术进步一等奖。这是水利科技领域的一件大事,也是喜事。这一科研项目究竟解决了哪些关键问题?通过项目研究揭示了哪些基本规律?为我国缺水流域水问题提供了怎样的解决方案?本期特别邀请王浩院士及有关嘉宾做客《特别关注》,与

广大读者一起分享在寻根施策缺水流域水“渴”望过程中的故事。

中国水利:王院士您好!我们都知道,国家科学技术奖是一面旗帜,展示的是一批标志性重大科技成果。能获得这样一份殊荣,成绩来之不易。首先祝贺您和您的团队!

王浩:谢谢主持人!

中国水利:我们了解到,“海河流域水循环演变机理与水资源高效利用”是第一个由水利系统主持的国家“973”项目,王院士,您能不能给我们介绍一下,当时选择在海河流域开展这个课题的研究,有什么背景考虑?

王浩:当时各流域,特别是我国北方缺水流域普遍面临一个问题:有限水资源如何支撑经济社会的可持续发展,如何支撑生态环境的修复维护。可以说,经济发展、人口增加、城镇化和灌溉面积扩大,这些强烈的人类活动再加上全球气候变化,导致流域水循环发生了深刻变化,对国民经济和生态安全造成了严重的威胁,具体表现为资源衰减、环境污染、生态退化、供需失衡等。但是, these 问题是表象,背后的科学基础是流域水循环及其伴生过程的演变,这也是当前全球性的研究前沿和热点。最近这几年,在 Science 和 Nature 上有一系列文章阐述这一问题。所以,解决这些水问题的关键是揭示水循环演变机理,实现水资源的高效利用。

2006年,国家“973”计划批准设立了“海河流域水循环演变机理与水资源高效利用”项目。项目选择以海河流域为研究对象,主要考虑这里人类干扰强度位居全球各大流域之首;GDP占全国的15%,粮食产量占全国10%以上,而水资源量只占全国的1%。最近20多年,地表水衰减了51%,水资源开发利用率高达123%,人均水资源量仅243 m<sup>3</sup>,比最缺水的以色列还要少!而且海河流域经济安全、粮食安全、生态安全等任务高度集中,水安全保障受到更严峻的挑战。

海河流域正在经历的可能是我国其他流域正在经历或者以后将要经历的问题,我国遇到的这些水问题也是其他发展中国家正在面临或即将遇到的水问题。所以我们希望通过深入剖析一个流域,形成一套理论和方法,推向全国和世界同类地区。

中国水利:向大家报告一下,王浩院士主持的这一项目在2010年11月科技部组织的“973”资源环境领域13个项目中,验收结果排名第一。这充分说明当时我们的项目研究成果是得到广泛认可和好评的。王院士,您能否用比较通俗易懂的方式介绍一下我们这项研究取得了哪些成果?

王浩:好的。简单地讲,我们取得了四项研究成果,即“研制了一个工具,揭示了一类规律,制定了一套标准,创建了一种模式”。

研制的工具,就是“流域水循环及其伴生过程的综合模拟与预测平台”——NADUWA3E,解决了“桥”和“船”的问题。正是通过这套工具的模拟,我们发现了高强度人类活动干扰下流域水循环六大演变规律、水环境五大演变规律、生态四大演变规律,并进行了定量的归因分析,形成了对海河流域万、千、百年尺度气温、降水、地表水系及地下水分层演化规律的统一认识。这是这类问题的第一次科学发现,是全世界范围内还没有做过的事情。

在此基础上,我们又提出了“量-质-效”综合评价的方法,提出了城市单元和农村单元的水资源高效利用模式、潜力和标准,为最严格水资源管理制度的提出和“三条红线”的现实操作提供了理论依据。我们还将水循环与经济社会和生态环境作为整体系统,提出了流域多维的、临界的、整体的调控方案,评价了调控措施对水资源利用从低效到高效的转化效果,这对于人类活动密集的缺水地区涉水决策而言,具有重要的指导意义。目前这些成果已经在海河流域应用了5年,通过农田灌溉节水、深层地下水压采和再生水利用等,取得经济效益总计294.08亿元。除此之外,项目成果还发挥了重大的生态、社会效益。

👉 获奖项目基本情况

为解决海河流域经济社会用水和水资源、生态环境良性发展之间的矛盾,王浩院士率领的科研团队结合国家重点基础发展计划“973”项目“海河流域水循环演变机理与水资源高效利用”和全球环境基金海河项目,以强人类活动影响下水循环演变机理为研究主线,经过数年的科学攻关,在实验和理论研究的基础上,揭示了水循环及其伴生过程的演变机理,创建了综合模拟与预测平台,实现了水循环、水环境、水生态三大系统全方位耦合模拟,在此基础上提出了水资源高效利用的标准,以及水循环与社会、经济、生态、环境五维临界整体调控理论与调控方案。通过5年的实施和应用,有效缓解了海河流域用水紧缺的矛盾,促进了生态环境的改善。

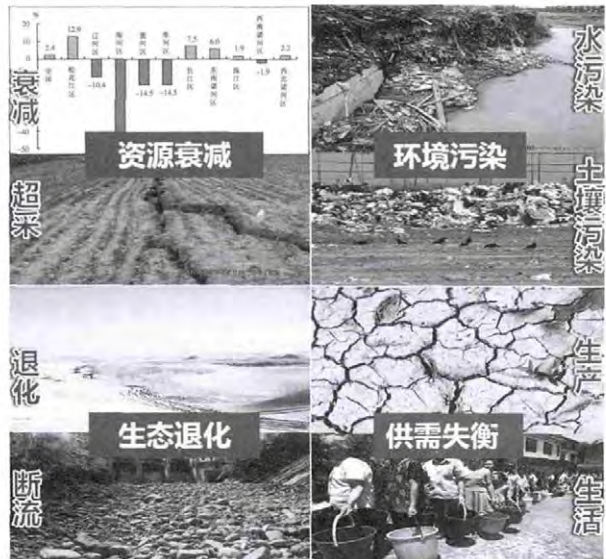


图1 缺水流域面临的水问题

## 缘何能获一等奖：“自然-社会”二元水循环理念领跑世界

中国水利:王院士,您在1999年国家“973”项目“黄河流域水资源环境演化规律与可再生性维持机理”立项申请文本里,第一次提出“自然-社会”复杂水循环的概念,2006年进一步提出了“自然-社会二元驱动下的流域水循环演变与调控”。7年之后的2013年,国际水文组织启动了2013—2022年十年科学计划——Panta-Rhei(一切皆流动),把未来10年唯一研究主题确定为“变化中的自然-社会水循环”,关注焦点是水与社会相互作用。这说明在这个领域,我国开展的研究是前瞻领先的,并在全球范围

内得到了认可,形成了广泛的共识。请您介绍一下这方面的具体情况。

王浩:人类活动改变了水循环过程,这一点已经得到世界公认。美国研究原子弹的机构阿拉莫斯实验室以水为突破口对“自然-人类”巨系统演化过程正在进行模拟和分析。我国人口众多,人类活动对水循环的干扰强度更大,环境和生态问题更加突出,强人类活动对水循环带来的深刻问题在我国提早暴露,使得我们得以有条件先于世界各国在“自然-社会”水循环领域开展研究。另外,对于国际水文十年提出的六大科学问题我们以海河流域为例,已经初步给出了这些问题的答案。

### ☞ 项目创新成果与国际水文十年提出的六大科学问题的对应关系

#### 科学问题 : 认知水文变化最关键的突破口何在?

在高强度人类活动干扰下,水循环已经发生深刻的演化,也就是从单纯的受自然力驱动的水循环系统演化成为受自然和社会双重驱动的水循环系统,面对这种新的水循环系统,应该采用项目研究提出的“自然-社会”双驱动下的流域水循环演变及其调控理论进行认知和管理。

未来时不仅考虑了自然因素的不确定性,还考虑了社会因素带来的不确定性,具有较好的预测效果。

#### 科学问题 : 如何增强水文监测和数据分析能力,以便预测和管理水文变化?

目前对水循环的监测,主要是对自然水循环的降水、河道径流、地下水等环节和子过程的监测,忽视了对社会水循环的“取-用-耗-排”过程的监测,不利于全面认知“自然-社会”水循环的全貌。在创新成果三中,提出了“量-质-效”综合评价理论,在这一理论指导下,项目不仅对自然水循环进行监测,还要对水资源的“供-用-耗-排”过程中的量、质、效率、效益进行全面监测,以便对“自然-社会”水循环的整个过程进行全面认知。在创新成果四中提出了六大总量控制,就是针对水循环的地表、地下、用水、耗水、排水、重要断面通量过程的全面管理。

#### 科学问题 : 处于变化中的水文系统如何相互作用并反馈于水文过程驱动的“自然-社会”系统?

在创新成果一中,从万年尺度、千年尺度和百年尺度揭示了海河流域水循环演变的自然驱动力和社会驱动力,以及受自然、社会驱动力驱动下的水系及流域水资源演变规律。

#### 科学问题 : 怎样考虑水文自然变化与人为变化之间的反馈和不确定性来支撑社会适应正在变化着的环境?

创新成果四提出流域多维临界整体调控方案时,既考虑了未来气候条件变化对水循环的影响,又考虑了社会发展对水循环的影响,还考虑了流域水循环的变化对经济社会发展的反馈作用,从而选择适应于变化水循环条件下的经济社会可持续发展模式。这样提出的调控方案,既极大地减少了调控的不确定性,又增强了调控的科学性。

#### 科学问题 : 什么是水文系统变化的外部驱动力和内部系统特征?

同样在创新成果一中,揭示了近几十年来自然和人类活动对水循环影响的定量归因分析成果。

#### 科学问题 : 怎样运用“水文-社会”耦合系统新知识来提升预测能力(包括预测结果的不确定性计算、可预测性评价)?

创新成果二构建了“流域水循环及其伴生过程的综合模拟与预测平台”,这个平台对水资源、水环境、水生态三方面九类16个具有代表性的水循环要素进行了相互验证,极大地减少了模拟结果的不确定性,在预测

中国水利:听了这么多,我们感受到能取得这样的成绩,确实来之不易。王院士,作为获奖项目的首席科学家,我们想知道当您在人民大会堂接受颁奖时是什么样的感受?

王浩:我们是2006年申请的项目,当时汪恕诚部长提出传统水利向资源水利、可持续发展水利转变,对我们项目给予了很大的支持。项目实施中,在陈雷部长的支持下,我们设立了流域水循环模拟与调控国家重点实验室,部里还批给我们配套项目,对项目完成帮助很大。所以第一点感受,没有行业主管部门的坚定支持,没有部领导的关怀,没有有关司局的支持,我们的项目就是无源之水,根本做不出来。从心底里感谢水利部,感谢汪恕诚部长、陈雷部长,感谢胡四一副部长,感谢高波司长、吴宏伟副

司长,感谢陈明忠司长,感谢海委的任宪韶主任。他们是幕后英雄。

第二点感受是项目取得现在的成果得益于团队里这些年轻人的卓越工作。基本都没有春节、“五一”、“十一”这些节假日,整天上足了发条做研究。这些年轻人充分掌握国际国内的动态,使我们没落下空子,不是跟踪国际前沿,而是领先国际在做。

第三点感受是同行的学术交流很重要,学科的交叉互补很重要。如清华大学陈吉宁校长、中国农业大学康绍忠院士、中国科学院生态中心欧阳志云主任、北京师范大学环境学院刘静玲副院长。我们都属于不同的小学科,水资源、水环境、水生态、水文、给排水,光守着自己专业的东西不够用,也解决不了问题。不同学科互相交叉、融合,形成合力很重要,这样才能把一个流域的管理落到实处。

### ☞ 国内外同行专家怎么说

针对地球科学国际热点,展现了研究取得的创新性进展,对促进农田水循环过程与农业高效用水机理研究领域的理论创新与技术应用有重要意义与价值。

——刘昌明教授,中国科学院院士

在海河流域,我们生活在城市里似乎并没有感到缺水,这是因为当前城市供水的满足是以地下水深度超采、河道径流与入海水量衰竭、农业与生态用水严重短缺为代价的,这种代价将成为后世子孙的沉重负担,如果继续延续这种方式,城市供水将难以保障,自然生态系统也将面临全面衰退的风险。研究揭示的这一基本认识,必将促进海河流域经济增长和用水方式的转变,走上高效、节水的内涵式发展道路。

——王光谦教授,中国科学院院士

这项研究形成了对海河流域水循环演化规律的系统认识,填补了我国相关领域的研究空白;科学识别了海河流域万年、千年、百年尺度水循环的主要因子,以及影响未来50年的主导因子和限制因子,这是一项重要的原始创新。这项研究关于对强人类活动影响下流域水循环规律的定量描述,有助于海河流域水循环的科学调控,对未来情景的预估可以改变人们对全球气温升高的恐惧心理,同时会对海河流域应对气候变化的研究工作产生革命性的影响。

——张建云教授,中国工程院院士

这项研究提出的多维临界调控理论,创造性地提供了流域水循环自然、社会、经济和生态诸因素的整体分析方法,使水循环朝着良性演变的方向发展,达到水

资源可持续利用,也为类似缺水流域的水资源宏观调控提供了理论基础。

——王超教授,中国工程院院士

该项研究具有国际重要性,提出的情景方案成果对海河流域综合管理具有实质性支撑作用,研究成果达到国际领先水平,对国际水科学研究作出了重大贡献。

——夏军教授,国际水资源协会前主席

耦合物理、水质、生态和人的相互作用,集成分布式水文模型、水资源配置模型和多目标分析模型,这项工作是我见到的最具挑战性的、最先进的……对解决广泛的经济与生态问题具有应用价值。

——杰兰德(Jay.R.Lund)教授,美国加州大学

采用指纹分析的方法对海河流域水资源演变进行归因分析,是一项具有很高科学价值的原创成果,对其他大流域也具有应用价值,研究成果达到国际领先水平。项目提出的流域水循环规律、NADUWA3E模型、高效用水标准、水循环多维临界调控等成果,极具挑战性,是具有很高科学价值的原创成果。

——奥康奈尔(PE O'Connell)教授,英国皇家工程院院士

开展“自然-人工”水循环研究具有非常重要的国际意义,他们构建的二元水循环模型具有重大创新性……研究成果达到国际领先水平,对国际水科学的研究做出了重大贡献。

——玉井信行(Nobuyuki Tamai)教授,国际水利与环境工程学会前主席

## 水都去哪儿了:探寻水循环演变规律

### 创新成果 1

揭示了强人类活动影响下流域水循环演变机理和水资源演变规律,并进行了定量的归因分析

中国水利:看到您有一句话说:“万年以来形成的地下水被百年的人类活动消耗光了。”能跟我们解释下这句话的来历么?对水循环的演变规律还有哪些重大发现?

王浩:我们第一次系统研究了万年、千年、百年尺度水资源演变规律,在万年尺度上,我们将前期研究积累的同位素、古生物遗迹、古河道资料串联起来,形成对海河流域气温、降水、地表水系及地下水分层演化规律的统一认识,发现黄河、海河水系分离,形成了现代海河九河入海的地表水格局,仰韶湿润期充分补给,充盈了华北平原深层地下水;在千年尺度上,取得了自殷商以后 3000 年来的气温、降水的演变趋势,并捕捉到了明清间气温和降水的极值,发现了 6 次洪旱过程交替,形成现代水生态格局;在百年尺度上,发现海河流域存在 5 年连枯和 11 年连丰的周期,1954—1964 年是距今最近的 11 年连丰周期,1999—2003 年是有实测记录以来连续最枯的 5 年;海河流域近期由丰转枯降水演变的突变点发生在 1978—1980 年间。在百年尺度上,人类活动上升为主导因素,社会侧支循环量不断加大。也就是现在海河流域抽上来的深层地下水是大约七八千年前的仰韶湿润期形成的,存了几千年,到了近代基本上都抽出来消耗光了;万年尺度自然演化形成的深层地下水被百年尺度人类活动所消耗,万年尺度的地表水格局被百年尺度的地表水系改造和城市化过程所改变。以海河流域地下水持续超采的内在机理为例,现状经济发展条件下,海河流域降水量须达到 748 mm,才能实现地下水的采补平衡,可现在只有 535 mm,还亏缺 213 mm,所以城市、工农业发展导致地下水累计超采 1 400 亿 m<sup>3</sup>。

我们首次从广义、狭义水资源、地表水、地下水多角度,定量揭示了海河流域水循环演变的六大规律,具体可以看这张图表(图 2)。

- 1 流域内部的水循环通量加强,海陆水汽大循环下的跨流域水汽循环通量在流域水循环总通量中的比例下降
- 2 流域地表和地下水循环过程的联系减弱,地表水和地下水之间的循环重复量减少,不重复量增加
- 3 流域土壤和地下水循环过程的联系减弱,土壤水下渗补给地下水减少,地下水循环更新周期延长
- 4 各项人类活动的总效应,使得流域水循环的垂向通量增加,水平向通量减少
- 5 在气候变化和人类活动的双重驱动下,流域广义水资源量增加,狭义水资源量减少
- 6 具体到海河流域,通过定量的归因分析,发现在上述水循环演变规律中,人类活动贡献占 62%,自然变异占 38%

图 2 水循环演变六大规律

中国水利:从这张表中我们看到,海河“流域广义水资源量增加,狭义水资源量减少”。近几年一些地区的干旱问题常见报端,比如 2014 年北方的春夏旱。根据研究成果,我们应该怎样理解这一现象?

王浩:这个问题请刘家宏教授讲讲,他在第一课题组,一直在研究水循环演变模式和水资源演变机理。

刘家宏:现在干旱的原因,一是降水量确实在减少,1999—2013 年与常年值比较偏少 7%,这 14 年的短期干旱已经形成;二是人类活动大量增加,比如 20 世纪以前海河流域总人口很少超过 1 000 万,而现在人口大约 1.4 亿人,是原来的 14 倍,也就是说原来 1 个人用的水现在要 14 个人用,干旱程度不言而喻。可以说短期干旱和用水量增加,是导致目前干旱的主要原因。

中国水利:刚才王院士和刘教授都提到人类活动对水循环演变的影响。我们了解到,目前有一种对全球水循环的解释,由于全球气候变暖海平面上升,过去一百年平均每年上升 1.7 mm,而由于气温升高、冰雪融化导致的海平面上升了 1.1 mm。那另外 0.6 mm 从哪来?有科学家认为,很大程度上是人类的平原区活动,把几万年深埋地下的水抽了出来,用了以后不管是排入河道,还是排到大气层,最后都是流入海洋,0.6 mm 就是这么来的。实际情况是这样的吗?

王浩:是这样的。我们研究了海河流域的水在人类活动的影响下是怎么变化的,原因要定量分析,这是水资源调控的基础。比如,海河流域水资源总量从 1956—1979 年年均约 410 亿 m<sup>3</sup> 到 1980—2005 年年均约 300 亿 m<sup>3</sup>,减少了 27 个百分点,而且结构发生了变化,过去降水通过地表、地下排到河流再入海,这是正常的现象,但现在水被人类活动取用了,通过面上的蒸发消耗排到大气,不再经过河道,排泄渠道发生了变化,那么河道生态就受到破坏,还引起地下水超采、地面沉降等一系列环境问题。这一改变对于人类、对于生态环境都是不利的。我们通过研究进行了定量阐述。根据研究结果,强人类活动对流域水循环演变的影响体现在这几个方面:

在海陆循环通量变化方面,大量的农业活动和人工用水行为,强化了流域下垫面的蒸发消耗,表现为流域内部水汽循环量增加,海洋水汽输入量占流域水汽总量的比例在减少;在地表水和地下水作用关系上,大规模的出山口以上地表拦蓄导致平原区地表水和地下水的联系减弱,山间盆地以及平原区地下水的大规模开采改变了地下水的排泄方式,不重复地下水资源量急剧加大;在土壤水和地下水作用关系上,大规模超采地下水导致包气带增厚,地下

水接受垂向补给能力减弱,补给周期变长;在流域水循环路径变化上,总体表现为流域尺度垂直系统循环强度增加,水平系统循环强度减弱;此外广义水资源中的生产、生态利用量增加,径流性资源减少;从定量归因分析结果看,人类活动是海河流域水资源量减少的主导因素,贡献率占62%。此外,气候自然变异是导致海河流域过去50年降水减少的主要原因;温室气体排放、太阳活动与火山爆发是导致海河流域过去50年温度增加的两个因素,贡献率分别为84%和16%。这些都是以前没有被意识到的机理和发现。

中国水利:您能否再用更浅显点的语言告诉我们,海河的水究竟去哪了?

王浩:海河流域形成现在“有河皆干”的局面是多种因素共同作用的结果。在20世纪五六十年代,海河流域的降水有1800亿m<sup>3</sup>,扣除蒸发后产生的地表径流有近300亿m<sup>3</sup>,还有200亿m<sup>3</sup>可以补给地下水。而那时海河流域的人口不过四五千万,灌溉面积不足2000万亩(15亩=1hm<sup>2</sup>,下同)。由于缺乏水利工程控制,全流域用水不超过100亿m<sup>3</sup>,入海水量能达到250亿m<sup>3</sup>以上。因此,主要河道水系水量都较为充沛,汛期更是容易引发洪涝灾害。

从1958年开始,海河流域进入以兴建水库为主的大规模水利建设时期,同时对平原区河道进行大规模改建。海河流域建成各型水库2000余座,总库容接近300亿m<sup>3</sup>,其中山区大型水库库容达251亿m<sup>3</sup>,90%的山区径流被水库控制。出山口水库对水量的调蓄起到了防洪、供水的重要作用,但客观上也起到了减少下游河道水量的效应。同时,全流域机井超过120万眼,随着机井建设的增加,地下水开采能力也大幅度增加。

进入20世纪80年代后,受全球气候变化影响,海河流域降水明显减少。2000年以来,降水量比多年平均值减少了10%,仅有1570亿m<sup>3</sup>。另一方面,海河流域的有效灌溉面积已经接近1亿亩,人口超过1.4亿。由于耕地面积和灌溉面积增加、城市化加快,地表产流效应降低,1570亿m<sup>3</sup>降水只形成了130亿m<sup>3</sup>地表水,另外有147亿m<sup>3</sup>补给了地下水,其他的水都以蒸发形式返回到了大气中。而海河流域的用水已经达到了400亿m<sup>3</sup>,即使将海河流域自产的水资源全部吃干喝尽,也不能满足流域的需求。因此,除了最大限度地用尽本流域水资源外,海河流域一方面不得不超采地下水,年均超采80亿m<sup>3</sup>,同时还从黄河流域调水40亿m<sup>3</sup>,同时还加大流域内水的再生利用。这种条件下,除了部分缺乏控制工程的和沿海区域汛期少量洪水以及污水排放外,地表径流基本被控制为供水、灌溉利用,全流域

的入海水量仅25亿m<sup>3</sup>,不足20世纪五六十年代的1/10,造成主要河道绝大部分时间都干涸的状况。

所以,海河流域河道水、地下水减少最主要的原因是社会经济用水需求的增加,社会水循环逐步挤占了自然水循环,河流被拦蓄,地下水被抽取,进入了供给城市、农业的管道、渠道中,形成粮食、产品,最后产生污水被再利用或进入城市河湖,从而天然河道的自然水流越来越少。

### 搭“桥”造“船”开发模型工具——NADUWA3E

**创新成果 2**  
创建了流域水循环及其伴生过程的综合模拟与预测平台 NADUWA3E, 定量评估了海河流域水循环及其伴生过程的演变趋势

中国水利:刚开始的时候您提到了一个词汇叫“NADUWA3E”,听上去有些“不明觉厉”。王院士,您能不能给我们介绍下这个模型名字的含义。

王浩:NADUWA3E是Natural-Artificial Dualistic Water cycle model with integrated consideration of Economy, Environment and Ecology的缩写,也就是“综合考虑经济、环境和生态的自然-人工二元水循环模型”,或称为流域水循环及其伴生过程的综合模拟与预测平台。NADUWA3E考虑大气-地表-土壤-地下过程的动力学机制,宏观、中观、微观相互衔接,通过尺度转换耦合集成形成具有自主知识产权的模型体系,包括11个模块,具体可以看这张图(图3)。光我们输入模型平台的数据量就达71G,包括自然地理、水文气象、社会经济、水环境和生态五大类。

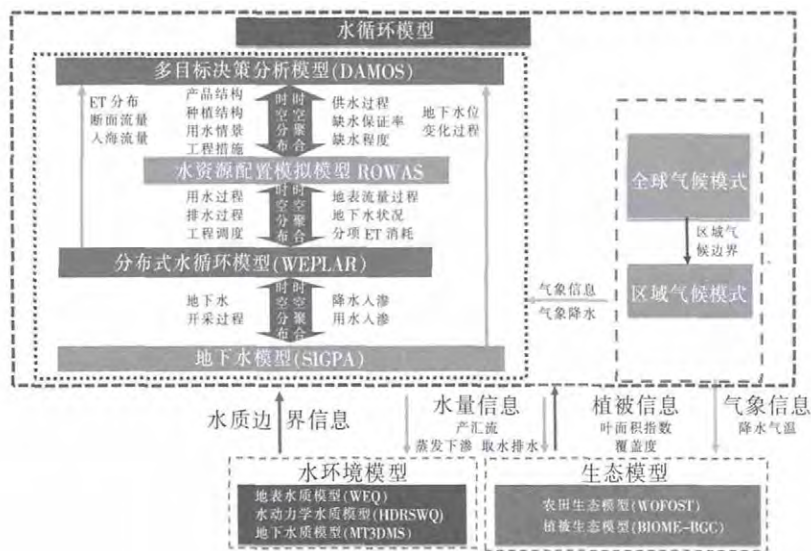


图3 NADUWA3E模型框架

表 1 NADUWA3E 模型与国内外其他模型对比表

项目	指标	NADUWA3E	美国 SWAT	欧洲 SHE/SHETRAN	美国 AQUAVEO	瑞典 ISE-WEAP	奥地利 WATERWARE
功能	自然水循环过程模拟	强	强	强	强	无	弱
	社会水循环过程模拟	强	弱	弱	强	强	弱
	宏观经济多目标分析	有	无	无	无	无	有
	水资源配置	有	无	无	弱	有	有
	水环境过程模拟	强	强	强	强	弱	弱
	陆面生态过程模拟	强	弱	弱	弱	无	无
	平原区地下水数值模拟	有	无	有	有	无	无
	气陆耦合模拟	有	无	无	无	无	无
	多时空尺度模拟	有	有	无	有	无	有
	下垫面影响分析	有	有	有	无	无	无
	水资源演变归因分析	有	无	无	无	无	无
	水资源动态评价	有	有	有	无	无	无
	水功能区达标分析	有	有	有	有	无	有
	水量及污染物总量控制	有	有	有	有	无	有
	层次化 ET 分析	强	强	弱	弱	弱	弱
	模型定制	有	有	无	有	无	无
	参数自动率定	有	有	无	无	无	无
GIS 集成平台	自主创新	第三方集成	第三方集成	有	无	无	
性能	模拟精度	高	中	高	中	中	中
	计算速度	快	快	慢	快	中	快

中国水利:与国内外其他的模型相比,这个模型有什么特点?

王浩:水循环及伴生水环境、水生态过程相互影响,以往的研究都是人为地把三个过程割裂开来,我们创建的流域水循环及其伴生过程的综合模拟与预测平台,实现了三大系统全方位耦合模拟。模型进行了水循环、水环境和生态三方面九类共 16 个要素的验证,突破了以往的单要素验证,有效减小了模拟结果的不确定性。与国外同类先进模型,包括美国的、欧洲的、奥地利的、瑞典的、加拿大的、日本的比起来,这套工具在适用性、全面性、计算性能等 20 多个功能参数等方面,都处于领先水平,有关指标可见表 1。

中国水利:我们了解到,以 NADUWA3E 为核心的软件系统在水利部海河水利委员会已经得到应用。这套系统目前的运行情况如何?我们请海委信息中心的李建新主任介绍一下。

李建新:海河流域水资源与水环境综合管理知识管理系统是在 2009 年上半年安装的,到目前已经成功运行 5 年。NADUWA3E 是这套系统的核心模型,简称“二元核心模型”,为海河流域的最严格水资源管理提供了技术手

段,并为海河流域省市县三条红线的分配与考核管理工作提供了重要的依据,也为海河流域水资源综合规划提供了重要的理论依据。

中国水利:刚才提到了水循环,那么对于水循环的伴生过程,我们是否也有一些重大发现?

王浩:贾仰文教授在流域水循环及其伴生过程综合模拟工具开发上倾注了不少心血,这个问题请仰文教授讲讲。

贾仰文:通过模型平台,我们揭示了海河流域水循环伴生过程的演变规律。从点源、面源污染物的产生、污水收集、污水处理、再生利用、入河等角度,揭示了海河流域五大水环境演变规律;从农田和自然生态系统的净初级生产力、蒸发蒸腾、湿地面积等角度揭示了海河流域四大生态演变规律,具体的我们可以看这张图(图 4)。同时,我们对气候变化及调控措施下未来水循环及其伴生过程的演变趋势做了全面定量的预测。海河流域未来降水、水资源量将呈增加趋势,增加幅度为 5%~10%,但由于过去欠账太多,未来经济社会用水量还会增加,因此即使有了南水北调工程,也必须采取最严厉的节水和系统治理措施,才能协调经济社会用水与生态环境用水的冲突,实现海河流域可持续发展。

## 从理论到实践：“量-质-效”与“三条红线”



### 创新成果 3

提出了“量-质-效”全口径、多尺度水资源利用综合评价方法和高效利用机理与标准

中国水利：与传统的水资源评价方法相比，“量-质-效”综合评价方法有哪些不同？

王浩：目前国际上的水资源评价，一般仅限于数量或质量的单一评价。项目提出了“量-质-效”综合评价方法，是对水资源的可再生性、可控性、有效性等的评价。其中，“量”指广义水资源量评价，“质”指污染负荷与水质评价，“效”指用水效率与效益评价。

评价首先是“量”，这是基础，用 NADUWA3E 平台评价给出一个流域有多少水，比如多少降水、广义水资源、狭义水资源、地表水、地下水等。其次“量-质”，评价这些不同量的水对应什么样的水质类别，不同水质类别的水都在什么地方。然后“量-质-效”，回答这些水多少是高效的，多少是低效的，高效水的水质怎么样，低效水的水质怎么样，最后是“效”，也就是效益的事儿，这些高效的、低效的，好水、坏水，取得的效益怎么样。

我们对海河流域的水给出了一个详细的四维矩阵。每一滴水的水质怎么样？效率怎么样？取得了多少效益？贴上不同的标签。每一维都可以分类汇总，实现“量-质-效”的统一评价。目前这套评价方法在海河和中国北方其他一级流域得到了初步推广应用。

中国水利：显然，“量-质-效”与最严格水资源管理制度的“三条红线”有明确的对应关系。我们也请到了曾参与《国务院关于实行最严格水资源管理制度的意见》文件起草的王建华所长。王所长，“量-质-效”与最严格水资源管

理的“三条红线”的关系是怎样的？

王建华：“三条红线”分别对应水资源的配置、节约和保护三个核心领域。“三条红线”各司其责，互为补充，缺一不可。用水效率的提高会使相同用水总量下耗水量增加，回归地表、地下水体的水量减少，因此用水总量控制指标的确定必须考虑用水效率控制指标的变化；水功能区限制纳污控制指标与河道来水量关系十分密切，而后者受到水文丰枯及河道外引用水量影响，因此确立第三条红线时需要同时考虑第一条和第二条红线控制，特别是枯水期。“三条红线”之间关联密切，确定指标时若不能很好地协调，很可能出现矛盾的、不利的结果。

海河流域是世界上人类活动干扰强度最大、水资源开发利用率最高的流域，国民经济和生态、各社会经济行业部门间的用水竞争矛盾十分突出，由于流域水循环及其伴生过程的演变，从而导致了一系列的资源、环境、生态负向效应，影响区域可持续发展。正是在对这些问题深入研究和制定应对方略过程中，形成了“最严格的水资源管理”的思想理念与制度雏形；项目提出的六大总量控制，从环节的划分上包括社会水循环的取水、用水和输水控制三个基本过程，在此基础上衍生出了以“三条红线”为基本框架的最严格制度设计，同时六大总量控制下面还有具体的指标，实现了“三条红线”的现实操作。

一个完整的制度系统包括条文规则、管理设施和执行系统三大部分，基于这一理解，我们项目研发的海河流域水循环模拟与调控系统平台，一方面为最严格制度设计中，专门将水资源管理信息平台作为制度的重要组成提供了思想基础，同时也为国家水资源管理系统中流域管理系统平台建设提供了有益的技术示范；海河流域社会水循环调控经验，特别是用水总量、地下水开采总量控制和定额管理等，为落实最严格水资源管理制度提供了有益的支撑。

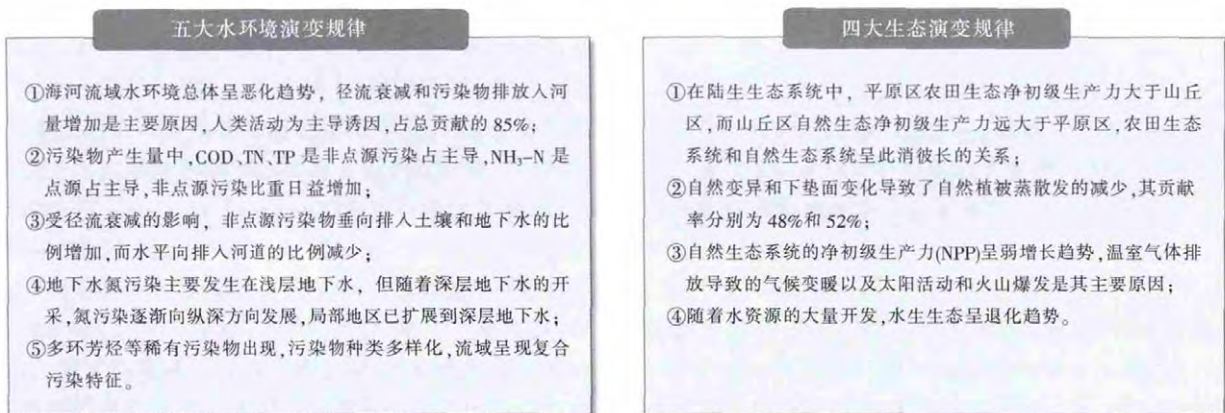


图4 水环境、水生态演变规律



中国水利;这项研究在综合评价的基础上,分别揭示了社会水循环中城市与农村单元高效用水机理与模式。对城市来说,应用这项模式后,将对用水产生怎样的影响?

王浩:这一部分是陈吉宁教授牵头负责的。在城市用水方面,以识别城市水循环机理为基础,通过对海河流域26个城市的大量原型观测实验和数据调研,形成了城市水循环系统演化过程的新认识,系统识别了海河流域城市高效用水机制和规律;揭示了技术与行为共同作用下的城市水循环规律,提出了城市分用户节水潜力、高效用水指标与实现途径。基于模式分析和定量计算,海河流域2020年和2030年可分别实现生活节水5.67亿t和6.78亿t,工业节水4.6亿t和4.4亿t。评价得出海河流域灌溉节水潜力为71亿m<sup>3</sup>,资源节水潜力为28亿m<sup>3</sup>。

根据我们的研究,提出了未来的节水方向,对于城市生活节水2020年前主要依靠提高居民家庭用水器具效率,2020年后主要依靠提高公共用水器具效率;对于工业节水主要依靠工艺发展与重复利用、再生水回用等措施。

通过对城市节水潜力的识别,我们提出了海河流域产业结构调整、工业技术提升的建议,并逐步得到应用。在工业产业布局方面也提出了建议方案,通过优化重组高风险、高污染和高耗水行业,北京、天津和河北三个省市的黑色金属冶炼及压延加工业比重下降11%,纺织业下降1.4%。交通运输设备制造业以及通信设备等其他先进制造业所占比例大幅度增加,分别增加6.7%和3.2%,大大提高了工业用水效率。全流域工业万元增加值用水量从项目启动初期的100m<sup>3</sup>左右降到2012年的18m<sup>3</sup>。流域再生水利用量从2008年的7.3亿m<sup>3</sup>增加到2012年的13.0亿m<sup>3</sup>。

中国水利:我们了解到,农业用水占海河流域总用水的近70%,农业节水与高效用水对缓解海河缺水现状意义重大。这项研究通过对流域内52个试验站点冬小麦、夏玉米生育期需水量、产量、根氮循环等机理的研究,确定了不同节水灌溉分区的冬小麦、夏玉米的经济灌溉定额和优化灌溉制度,而且研究提出了作物高效用水模式及技术。这项成果目前应用效果如何?我们请河北省石津灌区管理局的郭宗信总工程师介绍一下。

郭宗信:从2009年成果应用以来,我们灌区大面积推广了康绍忠院士提出的调亏灌溉和非充分灌溉的灌溉制度,由原来的三水、四水变成现在的两水。灌水量每亩地可节约40m<sup>3</sup>,在节水的同时,粮食产量还有所增加,每亩增加了30kg,省里将这项技术形成河北地方标准,在我们灌区管理人员和农技人员指导下,一直在推广执行这项制度。这种灌溉制度对我们当地老百姓来说,非常受欢迎。

## 全面地认识水资源“高效利用”:五维临界调控



### 创新成果 4

创建了流域水循环多维临界整体调控理论与模式,提出了总量控制目标

中国水利:提到水资源高效利用,我们一般想到的是是一套生产装置、一个试验田上开展高效节水的应用。这项研究提出了一套水循环多维临界整体调控的理论,如何应用这套理论促进水资源的高效利用?

王浩:“自然-社会”二元水循环调控,第一是资源维,追求水循环中具有经济效用或生态效用的生产性水分在总循环通量中的比例提高,同时保持单位面积上地表径流和地下水较高的产水量;第二是生态维,在水资源总体不足的情况下,保持最为必要的各关键断面的生态基流,尽量增大一点湿地面积,提高全流域水的整体生态服务功能;第三是经济维,千方百计地提高各类用水的效率和效益;第四是环境维,源头减排,过程阻断,末端治理,通过提高水质增加水资源的有效性,提高水功能区达标率;第五是社会维,强调用水公平,包括用水目标间的公平、用水区间的公平、用水人群间的公平以及代际用水公平。五维是一个整体,我们通过创建归一化的雷达图,各维的理想点可以构成一个正五边形。调控方案归一化的结果愈接近正五边形,整体调控的效果也就更好。

再有就是临界调控。水是有限的,各目标不能全部满足,只能有所取舍。取舍的原则有两个:一是满足各目标的临界阈值,不能让个别子系统崩溃;二是提高全系统的整体经济、生态服务功能。具体的做法是:多重循环,再生利用;一水多用,分质利用。提高用水效率,经济、生态协同利用。一句话,提高流域水循环的整体有效性,从而提高全流域的水资源、水环境、水生态系统的综合承载能力。这也就是习总书记讲的节水优先、空间均衡、系统治理。

贾仰文:在现有社会经济状况不能改变的条件下,解决海河水资源问题,必须从多类用水竞争协同、高效利用的思路出发,均衡各种利益,形成协调用水模式。

我们在海河的全流域上,分坡面、河道、湿地自然单元以及社会单元全面开展多维临界调控。为什么要搞多维临界调控?核心是认为水资源开发利用存在临界状态,我们不仅要关注水资源的高效利用,同时也要考虑生态环境问题以及社会的公平正义,也就是说要考虑经济效率,提高水的经济效益产出,但也不能让弱势群体没有水用,也要考虑水资源的再生可维持性,生态、环境质量的



**曹寅白**  
 获奖项目主要完成人,水利部海  
 河水利委员会总工程师,教授  
 级高级工程师



**王建华**  
 获奖项目主要完成人,中国水利  
 水电科学研究院水资源研究所  
 所长,教授级高级工程师



**贾仰文**  
 获奖项目主要完成人,中国水利  
 水电科学研究院水资源研究所副  
 所长,教授级高级工程师

成果应用情况及取得效益

**七里海湿地恢复**

七里海湿地位于天津市宁河县境内,距渤海海岸 15 km,为古海岸与湿地国家级自然保护区。据有关资料统计,乾隆时期七里海面积约 170 km<sup>2</sup>。然而在 2008 年以前,由于用水挤占了湿地入流,七里海湿地严重萎缩,昔日“沧波浩渺”的景观已不复存在,仅部分沼泽湿地残存,面积不足 45 km<sup>2</sup>,湿地的疏干导致这里生态环境日益恶化。这是现在的七里海湿地,水域辽阔,芦林苇海,水清草美,鸟类群集。湿地恢复作为“海河流域水循环演变机理与水资源高效利用”国家“973”项目一项重要的调控内容,效果在七里海得到了显著体现。目前七里海湿地生态供水得到有效保障,管理也日趋规范,湿地的水禽保护、生态防护林建设等工作均迈上了新的台阶。据有关专家介绍,2014 年七里海湿地面积已经恢复到 90 km<sup>2</sup>,昔日生机盎然的景观又重新回到七里海湿地。

**京津冀供水安全**

基于海河流域水资源多维临界调控方案,开展了海河水资源工程建设与临河运行调度工作,组建了五大片区供水网络,保障着京津冀供水安全。2008 年以来,通过五大供水网络,累计调水 85.8 亿 m<sup>3</sup>,有效保障了海河流域的供水安全和生态安全。

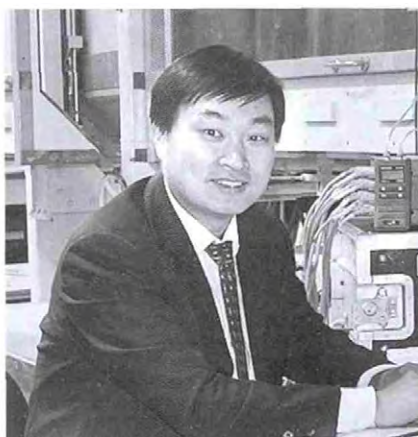
2000—2008 年海河年均入海水量仅有 18 亿 m<sup>3</sup>,80% 以上的地表水都被拦在上游水库,由生产生活消耗殆尽。通过项目成果的逐步应用,采用节水、水利工程调度、跨流域引水等调控手段,逐步实现了河流最小生态流量控制,2009—2011 年实际年平均入海水量已经提高到 42 亿 m<sup>3</sup>,相当于同期 1/3 的天然径流量已经作为河

道内的生态水量流入渤海,有效缓解了海河平原河道水量匮乏的问题,并改善了渤海近海生态。

**其他经济社会效益**

项目成果已成功应用于北京市、天津市、河北省、山西省及环保部、国家林业局等区域和部门,支撑了海河流域水资源管理和生态环境保护实践,海河流域四省(直辖市)人民政府、水利部、环保部、林业局分别出具了成果应用证明;应用于国家防总、水利部及水规总院、海委,全国节水办,国务院南水北调办等国家行业主管部门,为国家治水实践做出了实在的贡献;被列为《国家中长期科学发展规划纲要》的中期代表性成果,并促进了水利部首个国家重点实验室的成立,推动了水文水资源学科的发展。基于项目成果编制了一系列国家和行业标准,推动了水利行业科技进步。项目成果共获得省部级一等奖 5 项。项目发表论文 633 篇,其中 SCI 收录 167 篇,他引 910 次;EI 收录 158 篇。发明专利授权 9 项,软件著作权 14 项,出版专著 26 部。

项目实施 5 年来,通过农田灌溉节水与深层地下水压采等,取得经济效益总计 294 亿元。社会效益方面,一是支撑了《国务院关于实行最严格水资源管理制度的意见》和《南水北调东中线一期工程受水区地下水压采总体方案》。二是支撑了海河流域重大水资源工程建设与管理调度,2008 年以来,陆续组建了五大片区供水网络,累计输水量 86 亿 m<sup>3</sup>,有效保障了京津冀供水安全。项目实施后,年均实现农业灌溉节水 37 亿 m<sup>3</sup>、地下水压采 21 亿 m<sup>3</sup>,并实现湿地面积增加、入海水量增加和粮食产量增加,有效缓解了海河流域用水紧缺的局面,促进了生态环境的改善。



刘家宏

获奖项目主要完成人,中国水利水电科学研究院教授级高级工程师



陆垂裕

获奖项目主要完成人,中国水利水电科学研究院教授级高级工程师



游进军

获奖项目主要完成人,中国水利水电科学研究院教授级高级工程师

健康性。如今,生态文明已经上升到国家战略高度,过去说国家发展建设需要水资源提供保障,现在反过来,经济社会发展进入新常态,发展目标要考虑资源的约束,要以水定发展,以水定规模。因此我们要考虑如何实现五维的、均衡的、大家都认可的调控方案,并且调控标准、阈值、模式都能付诸实施。

我们采用归一化的雷达图评价方法描述了多维、多目标的调控效果,提出了五维多层次递进方案设置技术,构建了4万多个方案,从中筛选得到了7个推荐方案,系统提出了流域综合效益平衡下的六大总量控制目标。

中国水利:海河流域在应用这项研究成果后,预计会达到怎样的效果?曹总,您作为项目的完成人之一,同时也是海河流域变化最直接的见证者,请您给我们介绍一下。

曹寅白:通过我们分析,应用这套调控方案后,节水潜力充分发挥,跨流域调水得到合理配置,在支撑经济社会发展后,可以返还被挤占的生态用水,改善海河生态状况;到2030年浅层地下水水位不再继续下降,深层地下水水位将有所回升;入海水量将达到75亿 $m^3$ ,近海区域盐度降低,有利于生态保护;平原河流和湖泊湿地生态水量提高到70亿 $m^3$ ,满足适宜生态用水需求。

### 他们心中的团队

中国水利:我们了解到,在项目实施中,除了王浩教授和康绍忠教授因为对这一领域作出的突出贡献当选中国工程院院士之外,项目骨干多人获得了国际重要学术奖励,比如有ICID国际节水技术杰出贡献奖、美国地质学会水文地质学杰出主席奖、2009年度英国女王奖等重量级奖

项,还有专家入选了全国杰出专业技术人才、国家“千人计划”等。王院士,能获得这样的奖项,您认为这个团队具有什么样的精神和特质?

王浩:项目的成功与大家的辛勤劳动是分不开的,团队里的每一个人都是最能干的。这方面请仰文教授讲讲。

中国水利:贾所长,您是2002年到中国水科院工作的,听说当时是王院士把您要来的?

贾仰文:是的。要阐释变化环境下的流域水循环演变规律,需要技术工具,分布式水文模型是其中一项重要的基础,当时所里做分布式水文模型的人很少,不过现在已经形成一个团队,这些年轻人都是分布式水文模型的专家。所以,对我们团队来讲,王院士是学术带头人,是首席科学家,他能把握国际趋势和关注的科学问题,也能把能干的科学家和工匠集中到一块。后来王院士把握了我们国家的特点——人口多、人类活动强烈,提出“自然-社会”二元水循环及伴生过程的综合模拟。王院士既立足于国际,又切实把握国家实际的水问题,创造性地提出“自然-社会”水循环的一套理论和方法,这是我们整个研究的最根本的理论基础,也是我们项目的灵魂所在。

另外,出现在获奖名单上的只是其中比较突出的人员。刚开始我们项目申请时团队有60人,除了获奖名单中的15人外,还有许多默默无闻付出的人,目前项目组已经有杨柄老师、秦大庸所长、陈志恺院士、彭世彰教授4位同志先后离去。虽然名单上没有他们,但他们做出的突出贡献是不能磨灭的。

中国水利:在整个项目研究过程中,有什么体会?有哪



牛存稳  
获奖项目主要完成人,中国水利水电科学研究院高级工程师



李建新  
水利部海河水利委员会信息中心主任



郭宗信  
河北省石津灌区管理局总工程师

些印象深刻的事?我们有请其他几位主要完成人介绍一下。

刘家宏:项目总共有八个课题,我在第一课题组研究水循环演变模式与演变机理。通过这个课题,感觉在视野上更宽广了,原来我们只关注地表水、地下水径流等陆面过程,现在还关注大气降水、土壤水;以往谈水资源做水资源,现在还谈水环境、水生态。除了学术上的进步外,更大的是跟随前辈在人品上和学术精神上的收获。他们的科学精神和踏实的工作态度影响了我们,令我们终身受益。

陆垂裕:当时白天跑很多试验点采样,晚上再忙乎几个小时,烘干,称重,分析,经常到深夜。王院士、秦大庸老师教导我们这些数据非常重要,这也是踏实做学问的一种态度。作为年轻人,感觉能获这个奖是一件很幸运的事。一个人的能力和精力是有限的,个人只是庞大机器中的一个组成部分,整个成果产出需要团队的整体付出,尤其这样一个前沿性综合性的大课题。王院士、贾所长站位高,我们比较注重技术细节,在宏观把握方面比较欠缺,在他们的带领下走完整个项目,得到很多锻炼。这是老一辈专家对我们的培养,他们付出了很多心血。

牛存稳:当时参与这个项目时我还是学生,那时我们这儿有男朋友、女朋友的没两三年都分手了,因为这个项目太忙了。记得有一次,我们几个年轻人一起吃饭,王院士问一个小伙子什么时候结婚啊?他说等等吧。王院士说,别等了,再等就黄了。大家一直都把精力、时间放在这个项目上,给予家人、恋人的时间太少,这是我们觉得亏欠的。但尽管如此,相信大家都无怨无悔,能够在这个年龄就参与这么重要的项目,跟随项目研究的进程一同成长,对年轻人而言是一种千载难逢、弥足珍贵的财富。

中国水利:游教授,听说您因为到海委出差,五年去了天津 200 次,一家宾馆从二层到五层的每一间房间您都住过。而且因为经常吃员工食堂,还被当作是宾馆的员工,让你参加了员工晚会。让我们也分享一下您的故事?

游进军:我是 1995 年考入武汉水利电力大学本科,到硕士、博士、博士后和现在的工作,一直从事水文水资源专业。个人感觉整个大环境在变化。刚入学时觉得自己专业工作不好找,现在不一样了。可以说不论是从发展需求、基础设施建设,还是从社会反响、老百姓居住环境等,对水资源水环境越来越重视。说起团队,甘泓老师在这个项目验收完成的阶段突发心梗,送到阜外医院抢救,到现在他爬楼、负重都还有困难。汪林教授几年前身体出现问题,医生建议她手术,但她舍不得拿出一段时间做手术,一直拖到去年,术后要求卧床休息三个月,结果她休息一个月就来工作了。

中国水利:好的。谢谢王院士,谢谢各位专家!通过今天的对话,我们了解到,资源衰减、环境污染、生态退化这些水危机的背后,是强烈人类活动干扰下流域水循环及其伴生过程的演变,高效利用水资源需要统筹协调考虑资源、生态、环境、社会、经济等五大方面的需求。今天王浩院士、王建华所长、贾仰文副所长、曹寅白总工程师给我们介绍了一些水科学领域的前沿观点,科研领域取得的重要成果;团队里刘家宏教授、陆垂裕教授、游进军教授、牛存稳博士给我们分享了在科研过程中的一些感悟,李建新主任、郭宗信总工程师表达了对项目成果应用的喜悦与信心。相信随着项目成果的进一步推广应用,一定会为水利事业发展提供新的有力支撑。同时也期待水利科技领域涌现更多更有价值的科研成果。

本期《特别关注》栏目对话到此结束,谢谢!