我国水安全和水利科技热点与前沿

张楚汉*, 王光谦

清华大学水沙科学与水利水电工程国家重点实验室, 北京 100084

* E-mail: zch-dhh@mail.tsinghua.edu.cn

收稿日期: 2015-04-20; 接受日期: 2015-06-15

国家自然科学基金(批准号: 20141661033)和中国科学院学科发展战略研究(批准号: 20141300325)资助项目

摘要 水安全是社会经济、生态环境乃至国家安全的一个重要组成部分, 与人类生存和社会经济的可持续发展紧密相关. 为引领我国水利学科未来科技创新, 指引水利工程关键科技发展的研究方向, 基于中国科学院技术科学部《水利学科战略发展研究》项目的研究内容, 本文提出我国当前水安全情势和未来中长期需重点关注的若干重大科技问题, 包括: 全球气候变化与人类强烈活动下的水资源安全; 农业水资源高效利用; 河流-湖泊-近海泥沙与生态环境; 水电能源开发的驱动与制约因素, 高坝梯级水电站长期安全运行和水旱灾害防御等六个方面. 立足于国家水安全战略需求, 提出未来我国水利科技发展的前沿科学问题, 以期为我国水利科技的发展研究提供支撑作用.

关键词

水安全
水利科技
研究热点
前沿问题

1 引言

水是生命之源, 生产之要, 生态之基^[1].

水利是国民经济的命脉. 水利与工业、农业、生态、环境、能源、防灾、民生、人文景观等社会经济部门紧密联系, 与国家社会经济可持续发展休戚相关^[2].

水安全不仅涉及防洪安全、供水安全、粮食安全, 而且关系经济安全、生态安全、国家安全. 坚持以人为本, 发挥水利科技引领作用, 依靠科技进步, 保障国家水安全是实现中华民族伟大复兴的重要环节. 习近平总书记在 2014 年 3 月中央财经领导小组第五次会议上, 对保障国家水安全问题发表了重要讲话, 提出了保障国家水安全的基本思路和需要解决的重大问题.

水利科学与工程技术问题来源于人类社会生存和发展的需要, 其目标是认识自然规律并通过多种

技术和工程措施, 对自然界的水和水域进行人为的控制和调配, 以防治水旱灾害, 开发利用和保护水资源. 然而, 我国水安全问题新旧交织, 仍然面临较为严峻的形势, 突出表现在水资源短缺严重、水污染问题突出、水灾害威胁加重、水生态退化严重等方面. 同时, 超强地震、超标洪水及特大地质灾害等因素, 威胁高坝水电站长期安全运行, 甚至诱发高坝失事、危害下游人民生命财产安全. 从科学与技术层面来看, 我们仍存在许多重大瓶颈科技问题需要突破.

中国科学院技术科学部于 2012 年启动《水利学科战略发展研究》项目, 目标是引领我国水利学科未来科技创新, 指引水利科学与工程的技术发展方向. 项目组聚集全国近百名相关学科的专家, 经过两年多的研究, 于 2014 年底完成研究报告初稿. 综合研究报告内容, 提出我国当前水安全情势和未来中长期需重点关注的若干重大科技问题.

引用格式: 张楚汉, 王光谦. 我国水安全和水利科技热点与前沿. 中国科学: 技术科学, 2015, 45: 1007-1012

Zhang C H, Wang G Q. Water security, and hydrosience and technology in China: Focuses and frontiers (in Chinese). Sci Sin Tech, 2015, 45: 1007-1012, doi: 10.1360/N092015-00131

2 全球气候变化与人类强烈活动下的水资源安全

IPCC(联合政府间气候变化专门委员会)通过分析近百年来的气候研究表明全球气候变化和人类活动对水资源具有重要的影响^[3,4]。20 世纪 90 年代,我国雨带南移,降水呈南涝北旱趋势,进入 21 世纪后,雨带北抬,南方降雨减少,但暴雨干旱等极端气候事件频发。因此,在全球气候变化与社会经济快速发展的背景下,我国未来水文情势具有很大的不确定性,现状水资源供需矛盾在未来愈加突出。

我国水文水资源时空分布极不均匀,在空间分布上,水量由东南沿海向西北内陆递减,占耕地 70% 的北方仅占有全国水资源的 16%;在时间分布上,汛期 4 个月水量占全年水量的 60%~80%。在农业用水的区域差异上,南方地区农业用水占总用水量的 51%,北方地区占 74%,其中西北地区占 90%以上^[5]。近 30 年,受全球气候变化的以及水资源的过度开发利用的影响,我国北方黄、海、淮三大流域的河川径流量呈下降趋势,减少了 15%~40%左右,未来的变化仍具有很大大不确定性。我国水资源总量为 $2.8 \times 10^{12} \text{ m}^3$, 占全球总量 6%,人均水资源约 2000 m^3 , 仅为全球人均的 28%。目前,我国年用水总量为 $6200 \times 10^8 \text{ m}^3$, 人均用量为 440 m^3 , 为全球人均用量的 75%, 水资源用量严重的短缺。以黄河为例,近半个世纪虽然流域降水量并无显著变化,但中下游径流锐减,甚至出现上世纪末连续多年下游-河口断流现象。北京的水资源总量也呈下降趋势,由过去 $40 \times 10^8 \text{ m}^3$ 变成现在不足 $30 \times 10^8 \text{ m}^3$, 其中密云、官厅两大水库来水量已不足 $10 \times 10^8 \text{ m}^3$, 地下水量依靠超采维持在年 $20 \times 10^8 \text{ m}^3$ 水平。

随着我国社会经济向建国 100 年时的中等发达国家水平稳步迈进,在农业用水量基本保持不变的条件下,我国工业用水、生态用水和人民生活用水量都将大幅增加,预计到 2030 年,我国水资源需要量将从现在的 $6200 \times 10^8 \text{ m}^3$ 增加到 $7000 \times 10^8 \text{ m}^3$ 以上。水资源供需矛盾将越来越突出。据联合国世界水发展报告^[6],到 2025 年,我国北方将面临物理性缺水的严重压力。为缓解这一突出矛盾,我国开工建设南水北调工程,其东线和中线一期调水工程已经完工并投入使用,西线调水仍在研究论证中,即使调水工程全面完成,但仍需实施最严格的管理制度对水资源

使用进行控制。

综上所述,提出未来我国水资源安全问题的科技前沿问题包括:(1)气候变化与人类活动条件下未来全球-流域/区域-田间多尺度水文过程与水资源变化情势研究;(2)我国地面-地下-天空径流相互转换与调控机制研究;(3)以水信息为基础的水文水资源预测评价模型与方法研究;(4)实施我国最严格水资源管理制度的关键因素研究,包括开源-节流-治污-调配等综合措施;(5)跨流域调水的经济、社会影响、生态环境效应与关键技术研究。

3 农业水资源高效利用

我国农业有效灌溉面积为 9 亿亩,用水总量为 $3700 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{y}$, 占工农业、生活、生态总用水量的 61%。我们以占全球 6% 的淡水资源、9% 的耕地,解决了全球 20% 人口的温饱问题,而且支撑了社会的快速发展。在农业用水分布中,区域差异显著,南方地区农业用水占用水总量的 51%,北方地区占 74%,其中西北地区占 91%。灌溉对粮食增产起重要作用,根据统计,全国各流域灌溉地与非灌溉地的产量增长系数为 1.61(东北)、1.78(长江)、1.99(西南)、2.24(东南,珠江)、2.78(黄河、海河、淮河流域)、2.73(内陆诸河)。然而,我国农业灌溉的效率仍不高,与发达国家相比^[7],单方灌溉水粮食产量仅 $1.1 \text{ kg}/\text{m}^3$,而发达国家达 $2.5 \sim 3.0 \text{ kg}/\text{m}^3$,灌溉水有效利用系数仅为 0.5,而发达国家达 0.7~0.8,因此农业增产节水潜力仍然巨大。综上所述,提出农业节水、粮食保障与水资源科技前沿问题有:(1)农业水资源高效利用关键技术研究;(2)植物光合作用与蒸腾耗水关系,光合速率饱和与其蒸腾速率变化的最优灌溉模式研究;(3)未来气候变化条件下我国不同作物(小麦、水稻等)的灌溉需水量的变化趋势研究;(4)灌区节水的水文与生态环境效益研究;(5)高新科技(分子生物节水技术、信息技术、遥感等)在节水农业中的应用研究等。

4 河流-湖泊-近海泥沙与生态环境

我国河流-湖泊-近海泥沙与生态环境面临严峻形势,一是由于水土资源的过度开发,导致河流数目大幅度减少,按全国水利普查公报^[8],流域面积 100 平方公里以上的河流总数为 22909 条,与 20 世纪中

叶相比有大幅度减少;二是由于河流泥沙淤积,导致有近 1/2 河流功能衰减,有 1/3 河流淤积萎缩;三是河流、湖泊、水库、地下水水质污染问题仍然严峻,其中黄河、海河、淮河、辽河四大流域仍有 40%-60% 的河段水质属 IV~V 与劣 V 类,地下水较差和极差比例占 55% 以上,重点湖泊富营养化比例占 25%,如图 1 所示;四是黄河、长江由于上游来沙量逐年减少,河口海岸开始退蚀,生态系统受到影响.如长江下游控制站大通站在 2003~2011 年平均输沙量是 1951~2011 年的 37%,长江口底栖生物种类 2010 年比 1980 年减少 80%,生物量减少 58%.由此可见,我国河流-湖泊-近海的物质通量发生了巨大变化,河流梯级化明显.导致上述问题的原因主要是水资源过度消耗,工农业发展和城镇化引起的过度排放,坝库拦截泥沙等人类活动以及气候变化因素^[9]的影响.

综上所述,提出河流-湖泊-近海泥沙与生态环境的前沿科技问题包括:(1)水沙运动与生态环境的多尺度交互作用机理,包括泥沙-河流-流域地貌演变的物理过程以及河流泥沙、氮、磷等物质通量和流域(河湖、河网、湿地)生态环境的物理、化学、生物学相互作用;(2)人类活动因素,如工程开发、土地开发、工农业用水与污水排放,城镇化、生活用水、水土保持等因素相互耦联作用;(3)河流系统的宏观平衡与生态环境修复的关键水动力、地貌和生物多样性要素;(4)长江、黄河未来水沙情势与环境生态要素预测.

5 水电能源开发的驱动与制约因素

我国水电能源储量居世界首位,近年开发速度增快,迄今共有水电装机容量 3.0×10^8 kW,占电力总装机容量的 22.7%,仍有不到 50% 的水电资源正在或有待开发,如图 2 所示.

目前驱动我国水电能源继续较快开发的因素:一是我国的“科学、绿色、低碳”能源战略要求逐渐减少对占 70% 的煤炭能源的依赖,以缓解环境-生态的压力;二是 CO₂ 等温室气体减排的迫切需求,我国目前的 CO₂ 排放量已超过 90 亿吨,减排压力巨大;三是大规模风电、太阳能发电并网和水电(包括抽水蓄能发电)的调峰补偿功能要求水电加快发展;四是中小型水电对山区农村经济社会发展的支撑作用.因此,我国在 2020 年前预计新增装机容量约 1.2×10^8 kW,集中于西南诸河流域和黄河上游:2020~2030 年内有

0.9×10^8 kW,集中于西南诸河上游:2030~2050 年有 0.8×10^8 kW,集中于西藏与云南两地.在一定的自然、社会和经济环境下,水电能源开发的关键驱动与制约因素在于综合高效利用流域水能资源的同时,如何减少对生态环境的影响以及水库移民问题.综上所述,水电能源开发需要研究的前沿科技问题有:(1)水电能源开发与我国资源配置和能源结构调整的协同规划问题;(2)梯级水电站群防洪、发电、航运、供水和生态环境等综合优化调度研究;(3)水电能源开发导致的河流梯级化流域生态环境演化机制问题;(4)移民问题;(5)水电与风、光、海洋等可再生能源的调节互补问题.

6 高坝梯级水电站长期安全运行

高坝梯级水电站的长期安全运行涉及坝下游人民生命财产安全,是水安全的重要组成部分.截止 2010 年我国已建在建 30 m 以上大坝 5564 座,在防洪、发电、灌溉、供水、航运等方面发挥着巨大的作用.我国高坝梯级水电站建设主要集中于西南地区,主要特点为:坝高达 300 m 级,库容达几十亿至百亿立方米,泄洪流量大,长江干支流骨干工程设计洪水流量高达 $(2 \sim 5) \times 10^4$ m³/s,三峡设计洪水量超过 12×10^4 m³/s,泄洪能量集中,消能难度大;坝址处于地震高烈度区,设防烈度达 8~9 度以上;地质条件复杂,地下电站规模巨大等等.由此可见,强震、复杂地质和洪水等严酷自然条件下的高坝水库群,长期运行安全是水安全保障的基本战略目标.

根据世界高坝安全事故原因分析,高坝水电站主要致灾因子包括超强地震、超标洪水以及特大地质灾害.如 1999 年我国台湾石冈坝地震断裂,1971 年美国洛杉矶上游 San Fernando 地震导致 Van Norman 土坝地震滑坡,几乎造成漫顶,1975 年我国板桥、石漫滩洪水漫顶溃坝,1959 年法国 Malpasset 拱坝坝基失稳溃坝,1963 年意大利 Vajont 拱坝库岸滑坡涌浪等.综上所述,提出高坝梯级水电站安全运行的前沿科技问题有:(1)高坝地震全过程模型研究,从震源破裂到介质传播到高坝响应统一于一个模型中,精细分析大坝地震作用过程;(2)高坝-水库-地基强非线性耦合,包括大坝地震破坏过程研究;(3)强震作用下,库群滑坡-泥石流-堰塞湖-溃坝灾害链研究;(4)地基与体、材料宏观动力破坏机理研究;(5)高土石坝洪

图1 2013年重点湖泊(水库)综合营养状态指数
数据来源: 2013年中国环境状况公报^[10]

图2 1949~2013年中国水电装机容量

水溃坝过程研究; (6)综合经济投入-工程设计-灾害-人 员、经济损失与环境影响的风险评价体系研究。

7 水旱灾害防御

我国洪旱灾害频繁, 每年损失巨大, 中小河流、

大中城市和沿海发达地区的公共安全面临严峻挑战. 受极端气候条件和高强度人类活动的影响, 近年我国水旱灾害频繁发生, 包括沿江平原区的江河洪水、大中城市区的城市洪涝、山地丘陵区山洪与滑坡泥石流、沿海地区的风暴潮、遍及全国各地区的干旱等五大类型。

目前,我国大江大河防洪体系已基本形成,但防御特大洪涝灾害能力仍较薄弱.总体上,水旱灾害威胁仍然严重,带来人员伤亡与经济损失仍然巨大,如 20 世纪洪涝灾害年平均死亡人数达 4000 人以上,21 世纪降为 1400 人,水旱灾害直接经济损失仍占 GDP 的 1.28%,其中洪涝灾害占 GDP 的 0.64%^[11];小河流与山洪泥石流灾害更为突显,其经济损失占洪涝灾害的 80%,山洪死亡人数占洪涝灾害的 76%.此外,近年来洪涝灾害一个大的特点是城市洪涝灾害增加,从 2006 年以来,每年遭受城市洪涝灾害的县级以上城市超过 100 个.近年来,北京、重庆、天津、武汉、杭州、成都、南京、广州、深圳等大城市都发生过大洪涝灾害,其原因可能与区域气候变化导致孤岛热效应使暴雨增大,城镇化地表硬化导致入渗减少,以及各大城市原有防洪排洪设施标准偏低等有关.风暴潮对沿海的威胁也很严重,仅 2012 年就有 17 个省、753 个县受灾,经济损失达 650 亿元.此外,我国有 71% 的干旱县、干旱年均损失为 1500 亿元.本世纪以来的重大旱灾包括 2000 年、2001 年的全国大旱,2006 年川渝大旱、2009 年北方大旱、2010 年西南五省特大旱、2011 年北方、长江中下游大旱等^[12].综上所述,关于水旱灾害防御的前沿科技问题包括: (1)水

旱灾害机理研究; (2)灾害时空分布规律与预报预警研究; (3)强变化条件下灾害动态风险管理系统研究; (4)洪旱灾害防御中的信息化与决策应急系统研究等.

8 结语

综上所述,我国未来水利科技研究的重点应紧紧围绕以下几方面的核心问题. (1)在水资源安全保障方面: 未来气候变化影响下水资源供需预测、水资源的跨流域时空调配以及以节水、治污、开源、调配为核心的最严格水资源管理技术; (2)在流域水沙-环境生态方面: 在工农业发展、城镇化、大规模水利工程建设条件下未来河流水沙与生态环境变化趋势预测、河流水沙与生态环境的物质通量的相互作用以及河流系统水动力、地貌与生物多样性等要素的平衡与调控问题; (3)在水电能源开发与长效安全运行保障方面: 重点研究极端致灾因子如超强地震、超标洪水与复杂地质条件下水电站高坝枢纽群的灾害链风险问题; (4)在洪旱灾害防御方面: 重点研究极端气象条件与人类活动影响下的江河洪水、城市洪涝、山洪泥石流、风暴潮与干旱的灾害机理与风险控制问题.

参考文献

- 1 中共中央国务院关于加快水利改革发展的决定. 中共中央文件 1 号, 2011
- 2 国务院关于实行最严格水资源管理制度的意见. 国务院, 2012
- 3 The United Nations World Water Development Report 4
- 4 CHANGE O N C. Intergovernmental Panel on Climate Change. Working Group I: Summary for Policymakers, 2001
- 5 中国水资源公报. 中华人民共和国水利部, 1997-2013
- 6 Change I P O C. Climate change 2007: Synthesis report. Geneva: IPCC, 2007
- 7 Griffin R C. Water resource economics: The analysis of scarcity, policies, and projects. MIT Press Books, 2006, 1
- 8 第一次全国水利普查公报. 水利部-统计局, 2013
- 9 Vörösmarty C J, McIntyre P B, Gessner M O, et al. Global threats to human water security and river biodiversity. Nature, 2010, 467: 555-561
- 10 中国环境状况公报. 中华人民共和国环境保护部, 2013
- 11 中国水旱灾害公报. 国家防汛抗旱总指挥部, 2006-2013
- 12 UNISDR M. UNISDR Terminology for Disaster Risk Reduction. United Nations International Strategy for Disaster Reduction (UNISDR) Geneva, Switzerland, 2009

Water security, and hydroscience and technology in China: Focuses and frontiers

ZHANG ChuHan & WANG GuangQian

State Key Laboratory of Hydroscience and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China

Water security, one of the most important part of socioeconomical, ecological environment and even national security, is closely related to human survival and sustainable social economic development. As a prospective study to the future science and technology innovative development in hydraulic engineering, six major technology issues concerning current water security situation that require focuses in the medium to long term future are proposed based on the “Water conservancy strategic development research” set up by the Technological Science Division of CAS, which includes (1) water security under global climate change and human activities, (2) efficient utilization of water resources in agriculture, (3) rivers-lakes-coastal sediment and ecological environments, (4) the drive and restriction key factors of hydropower energy development, (5) long-term safety operation of cascade hydropower stations with high dams, (6) flood and drought defense. Based on the national security strategy of water demand, frontier scientific issues of water science and technology were proposed herein aimed to provide impetus and support for the research and development of hydroscience and technology.

water security, hydroscience and technology, attractive field, frontier issues

doi: 10.1360/N092015-00131