



王忠耀 赵全胜
喻霞临 武明鑫

自新中国成立以来，发展水电一直是我国能源电力的重要战略方针，水电在电力工业中发挥了中流砥柱的作用。党的十八大以来，水电开发贯彻“创新、协调、绿色、开放、共享”新发展理念，继续保持高速发展态势，并迈进高质量发展新阶段：全国常规水电新增投产规模约1.26亿千瓦，抽水蓄能新增投产1606万千瓦。截至2022年6月底，我国水电装机容量达4.0亿千瓦（其中抽水蓄能0.42亿千瓦），占全国发电装机容量的16.4%。水电工程在保障我国供水安全、能源安全、应对气候变化和节能减排等方面，发挥了不可替代的重要作用。

党的十八大以来，我国高度重视科技创新工作，坚持把创新作为引领发展的第一动力。这十年，我国水电领域技术创新，以重大工程为依托，以成果转化为重点，在标准、技术、设备、体系各方面取得全面进步，技术水平领先世界。

水电行业标准创新奠定基石

水电行业技术标准体系研究，建立了水电行业技术标准体系框架结构，形成涉及规划、勘察、设计、施工、验收、运行、管理、维护、加固、拆除（或退役）等水电行业全生命周期技术标准体系共1100余项规范，适应了水电行业发展的新形势、新任务、新要求。党的十八大以来，针对我国水电行业技术标准“重建轻、轻运维”的现状，加大了“建设、运维并重”相关标准研究。

中国水电技术标准“走出去”课题研究，全面系统收集整理了中国承建国际水电工程项目的技术标准使用情况，系统总结了国内外技术标准在国际水电工程中的使用现状、成功经验和存在的问题，全面对比分析了中外技术标准在设置结构、内容、使用、管理等方面的主要差异，提出了“接轨国际、适应国情”的中国水电技术标准体系框架。通过研究，搭建了中国水电标准中英文查询平台，提出了我国水电技术标准国际化工作方案，加快推进水电行业技术标准英文

赵增海 郭雁珩 宋述军
艾琳 邱辰

随着国家能源战略的逐步实施，经济社会清洁发展的纵深推进，在各项政策的大力推动下，无论是绿色电力生产端还是消费端都面临着重大机遇，可再生能源绿色电力证书（以下简称“绿证”）制度，正是我国促进可再生能源发展、推动能源体制改革、实现碳达峰碳中和目标的重要途径。

绿证是推动能源绿色低碳发展的重要途径

可再生能源为推动我国能源结构转型发挥积极作用。中国电力行业碳排放量约占排放总量的50%，减少电力行业碳排放是实现“2030碳达峰、2060碳中和”目标的关键，稳步发展可再生能源、助推生产端能源结构转型是电力行业低碳、绿色、清洁发展的必然选择。在国家各项政策支持下，我国可再生能源行业发展迅速。截至2021年12月底，可再生能源发电装机容量达到10.63亿千瓦，发电量持续增长，2021年全国可再生能源发电量达2.48万亿千瓦时，在推动我国能源结构转型方面发挥了积极作用。

绿证是发挥环境价值支持可再生能源发展的重要机制。随着全社会绿色电力消费意识的提升，用户消费绿色电力的比例和来源需要科学的计量方式和权威机构证明。为了保障绿色电力环境属性的可追溯性，

版翻译出版工作，对中国水电技术标准“走出去”具有重要的指导意义。

党的十八大以来，在国家能源局的领导下，水电行业总结提炼建设经验，广泛凝聚行业力量，反复打磨修订了《混凝土拱坝设计规范》《混凝土面板堆石坝设计规范》《碾压式土石坝设计规范》《混凝土重力坝设计规范》《水工工程边坡设计规范》《水工隧洞设计规范》等一系列核心关键的设计规范，并制定了《抽水蓄能电站设计规范》《水库放空技术导则》《梯级水库群安全风险评估导则》等面向新时期新形势水电发展需要的技术标准，有力引领了水电技术高质量发展。

水电领域技术创新领先世界

党的十八大以来，我国继续扎实推进金沙江白鹤滩、乌东德，雅鲁藏布江两河口、澜沧江黄登，大渡河猴子岩、双江口等重大水电工程建设。集中建成和新开工建设的这批巨型工程，标志着我国在300米级高混凝土拱坝、200米级高碾压混凝土重力坝、250米级高混凝土面板堆石坝、300米级高土心墙堆石坝、700米级高边坡加固处理技术、高水头大流量泄洪消能技术、巨型地下洞室群建设技术、深埋长隧洞设计建设技术、复杂地基处理技术等方面不断取得技术突破。

新型材料不断进步。堆石混凝土以自密实性能替代传统混凝土振捣（碾压）密实工艺，使用大量块石减少水泥用量，降低水化热温升，简化温控措施，综合单价降低，施工效率提高，目前已建在建的堆石混凝土坝142座。堆石混凝土坝不仅是中国坝工取得突破的标志性技术发明成果之一，也得到了国际上的广泛认可。胶凝砂砾石坝是融合了土石坝和混凝土坝优点的新坝型，实现了用当地材料在岩基、非岩基上筑坝坝顶不溃的突破。防渗新材料方面，我国研制的改性沥青混凝土面板抗低温技术，冻融温度平均值为-46℃，在呼和浩特抽水蓄能电站上水库得到成功应用。土工膜防渗技术经过不断的改良创新，成功应用于老挝南欧江六级电站，复合土工膜面板堆石坝坝高85米，筑坝软岩比例高达81%，获得了中国建设工程鲁班奖。

新型工艺不断涌现。经过多年

工程实践、运用与探索，在深厚覆盖层处理工艺方面，取得了较大突破。混凝土防渗墙方面，已初步解决深厚覆盖层内防渗墙成槽难、清孔难、浇筑易堵管等问题，防渗墙施工技术能力已达200米级深度范围。振冲碎石桩方面，金沙江上拉哇水电站围堰基础采用SV70碎石桩机+伸缩式导杆连接振冲器造孔制桩的施工工艺，成功实施最大加固深度为72米的振冲碎石桩，其超深厚覆盖层工程坝基也已成功试桩深度约90米的振冲碎石桩。超深钻孔方面，研发了孔口封闭装置、加重泥浆技术，采用孔口封闭装置与加重泥浆护壁钻孔工艺，形成一套深厚覆盖层涌水涌砂条件下钻孔技术，可在一定程度实现带压或控压钻进，有效解决了高水头、动水条件下150米深覆盖层钻孔过程中的“涌水涌砂、塌孔不成孔、漏浆”等难题。

新型设备自主引领。我国水电设备通过“引进再创新”，实现了跨越式发展，具备了自主研制大型水电机组的能力，混流式、轴流转桨式和灯泡贯流式水机组的设计制造水平均已达到世界先进水平。伴随着抽水蓄能电站规模快速发展，设计、施工、设备制造能力不断提升，中国自主研发的抽水蓄能成套设备已达国际领先水平。世界上单机容量最大的白鹤滩水电站1000兆瓦水机组，在机组设备研制、设计、制造、材料等领域推动了我国特大型水电设备设计制造技术的全面发展。

创新技术攻克难题。“高坝动静力超载破损机理与安全评价方法”“高土石坝抗震设计理论与工程应用”“高坝泄洪消能防护和雾化安全技术与应用”“高混凝土面板堆石坝安全关键技术研究与工程应用”“超高心墙堆石坝关键技术及应用”“特大型水轮机控制系统关键技术、成套装备与产业化”“300米级溪洛渡拱坝智能化建设关键技术”“锦屏二级超深埋特大引水隧洞发电工程关键技术”等研究成果，均获得了科技进步奖。这些成果，凝聚着中国大坝工程师和科技工作者的辛勤耕耘和刻苦攻关，不仅成就了我国一批巨型工程的成功建设，也推动了我国水电技术的全面进步。

为世界提供绿色环境友好产品的“中国方案”

——我国可再生能源绿色电力证书发展及展望

国际上通常采用绿色电力证书作为绿色电力消费的证明方式，1个绿证对应1000千瓦时的电。作为独立的绿色电力计量工具和绿色电力环境价值交易载体，绿证在国际上已运行多年，主要分为强制和自愿两个市场。

强制市场将可再生能源配额制作为绿证的配套政策，通过法律、法规形式对可再生能源电力的市场份额作出强制性规定。政府向可再生能源发电企业发放与其上网电量相对应数量的绿证，配额义务主体可通过向发电企业购买绿证以证明完成配额目标，以实现提高可再生能源利用比例的目的。英国、澳大利亚、瑞典、日本、韩国及其他20多个国家，以及美国29个州和华盛顿特区等地均实施了配额制政策。国际经验表明，配额制及绿证交易是促进可再生能源产业持续健康发展的重要手段之一。

除绿证强制交易外，有经济承受能力、具有环境保护意识的个人和企业可以通过自愿的方式购买绿证，支持可再生能源发展。截至目前，全球共有超过300家企业承诺未来实现100%使用可再生能源电力。

绿证是兑现新能源环境价值，支持新型电力系统建设的重要力量。新能源电力具有物理电量和绿色环

境价值双重属性。面对多重经济压力，通过绿证交易兑现新能源环境价值将成为向新能源发电提供正向价值激励、保障行业可持续发展的关键因素，进而有力支持构建以新能源为主的新型电力系统建设。

我国绿色电力证书发展情况

绿证核发交易总体平稳有序。我国自2017年启动自愿绿证交易，并明确适时建立强制绿证交易市场。根据国家发展改革委、财政部、国家能源局联合印发的文件要求，由国家可再生能源信息中心作为第三方机构建设运行全国绿证认购交易平台，同时负责全国绿证的核发及交易组织工作。目前，已初步推动全社会形成了较好的绿色电力消费共识。

从绿证类型看，目前我国绿证主要包括补贴绿证和无补贴绿证两类。其中补贴绿证核发范围为纳入国家补贴清单的陆上风电、光伏电站项目；无补贴绿证核发范围为平价（低价）陆上风电、光伏发电项目，以及超过全生命周期合理利用小时数或者达到补贴年限的可再生能源发电项目。截至2022年7月底，全国补贴绿证累计核发数量约3421万个，累计认购数量约7.9万个。全国无补



科技创新助力高原明珠两河口电站顺利建成（雅鲁藏布江流域水电开发有限公司、水电水利规划设计总院提供）

数字化智能化技术创新助力发展

党的十八大以来，信息化、数字化、智能化技术更加广泛、深入应用于水电工程建设与运营各环节，对提高工程建设智能化水平、运行智慧化水平、管理精细化水平发挥了重要作用。

信息化数字化技术形成更大发展合力。以BIM、大数据、云边协同为代表的新一代信息技术的不断融合与创新，极大地推动水电工程的数字化转型。基于BIM的设计施工一体化取得积极进展，并在杨房沟、白鹤滩等工程开展了实质性应用。BIM设计与施工已成新常态，基本形成了工程数字化的基础能力，有力支撑了工程数字生态和数字孪生工程的建设。智慧工地、智慧电厂等数字化管控手段得到广泛应用并持续改进，有效提升了现场管控效率和质量。以抽水蓄能电站群智能选点规划为代表的抽水蓄能全周期数字化智能化技术已开展大量有益探索。

智能建设技术创新方兴未艾。物料轨迹追踪管理系统可追踪建筑材料的采、运、储、用，实现建筑材料的实时监控管理。智能碾压技术已广泛应用于大型堆石坝和碾压混凝土坝的碾压控制，可实现按照预定碾压轨迹、碾压遍数进行监控和报警，显著提高大坝填筑质量。该项技术起步于糯扎渡工程，并在长河坝、双江口、两河口、猴子岩等工程中均有成功应用。无人驾驶智能碾压突破

了高精度高鲁棒性循迹管理关键技术，在两河口实现了无人碾压机群的协同作业，已大规模应用于坝体填筑。智能温控技术已突破前端快速感知、全周期全域实时分析、全过程精确控制的技术难题，广泛应用于各类混凝土工程，并在白鹤滩、乌东德等项目实现全过程全环节智能管控。智能灌浆系统采用计算机控制自动配浆、自动调压，实现常态情况下的全自动灌浆，有效提升了灌浆过程管控效率。抽水蓄能电站积极推进全面机械化智能化施工，在设计理念、装备技术、施工配套技术、建设管理技术方面都取得新的突破和实践，TBM智能掘进技术已成热点。

水电流域系统创新展开新篇

党的十八大以来，我国水电开发程度过半，主要大江大河特别是中下游干流的水电开发基本完成，全国主要流域梯级水电站开发格局、库群联合调度运行管理机制初步形成，全面开展了流域水电综合监测，梯级调度运行管理水平和安全风险管控能力持续提升。梯级水库群的开发，发挥了发电、防洪、供水等综合效益，主要河流沿江交通得到系统性规划建设，加快了民族地区经济社会发展，实现企业、政府、社会的合作共赢。

金沙江、雅鲁藏布江、澜沧江、大渡河等大型流域均组建了梯级调度运行管理机构，利用物联网、大数据、云计

算等数字技术，开发了从气象预报、水情预报、需求预测、梯级发电出力自动匹配生态调度等功能的流域梯级智慧调度运行管理平台。

在工程健康检查和诊断方面，初步开展了物联智能感知设备与技术研发、深水与超长距离水下探测关键技术及设备研发、大坝安全鉴定及评价关键技术研究等工作。在水电工程升级改造方面，开展了水下修复、渗漏处理、缺陷处理、加固处理、水库淤积处理、机组维修、生态流量设施改造、监测自动化系统改造等工作。在高坝大库放空技术方面，提出了连续多级闸门联合挡水的新型放空系统及其自动化控制的技术创新。

国家973项目开展了“梯级水库群风险等级确定与风险设计”研究，并根据课题成果完成了流域安全相关行业标准的编制和发布。流域水电工程安全与应急管理技术体系逐步形成。智能监测预警系统、遥感识别技术的应用实现了“人机结合”决策模式与技术流程，为流域地质灾害防治提供了新的手段。

未来，水电行业科技创新将立足新发展阶段、贯彻新发展理念、构建新发展格局、推动高质量发展，应对水电开发面临的更为复杂的建设条件、更高的生态环境保护和社会公共要求，以及建设新型电力系统、大力提升系统调节能力的需求，为推动能源技术革命，构建清洁低碳、安全高效的能源体系提供坚强保障。

善可再生能源绿色电力证书制度，从2022年起，逐步建立以可再生能源绿色电力证书计量可再生能源消纳量的相关制度。为发挥政策合力，需要做好绿证制度与可再生能源电力消纳保障机制的充分衔接。

二是核算新增可再生能源消费。2021年底，中央经济工作会议提出“新增可再生能源和原料用能不纳入能源消费总量控制，创造条件尽早实现能耗双控向碳排放总量和强度双控转变”。国务院印发的《“十四五”节能减排综合工作方案》进一步明确，“各地区‘十四五’时期新增可再生能源电力消费量不纳入地方能源消费总量考核，原料用能不纳入全国及地方能耗双控考核。”绿证作为绿色电力消费的唯一凭证，可用于核算新增可再生能源电力消费量。

三是计量二氧化碳减排量。碳交易是温室气体排放权交易的统称，目前世界上很多国家和地区都建立了碳交易体系。我国在前期试点基础上，于2021年7月16日正式启动碳交易市场。碳交易、绿证等相关机制都是服务“双碳”目标的重要市场化机制，是天然且精确的二氧化碳减排量计量方式，未来将与碳交易有效衔接，助力绿色低碳发展。

总体来看，我国绿证政策设计充分借鉴了国际先进经验，但同时也体现了基于中国国情的设计理念。中国绿证也将为世界提供绿色环境友好产品的“中国方案”，为助力我国碳达峰碳中和目标实现作出历史性的贡献。

心。截至2022年7月底，已核发绿证交易对应绿证超过108万个。

形势与展望

能源发展战略要求持续提升绿色电力消费水平。国家提出碳达峰碳中和目标，电力作为碳排放重点行业，亟须推动发电端能源结构调整和消费侧绿色电力消费水平提升。国务院印发的《关于加快建立健全绿色低碳循环发展经济体系的指导意见》明确提出“推广绿色电力证书交易，引领全社会提升绿色电力消费”，国务院办公厅转发的《关于促进新时代新能源高质量发展的实施方案》提出“完善绿色电力证书制度，推广绿色电力证书交易”。绿证作为绿色电力消费的唯一凭证，将在绿色低碳发展中发挥重要作用。

相关政策机制推动绿证应用场景不断拓展。

一是计量可再生能源消纳量。《关于建立健全可再生能源电力消纳保障机制的通知》明确，各承担消纳责任的市场主体以实际消纳可再生能源电量为主要方式完成消纳量，同时可通过认购绿证等补充（替代）方式完成消纳责任权重。《关于2022年可再生能源电力消纳责任权重及有关事项的通知》提出，健全完

贴绿证核发工作于2021年5月正式启动，截至2022年7月底，无补贴绿证累计核发数量约1139万个，累计认购数量约197万个。

国际可再生能源100%消费计划组织（RE100）、绿色和平等国际非营利性组织持续倡导绿色低碳发展，除绿证强制市场外，自愿认购绿证提升绿色电力消费水平已成为重要趋势。我国绿证已于2020年初实现了与RE100的互认，在国际市场形成一定的影响力。

衔接绿色电力交易试点。2021年8月，国家发展改革委、国家能源局复函国家电网公司、南方电网公司《关于绿色电力交易试点工作方案》的请示》，推动开展绿色电力交易试点工作。2021年9月7日，全国绿色电力交易试点正式启动，共17个省区的259家市场主体参与了首次交易，成交电量79.35亿千瓦时（交易期限为1年~5年），成交均价较煤电基准价增加约2分/千瓦时，较当地电力中长期交易价格增加3分/千瓦时~5分/千瓦时。

目前绿证核发交易制度已实现与绿电交易试点的有效衔接，国家可再生能源信息中心按照国家相关要求，根据绿电交易结算数据批量核发绿证至北京、广州电力交易中