对于黄河流域，能源是资源禀赋，是推动流域发展的动力，也是实现生态保护和高质量发展的抓手。

黄河：以水为基，重塑能源流域

文／本刊记者　张越月

谈到“中华民族摇篮”和“华夏文明起源地”，绝大多数中国人会想到黄河流域。近些年，这片总面积超过750万平方千米的区域有了一个新标签——能源流域。

在黄河流域生态保护和高质量发展上升为重大国家战略后，“能源”已多次出现在相关规划里。如2022年6月由生态环境部等四部门联合印发的《黄河流域生态环境保护规划》（以下简称《规划》），“能源”一词在这份文件中出现了25次，集中在“增强应对气候变化能力”一节中。这节的核心观点就像中国工程院院士、生态环境部环境规划院院长王金南在解读《规划》时所说：“黄河流域要‘有多少汤，泡多少馍’，要把水资源作为最大的刚性约束，坚决抑制不合理用水需求。”

生态环境部环境规划院环境政策部副主任董战峰表示：“黄河流域能源发展与水资源刚性约束的矛盾突出。”要化解矛盾、重塑能源流域，需要把能源转型和流域保护相结合，在“双碳”目标下以水为基、因水施策、量水而行。

产业转型：坚持以水定产

2019年，习近平总书记在黄河流域生态保护和高质量发展座谈会上指出，要坚持绿水青山就是金山银山的理念，坚持生态优先、绿色发展，以水而定、量水而行，因地制宜、分类施策，上下游、干支流、左右岸统筹谋划，共同抓好大保护，协同推进大治理，着力加强生态保护治理、保障黄河长治久安、促进全流域高质量发展、改善人民群众生活、保护传承弘扬黄河文化，让黄河成为造福人民的幸福河。

在黄河流域，能源生产和水资源利用之间的难题就出现在“以水定产”上，特别是采煤、煤化工和发电等环节——煤炭开采不仅耗水量巨大，且会产生大量的矿井水，但由于处理成本高、处理后的水质与用户需求不匹配等原因，矿井水利用率偏低；在煤化工环节，我国四大现代煤化工产业示范区中的三个分布在黄河流域，煤化工项目均耗水量巨大，虽然示范区的大型企业已经采取措施加强水资源的循环利用，但众多的小型企业仍采用粗放的用水方式；在发电环节，发电机组需要大量的水进行冷却，而排放出的冷却水温度相对较高，会造成河流排放口周边的河流温度上升，进而对水域生态系统造成影响。

石油和化学工业规划院副总工程师韩红梅认为：“如何在项目边界内做到用水最少，可以说是需要全行业共同探索的难题。”

目前，“以水定产”在能源行业落实可以借助两种方式：一是监管，二

“四水四定”

2019 年，习近平总书记在黄河流域生态保护和高质量发展座谈会上提出坚持“四水四定”，即以水定城、以水定地、以水定人、以水定产。

是技术。在监管方面，煤化工项目、煤矿项目环评审批更加严格，在用水指标有限和高水价的限制下，煤炭及煤化工企业加强废水深度处理循环利用补充企业用水将成为必然选择。在技术方面，对于黄河流域这样的干旱缺水地区，在碳排放量还有一定上升空间且水资源极度紧张的情况下，可以采用如空气冷却等节水型技术。

从长远看，“以水定产”可以推动流域能源产业实现重塑和升级。国家发展改革委能源研究所原所长韩文科表示，“以水定产”对耗水大的项目有极严厉的约束作用，会使一些地区倒逼没有效益和市场前景的煤化工项目转型。

梯级联动：借力数字孪生

不久前，水利部黄河水利委员会印发《数字孪生黄河建设规划（2022—2025）》（以下简称《规划》），所谓数字孪生技术，是指在数字世界中建立与物理实体的性能完全一致，且可对其进行实时仿真的模型。

数字孪生黄河可以追溯到2001年的建设“三条黄河”，当时，黄河委员会提出要建设“原型黄河”“数字黄河”和“模型黄河”，其中的“数字黄河”就是要借助现代化手段，对黄河流域及相关地区的自然、经济、社会等要素构建一体化的数字集成平台和虚拟环境。数字孪生黄河可视为“数字黄河”的延续。

作为七大江河流域首个数字孪生建设规划，《规划》明确了“十四五”初步建成“2+N”智能业务应用体系的目标。其中的“2”指的是在黄河重点防洪地区基本实现水资源管理与调配“四预”；“N”指的是推进水文业务管理、水土保持、水利工程建设及运行管理等N项重点业务应用。对于水电项目的管理就是N的一部分。

长远看，数字孪生的意义将在合理调配流域能源中体现。黄河勘测规划设计研究院的研究表明，黄河是我国七大江河中水能资源开发利用程度较高的河流，目前，黄河干流规划水电梯级42 座，总装机容量已达3444万千瓦。要让流域内梯级电站之间实现更好的联动，需要借助数字孪生技术，综合多领域数据进行分析研判，系统整合各电站历年电量数据，在对电站累计发电量、发电计划完成情况、电站运行负荷、发供电能力等关键指标进行科学分析的基础上，统筹在既定负荷下，为各个梯级站的经济运行、优化调度提供科学决策依据，实现梯级电站综合效能最大化。

当前，黄河流域的多个水电项目已经引入数字孪生技术。在位于山西的万家寨水电站，数字孪生将聚焦防洪调度、防凌调度、泥沙调度、大坝安全分析预警等重点业务，充分整合现有信息化资源，实现对运行管理进行实时监控，进而发现问题并优化调度；在位于河南的小浪底水电站，基于数字孪生小浪底三维空间动态展示枢纽发电及泄洪孔洞的当前运行状态、当日泄流、发电等过程数据，调度方案预演则直观演示了不同调度方案下枢纽运行情况，帮助电站进行科学决策。

资源利用：发挥两个“互补效应”

从今年3月至今，多个抽水蓄能项目在黄河流域开工。这不是偶然，黄河流域新能源发电资源极为丰富，据统计，黄河流域八省区（不包括四川省）的风能资源理论开发储量和技术开发储量均为全国总储量的44.5%左右，光伏资源理论储量则占全国陆上理论储量的32.93%。《“十四五”可再生能源发展规划》中明确建设的八个新能源基地中，有三个位于黄河流域。

开发容量虽可观，但黄河流域新能源发电项目面临和其他地区同样的问题——如何让绿电送得出、用得好，这离不开灵活调节资源的助力。一直以来，煤电是黄河流域灵活调节的主要“担当”，在煤电灵活性资源占地区灵活性资源总供应量比重方面，西北、华北送端地区均达到70%以上。但在“双碳”目标下，灵活性资源除了要灵活，更要绿色，这就需要水电特别是抽水蓄能的参与。

当前，黄河流域上中游地区已建抽水蓄能装机容量约为240万千瓦，仅占全国总装机容量的7.4%。但从条件看，黄河流域上中游地区为抽水蓄能选点提供了巨大的空间。黄河勘测规划设计研究院有限公司谢遵党等在《双碳目标下黄河流域水土风光资源一体化开发模式研究》中指出，黄河流域上中游地区地域辽阔，地形起伏大且多山地。据统计，宁夏、甘肃、内蒙古、山西的山地占比分别为20.9%、25.9%、20.9%、36%。同时，西北地区地广人稀，各类自然保护区及生态红线等禁止开发区域面积相对较小。

“十四五”时期，黄河流域抽水蓄能储备站点装机规划容量将达到777万千瓦，在全国的占比也将提至约27.7%。青海省共和龙羊峡储能（一期）、宁夏的牛首山抽水蓄能电站和山西浑源抽水蓄能电站等项目将成为上述地区新能源发展的“调节器”和“稳定器”，为构建新型电力系统和电网安全稳定运行提供有力支撑。

除了能够与新能源互补，储能和储水互补也被认为是优化流域生态的手段。西南财经大学教授方行明在其《黄河治理新思路：构建智能化储水、储能综合体》研究中建议，可根据水和电的需求确定供水量和供电量，在水资源不太短缺的时段，利用综合体抽水发电，当水资源短缺时，弃电供水，水可直接用于灌溉或输入自来水厂，亦可将水回流到黄河，弥补黄河流量不足，从而实现黄河水资源和能源利用的良性循环。E

沿黄河省份能源开发规划要点

青海省 >

流经 1964 千米

- 全面提升水电、光伏、锂电池等全产业链发展水平，打造国家储能发展先行示范区
- 积极构建多能互补储能调峰体系
- 参与跨省跨区电力交易

四川省 >

流经 174 千米

- 发挥黄河上游水电站和电网系统的调节能力，构建多能互补系统
- 推动光伏与农业、养殖业等融合发展

陕西省 >

流经 718.7 千米

- 强化主网架和配电网建设，增强电力保障能力，推进“陕电外送”特高压输电工程建设
- 推进建设互联互通、纵贯南北、横跨东西的天然气输配管道网

>> 黄河小浪底水利枢纽工程是黄河干流上的一座集减淤、防洪、防凌、供水灌溉、发电等为一体的大型综合性水利工程，是治理开发黄河的关键性工程。

甘肃省 >

流经共 913 千米

● 积极推进陇东至山东特高压直流输电工程

● 开展大容量、高效率储能试点示范工程建设

● 加快农村燃气管网建设，推动农村燃气入村入户

● 挖掘黄河上游现有梯级电站潜力，建设混合可逆式抽水蓄能电站

宁夏回族自治区 >

流经 397 千米

● 实施清洁能源替代，发展非煤产业和低碳经济

● 推进牛首山抽水蓄能等电站前期工作，强化“西电东送”网架枢纽建设，推进“宁电入湘”工程，加强供电保障

内蒙古自治区 >

流经 950 千米

● 实施控煤减碳，推动煤炭绿色开发、智能化发展和清洁高效利用

● 推进沙漠“光伏 + 生态治理”基地建设

● 统筹推进风光氢储和大容量、高效率储能工程建设，稳步推进抽水蓄能电站建设

● 加大清洁能源消纳外送能力和保障机制建设力度

山西省 >

流经 965 千米

● 调整优化煤炭开发布局，积极引导焦化产业升级转移

● 打造新能源产业链、节能环保产业集群、智能网联新能源汽车产业集群

● 推动信息基础设施建设，积极探索“新能源 + 数据服务”发展新模式

山东省 >

流经 628 千米

● 严格落实新上煤耗项目煤炭消费减量替代政策，推进全省平原地区清洁取暖改造

● “外电入鲁”，深化与甘肃、内蒙古等省区能源战略合作，协同建设陇东至山东特高压直流工程

● 推进鲁西南采煤沉陷区和鲁北盐碱滩涂地光伏发电等项目建设

河南省 >

流经 711 千米

● 在煤炭、火电等行业企业实施强制性清洁生产，加快构建覆盖黄河干支流所有入河排污口的在线监测系统

● 充分发挥小浪底工程枢纽作用，完善三门峡水库运用方式