

中国可再生能源开发现状与未来

高季章

(中国水利水电科学研究院 北京复兴路甲1号 100038 gaojz@iwhr.com)

摘要 中国的可再生能源开发一直以水电为主。这是由于中国水能资源丰富(技术可开发装机容量达5.4亿kW);中国大规模开发水能资源起步较早;中国经过几十年的发展,已掌握了各种复杂条件下建设水电站的技术和机电设备的制造技术;中国经过改革开放和实行市场经济,年经济增长长期保持在8~9%,电力市场需求旺盛,建设资金比较宽裕,到2008年底,水电装机已达1.7亿kW,按照规划,2020年将达到3亿kW。但是,随资源开发度的提高开发难度也在提高,特别是移民难度和费用大幅提高,环境与生态保护标准的提高与费用的增加,水电的开发速度将逐渐放慢,估计到2050年才可能达到4亿kW。中国的风电开发起步并不晚,但在2000年以前一直发展缓慢,主要是缺乏鼓励政策和没有掌握大型风机制造的核心技术。近十年来,这两方面的情况有很大改善,风电开始快速发展。到2008年底,风电装机已达1000万kW,按照规划,2020年将达到1亿kW。从年投产规模看,将达到与水电接近的水平。除陆上风电大规模建设外,近海风电也开始试验性开发。中国的可再生能源开发从以水为主走向风、水并举。风电的发展到2050年也能达到4亿kW(电量相当于2亿kW水电)。中国也在积极发展太阳能等其他可再生能源,目前在规模上还比较小,但太阳能具有极大的发展潜力。中国可再生能源的发展,将为电力结构的调整和CO₂减排做出重大的贡献。

关键词 可再生能源;水能资源;风电;太阳能;生物质能;海洋能

1 中国可再生能源的开发现状——以水电为主

1.1 中国有多少水能资源

水能资源是我国最丰富的能源资源。季风区充沛的雨量($Q\text{ m}^3/\text{s}$)和高山峻岭间的大落差($H\text{ m}$)形成巨大的水能($P\text{ kW}=9.81QH$)。

21世纪初复查的数字是:中国大陆部分水电的理论蕴藏容量为6.94亿kW,年电量为6.08万亿kWh,其中技术可开发容量为5.4亿kW,年发电量为2.47万亿kWh,列世界之冠。

1.2 中国水能资源在中国能源中的地位

水电资源总量在中国能源组成中仅次于煤处第二位。

水能资源是我国最丰富的能源资源。总量世界第一,人均也能接近世界平均水平。

水电能源是中国现有能源中唯一可以大规模开发的可再生能源。水电能源考虑的时间段越长,其总量越大。按常规能源再使用100年考虑,中国经济可开发水电能源折合标准煤507亿tce。而中国煤炭剩余可采储量为950亿t,折合标准煤678亿tce。中国的能源资源中,水电能源和煤炭能源处在大体相同的水平。

1.3 中国能开发多少水电资源

2004年9月,随着黄河公伯峡水电站首台30万kW机组的投产,中国水电总容量突破了一亿kW,稳居世界第一。世界上最大的三峡水电站不久将竣工。金沙江、大渡河、雅砻江、乌江、红水河、澜沧江、黄河等十二个大水电基地正在全面开发建设。在东部和沿海水能资源较少的地区,仍有一些中小型水电站在建设,一批抽水蓄能电站也在建设中。预期到2010

年和2020年全国水电容量将达到2.0亿和3.0亿kW。

到2020年,除雅鲁藏布江、怒江、金沙江上游、澜沧江上游外,其他水电基地的水电资源将基本开发完毕。

一般认为,到2050年我国可开发的水电资源将基本开发完毕。综合考虑改变能源结构、减轻温室气体排放的需求和考虑移民、淹没耕地、保护生态环境的限制,可以开发4亿kW。

另外,预计我国2050年装机15~16亿kW,常规水电占20~25%,这样的电网需要6~8%的抽水蓄能电站,大约为1亿kW。

1.4 发展历程: 1949到2009——可再生能源开发以水电为主

中国的电力工业从1949年新中国成立开始,特别是1978年实施改革开放政策后,得到快速发展。由于中国煤炭资源丰富和政策方面的原因(如早期很少考虑环保),一直是火电为主。水电由于具有防洪、灌溉、供水、发电等综合效益,也得到较快的发展,一直是中国可再生能源的主力。水电在中国可再生能源中起到主力作用,除资源丰富和政府的政策支持外,还有如下一些重要原因。

1.4.1 中国已掌握在各种复杂条件下建设巨型与大型水利水电工程的技术,涌现一大批界之最

世界最大的水电工程——三峡工程,装机26+6台,容量1820+420万kW;该工程还有世界上规模最大的五级船闸;该工程创造混凝土年浇筑量的世界最高纪录;世界最高的混凝土拱坝——锦屏一级双曲拱坝,最大坝高305米;世界最高的碾压混凝土坝——龙滩碾压混凝土坝,最大坝高216.5米;世界最高的混凝土面板堆石坝——水布垭混凝土面板堆石坝,最大坝高233米;在工程建设中,大批自主研发的具有世界先进水平的技术得到广泛应用。

1.4.2 特大型水电机组设备国产化进程加快,接近世界先进水平

三峡和龙滩700MW国产机组先后投产,标志特大型机电设备国产化进程加快,接近世界先进水平。

1.4.3 开发理念实现重大转变,移民和生态环境保护越来越受到重视

中央政府提出在保护生态的基础上发展水电,中国长江三峡工程开发总公司在“建设三峡,开发长江”的过程中,逐步形成了“建好一座电站,带动一方经济,改善一片环境,造福一批移民”的水电开发理念。

1.5 2020年以前,水电还将较快发展

1.5.1 国际石油、煤炭价格剧烈波动,从发展趋势看仍将震荡向上,水电的竞争力提高

1.5.2 温室气体减排的压力

水力发电主要的环境效益是减少污染物的排放,改善空气质量。由于人类活动特别是CO₂排放引起的全球变化将会加速中国的生态与环境的恶化。近百年中国的气候也在变暖,平均地面温度上升了0.6~0.7℃,海平面平均上升了10~20cm,极端的天气气候事件如旱涝灾害发生的频率和强度近20年来呈上升趋势,由此造成的气象灾害损失目前达到了GDP的3%。4亿kW水电装机,按平均年利用4000小时计,年发电量为16000亿kWh。按照先进的耗煤水平(330g/kWh)计,每年减少燃烧原煤5.3亿吨。减排10.7亿吨CO₂,以及大量的悬浮颗粒物,废水和固体废物。

1.5.3 水电工程的综合效益促进其发展

水电工程一般都具有发电、防洪、供水等综合效益。水电工程在防洪、灌溉、供水方面的作用,本质上就是减轻和防止生态环境灾难的发生。三峡工程运行以来,除了发电、防洪效益外,在增加枯期流量,保障航运和生态需求方面也显现了重要的作用。

1.5.4 水能资源的可再生性决定了水电是不会枯竭的资源型产业

水电也是资源型产业，最终的开发量是有限的。但水能资源的可再生性决定了水电是不会枯竭的资源型产业。这是与火电不同的。火电依赖的煤、油、天然气均是不可再生的，一旦燃料枯竭，火电便无法生产。而水电会以开发的最大容量继续运转，机电设备和土建工程的老化是可以更新的。

1.6 水电发展面临的挑战，发展速度将逐步放慢

水电发展面临的挑战来自水电本身的负面影响和人们的工作两个方面。

1.6.1 移民

在过去几十年水电建设过程中，由于补偿标准较低，或者补偿资金使用管理上的问题，有部分移民没有达到“移得出，稳得住，能致富”的目标。近十几年来，人均移民经费有了大幅度的提高，如三峡工程移民经费已占工程投资的约50%，人均约8万元，情况已有很大好转。云南省政府2007年针对金沙江中游电站移民提出的“16118政策”——“立足长效补偿机制（逐年定量递增，补偿期与电站运行期相同）；实行6种安置并举（城市（县城）安置；城乡结合安置；农业生产安置；分散安置；货币安置；就业安置）；建立产业发展资金；享受统一后期扶持（600元/人年）”；实行2年效果良好，移民年人均得到的综合补助达到4800~6000元，为历史最高水平；移民问题的产生根源在于水电开发效益分配不合理和长期的同质不同价的水电低上网电价问题（从计划经济时代的每度几分钱到现在三峡的每度2角5分钱）。一方面为中国的工业化提供了廉价的电力，另一方面积累了移民发展滞后的问题。如果我们用党中央提出的科学发展观来分析，这一政策的不合理性是非常明显的：

- 同质不同价违背市场经济公平竞争的原则；
- 清洁的水电电价大大低于污染较重的火电，是鼓励污染的政策；不仅得不到风电的优惠电价政策，还不如污染较重的火电；
- 3、压低水电电价，使利益由发电侧转移至输配电；
- 压低水电电价，使利益由西部发电侧转移至东部用电侧，“穷人”补助了“富人”；不利于区域协调发展；

计划经济时代不计，从1980年至2008年，水电累计发电量58000亿kWh，按每kWh少计电费0.1元计，共计从水电平调资金5800亿元。“同质同价”应该写入国家法律并尽快实施，由此增加的收入应该主要用于移民和生态环境保护。按2008年的水平，每年有560亿资金，完全可以为搞好移民和生态环境保护提供资金支撑。

1.6.2 大坝的淹没、阻隔、径流调节对生物资源、生物多样性、景观多样性等方面的影响

特别是大坝的堵隔作用对珍稀洄游性鱼类产生的影响，需要采用人工繁殖、设过鱼通道（鱼道、鱼梯、能过鱼的水轮机）等措施。对于国际河流，还要考虑国际合作问题，如果下游国家建坝未解决珍稀洄游性鱼类的通道问题，即使我们放弃建坝也不能解决问题。

在生态保护中，珍稀鱼类的保护占有重要位置。如果干流开发，而部分支流不开发，就会有较大的保护空间。现在的问题是支流开发往往先于干流，在水电领域，从保护生态环境出发，也有“上大压小”的问题。

1.6.3 区域发展规划、流域综合规划与水电开发规划的协调

水电开发规划应该在区域发展规划、流域综合规划的指导下制订。但实际上区域发展规划、流域综合规划落后于水电的开发。在今后的水电开发中，争论比较大的是怒江中、下游的开发，三江（金沙江、澜沧江、怒江）上游的水电开发，雅鲁藏布江的水电开发。

关于怒江中、下游的开发，已争论多年。目前主要有三种意见，一是完全不开发，保留“原生态”的怒江；二是全面开发，十一个梯级；三是适度开发，开发效益好、移民与淹没耕地较少、生态环境影响较小的四个梯级。实际上怒江流域的生态破坏已很严重，当地发展的压力很大，下游的萨尔温江已开始开发。保留“原生态”的怒江既无可能也无必要。由于涉及

自然保护区, 全面开发也无可能。适度开发是比较好的选择。

关于三江(金沙江、澜沧江、怒江)上游的水电开发, 由于涉及三江并流自然遗产保护区, 开发的难度很大。需要在规划阶段就把开发与保护的关系研究清楚。

雅鲁藏布江干流的水力资源以墨脱大拐弯处最为优越, 装机可达4000万kW以上。虽然是远期的任务, 但开发方式与生态环境影响等都是需要超前研究的重大课题。

2 中国可再生能源开发的未来——风、水并举

2.1 风电: 起步不晚, 相当长时间发展缓慢

中国风电发展起步并不晚, 世界上从20世纪70年代石油危机开始发展风电, 中国80年代中期开始发展, 但一直发展缓慢, 2004年总装机仅76万kW, 与1950年中国的水电装机相当。发展缓慢的主要原因国家缺乏政策支持, 不掌握风机制造的核心技术, 风电设备产业链没有形成, 风电成本高及业界普遍认为风电不稳定, 是“垃圾电”。

2003年底, 国家主管部门出台了关于风电特许权项目前期工作管理办法; 2005年2月第十届全国人大常委会第十四次会议通过了《中华人民共和国可再生能源法》, 并于2006年1月1日正式生效。由于环境保护及可持续发展的要求, 风机制造核心技术逐步掌握和国产化水平的提高, 国家扶持政策及激励措施的实施, 中国风电开始加速发展。风电装机一再突破原有规划, 2008年已达1200万kW, 主管部门已把2020年风电发展的目标提高到1亿kW。风电将超过核电, 继煤电、水电之后成为中国第三大主力发电电源。

2.2 风能资源

中国幅员辽阔, 海岸线长, 风能资源比较丰富。据中国气象科学研究院估算, 全国平均风功率密度为 $100\text{W}/\text{m}^2$, 风能资源总储量约32.26亿kW, 可开发和利用的陆地上风能储量有2.5亿kW(依据陆地上离地10m高度资料计算), 海上可开发和利用的风能储量有7.5亿kW。

中国风能资源主要分布在东南沿海及其岛屿风能丰富带、北部(东北、华北、西北)地区风能较丰富带、内陆局部风能丰富区(如鄱阳湖、湖南衡山、湖北九宫山、河南嵩山、山西五台山、安徽黄山、云南太华山等)和海上风能丰富区。

2.3 发展现状与展望

2.3.1 政策

可再生能源法2006年1月生效, 要求并鼓励发电企业都要开发一定的可再生能源。电价政策是在当地平均电价的基础上加0.25元/kWh, 各地还可适当增加。经过国家批准的风电, 电网必须收购。目前, 陆上风电与水电的单位kW投资相当, 水电的年利用小时是风电的2倍, 风电的上网电价是水电的2倍。因此, 条件较好的风电场与水电一样可以做到微利。

2.3.2 风机制造

中国政府近年来加大了对风机制造技术的支持力度, 鼓励企业自主创新和引进、消化、吸收、再创新。要求风电场的设备国产化率达到70%。一批国有、民营、合资企业加大了研发力度, 多种1MW—3MW的风机投产。

2.3.3 科技支撑

“十一五”国家科技支撑计划安排了重大项目“大功率风电机组研制与示范”, 包括16个课题。该项目包括大型风电机组4个课题, 叶片、齿轮箱、发电机、控制系统及变流器等6个课题, 近海风电4个课题, 认证规范与相关标准等两个课题。国家投入经费1.8亿, 承担单位配套不少于6亿, 投入强度为历史最高水平。中标单位全部为企业, 体现了科技创新以企业

为主体，产学研结合的格局。这些项目完成时，我国的风电技术可望缩小与世界先进水平的差距。

2.4 重大技术研究

2.4.1 海上风电

中国的风资源主要分布在北部、东部沿海和近海三个区域，北部新疆等地资源丰富但用电负荷较小，远距离输电成本高；东部沿海地区土地资源短缺，还有一些鸟类保护区；而海上风况优于陆地，开发利用海上风能受噪声、景观影响、鸟类影响、电磁波干扰等问题的限制较少，海上风电场不占陆上土地，海上风能的开发利用不会造成大气污染和产生任何有害物质。但是，海上发电成本很高，海上作业难度大，海洋潮湿的环境和周围的盐雾容易引起结构和部件的腐蚀问题。为了将来能够大规模开发近海风电，中国正进行海上风电建设技术的研究和海上专用风机的研制。作为试点的上海东大桥海上风电场进展顺利，采用非专门设备和自有技术，已成功地在海上安装了3MW的风机3台，2010年将完成全部100MW海上风电场的建设。

2.4.2 大规模并网对电网的影响及对策

许多电力专家认为，电网中容纳5%的风电没有问题，更多的比例则可能影响电网的稳定安全运行。也有专家认为可容纳10%。但欧洲丹麦、德国的实际经验又表明电网中风电的比例可以更高。

中国已规划建设几个1000万kW的巨型风电场，大规模并网对电网的影响及对策是重大的研究课题。将针对大规模风电并网可能对电网运行带来的诸如电压闪变、谐波污染、系统不稳定、频率偏差等一系列问题进行研究，提出解决的技术措施。

建立“强大智能电网”是国家电网公司提出的解决对策。

2.4.3 非并网风电的大规模应用

避免风电对电网影响的另一思路是走风电大规模非并网应用的路。在中国，小风机的风电非并网应用已有30多年的历史，特别是在内蒙古牧区得到了广泛应用。风光互补系统加蓄电池调节，成为牧民解决照明、看电视、听广播、提水（人畜饮水与草地灌溉）的重要能源。但大规模的风电非并网应用尚无先例。

大规模的风电非并网应用需要考虑需求量很大且可以持续发展的产业，海水淡化是一个方向，因为水资源短缺是一个长期趋势，随城市化的发展，人口的增加，需求也会持续增加。目前海水淡化的成本还较高，而供水带有公益性，很多基础设施的建设由国家或地方政府投资，没有纳入供水成本。因此，完全商业性的海水淡化还缺乏竞争力。但如果采取鼓励的政策，加上技术的进步，从中长期看，大规模的风电非并网应用于海水淡化是有前途的。

3 其他可再生能源

3.1 太阳能：潜力最大

3.1.1 资源

太阳能是资源量最大、分布最普遍的可再生能源，也是一种取之不尽、用之不竭、对环境无任何污染的一次能源。中国太阳能资源总量9600000GW，如果开发1%，就超过水电10倍。

3.2.2 太阳能利用

太阳能利用主要包括太阳能热利用和太阳能光利用。太阳能热利用应用很广，如太阳能热水、供暖和制冷；太阳能农作物干燥和海水淡化；太阳能热动力发电等。太阳能光利用主要是太阳能光伏发电和太阳能制氢。

中国太阳能热水器应用世界第一,1平方米太阳能每年等于150kg煤,中国有6500万平方米以上的太阳能热水器。技术非常成熟。太阳能光伏发电,技术成熟、但成本高,5元/kWh。住宅用并网光伏系统已在北京、深圳、上海等地建成多处示范工程。2006年敦煌市筹建100兆瓦太阳能并网光伏发电项目。

从长远看,太阳能光伏发电的潜力非常巨大,过去因成本过高难以大规模应用。随技术进步和成本的大幅下降,国家支持力度的增加,应用规模将扩大。

3.2 生物质能

生物质指农业、林业生产中产生的农林剩余物和能源作物。能源作物包括野生的和人工种植的。

生物质能在中国的利用主要有四种方式:

- 直接燃烧技术,如非常原始而范围极广的炉灶,中国农村仍广泛采用;现代技术是用于发电,需要解决收集、致密成型等问题,中国应用规模很小;
- 物化转换技术(热化学途径),形成气态、液态中间产物,如燃气、生物油,以热与电的方式应用,中国应用规模很小;
- 生化转化技术(糖途径),形成糖和木质素中间产品,再转化为沼气、燃料酒精、生物柴油等,副产品为肥料,以热与电的方式应用;沼气在中国南方农村已广泛使用;使用粮食制酒精因为影响粮食安全,难以在中国大规模应用。
- 植物油技术,从植物中提取生物柴油;从需要农田的油料作物中提取生物柴油也难以在中国大规模应用。而可在山坡种植的油料树,如麻疯树等有一定的前景,在原油价格超过80美元时有市场竞争力,中国正在扩大种植规模。

严格地讲,生物质能虽然是可再生能源,但他的清洁性比不上水能、风能、太阳能和海洋能,它直接燃烧或用于发电都要产生CO₂,也有温室效应问题。

3.3 海洋能

海洋能主要包括潮汐能、波能、海流能、温差与盐差能,目前在中国潮汐能与波能获得小规模的试验与应用。

3.3.1 潮汐能

中国在20世纪80年代进行过潮汐能资源普查,技术可开发装机容量2157.5万kW,多年平均发电量618.7亿kWh。

中国江夏潮汐实验电站位于我国浙江省乐清湾北端的江夏港。该电站的特点是采用双向发电的灯泡贯流式水轮发电机组。该站址最大潮差8.39m,平均潮5.1m,第一台为500kW在1980年5月投入运行,第二台为600kW,其余3台为700kW,最后一台于1986年投入运行。目前总装机为3200kW,为世界第3大潮汐电站。

近20年来中国几乎没有建新的潮汐电站,分析原因主要是考虑电站的经济性和潮汐大坝对环境的影响,包括有泥沙淤积问题以及对沿海动植物、鱼类和鸟类栖息地等特殊生态环境的影响问题。在沿海筑坝建大型潮汐电站所导致的环境与生态问题可能比在河川筑坝还要严重。

3.3.2 波浪能

波能资源总量很大,但沿岸的波能资源并不多,中国的调查与计算表明,中国沿岸波浪资源理论平均功率为1285万kW。

中国从1986年开始在珠江口大万山岛研建振荡水柱岸式3kW波浪电站,随后几年又在该电站上改造成20kW的电站。1996年2月试发电,初步试验的结果表明是成功的。广东省汕尾市遮浪镇100kW岸式波力电站是一座与当地电网并网运行的岸式波浪发电站,2001年2月进入

试发电，最大发电功率100kW。

中国国家海洋局海洋技术研究所山东大管岛研建的30kW摆式电站，与振荡水柱不同的是，利用波浪推动一个摆板，通过油压传动系统带动发电机发电。后者还与5kW的风力发电机进行波风互补，为岛上渔民提供电力。

广州能源研究所海洋能源实验室研制出了独立稳定波浪能发电系统，波浪能发电系统由三部分构成：波浪能独立发电系统、波浪能制淡系统以及漂浮式波浪能充电系统。其中发电系统的功能是将波浪能转换成稳定的电力；制淡系统的功能则是将波浪能直接用于海水淡化；而充电系统，则是将充裕的波浪能转换成电能，直接充入蓄电池，备不时之需，或为海上航标灯等设施供电。据测算，一台总装机容量50kW、允许最大波浪能峰值功率为400kW的波浪能独立发电系统，一年可发电26300kWh。

由于成本较高，目前仅在无电海岛小规模试验及应用。

4 小结

为了应对气候变化，实现减排温室气体的目标，我国电力的结果必须加快调整，应该限制火电发展，加快可再生能源的发展。从资源、技术、经济等方面出发，2050年使火电的比重降到50%以下是有可能的。

按低限估计，2050年电力总装机16亿kW，可能达到较优的结构是：火电8亿kW，水电4亿kW，风电4亿kW（电量相当于2亿kW的水电），核电1.5亿kW（电量超过2亿kW的水电），太阳能和其它可再生能源发电0.5亿kW。火电第一，水电第二，风电核电争第三，其它新能源补充的格局在2050年前将难以改变。

新疆水资源战略问题研究

邓铭江

(新疆水利厅 乌鲁木齐 830000)

摘要 新疆地处欧亚大陆腹地, 远离水汽源, 气候干燥, 属典型的干旱、半干旱地区, 存在严重的资源性缺水问题。新疆河川径流总量 879 亿 m^3 , 其中约 1/2 用于人工绿洲内的国民经济发展, 1/4 直接消耗于天然绿洲, 1/4 流出境外, 未来社会经济发展与生态环境保护面临严峻的水资源瓶颈制约。本文系统分析了新疆水资源的形成及其转化机理以及主要生态环境特征, 综合评价了水资源开发利用现状及存在的主要问题, 并就新疆可持续发展中的有关水资源战略问题进行了研究探讨, 提出了具体解决办法和应对措施, 对于实现新疆水资源可持续利用, 优化配置, 合理保护, 促进经济社会又好又快发展, 具有重要的指导意义。

关键词 新疆; 水资源; 战略研究

1 水资源转化及生态环境特征

1.1 水资源形成及其转化规律

(1) 地形地貌。新疆地貌轮廓鲜明, 高耸宽大的山脉与广阔平坦的盆地相间排列, 形成“三山夹两盆”态势。由南至北排布着昆仑山、塔里木盆地、天山、准噶尔盆地、阿尔泰山。天山横亘中部, 将新疆分为南北两部分。南疆塔里木盆地面积为 53 万 km^2 , 北疆准噶尔盆地为 38 万 km^2 。在远离海洋和高山环抱的综合地理因素影响下, 形成典型干旱气候。

(2) 水汽来源。大气水分主要分三条路径输入新疆上空: 一条是西方路径, 依靠西风环流带来的大西洋气流是新疆水汽的主要来源。其次是西北路径, 来自北冰洋的干冷气流, 经乌拉尔山南部进入新疆。另一条是西南路径, 来自南印度洋水汽含量丰富, 虽然受到高大山系阻隔, 但仍有部分湿润气流进入塔里木盆地。据气象部门的测算, 新疆上空的水汽输入量为 11540 亿 m^3 , 加上本区蒸发量 2403 亿 m^3 , 减去本区降水量 2544 亿 m^3 , 水汽输出量为 11399 亿 m^3 。

(3) 山区水资源形成过程。山区年降水量为 2062 亿 m^3 , 占总降水的 81.1%, 山区降水到达地表时, 首先植物截留少量降水, 通过蒸发返回空中, 大部份降水到达地面后其中部分补给河网、湖泊、冰川等各种水体, 部分从地表渗入土壤中, 当降水强度超过下渗强度时, 可形成坡面流汇入河道。渗入土壤中水量, 一部分由土壤直接蒸发和通过植物散发返回空中, 一部分以壤中流形式补给河道, 其余部分下渗补给地下水。坡面流和壤中流以及冰川等水体补给河道的水量合成河道地表径流。山区的地下水又以基流的形式补给河流, 成为河流径流组成部分, 即由地下水转化成地表水。因此, 山区地表水资源量 (765.7) 加上国外产流流入本区水量 (90.3), 则山区河川径流总量为 856.0 亿 m^3 。山区地下水中还有一部分水, 以山前侧渗和河床潜流 (31.88) 形式直接补给平原区地下水。2062 亿 m^3 山区降水量, 经过山区调蓄与转化, 产生了 798.8 亿 m^3 的水资源, 其余水量以各种蒸散发 (1263) 形式返回空中, 这就是山区水资源形成过程。参见图 1。

(4) 河流湖泊及水资源运移转化。由于有高大山体拦截高空的水汽, 山区降水较多,

作者简介: 邓铭江 (1960-), 男, 湖南省耒阳市, 博士。现任新疆水利厅总工程师, 教授级高级工程师, 主要从事技术管理和水资源规划研究工作。

再加上号称“固体水库”的众多高山冰川调节，形成了全疆 570 多条大小河流和博斯腾湖、乌伦古湖、艾比湖等 100 多个大小湖泊。从地貌特征和水循环特点，可分为山区和平原区二大区域，大约 70 万 km² 的山区，97.1% 的水资源形成于山区，是径流形成区；平原区面积为 94 万 km²，其中，盆地周缘 27 万 km² 的地区是径流散失区，其余 67 万 km² 的沙漠和荒漠区是无流区。

(5) 平原区水资源运移转化关系。山区河川径流总量加上平原区地表产水量 (23.0) 组成 879 亿 m³ 的河川径流总量，其流入平原区后转化过程为：通过河床入渗 (123.6)、水库入渗 (8.8)、渠系入渗 (100.0)、田间入渗 (53.7) 的形式，转化补给平原区地下水。还有部分河川径流量补给湖泊、沼泽或直接流入荒漠区。因此，流入平原区的河川径流量除流出境外的 229.2 亿 m³ 的水量外，其余水量通过各种形式转化，最终以水体蒸发、土壤蒸发、潜水蒸发、植物散发等各种形式返回空中。此外，平原区降水量 (482) 中，只有 14.16 亿 m³ 入渗补给平原区地下水资源，其余以蒸散发形式返回空中。平原区蒸散发量为 1140 亿 m³，全区总蒸散发量为 2403 亿 m³。

(6) 水资源总量。平原区地下水来自地表水的转化补给量占地下水总资源量的 86% 水资源总量为不重复的地下水资源量 (14.16+31.88) 与地表水资源量 (765.7+23.0) 之和，即 834.74 亿 m³[1]。

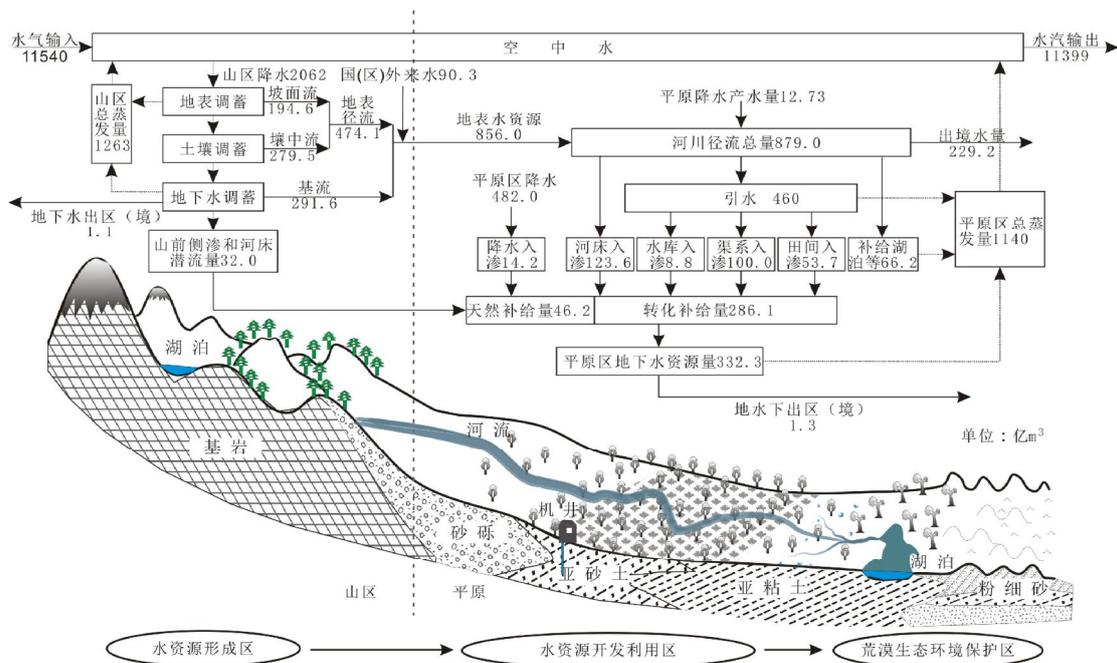


图 1 新疆水资源运移转化示意图 (单位: 亿 m³)

1.2 生态环境特征

(1) 自然环境特征。新疆自然环境的基本特征是：气候极端干旱，降水稀少；盆地封闭性质使低洼部位成为积盐中心；生态环境脆弱，植被稀疏以致完全裸露，流动沙丘和盐碱地广布。气候干旱的直接表现是降水稀少，干旱环境形成的地理基础是远离海洋和高山环绕。盆地的封闭性意味着所有河流都是内陆河，溶质只能积聚于盆地之中。植被稀疏是干旱区常见的自然景观，生态环境脆弱是气候干旱的直接表现。沙漠是干旱气候的产物，沙尘暴和浮尘天气多是沙丘移动的动力，又是植被稀疏的后果。

(2) 生态经济特征。由于水资源相对紧缺，使得大部分地区生态环境十分脆弱，农业

生产主要依靠人工灌溉,形成了独特的“灌溉农业,荒漠绿洲”生态环境和经济社会体系,水不仅是农业也是整个国民经济的命脉。流域生态环境体系具有干湿交替带、农牧交错带、森林边缘带及沙漠边缘带等多种宏观意义上的生态环境脆弱带,生态体系的极度脆弱性使其对水土资源开发响应强烈。

(3) 水文机理垂直分带性特征。降水、蒸发、径流等水文要素垂直地带性分布规律明显。从高山、中山到山前平原,再到荒漠、沙漠,随着海拔高程降低,降水量依次减少,蒸发能力依次增大。高山区分布丰厚的山地冰川,干旱指数小于2,是湿润区;中山区是半湿润带,干旱指数2~5;低山带及山间盆地是半干旱区,干旱指数5~10;山前平原,干旱指数在8~20之间,是干旱带;戈壁、沙漠,干旱指数在20以上,个别地区可达100以上,是极干旱区。

(4) 河川径流补给多样化特征。河川径流有冰川和永久性积雪融水补给、季节性积雪融水补给、降雨补给、地下水的补给及各种组合的混合补给。中低山区主要为降雨补给,中山带主要为季节性积雪融水补给,高山带主要为冰川和永久性积雪融水补给,不同类型的河流表现为不同的径流特性与洪水特性。

(5) 河流水循环系统平衡特征。流域地表水、地下水同处一源,均来自山区降水。降水所形成的河道径流在出山口后,经山前冲积扇和冲积平原地表水与地下水转换频繁,且地下水86%的补给来自地表水。地表水、土壤水、地下水在频繁转换过程中以“液体”转化为“气体”的形式全部消耗于大气中。不同转化形式、地点、时间产生不同的效益,“四水”转换与水量消耗形式是干旱内陆河流域水资源系统的最大特点。对一个流域来说,“山区—人工绿洲—荒漠绿洲”是一个完整自然的水循环过程,绿洲水循环强烈的人为作用与荒漠水循环自然衰竭变化是一个自上而下响应敏感的单向过程。

(6) 河川径流特征。由于山区降水量比较稳定,加之冰川、永久积雪对地表水起着“多年调节”的作用,河川径流量年际变化幅度小,变差系数 C_v 值一般为0.1~0.5之间。但径流年内分配极不均匀,一般春季(3~5月)水量占年水量的10~20%,夏季(6~8月)占50~70%,秋季(9~11月)占10~20%,冬季(12~2月)占10%以下,连续最大四个月水量占全年水量的60~80%。

(7) 河川径流区域分布特征。“区域分布相差悬殊”是新疆水资源分布的主要特征,一是山区多,平原少。二是“北多南少,西多东少”,以天山山脊为界,北部地区单位面积水量是南部地区的2.6倍;在西北和东南两部分面积大致相当区域内,西北部分水资源占全疆水资源总量的93%,而东南部仅占7%;以单位面积径流深对比,南疆、北疆和东疆有“北多,南少,东缺”的显著特征。

(8) 生态环境演替特征。由于地貌、水文地质、土壤的差异,天然植被有着明显的分带性,湿润地区依靠降雨,而干旱地区则依靠地下水。一般在水量较大的河流两岸,依靠季节性地表水(或洪水)发育有胡杨、柽柳、梭梭等天然植被,形成线状自然生态景观,远离河道的天然植被则主要依靠地下水维持生存,人工绿洲内的天然植被耗水也主要是依靠转化形成的地下水。因此,地下水是荒漠生态环境保护的最后一道防线。

(9) 绿洲水盐平衡变化特征。在人类开发初期,由于绿洲带耗水量较小,大量的地表水沿河道穿越绿洲,并携带着绿洲的有害物质(如盐份)注入沙漠中的湖泊水体,绿洲保持着良好的环境质量。随着近50年人类活动的加剧,地表径流被大量引入绿洲,使得绿洲内有害物质入多出少,并且造成河流下游河道及湖泊不断萎缩干枯,导致绿洲内部和外部的环境质量均出现劣变的态势。为此,遵守“盐随水来、盐随水去、水去盐留”客观规律,维持农田土壤脱盐或不积盐、盐份合理排放,是实现流域社会经济可持续发展的关键。

2 水资源开发利用及其综合评价

2.1 水资源利用情况

(1) 水资源利用现状。2007年地表水资源总量为788.7亿 m^3 ，接近多年平均水平。总灌溉面积7634万亩，人均灌溉面积3.11亩/人。国民经济总用水量517.69亿 m^3 。其中，农业用水478.39亿 m^3 （含渔业和牲畜用水），工业用水10.79亿 m^3 ，城乡居民生活用水8.06亿 m^3 ，生态环境用水20.45亿 m^3 。在总供水量中，地表水源供水449.16亿 m^3 ，地下水源供水67.78亿 m^3 ，中水回用0.75亿 m^3 ^[2]。从多年平均河川径流量中扣除地表水引用水量 and 流出境内外水量（879—449.16—229.2）后，天然生态直接耗用水量为201亿 m^3 。

(2) 水资源利用评价。①以地表水供水为主，尤以引水工程为主。2007年地表水供水量占供水总量的比重为86.8%，其中引水工程占74.2%。全疆489座水库总库容80.64亿 m^3 ，供水量为60.19亿 m^3 ，占水库总库容的74.6%，利用效率低，调蓄能力明显不足。②农业用水占国民经济总用水量的96.2%，35.38万 km^2 的干、支、斗、农四级渠道防渗率为35.3%，灌溉水利用系数为0.44，农业综合亩均用水量638 m^3 /亩，农田实灌亩均用水量756 m^3 /亩，南疆则高达945 m^3 /亩，高效节水灌溉面积900万亩，占总灌溉面积的12%，农业灌溉用水效率低，节水潜力较大。③工业和居民生活用水增幅较大，但污水处理回用量小，工业和城镇用水比重仍很低，随着经济发展用水结构需做进一步的调整。万元GDP用水量平均为1687 m^3 /万元，与全国平均水平差距很大。④地下水开发布局不均衡，南疆开发利用水平较低，灌区地下水位普遍较高，土壤次生盐碱化严重，但天山北麓东段、中段和吐鲁番、哈密、塔城地区地下水超采现象严重，年超采量合计达到17.16亿 m^3 ^[3]。纯井灌区的大规模发展，沙漠边缘大量开采深层地下水，已严重威胁到这些地区的水资源可持续利用和生态环境安全。

2.2 存在的主要问题

(1) 水资源区域分布悬殊，且与社会经济发展布局不匹配，供需矛盾突出，局部地区缺水严重。由于南、北、东疆水资源分布的悬殊差异，使得建设跨流域调水工程成为实现区域水资源合理配置的根本手段。乌鲁木齐—奎屯—克拉玛依天山北坡经济带，是我国西部最具发展潜力的区域之一，GDP占全疆的56%，而水资源仅占全疆的7.4%，随着独山子石油化工基地和准东特大型煤电化、煤化工基地的开发建设，水资源的“瓶颈”制约将更加凸显。引额供水工程的实施，部分缓解了天山该区域的缺水程度；东疆地区是石油、天然气、煤炭资源的富集区，但水资源却极度匮乏，水资源过度利用，地下水超采问题十分严重；覆盖南疆的塔里木河流域，虽然存在着突出的管理型和工程型缺水问题，但从长远发展来看，最终矛盾的汇交点已然是资源型缺水问题。

(2) 河道天然径流年内分配极不均匀，春旱和夏洪是实现水资源合理配置、高效利用首先应解决的基本问题。由于绝大部分河流径流年内分配极不均匀，使得建设山区控制性调蓄工程成为实现流域水资源合理配置的根本手段。由于现有平原水库调蓄能力低下，病险库居多，蒸发渗漏严重并且还造成了水库周围的土地盐碱化。在这种情况下，春旱得不到根本的缓解，夏洪得不到有效的防患，大多数农田得不到适时适量的灌溉，各地倡导农民大面积的进行“冬灌”或“浇白地”，鼓励农民引洪灌溉。这种落后的灌水方式，极易造成过量灌溉，迅速抬升灌区地下水位，如果排水设施不健全，最终必然导致土地次生盐碱化。这种现实状况告诉我们，节水、治碱、高效利用水资源的前提是合理配置水资源，然而现有的灌排系统还远远满足不了这一要求。

(3) 跨界河流“出多入少”，水资源亟待加速开发利用。由于绝大多数内陆河流普遍出现水资源过度开发利用状态，使得加快跨界河流水资源开发利用成为实现流域水资源合理配

3.2 气候变化对河川径流及生态环境的影响

3.2.1 气候与水资源变化情况

全球气候变暖已是不争的事实，新疆气温变化明显高于全国平均值 0.65°C 。与近 30 年平均值相比（1971~2000 年），近十年春、秋季气温增加幅度超过 1°C ，冬季增幅超过 0.6°C ^{注1}。新疆在上世纪 80 年代后期，降水开始进入偏丰时期，这种变化是大范围的，而不是局部的。2001~2007 年平均年降水量 2936.29 亿 m^3 ，高于 1956~2000 年多年平均降水量 392 亿 m^3 ，降水形成地表水资源 896.57 亿 m^3 ，高于多年平均 107.87 亿 m^3 ^{注2}。

3.2.2 气候变化对水资源影响的初步分析

(1) 气候变化对需水的影响。有关研究表明我国中纬度地区气温升高 1°C ，灌溉需水量将增加 6%~10%。与此同时，生态需水量也将有所增加，将进一步加剧区域水资源供需矛盾。新疆降水基数较小，气温升高则蒸发能力更强，增加的降水量将不足以抵消蒸发量的增加。

(2) 气候变化对水害防治的影响。气候变暖引起降水量重新分配，冰川和冻土消融，继而引发一些极端天气气候事件，如暴雨、干旱、局部冰雹、暴风雪等灾害性天气增多，发生的频率和强度也将增加，危害自然生态系统的平衡和人类的正常活动。

(3) 气候变化对冰川积雪的影响。有资料显示，由于全球气候的变化，冰川消融的速度在不断加快，中国中西部山区冰川面积减少 21%。新疆北部和南部的冰川目前都出现萎缩现象，据中国科学院天山冰川观测试验站近年的观测，自上世纪 50 年代以来，乌鲁木齐境内的“一号冰川”一直处于萎缩状态。1962~2006 年面积已由原来的 1.95km^2 减少到 1.68km^2 ，减少面积达 13.8%，而 1962~1992 年面积只减少 0.12km^2 ^{注4}。

(4) 冰川积雪消融对水资源及其利用的影响。因气温升高引起的冰川消融及径流增加，是以固体水资源的不断消耗为代价的，因此，难以长期持续。届时冰川融水将使河川径流季节调节能力大大降低。长远来看，部分冰川消失后，原本能够形成的冰川径流随之消失，冰川融化对河流补给量呈下降趋势，河流可利用水资源量因此将减少。远期新疆水资源将呈现先增后减的趋势，而且由于失去“固体水库”的调节，不仅水资源总量逐步衰减，而且年际变化加大，年内季节性分布更加不均。因此，长远来看，气温升高引发的冰川消退将降低水资源对区域工农业生产、自然生态环境及经济社会运行的可持续保障程度，威胁用水安全。

3.2.3 应对气候变化的对策与措施

(1) 工程性适应对策。加强水利基础设施建设，通过山区控制性水库工程建设，增强水资源年际调节能力，并结合堤防工程建设，提高重点河段和主要城镇的防洪能力；加强农田改造基本建设，努力提高水资源利用效率；积极发挥地下水多年调蓄的作用，以流域为单元将地表水和地下水视为一个统一整体，通过对地表水和地下水实施联合调度，提高供水保证率，满足流域内各业的需水，并且通过排灌结合积极有效地控制地下水位，从而减少土壤无效和低效潜水蒸发，降低土壤盐碱化危害。

(2) 生产性适应对策。按照干旱区 $P=75\%$ 的灌溉设计保证率，严格控制灌溉面积发展规模，合理调整农业、工业和城镇生活用水结构；大力发展高效节水农业，积极建设节水型社会；确保生态用水，严格实施“总量控制，限额用水”的“需水”配置管理模式；根据水资源的禀赋条件及其赋存形式的变化，适时、合理地调整生产力布局；防污减排，加大中水回用力度；积极开展微咸水利用技术的研究；大力开发旱地农业生物节水技术，积极推广设施农业栽培技术及生产管理新模式。

(3) 管理性适应对策。预测变化、并在制订适应性发展规划时考虑未来气候变化，最大

注 1：资料来源于新疆气象部门。注 2：资料来源于新疆水资源公报。

化地利用气候变化所带来的机遇,并尽可能地降低气候变化带来的不利影响,协调和优化发展战略,这就是对气候变化的适应性管理。当然,控制人口增长、限制高耗水产业发展、提高水价、建立和完善水权体制、加强需水管理、建立风险管理机制等措施都是适应性管理的有效手段,但运用各种预测技术估计未来气候的可能变化趋势,是适应性管理和科学决策的前提。为此,近期需要开展针对气候变化对区域水循环和水资源变化过程影响的重点研究,分析与评估干旱与洪水对水资源系统可供水量和需水量的影响,加强洪水监测、预报、预警、调度系统的建设。另外,对生态环境保护目标及耗水量控制也应制定相应的对策和措施。

3.3 干旱区生态环境演变过程中的适宜度与可控性

新疆灌溉农业的大规模发展,导致人工绿洲快速扩张和天然绿洲的持续减少。研究表明每扩大1个单位面积的人工绿洲,大约就会影响或减少2~3个单位面积的天然绿洲。解决经济社会与生态系统的用水竞争性矛盾,一方面必须要控制人工绿洲的过度膨胀,特别是要严格控制灌溉面积的发展规模,提高水资源利用效率和效益。另一方要合理、适度地确定生态环境保护的目标。适宜度与可控性是破解人工绿洲发展与天然绿洲保护这对“对立统一”矛盾的有效方法,我们必须深入研究,科学地加以应用。

3.3.1 科学把握流域生态环境适宜度,使资源环境与经济社会协调发展

在开发利用干旱区自然资源,变自然生态系统为人工生态系统过程中,局部的生态必然要发生变化,这是不可避免的客观规律。在一定水源条件下,上游人工绿洲扩大,下游天然绿洲则因水源减少必然收缩,并部分沙漠化。这种变化从干旱区自然地理条件和水量平衡角度看,无疑是一种应有的正常变化,但是水资源开发利用程度应当“适度”。一方面要防止无节制地、掠夺性地开发利用水资源,造成生态恶化,破坏了自己赖以生存与发展的空间和基地;另一方面要防止把生态平衡看成静止不变的,只强调保护,不主张对自然资源进行积极有效的开发利用。

生态环境的适宜度,关键取决于生态因子的适宜度。在干旱区影响生态环境最关键的因子是水,最核心的问题是社会经济与生态环境的耗水比例。钱正英等专家学者研究认为^[5]:“在西北内陆干旱区,生态环境和社会经济系统的耗水以各占50%为宜”、“按社会经济平均耗水率为用水量的70%折算,今后内陆河流用水量的最高开发利用率应不超过70%”。这是衡量和控制干旱区水资源开发利用适宜度的一个重要指标。当前,新疆在塔里木河中游河漫滩修建了609km的输水堤,其目的就是控制洪水漫溢的范围;规划提出了恢复艾比湖800km²湖面的保护目标(现状540km²,上世纪五十年代为1300km²);制定了主要河段生态基流控制要求等等,这些都是科学把握流域生态环境适宜度的具体实践。

3.3.2 在干旱区生态环境变化的必然性中提高可控性

人工渠道代替自然河流,人工水库代替天然湖泊,人工植被代替自然植被,人工绿洲代替自然生态;人为直接破坏天然森林和地表植被所造成的土地沙漠化;内陆河流域上游山区水源涵养林滥砍乱伐的人为破坏所引起的水土流失和出山口地表水资源不稳定;长期持续超采地下水所引起的地下水位下降,破坏地下水资源,造成地表植被死亡、土地沙漠化;灌区过量引水和大水漫灌造成的土地次生盐碱化和沼泽化;对地表水系与水资源的不合理改造,引起一些有价值水域的盐化和污染等等一系列环境恶化,都是可以研究找出原因,提出对策,加强管理,强化法制,加以控制和防止的。在生态环境变化的必然性过程中,提高预见性,实现可控性,是流域未来科学管理的方向。

适宜度是可控性的前提,只有科学合理地确定生态环境保护的目标,才能避免盲目性,实现可控性。新疆在额尔齐斯河干流修建“635”水库后,为保护下游河谷林,利用水库每年制造1~2次大于796m³/s的漫滩洪水;在伊犁喀什河上修建吉林台水库后,提出利用水库每年连续5天制造最大洪峰流量大于392m³/s的漫滩洪水,对下游河谷林进行淹灌等等,

这些都是生态环境可控性的具体事例。

3.4 关于大坝与河流生态保护问题

对于一条水资源已过多被开发利用的河流来说，修建山区水库并不增加水资源可利用量，通过建设山区水库替代平原水库，直观上只增加了因减少河道和平原水库蒸发损失的那部分水量。在河流上修筑大坝工程对于满足防洪、灌溉、供水、发电等需求，保障社会安全和经济发展具有十分巨大的作用。同时还可作为现有的灌溉面积将来建设成为高效节水农田提供条件，因高效节水灌溉对供水系统的可靠性和均衡度的要求很高，而天然来水过程满足不了这一过程，因此适当建设山区水库是必要的。但建设山区水库必须严格遵循以下限制条件：一是不挤占生态环境用水，保证河道内生态基流及用水总量的需求；二是不能为解决现有过大的灌溉面积缺水而增加用水量；三是要替代下游的平原水库，使之调控供水过程与用户需求过程相适应；四是加强水资源统一管理，地表水与地下水联合运用。

大坝对于河流生态系统的胁迫是客观存在的事实，不容回避。在目前和今后流域大型水利水电工程建设中，不仅需要正视这种负面影响，更重要的是主动研究对于河流生态系统的补偿技术、政策和管理措施问题，探索与生态环境友好的大坝建设新模式。塔里木河流域在其四源流上共规划了“12库59级”的开发方案，届时总库容将达到103.11亿 m^3 ，占四源流多年平均河川总径流的41.8%。毫无疑问，这些水库电站的建成，对满足塔里木河的供水要求以及生态环境保护将产生重大的影响。

3.5 地下水资源合理开发利用与保护对策

3.5.1 地下水开发利用现状总体评价

新疆中远期地下水可开采量为111亿 m^3 ^[6]，2008年已开采72.11亿 m^3 ，扣除超采量后，地下水开发利用尚有一定的潜力。通过对地下水开发利用现状、潜力区、超采区的综合分析评价，可以得出以下四条主要结论：①东疆地区和天山北坡东段地下水严重超采，资源枯竭，陷入绝境。②天山北坡中段、塔城盆地不惜以牺牲环境为代价，打井开荒，大规模发展纯井灌区，大量开采深层地下水，地下水利用不可持续。③南疆地区虽尚有潜力，但须科学规划，稳步实施，力戒重蹈“先超采，后治理”覆辙。④伊犁河流域、额尔齐斯河流域地表水资源丰富，地下水开发利用应以应急抗旱为主。

3.5.2 地下水开发利用在水资源合理配置中的定位

(1) 补充调节作用。地下水与地表水联合调度，实现春秋缺水季节的年内调节、丰枯年景年际调节，使地下水成为农业灌溉供水的重要补充水源。丰水年，地下水开采量相应减少，地表水大量补给地下水，地下水位上升；枯水年，则增加地下水开采量。这种“以补定采，多年平衡”的调蓄开采模式，充分体现了地下水的补充调节作用。

(2) 水位调控作用。在灌区内合理开采地下水，有效调控地下水位，既可最大限度减少潜水的无效或低效蒸发量，有利于土壤盐碱化的改良，又有利于发挥土壤水库的调节作用，以保证灌区内依靠地下水生存的天然植被耗水，同时又可使盐份的运移积累不至于污染地下水。因此，研究提出减少潜水无效蒸发、保证植被蒸腾、防治盐碱化发生的最佳地下水位控制标准，是一项非常重要的关键技术。根据相关研究，干旱区最佳控制水位埋深为3m左右。

(3) 生态保障作用。在干旱区内陆河流，当水资源被过度开发利用，而地表水枯竭后，天然植被只能依靠地下水和微少的降雨维持其生命，在南疆地区，远离地表水源的广大荒漠植被则完全依靠地下水生存。因此，地下水是天然植被保护的最后一道防线。据相关研究，适宜生态水位（埋深）为2~4.5m，胁迫水位4.5~6m，沙漠化水位>8m^[7]。

(4) 高效利用作用。水资源在循环和利用中，地表水转化为地下水是一个不可避免的自然过程，开发利用地下水可进一步提高水资源的利用效率。

3.5.3 地下水资源开发利用与保护

(1) 地下水开发与高效节水相结合。开发利用地下水具有水质好、供水稳定、输水距离近、调蓄功能强、调度方便等优点,但耗能多,运行成本较高,其开采利用要尽可能地与高效节水技术密切结合,如采用管道输水和滴灌、喷管等先进的灌水方式相结合,减少输水系统损失,提高田间水利用效益,避免再次转化带来的无效损失。

(2) 地下水开发与盐碱化防治、生态环境保护相结合。一是合理调控防止土壤次生盐碱化发生,保障天然植被根系供水。二是在潜水位和水质矿化度较高的区域,一方面要控制水位降升,防止高矿化度潜水与深层地下水的循环转化,并在丰水年加大淋洗土壤盐分的力度,将残留在土壤中的盐分通过排碱渠尽可能的排出灌区,以避免其对地下水造成污染。另一方面在地表水平排水无法控制到的区域,应合理采用竖井排水,并就近利用蒸发池“干排盐”。

(3) 限制农业灌溉开发利用的深层地下水。深层地下水自然恢复周期十分漫长,可视为不可再生的资源或地下水静储量。因此,从深层地下水可持续利用的角度出发,不能作为农业灌溉的长期稳定水源,其后果一是深层承压水水量迅速衰减,水位下降速度很快,不可持续;二是由于分层止水及凿井工艺问题,会造成上下含水层串通,严重破坏水文地质环境和污染原本水质很好的承压含水层。

(4) 压减并控制纯井灌区的开发规模。在水资源匮乏的地区,大规模发展纯井灌区是不可持续的。根据干旱区内陆河流域水资源循环转化特征,以地表水可利用量控制灌溉农业的发展规模,地下水作为补充调节水源以期提高供水保障率,大规模开发“纯井灌区”,必然造成地下水超采,其结果是:井越打越深,在同一位置新井替代老井,直至地下水枯竭。

(5) 保护地下水水质。新疆正在加速工业化和城镇化进程,城市人口的增加导致生活污水也呈逐步上升趋势,工业废水和城市生活污水对地下水水质造成了不同程度的污染。同时,随着农垦面积的大幅度增加,大量使用农药化肥,在排水设施不配套的灌区,盐分和流失的肥料、农药 70%以上进入了土壤和地下水中。由于地下水系统的滞后性、缓慢性 and 复杂性等,水质的变化往往被忽视。在改良土壤盐碱化时,不能将盐分和化肥农药残留积累于作物耕作层的土壤中,也不能将其带入地下水中。一旦各种污染物进入地下水系统,将成为干旱区地下水系统的“白血病”,其治理难度和所需投入相当大。

(6) 在统一规划的前提下,加强监测,强化管理。地下水开发利用规划与地表水、盐碱地改良、节水、抗旱、生态环境保护等规划密切相关,必须系统研究,科学规划,打破地面行政界线,统一管理。建设地下水监测站网,施行计量监控,完善评价体系,适时调整开发布局。

3.6 主要生态环境问题及其保护对策

草原生态系统恶化、绿洲内部土壤次生盐碱化、河流下游天然绿洲荒漠化是新疆现实最主要的三大生态环境问题。

3.6.1 天然绿洲荒漠化防治与生态水权保障

(1) 生态环境保护与恢复目标。①在维护天然绿洲植被现状规模并不再恶化的前提下,积极修复严重退化流域内的生态环境。②保护和恢复 18 条河川径流量大于 10 亿 m^3 河流(分属 5 个水系)中重要河流的河道基流量及其河谷生态林;保护 65 条中小河流(年径流量大于 1 亿 m^3)的河谷生态林,以及部分重要河流的流量过程。③保护或恢复艾比湖、博斯腾湖、乌伦古湖等三处重点湖沼湿地以及其他 7 个湖泊的湖面面积(艾里克湖、赛里木湖等)。

(2) 生态需水综合分析。1999 年国家“九五”重点科技攻关项目的研究成果,将生态用水对象按植被和湖泊分为两大类,根据天然生态的面积、湖泊湿地面积和用水定额,确定现状新疆天然生态耗水总量为 208.0 亿 m^3 ^[8];2003 年新疆水资源评价分析计算的通河湖泊、

湿地和河道内需保持的最小水量为 203.44 亿 m^3 ^[11]；2008 年完成的水资源综合规划，分析计算现状天然绿洲耗水量为 202.67 亿 m^3 ^[9]。根据以上对比分析，若考虑塔里木河流域、艾比湖流域等区域生态修复需新增生态供水 33 亿 m^3 ^[10]，新疆天然生态需水量 235 亿 m^3 的计算分析成果是基本可靠。人工绿洲内生态需水按总用水量的 30% 计算为 110 亿 m^3 。则新疆总的生态需水量为 345 亿 m^3 。

(3) 生态水权及其保障。干旱区内陆河流面对人工绿洲社会经济系统和天然绿洲生态系统两大竞争性用水户，在没有保护的情况下，往往是生态用水被大量挤占。因此，必须把生态环境作为一个重要的用水户公平对待，合理界定流域内经济社会系统和生态系统的水量分配方案，各条河流均应在生态耗水量分析研究的基础上，科学合理地确定生态保护区的范围、目标和需水总量，明晰生态水权，加强河道各主要控制断面的引水监控，保证水资源的有效管理和生态环境用水。

3.6.2 草原生态系统建设与水资源保障

(1) 草地资源及草原生态环境演变。新疆从平原到山地发育有荒漠、草原、草甸、沼泽等四大草地类组，草地面积 83942.55 万亩。据统计，现状草地超载率为 80.15%^[11]，85% 的天然草地已处在退化之中，其中严重退化的草地面积已占到 37.5%。不仅如此，目前新疆的草地退化和沙化面积仍以每年 435 万亩的速度增加，草地生态环境呈现日趋恶化的严重态势。草原畜牧业的发展在很大程度上是以牺牲草地生态为代价，特别是山区草地生态系统的严重退化，对河流的水源安全造成了严重危机，极大地危害了生存环境。

(2) 发展与保护目标。按照“畜草”平衡原则、现代畜牧业发展模式和减（禁）牧育草的草原生态环境保护要求，需新增灌溉面积 579.9 万亩，其中需配置饲草料地 456.4 万亩（含补充灌溉草场和种植结构调整），依靠天然草地自然修复功能，使 5.69 亿亩天然草地得到保护和恢复，覆盖度和生产能力达到大幅提高。实现草原生态保护、草原畜牧业发展、水资源保护三者之间的相互协调和“小开发大保护，小绿洲大生态”的战略目标。

(3) 水资源保障措施。新增灌溉面积需水量为 34.60 亿 m^3 。其中，国际河流片所需 18.53 亿 m^3 ，其余通过现有灌区节水和开发地下水解决。充分依托已建和在建水利骨干工程，加强灌区配套及节水改造工程建设，提高水资源利用率，为发展人工草料地提供供水保障。

3.6.3 土壤次生盐碱化改良与灌排调控保障

(1) 盐碱地分布及成因。新疆盐碱地面积为 1918.47 万亩，占耕地面积（不包括旱地）的 32.07%，其主要分布于天山南麓山前平原^[12]。在封闭的干旱内陆盆地，各种以水为载体的有害物质只能积聚于盆地之中，水资源分布决定了盐分的分布，盐分随水流聚集于盆地的低洼处，水分蒸发而盐分积累于地表。流域 50 多年来开垦的土地，有相当部分是荒漠区的“残余盐土”或“残余盐化土”，是灌区土壤盐碱化形成的客观原因。过量灌溉，地下水位上升，潜水蒸发强度的加大，表层潜水矿化度急剧升高，进一步加剧了土壤次生盐碱化的发生。

(2) 治理的对策与措施。在干旱区灌与排，供需平衡与水盐平衡是水资源开发利用中两个方面，两者之间任何一方的失衡都将影响灌溉农业可持续发展。防治土壤盐碱化可从 4 个方面进行综合规划设计：①合理配置水资源，积极推行适时适量、高效科学的灌溉制度，提高水资源利用效益；②以水盐平衡理论为指导，调控地下水位和盐份的时空分布，改善农区生态环境；③以田间节水为核心，加强灌排系统配套改造建设，减少潜水蒸发，提高单方水的产出。对现有的盐碱地应采取“治碱与节水并举，先治碱，后节水”的方法，盐碱地改良后，应大力推行节水灌溉，有效控制地下水位抬升，延缓土壤积盐过程；④调整大农业结构，实现农牧结合，草田轮作，有利于土壤有机质增加和土壤盐份减少，改善土壤环境。综合以上措施即构成土壤盐碱化防治与水资源高效利用的技术体系。

3.7 促进经济社会发展方式转变的水资源利用与保护

从新疆社会经济发展战略布局来看,以石油天然气资源和煤炭资源为依托的石油化工基地、煤电化、煤化工基地建设;以水、土、光热资源耦合系统为依托的商品棉和特色林果业基地建设;以工业化和现代化为依托的城镇化建设,将构成二十一世纪经济社会强势发展的三大支柱,对水资源的需求将会提出更高的要求。从水资源禀赋条件来看,开源的潜力在国际河流,节水的主要潜力在灌溉农业,用水的增长点在工业和城镇发展。根据水资源和环境承载能力,在未来的发展中必须科学合理地制定产业发展规划,调整产业用水结构,积极推进高效节水农业发展,控制灌溉农业总体发展规模,压减农业用水量,为产业结构调整、工业及城镇发展创造条件。以提高水资源承载能力、建立循环经济体系为目标,全面推进新型工业化和城镇化进程(详见图3)。

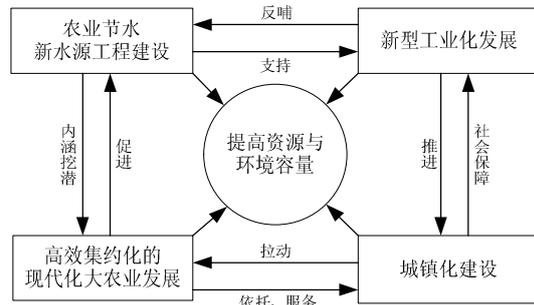


图3 流域水资源与循环经济体系关系图

4 结语

除以上主要水资源战略问题外,还有国际河流水资源开发利用与保护、水管理体制改单等重大水资源战略问题。新疆特殊的自然环境和独特的绿洲经济格局,决定了水利建设极为重要的基础战略地位,水资源的开发利用是其他资源开发利用的基础和前提,决定和制约着新疆社会发展的进程。因此,从战略的高度研究影响新疆“资源—环境—经济”协调发展中的重大水问题是十分必要的。

参考文献

- [1] 王志杰, 章曙明. 新疆地表水资源概评[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2008. 4.
- [2] 新疆水利厅. 2007年新疆水资源公报[R]. 2008. 7.
- [3] 新疆水文水资源局, 等. 新疆地下水超采区划定报告[R]. 2008. 12.
- [4] 李忠勤. 冰川研究[J]. 2007. 6.
- [5] 钱正英, 等. 西部地区水资源配置生态环境建设和可持续发展战略研究[M]. 北京: 科学出版社, 2004.
- [6] 新疆水文水资源局. 新疆地下水开发利用规划[R]. 2007. 11.
- [7] 王让会, 陈曦, 马英杰. 塔里木河流域生态环境问题及其对策[R]. 2000. 3.
- [8] 中国科学院新疆生态与地理研究所, 中国水利水电科学研究院. 新疆国民经济与生态环境需水量预测研究(“九五”国家重点科技攻关项目)[R]. 1999. 3.
- [9] 中国水利水电科学研究院. 新疆水资源综合规划报告[R]. 2008. 6.
- [10] 中国水利水电科学研究院. 艾比湖流域水资源合理配置研究[R]. 2008. 6.
- [11] 新疆水利厅. 新疆牧区草原生态建设水资源保障规划[R]. 2003. 3.
- [12] 新疆水利水电勘测设计研究院. 新疆绿洲灌区盐碱地改良利用规划报告[R]. 2007. 11.

三峡水库蓄水期间近坝区域水流及水质特性分析

陈永灿¹ 刘昭伟¹ 王志刚¹ 高千红²

(1. 清华大学水利水电工程系 北京 100084

2. 长江三峡水环境监测中心 宜昌 443002)

摘要 三峡水库蓄水后, 水流条件的巨大改变导致了周边区域的水环境特性的变迁。本文对 2002~2008 年坝前庙河断面和坝后黄陵庙断面的水文水质监测数据进行了分析, 研究了蓄水期间近坝区域水流及主要水质指标的变化规律。水库蓄水后, 坝前水体未出现明显分层, 只是升温过程和降温过程较蓄水前有所滞后; 主要污染物 BOD₅、NH₃-N 和 TN 等的浓度较蓄水前变化不大, 而易吸附于泥沙颗粒的 COD_{mn}、TP 和 Cu 等污染物随泥沙沉入库底, 其浓度随悬浮物浓度的降低而有所降低; 坝前水体中的 DO 浓度由于水面复氧能力的下降而减小, 而坝下水体 DO 的含量, 由于泄洪水流的剧烈掺气和静水压强的作用则大幅度增加, 溶解氧超饱和的现象时有发生。

关键词 三峡水库; 近坝区域; 水温; 水质; 溶解氧

1 概述

三峡水库 2003 年 6 月开始蓄水, 水位由天然状况下的 70m 左右抬高到 135m, 10 月份调整到 139m; 2006 年 10 月, 进一步蓄水到 156m 水位; 2008 年 11 月, 最高蓄水位达 172.47m, 完成 175m 试验性蓄水任务。随着水位的抬高, 水面变宽, 水域面积增大, 淹没土壤中的污染物有可能溶解到水体中, 增加水库污染物的含量; 另外, 水位的抬高也导致水深和过流面积的大幅度增加, 水流明显变缓, 污染物在水库中的滞留时间增长; 同时, 有部分污染物吸附于泥沙颗粒, 并随其沉降到库底。在坝前水域, 这些变化尤未突出。此外, 由于坝身孔口泄洪以及电站运行的影响, 水流的过坝方式也存在巨大的变化, 这些改变造成了坝下水体的独特水环境特性。

三峡水库近坝水域的水环境问题是公众广为关注的热点问题, 许多学者围绕该问题开展了大量的调查研究^[1]。文献[2]在对蓄水前库区水文、水质和污染负荷等水环境基础资料进行详尽调查和同步观测的基础上, 预测了包括坝区水域的整个库区的水质变化, 并对库首水体的水温结构进行了模拟预测。2003 年 6 月, 三峡水库开始蓄水后, 相关部门加强了近坝水域的水环境监测^[3], 并对该水域的水环境变化进行了跟踪、评价、分析^[4-8]。围绕三峡近坝水域可能出现的水环境问题, 具有针对性的深入研究也相继展开。文献[9]研究了香溪河的营养盐分布特性和富营养化的发展趋势; 文献[10-11]采用不同方法预测了坝前水域的水温结构, 并针对上游边界垂向水温分布的确定等难点问题提出了不同的处理方法; 文献[12-14]研究了坝下水体溶解气体(或溶解氧)超饱和的问题, 分析了出现超饱和现象的影响因素, 并提出了简洁的预测方法。

本文利用 1997 年、1998 年以及 2002 年—2008 年三峡工程坝前庙河断面(蓄水前为太平溪断面)及坝后黄陵庙断面的水文、水质监测数据, 通过分析, 评价了蓄水期间水位上升后的水流、水质等水环境要素的变化, 并对导致这种变化的因素进行了探究, 得到了蓄水期间近坝水域的水环境特性。

2 坝前水流条件的变化

三峡水库蓄水后, 水位抬高, 水面增宽, 过流面积增大, 水流减缓, 断面平均流速显著

减小。另外，为了兼顾发电和防洪的需要，水库在冬季枯水期运行在 175m 高水位，夏季丰水期保持 145m 低水位，结果在春季形成一个水位逐渐降低的放水过程，在秋季形成一个水位逐渐抬升的蓄水过程，进而影响到过坝的水位流量过程。

水库蓄水以后，坝前断面过流面积和平均流速会发生很大的变化。位于坝前 18 km 左右的庙河断面剖面图如图 1 所示，天然状况下，其丰水期水位约为 70 m，对应的过流面积为 18000 m² 左右；当水位抬高到 135 m 时，过流面积增加到 66000 m² 左右；当水位进一步抬高到 175 m 水位时，过流面积达 106000 m² 左右。断面平均流速随着过流面积的增大而减小，假定近坝区域丰水期的流量为 35000 m³/s，枯水期的流量为 3500 m³/s，则蓄水前、蓄水初期、水库正常运行后，该断面平均流速如表 1 所示，从表中可以看出，当水位蓄到 175m 时，坝前水流速度将从天然条件下的 1~2m/s 左右下降到 0.03 m/s 左右。随着水流的变缓，水流的紊动强度也将减弱，水流对污染物的输移扩散能力也随之降低。

表1 不同流量和水位条件下庙河断面的平均流速

	径流量(m ³ /s)	水位(m)	平均流速(m/s)
蓄水前	35000	70	1.76
	3500	65	0.20
蓄水初期	35000	135	0.53
	3500	135	0.05
正常运行	35000	145	0.47
	3500	175	0.03

注：2001年7月5日黄陵庙断面流量为 32,900 m³/s，水位为 68.08 m；1998年2月10日黄陵庙断面流量为 3,480 m³/s，水位为 65.51 m。庙河断面距离黄陵庙断面约 30 km，中间无一级支流汇入

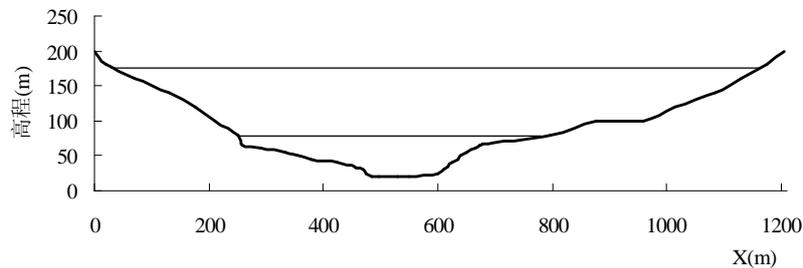


图1 庙河断面过流面积随水位变化曲线

3 坝前水域的水质变化

三峡水库蓄水前和蓄水期间，相关部门采取了大量的工程和非工程措施，控制三峡库区的污染排放，消减进入水库的工业废水和生活污水；对淹没区域也进行了细致的清理，但仍可能有部分污染物从土壤溶解到水体中。与此同时，水库蓄水后，流速减缓，水体对污染物的输移扩散能力减弱，污染物在整个水库的分布特性有所变化（如污染混合区的面积增大等），并在水库中滞留更长的时间。此外，流速减缓造成水流的挟沙能力降低，部分污染物将随泥沙的沉降沉入库底。下面根据 2002 年—2008 年的水文水质监测资料，分析坝前水域水温及主要水质指标的变化，并探求造成这种变化的影响因素及途径。

3.1 水温的变化

根据监测结果，蓄水后，坝前水域没有出现明显的水温分层，下泄水温和坝前水温大致相等，坝前庙河断面 2002 年—2008 年水温变化如图 2 所示。图中的水温值以及下文各图的

水质浓度值均为每月上旬的监测数据，近坝区域的大部分水质指标变化不太剧烈，各个水质指标的月际变化可以反映水质的总体演变趋势。从图 2 中可以看出，水温随着气温的升降而变化，夏季水温高，冬季水温低，蓄水前后水温的峰值、谷值以及变化过程没有明显差异。

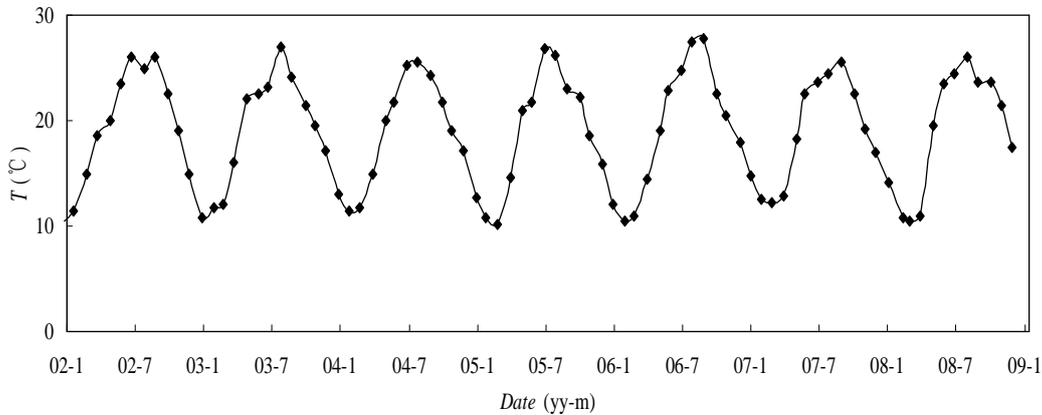


图 2 庙河断面 2002 年—2008 年水温的月际变化曲线

为了更清晰地观察水库蓄水对坝前水温的影响，本文一年的时间坐标内绘制了 1997 年、1998 年以及 2002—2008 年的水温变化，并采用三角函数分别对蓄水前和蓄水后的水温进行曲线拟合，如图 3 所示。比较图 3 中拟合曲线可以看出，蓄水后的水温峰值略低于蓄水前的峰值，水温谷值则略高于蓄水前的谷值；水库的升温过程和降温过程较蓄水前存在明显的相位差异，升温过程中总体上比蓄水前晚 15~20 天。根据文献[15]对坝前区域的热量收支平衡分析，坝前水位从天然的 66 m 上升到 139 后，坝前 105 km 范围内的平均水深由 31.14 m 增加到 72.29 m；这种变化意味着单位面积水面对应着更大体积的水体，如果水面吸热条件变化不大，升温期水温上升的速度将明显减慢。同理，降温期水体的降温速度也明显减慢。

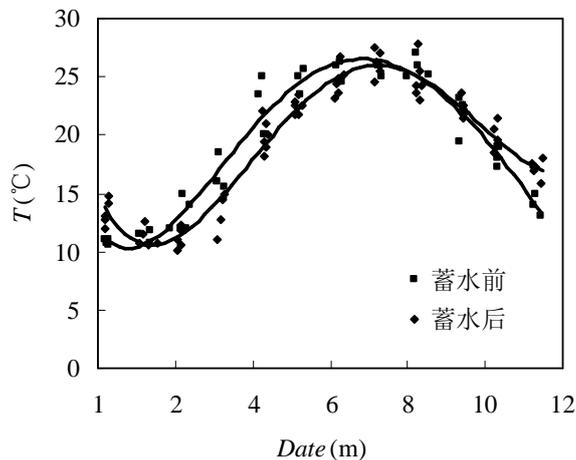


图 3 庙河断面蓄水前后水温月际变化比较

3.2 悬浮物浓度的变化

庙河断面 2002 年—2008 年悬浮物浓度的月际变化如图 4 所示。从图中可以看出，不管是蓄水前，还是蓄水后，丰水期的悬浮物浓度较枯水期显著地增加，这种变化和流量的变化相对应。从年际比较来看，2006 年长江来流流量明显减少，所对应的悬浮物浓度也相应地减少。在相当的流量条件下，蓄水后悬浮物的浓度大大低于蓄水前的水平。

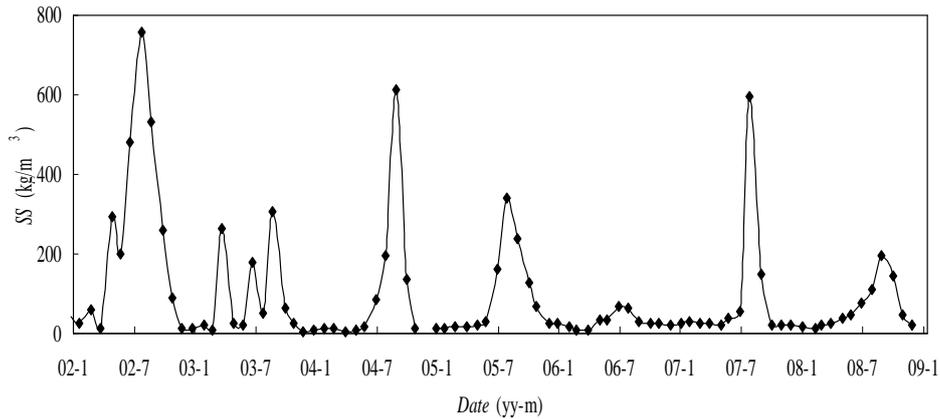


图4 庙河断面 2002 年—2008 年悬浮物浓度的月际变化曲线

为比较水库蓄水对悬浮物的影响,本文绘制了 1998 年和 2002—2008 年悬浮物浓度随流量的相关变化,并采用直线进行了拟合,如图 5 所示。从图中散点可以看出,不管是蓄水前还是蓄水后,悬浮物浓度总体随着流量的增加而增加,只是增加速率大不相同。蓄水前,水流速度较大,挟沙能力较强,悬浮物浓度随流量的增加速度较快;蓄水后,水位上升,过流面积增大,相同过流流量条件下的断面平均速度大幅度降低,水流的挟沙能力减弱,悬浮物浓度随流量的增加速度明显减缓。

3.3 氧平衡因子的变化

氧平衡因子通过水体中氧气的收支平衡反映水体中有机物污染状况。庙河断面 2002 年—2008 年氧平衡因子的月际变化如图 6 所示,其中菱形符号表示溶解氧(DO),方块符号表示高锰酸钾指数(COD_{Mn}),三角符号表示五日生化需氧量(BOD_5)。氧气在水体中的溶解度受水温影响较大,因此,不管是蓄水前还是蓄水后,DO 的变化均为夏季浓度低,而冬季浓度高。此外,水库蓄水后,水流减缓,污染物在水库中滞留了更长的时间,消耗了更多的氧气;水深加大,流速减小,水面紊动强度小,大气复氧的速率大为降低。这两个过程共同作用造成了 DO 浓度随着水位的抬升有明显下降的变化趋势。

从 COD_{Mn} 和 BOD_5 的变化曲线可以看出,蓄水后 COD_{Mn} 的浓度低于蓄水前的浓度,这种变化在丰水期最为明显;而蓄水后 BOD_5 的浓度较蓄水前变化不大。另外,不管是蓄水前,还是蓄水后, COD_{Mn} 的浓度均在丰水期有一明显的峰值,说明一部分 COD_{Mn} 吸附在泥沙颗粒上,其含量和悬浮物的浓度存在一定的相关性。

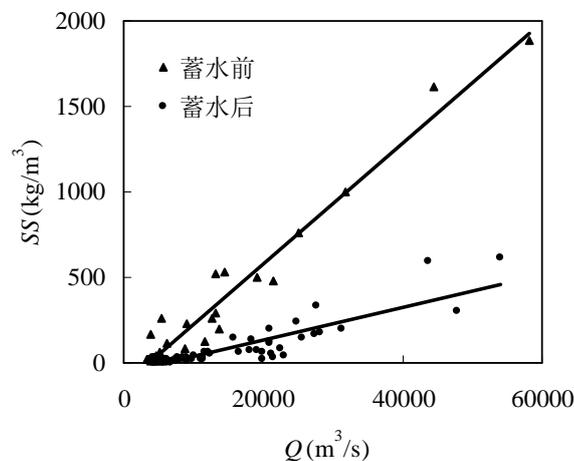


图5 蓄水前后悬浮物浓度随流量的相关变化图

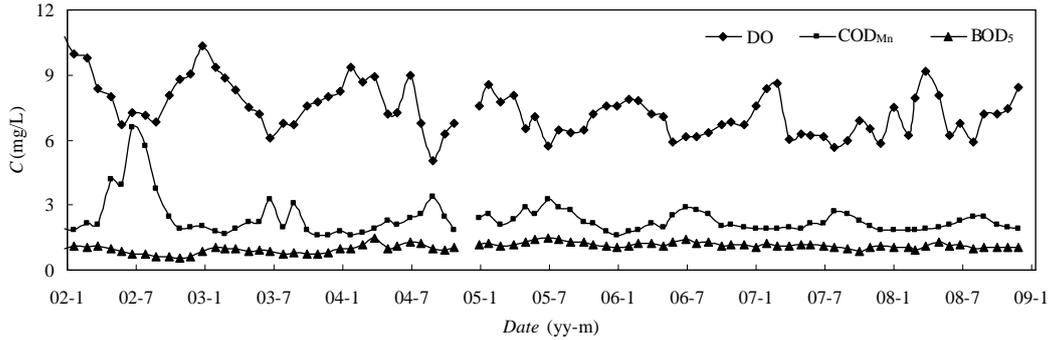


图6 庙河断面 2002 年—2008 年 DO、COD_{Mn} 和 BOD₅ 的月际变化

2002 年—2008 年的 COD_{Mn} 浓度和悬浮物浓度相关变化如图 7 所示。从图中可以看出, COD_{Mn} 总体上随着悬浮物浓度的上升而上升, 具有一定的相关性。但其相关度不是太高, 部分点分布较为零散, 说明 COD_{Mn} 浓度的变化除和悬浮物浓度相关外, 还受到其他因素的较大影响, 如通过对工业废水和城市污水的控制而造成 COD_{Mn} 负荷的消减, 淹没土壤的释放、COD_{Mn} 在水库中的衰减等。

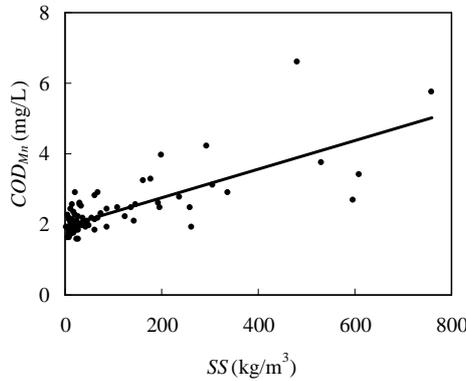


图7 庙河断面 COD_{Mn} 浓度和悬浮物浓度的相关变化图

3.4 营养盐因子的变化

营养盐因子反映水体中的营养状况, 即为藻类等水生植物提供营养物质的能力。坝前庙河断面营养盐因子的月际变化如图 8 所示, 其中菱形符号表示氨氮 (NH₃-N), 方块符号表示总磷 (TP), 三角符号表示总氮 (TN)。由于 TN 的浓度与 NH₃-N、TP 的浓度相差一个量级, 图 8 采用了双纵轴坐标, 右边纵轴表示 TN 的浓度值, 左边纵轴表示 NH₃-N 和 TP 的浓度值。

从图 8 中可以看出, 蓄水后, TP 的浓度有所降低, 而 NH₃-N 和 TN 的浓度变化不明显。和有机污染物相比, 营养盐因子的月际变化比较剧烈, 说明水库中水生植物对营养盐的吸收和释放比较频繁。TN 的年周期变化比较明显, 一般在 5、6 月份出现年内的峰值, 而后开始下降, 这种变化和洪水的变化并不一致, 可能和库内水生植物的生长发育过程相关, 其具体规律, 有待进一步研究。

水中 P 元素包括溶解态和吸附态, 一部分 P 元素常常吸附在泥沙颗粒上, TP 和悬浮物的相关变化如图 9 所示。从图中可以看出, TP 的含量随悬浮物浓度的增大近似呈线性增加, 表明图 8 中 TP 浓度的降低可部分归因于悬浮物浓度的降低, 部分 P 元素随泥沙沉入库底。P 是三峡水库中水华爆发的限制性因素, 蓄水后水流速度减缓, 而 P 的浓度降低后并没有达到可以抑制水华爆发的水平, 在库湾和一些支流出现水华现象。而 P 元素沉入库底后, 随时可能随着泥沙颗粒的起浮重新进入水体, 造成二次污染, 并可能随着泄洪水流进入坝下水体,

影响坝下水体的营养状况。如 2007 年 8 月, TP 含量突然形成一个超过 0.3mg/L 的峰值, 这种变化对水库及下游水体环境及相关水生植物的影响还有待进一步探索。

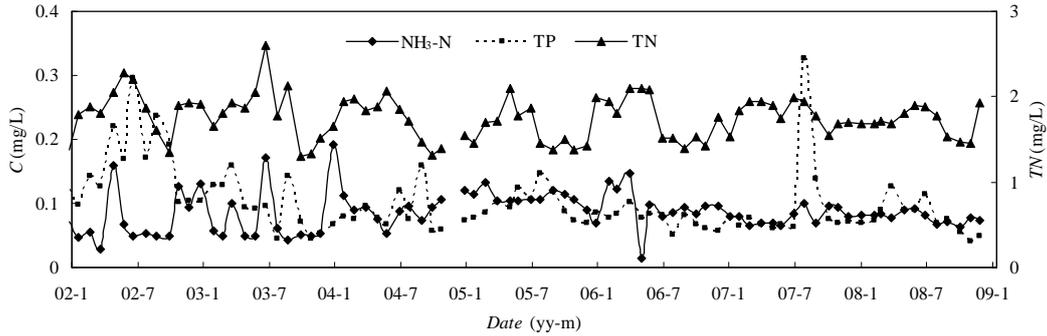


图 8 庙河断面 2002 年—2008 年营养盐因子的月际变化曲线

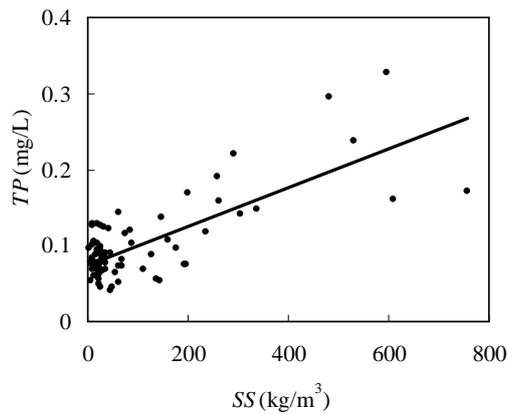


图 9 庙河断面 TP 浓度和悬浮物浓度相关变化图

3.5 重金属元素的变化

三峡水库中重金属含量不高, 坝前庙河断面 2002 年—2008 年重金属铜 (Cu) 的月际变化曲线如图 10 所示, 在所收集到的数据中, 许多月份的数据标为“未监测出”, 本文采用测量方法的最小可测出值 0.005 mg/L 代替。从图中可以看出, 不管是蓄水前, 还是蓄水后, Cu 的浓度在每年均有一明显的峰值, 丰水期 Cu 的浓度高, 枯水期 Cu 的浓度低, 和悬浮物的变化有很好的相关性。另外, 蓄水后, 丰水期重金属 Cu 的含量和蓄水前相比大大降低, 尤其在枯水年 2006 年, 丰水期 Cu 的浓度仅为约 0.01 mg/L, 大致为蓄水前 2002 年对应水期的 1/4。本文还给出了重金属 Cu 和悬浮物的相关变化图图 11, 从图中可以看到 Cu 和悬浮物很好的相关性, Cu 的浓度近似随悬浮物的浓度线性变化。

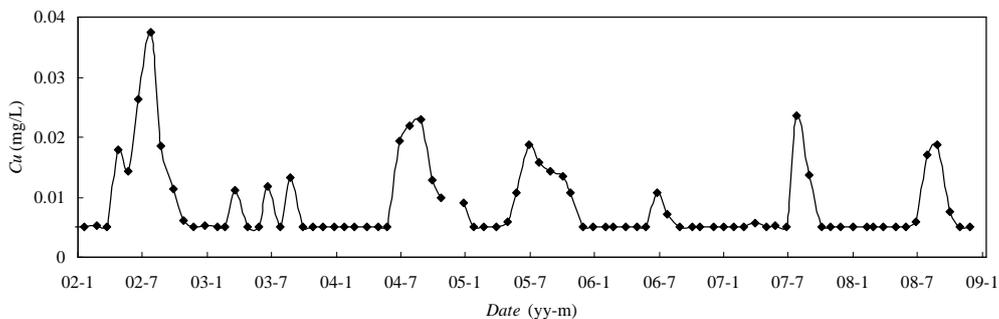


图 10 庙河断面 2002 年—2008 年 Cu 的月际变化曲线

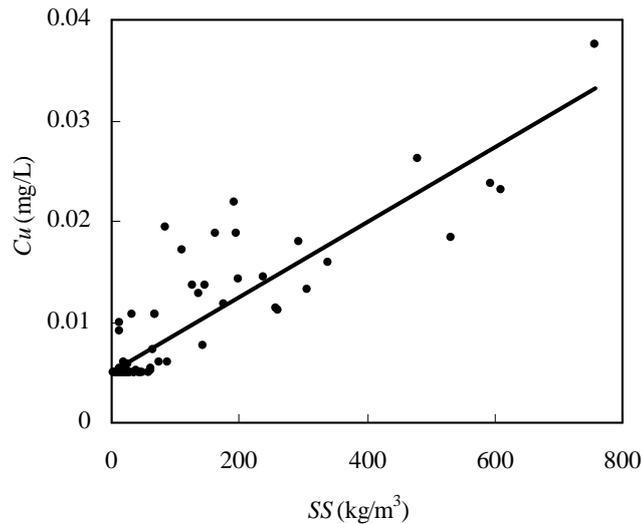


图 11 庙河断面 Cu 浓度和悬浮物浓度相关变化图

4 坝下水域的水环境变化

2003—2008 年，在三峡水库逐步蓄水期间，坝前水面未出现水温分层，水温及各种水质参数在整个断面上大致混合均匀，坝下水域的主要水质参数的变化和坝前水体基本保持一致，坝后断面的各种水质参数（DO 除外）的浓度和坝前断面基本相等。只是在丰水期大坝坝身泄洪阶段，高速水流携带大量气泡进入下游水体深处，在静水压的作用下，水中气体浓度大幅度增加，甚至出现溶解气体超饱和的现象。

坝前庙河断面和坝后黄陵庙断面（位于坝后约 12km 处）2002—2008 年 DO 的月际变化如图 12 所示。从图中可以看出，在蓄水前的 2002 年，两个断面 DO 浓度基本一致。蓄水以后，仅电站过流时，因三峡电站良好的淹没入流与淹没出流条件，过流水体不具备明显的掺气途径，下游溶解氧浓度仍然接近上游溶解氧浓度；而有坝身孔口泄洪时，下游溶解氧浓度较上游溶解氧浓度显著增大，最大值高达近 11mg/L。从机理上讲，深孔作为三峡大坝最为重要的泄洪途径，采用有压短管接明流泄槽的过流方式，以挑流与下游河道衔接，往往在坝身过流及空中挑射过程剧烈掺气，携带大量气体进入下游河道，为下游水体溶解氧浓度的增长提供条件。

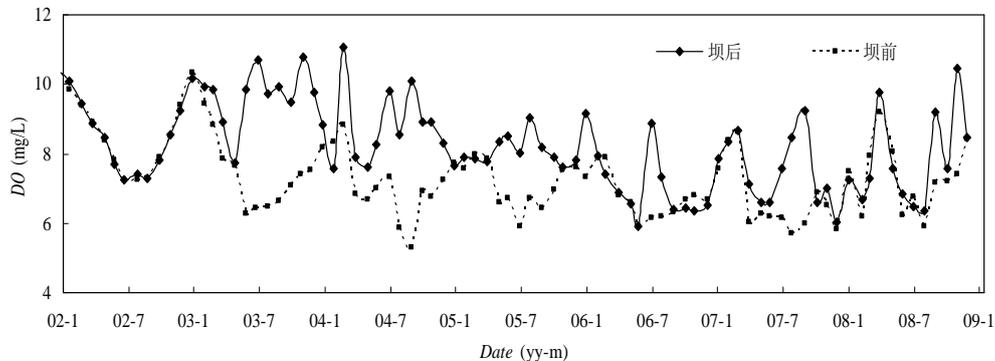


图 12 坝前庙河断面和坝后黄陵庙断面 2002~2008 年 DO 浓度的月际变化

蓄水以后，下游溶解氧浓度的年内最大值大多出现在长江的主汛期（7—9 月）。这是因

为三峡水库每年汛期(5—10月)都维持145m防洪限制水位运行,过坝总流量与天然来流量相同;主汛期发生的大洪水及特大洪水增大了坝身孔口的过流流量,往往造成年内最高的溶解氧浓度。蓄水初期,投入运行的电站机组较少、主要依靠坝身孔口过流的月份,下游溶解氧浓度也显著增大,而后随着发电机组的不断投入运行,溶解氧的浓度有所下降,过饱和的程度有所减轻。

三峡水利枢纽下游溶解氧饱和度取决于泄水建筑物流量、总流量、上游溶解氧饱和度和下游水位(水深)。文献[13]利用所建立的机理模型,对不同流量洪水条件下的溶解氧饱和度进行了预测。预测表明:泄水建筑物下游溶解氧饱和度远高于黄陵庙断面溶解氧饱和度,电站过流缓和了溶解氧超饱和状况。下游溶解氧饱和度的最大值出现在坝后较短距离,电站过流水体和泄水建筑物过流水体尚未掺混的位置。对于黄陵庙断面而言,三峡水库汛期一般维持防洪限制水位145m运行,其溶解氧饱和度最大值约为132%;遭遇20年一遇洪水和50年一遇洪水时,最高调洪水位为154.1m和黄陵庙断面相应的溶解氧饱和度不超过140%;遭遇百年一遇洪水时,最高蓄洪水位(防洪高水位)为166.5m,黄陵庙断面相应的溶解氧饱和度最大值略大于140%;遭遇千年一遇洪水,上游水位达到175m时,黄陵庙断面相应的溶解氧饱和度最大值约为152%。

5 结 语

三峡水库2003年6月开始逐步蓄水,2008年11月完成实验性蓄水,期间该区域水环境的变化一直为人们所广泛关注。本文利用1997年、1998年和2002—2008年的水文水质监测资料,对蓄水期间近坝水域的水环境状况进行了分析,得到了水流、水质和主要水质参数在蓄水期间的变化规律,并对其变化诱因进行了探讨。蓄水期间三峡近坝水域的水流及水质的变化特性如下:

(1) 三峡水库蓄水后,水位大幅度抬高后,过流面积增大,水流速度减缓。由于枯水期水库保持在175m高水位,丰水期保持在145m低水位,春季的放水过程和秋季的蓄水过程均对过坝的水位流量过程产生影响。

(2) 蓄水期间,坝前水体未出现明显分层。但蓄水后水温变化的峰值较蓄水前略有不同,蓄水后水体吸热速度和散热速度均较蓄水前有所减慢,蓄水后水库升温期的升温过程约比蓄水前慢15~20天。

(3) 蓄水后,由于流速减缓,水流挟沙能力减弱,坝前水体的悬浮物浓度大幅度降低。

(4) 蓄水后,坝前水域的主要水质参数 BOD_5 、 NH_3-N 和TN没有明显变化,而 COD_m 、TP和Cu的浓度则有所降低,这个变化主要和水体中悬浮物浓度的降低有关。污染随泥沙沉入库底后,有随着泥沙重新起浮的可能,造成二次污染。

(5) 尽管蓄水后营养盐因子 NH_3-N 和TN浓度变化不大,TP的浓度有所降低,但仍高于爆发水华的限制水平;水位上升水流减缓后,在部分库湾和支流出现了富营养化现象。

(6) 蓄水后,由于流速减缓,水面复氧能力下降,坝前水体中DO浓度较蓄水前有所降低。但是由于坝身泄洪的影响,坝下水体DO浓度大幅度增大,甚至有时出现DO超饱和的现象。DO超饱和的程度随着发电机组的不断投入使用有所减轻。

参考文献

- [1] 黄真理. 三峡水库水环境保护研究及其进展[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2006, 38(5): 7-15.
- [2] 黄真理, 李玉梁. 三峡水库水质预测和环境容量计算[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2006.
- [3] 张晟, 刘景红, 张全宁, 等. 三峡水库成库初期丰水期水环境化学特征[J]. 水土保持学报, 2005,

- 19(3): 118-120.
- [4] 吕怡兵, 宫正宇, 连军, 等. 长江三峡库区蓄水后水质状况分析[J]. 环境科学研究, 2007, 20(1): 1-6.
- [5] 刘宁, 江春波, 陈永灿. 三峡蓄水初期水库区坝水域水环境特性分析[J]. 水利学报, 2006, 37(12): 1447-1453.
- [6] 兰峰. 三峡工程蓄水前后库区河流水质变化分析[J]. 人民长江, 2008, 39(1): 7-8.
- [7] 陈永灿, 陈燕, 郑敬云, 等. 概率神经网络水质评价模型及其对三峡近坝水域的水质评价分析[J]. 水力发电学报, 2004, 23(3): 7-12.
- [8] 陈永灿, 付健, 刘昭伟, 等. 三峡水库蓄水前后近坝水域的水质评价与分析[J]. 水力发电学报, 2007, 26(4): 51-55.
- [9] 罗专溪, 张远, 郑炳辉. 三峡水库蓄水初期水生态环境特征分析[J]. 长江流域资源与环境, 2005, 14(6): 781-785.
- [10] 马方凯, 江春波, 李凯. 三峡水库近坝区三维流场及温度场的数值模拟[J]. 水利水电科技进展, 2007, 27(3): 17-20.
- [11] 任华堂, 陈永灿, 刘昭伟. 三峡水库水温预测研究[J]. 水动力学研究与进展(A辑), 2008, 23(2): 141-148.
- [12] 郭鸿博. 三峡大坝上游及坝下溶解氧变化规律研究[J]. 中国水运, 2008, 8(7): 146-147.
- [13] 付健, 陈永灿, 刘昭伟, 等. 水利枢纽下游水体溶解气体饱和度预测方法研究[J]. 科技导报, 2008, 26(17): 76-81.
- [14] 陈永灿, 付健, 刘昭伟, 等. 三峡大坝下游溶解氧变化特性及影响因素分析[J]. 水科学进展, 2009, 20(4): 526-530.
- [15] 任华堂. 大型水库水温特性三维数值模拟研究[D]. 清华大学博士学位论文, 2006.