

关于南水北调中线工程调水、用水、储水的思考

Thoughts on Transfer, Utilization and Storage of Water on the Middle Line of the South – to – North Water Tranfer Project

方建华¹ 张克伟² 赵云章³ 程生平¹ 吴国玺⁴
(河南省地勘局第一地质工程院¹ 463000 ;河南省国土资源厅² 450003 ;河南省地质矿产勘查开发局³ 450007 ;河南省驻马店教育学院⁴ 463000)

南水北调中线工程在国内外影响很大、意义深远,因此必须慎重决策,以避免或减少不必要的经济损失和生态环境的负面影响,确保南水北调中线工程的成功。为此,笔者从南水北调中线工程调水、用水、储水诸方面提出一些看法,供决策参考。

一、调水的思考

1. 水源问题

(1) 丹江口水库入库水量分析 南水北调中线工程规划一期工程完成后,年调水 $145 \times 10^8 \text{ m}^3$,这个调水量是按需确定的,也就是解决北京、天津、河北、河南等省市城市工业和生活用水,兼顾农业用水的需要。但实际情况是丹江口水库流域处于我国的季风活动区,受异常大气环流影响,导致旱涝灾害常有发生。笔者认为一期工程完成后,在没有长江三峡水库调入丹江口水库水量的情况下,一期工程调水量应按丹江口水库的实际来水量资料^[1] (表1) 确定。根据表1中资料分析,最干旱年入库水量 $133.0 \times 10^8 \text{ m}^3$,十年一遇(中)旱年入库水量 $218.4 \times 10^8 \text{ m}^3$,二者入库来水量的保证率为39%。

表1 丹江口水库 1930~1995 年(66 年)来水量分析		
来水情况分析	来水量 ($\times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$)	来水情况说明
大于或等于	500.0	入库来水量的保证率61% (其中 $500 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ 保证率18% , $383.4 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ 保证率43%) , 1964年(丰水年) 入库 $783.1 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$
大于或等于多年平均	383.4	
十年一遇(中)旱	218.4	入库来水量的保证率39% , 1965~1966年(中旱) 入库 $179.1 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$, (不足多年平均的1/2, 仅约相当于保证该水库本身正常蓄水位的水量) ; 1976~1978年(汉中、郧县等干旱) 入库低于 $300 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ (得不到补偿) ; 1991~1995年(安康、汉中等地3~5年连旱) 入库水量5年中4年不足 $300 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$, 1995年入库 $217.1 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$
百年一遇(大)旱	133.0	

(2) 丹江口水库外调水库分析及外调水量 丹

江口水库一期工程完成后,坝高162.0m(吴淞口),正常蓄水位157.0m(吴淞口),相应库容 $174.5 \times 10^8 \text{ m}^3$,现已建成的南水北调中线工程总干渠首(陶岔)水位高程为140.0m(吴淞口);若二期加高丹江口水库混凝土大坝(设计)坝高176.6m(吴淞口),加高大坝14.6m,正常蓄水位170.0m(吴淞口),相应库容 $290.5 \times 10^8 \text{ m}^3$,即是按正常蓄水位计算提高13.0m,可增加库容 $116.0 \times 10^8 \text{ m}^3$ ^[2]。丹江口水库调节库容 $163.6 \times 10^8 \sim 190.5 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。陶岔渠首水位高程140.0m以下,不能自流的(死)库容约 $110.5 \times 10^8 \sim 138.5 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。

根据丹江口水库的实际入库来水量资料及陶岔渠首水位高程140.0m以下不能自流调水的(死)库容,在考虑或不考虑丹江口水库以下汉江流域中下游的工农业生产及城市生活用水情况下的可外调水量见表2、表3。

表2 丹江口水库可自流外调水(考虑下游用水)计算表

入库来水保证率(%)	年入库来水量 ($\times 10^8 \text{ m}^3$)	140.0m渠首水位(死)库容水量 ($\times 10^8 \text{ m}^3$)	下游用水量 ($\times 10^8 \text{ m}^3$)	年可自流调水量 ($\times 10^8 \text{ m}^3$)
18	大于或等于500.0	110.5~138.5	70.0	319.5~291.5
43	大于或等于多年平均383.4	110.5~138.5	70.0	202.9~174.9
39	十年一遇中旱218.4	110.5~138.5	70.0	37.9~9.9
	百年一遇大旱133.0	110.5~138.5	70.0	-47.5~-75.5

说明:(1)下游用水量 $70.0 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$,为年用水量,包括城镇水厂、工业自备用水、农灌提水或引水,未包括下游河道航运用水、发电泄水量;(2)负值表示不可自流外调水。

由上所述,在丹江口水库来水大于或等于多年平均来水量 $383.4 \times 10^8 \text{ m}^3$ 、来水保证率61%的情况下,考虑或不考虑丹江口水库下游用水都能保证 $145 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ 的外调水量。在十年一遇中旱入库来水量 $218.4 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ 、百年一遇大旱 $133.0 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$,二者入库来水保证率39%的情况下,考虑或不考

表3 丹江口水库可自流外调水
(不考虑下游用水)计算表

入库来水保证率(%)	年入库来水量($\times 10^8 \text{ m}^3$)	140.0m渠首水位(死)库容水量($\times 10^8 \text{ m}^3$)	年可自流调水量($\times 10^8 \text{ m}^3$)
18	大于或等于500.0	110.5~138.5	389.5~361.5
43	大于或等于多年平均383.4	110.5~138.5	272.9~244.9
39	十年一遇中旱218.4	110.5~138.5	107.9~79.9
	百年一遇大旱133.0	110.5~138.5	22.5~-5.5

说明:负值表示不可自流外调水。

考虑丹江口水库下游用水都不能保证 $145 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ 的外调水量。若遇到这两种年景的入库来水量时考虑丹江口水库下游用水,只能自流外调水量 $0 \sim 37.9 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$;在不考虑下游用水时,可自流外调水量 $0 \sim 107.9 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$,而这两种年景在66年中出现25年(即10年中出现3年)。北京、天津、石家庄、郑州等华北缺水城市工业和生活用水保证率的要求,与农业用水保证率不同,城市供水保证率一般99%~100%,特别是北京作为国家首都供水保证率应该做到100%。为了提高供水保证率,应该根据丹江口水库入库来水量确定向北京、天津、华北等城市每年提供 $50 \times 10^8 \text{ m}^3 \sim 100 \times 10^8 \text{ m}^3$ 的外调水量,保证率是99%~100%。在水库水位低于渠首水位情况下,陶岔渠首闸不能自流外调,可采用水泵从丹江口水库提水到陶岔渠首向北自流。

根据北京、天津、河北、河南的缺水城市现阶段实际缺水的需水量及长江水利委员会资料^[2]和城市化发展水平预测,北京、天津、河北、河南等缺水城市需补充供水量(表4),经测算的需补充的缺水城市的补充供水量至少为 $50 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$,能满足城市化发展水平和主要工业生产用水的需求。若充分考虑城市工业生产和城市发展可能出现的各种情况及缺水城市回灌补充地下水,则外调补充供水量宜达到 $100 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ 。

表4 北京、天津、河北、河南等缺水城市需补充供水量预测

北京 ($\times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$)	天津 ($\times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$)	河北 ($\times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$)	河南 ($\times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$)	合计 ($\times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$)
10~20	10~20	15~30	15~30	50~100

2. 调水方式

根据丹江口水库入库来水量情况、城市工业和生活用水量与农业用水保证率要求的不同,调水方式应采取分用途建调水渠道的输水方式。第一期中线工程调水 $50 \times 10^8 \sim 100 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$,可解决北京、天津、河北、河南缺水城市的水资源短缺问题。由于城市用水水质要求高、保证程度高,渠道宜采用掩盖(不露天)全封闭混凝土渠系防渗漏,渠首采用自流闸引水和抽水泵提水两种方式调水。第二期中线工程调水 $50 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ 或 $50 \times 10^8 \sim 100 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ (更大调水量需靠引长江三峡水库水补充丹江口水

库),解决北京、天津、河北、河南的农业用水灌溉问题。农业用水保证程度较低,用水水质要求也低,可采用渠道不掩盖(露天)、渠首自流引水方式调水。总干渠沿线与大中小型水库相连,可进行补偿调节,也可补充回灌地下水。应充分地调引长江流域丰水年、平水年汛期大量的水库弃水供给华北地区;而农业调水则不调引长江流域枯水年、枯水期的水。

3. 枯水期调水对长江入海口的影响

长江水资源总量虽然丰沛,但是年际与月际间变化极大,月均流量变化在 $84 \text{ } 200 \text{ m}^3/\text{s}$ 与 $6 \text{ } 800 \text{ m}^3/\text{s}$ 之间,最低时流量仅 $4 \text{ } 620 \text{ m}^3/\text{s}$ ^[3],长江入海流量的下降直接导致长江口盐水强烈入侵。中线调水 $145 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$,使枯水期入海流量减少 $460 \text{ m}^3/\text{s}$,将会加剧长江口盐水强烈入侵,造成长江入海口地区沿江水厂氯度值增高、盐水入侵加重,影响纺织、食品、医药、冶金、化工和电子等很多行业。径流减少后潮汐作用加强,不仅使盐水入侵影响扩大,还将造成黄浦江中污水回水顶托,加重黄浦江的黑臭现象^[4],出现一些意想不到的生态环境负面影响。

二、用水的思考

1. 第一期调水的用水分配原则

因为丹江口水库入库来水量是随机性的,决定了外调水量呈动态变化特征,受水区内缺水城市的缺水程度及社会发展的重要战略地位也不相同,因此,将受水区内的缺水城市划分为一、二、三级(表5),用水分配优先保证一级,依次二级、三级。

表5 受水区缺水城市分级统计表

一级	二级	三级
北京市城区	邯郸、邢台、保定、廊坊、衡水、沧州包括山东省德州、聊城	项城、长葛、新郑、沁阳、辉县、卫辉、荥阳、禹州
天津市城区	许昌、平顶山、南阳、开封、商丘、焦作、新乡、安阳、濮阳、鹤壁、漯河、周口包括江苏省徐州	辛集、南宫、定州、任丘、沙河、冀州、黄骅、晋州、安国、河间、新乐、霸州、泊头、涿州及总干渠沿线重要的缺水县城

2. 第二期调水的用水分配原则

根据丹江口水库入库来水量分析,二期调水主要是充分调用丹江口水库上游(更大调水靠引长江三峡水库补充)平水年、丰水年汛期水库的大量弃水,用于受水区的农业灌溉或补充地下水。枯水年、枯水期不调水。二期调水是间断性的,应根据受水区内农业缺水程度不同及是否优质粮棉油生产基地,将受水区内的农田灌溉区划分为一、二级,优先保证优质粮棉油生产基地用水和节水灌区用水。

3. 华北农业缺水的原因

华北地区年降水量 $500 \sim 700 \text{ mm}$,与以色列年降水量 $500 \sim 600 \text{ mm}$ 相当。北京市与以色列面积相差不大,北京市水资源总量和农业用水量均大于以色列2.4倍,可是农业总产值却低于以色列,农业万元产值的用水量比以色列大2.76倍,可见差距之大。

造成华北平原农业缺水的原因,一是农业灌溉是传统的大水漫灌,灌溉定额居高不下,毛灌溉定额常年维持在 $400\text{m}^3/\text{亩}\cdot\text{年}\sim 600\text{m}^3/\text{亩}\cdot\text{年}$,水的有效利用系数平均只有 $0.3\sim 0.4$,远低于发达国家的 $0.7\sim 0.8$;二是河北平原、河流上游几乎都修建了水库,大量的蒸发和渗漏损失浪费了水资源;三是层层截水,使河流中下游完全干枯,人为地截断了中下游河水对地下水的补给,使下游不得不靠超采地下水来生活和生产。修水库是为了防洪,可是水库层层截流,使河流中下游完全干涸,只留下一道道河道功能严重退化的河床,一遇洪水便泛滥成灾。水库的自流灌溉受益区比起中下游水资源受益区小得多,而且水库自流灌溉受益区内农田的土壤肥力、粮食产量和质量都比不上中下游地区。因此,有必要反思几十年来修水库造成的失误,及时总结经验教训,从生态系统发展的高度看待水资源,千万不能顾此失彼;华北农业的缺水必须走旱作农业节水之路(以色列模式节水农业),不能仅仅依赖于南水北调。

三、储水的思考

1. 储水条件综述

丰水年、平水年汛期大量超过需水量的高峰调水要在受水区储存起来,以备枯水期利用。储存分两种方式:一是地下水储存,即充分利用缺水城市的水文地质条件和已有的地下水开采井补充地下水;二是地表水储存,即充分利用缺水城市城近郊区(县)已有的水库(湖淀),最好是由城市的供水源区(可利用现有供水系统)补充地表水。对海拔较高的水库可采用加压法提水进入水库,提水使用的电能最好与城市调峰电能结合起来。北京、天津、石家庄、郑州等(表5)缺水大中小城市,都存在大小不同的地下水位降落漏斗,为地下水储存提供了不泄流的水文地质条件。南水北调中线总干渠沿伏牛山、嵩山、太行山山前地带穿行,这些地带上城市地下的含水层岩性较粗,往往有利于外调水的入渗,特别是山前冲洪积扇地带的北京、石家庄等城市,由于含水层出露或浅埋藏,岩性为砂砾卵石、粗中砂,渗透性能好,故有利于补给地下水。天津、郑州、沧州、衡水等城市城近郊区深层水漏斗含水层为粉细砂、中细砂,应采取注水管井加压回灌或自流回灌补给地下水。

2. 主要缺水城市储水的可行性分析

北京 北京西郊地下水库试验研究报告^[51],论证了在北京西郊地区 283km^2 范围内不必修筑任何地下拦蓄工程,即可建立库容量为 $8\times 10^8\text{m}^3$ 的大型地下水库的可行性,并计算出试验研究区 $1\,000\text{km}^2$ 范围内已经腾空了 $17.4\times 10^8\text{m}^3$ 的地下水储水空间。该项研究成果1985年完成,当时试验区各类生产井总数7 671眼,开采量已达 $8\times 10^8\sim 9\times 10^8\text{m}^3/\text{a}$,平水年地下水补给量 $5\times 10^8\sim 6\times 10^8\text{m}^3/\text{a}$,开采量大于平水年补给量 $3\times 10^8\text{m}^3/\text{a}$,迫切需要回灌补给地下水。回灌方式可利用河道回灌、平原水库回灌、深井和大口井回灌、砂石坑回灌,回灌能力总计可达到 $34\sim 35\text{m}^3/\text{s}$ ^[51]。西郊地下水库的建立,将使地下水位

得到回升,进而可提高单井出水量、减少抽水的电力消耗,使部分已疏干的含水层恢复供水能力,这将保证首都干旱年份供水。北京平原区的地层过滤机能很好,对于磷酸盐、铁、硝酸盐、细菌、BOD、COD的去除非常有效,对有机化合物也有一定去除效能。只要对人工回灌外入水加强科学管理、严格控制回灌水质,就可防止地下水污染。

天津 地下水库储水可分为:砂层浅埋储水类型地下水库,面积 194km^2 ,可储水量 $1.02\times 10^8\text{m}^3/\text{a}$;砂层深埋储水类型,面积 856km^2 ;隐伏岩溶储水类型,面积 251km^2 ;深层不漏斗区补给类型,面积 445km^2 。据天津静海深井回灌试验研究^[51],回灌井深 288m ,回灌含水层位置 $200\sim 280\text{m}$,含水层岩性主要为中细砂,回灌井径 $187\sim 300\text{mm}$,全钢管结构。单井回灌制度试验选用3种方案。试验结果认为:进行长期的生产性回灌时,应采用连续24小时回灌、回抽1.5小时的回灌制度为宜,灌水量 $682\sim 703\text{m}^3$,灌水量 $28.4\sim 29.3\text{m}^3/\text{h}$,回扬量 $103\sim 408\text{m}^3$,回扬流量 $68\sim 69\text{m}^3/\text{h}$,净灌量 $580\sim 599\text{m}^3$,平均净灌流量 $22.7\sim 23.5\text{m}^3/\text{h}$,单井年净灌量约 $21.2\sim 21.9\times 10^4\text{m}^3$ 。回灌对地下水质变化的影响,主要反映在回灌水中 HCO_3^- 、 CO_3^{2-} 、 Na^+ 、 F^- 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 的含量相对于含水层中这些离子的含量的高低,若回灌水离子含量低于含水层离子含量,则回灌后含水层离子含量趋于降低,否则向相反方向变化。在回灌时,应加强回灌水水质监测工作,以防止回灌污染和堵塞含水层。

郑州 砂层浅埋储水类型地下水库面积 $1\,265\text{km}^2$,可储水量 $2.8\times 10^8\text{m}^3/\text{a}$,地处黄河冲积扇上,上街至邢村断层控制着地下水库的边界,断层南侧为中更新纪残坡积粘土、亚粘土和二叠系砂页岩,可视为隔水边界,根据地下水等水位线图和水文地质条件,可确定北部、东部、西部为地下水漏斗水位边界,储水层岩性为中粗砂,厚度一般 $30\sim 50\text{m}$ 。深层水漏斗区补给类型,面积约 166km^2 ,储水层岩性为中细砂、部分含砾石,可储水量不清楚。

石家庄 砂层浅埋储水类型地下水库面积 225km^2 ,可储水量 $1.3\times 10^8\text{m}^3/\text{a}$,储水层岩性以中砂为主。砂层深埋储水类型,储水层厚度 $20\sim 30\text{m}$,岩性为中细砂,可储水量不详。

3. 储水存在的主要问题

(1) 储水试验研究工作深度不够 按表5确定的受水区缺水城市,针对南水北调中线工程调入水储存问题,均未开展过专门性的全面系统的地下水储水的勘察试验研究工作。以往做过的南水北调中线总干渠地下调蓄工程勘察,由于资金投入很少,以及对围绕总干渠沿线可能作为地下水库调蓄的地段只进行了粗略简单的调查评价,故未对表5所列的二级以上缺水城市进行深入仔细的储水勘察试验研究工作。在北京西郊地下水库,主要针对利用雨季洪水、丰水年水库弃水、工业空调冷却弃水等方面开展了回灌补给地下水的试验研究工作,但未对大量调入北京的引江水储存问题进行全面系统的可行性研究。前人做过的华北平原地下水人工补给方面的试验研究,主要是针对农业灌溉用水方面开展过回灌试验研究,但未对调入缺水城市的引江水储水问题进行深入仔细的可行性试验研究。

(2) 对储水工作重要性认识不足 由于调水量受丹江口水库入库来水量丰平枯变化的影响,为了保证城市稳定的供水需求,起到以丰补歉的作用,必须高度重视储水工作。引滦济津工程就是忽略了天津市的储水工作,致使在滦河枯水期无水可供时造成了天津市的供水危机。南水北调入天津市的水怎样储存?能储存多少?是值得深入研究的大问题。若现在忽视储水问题,在丹江口水库遇到枯水年时,天津市供水危机将依然存在;其它城市亦将如此。

(3) 储水技术难度大,不容乐观 调入水的储存往往是在汛期,历时短,水量大,要求储水时能“大口吞”,也就是很快渗入补给地下水。从华北平原已做过的地下水人工补给的试验看,回灌补给地下水往往是细水长流,与历时短水量大的入渗补给地下水要求不协调,达不到地下水储存的目的。地表水储存虽然易于实现历时短、水量大,但是在华北地区,由于气候条件引起的蒸发损失量大以及自然环境条件差、长期储存不利于水质保护等因素,还不如地下水储存,且地下水储存还能防止城市因地下水过量开采引起的地面沉降。由此,笔者认为应综合利用地下水、地表水储存的优点,在天津市城近郊区(县)地下水上游,寻找适宜暂时存储引江水的地段建立地表水库储存历时短水量大的调入水,然后再引水入城区补给漏斗范围内的地下水,或引入适宜生成岩溶水、砂层孔隙水的地下水库储存,以备枯水期开采利用。其它城市也应如此。这样做可能要增加投资,但可解决储水的技术难题。

四、结论和建议

1. 一期工程调水规模 $50 \times 10^8 \sim 100 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$,主要建立北京、天津、石家庄、郑州等华北缺水城市的供水系统,以解决城市缺水问题,供水保证率力争达到 99~100%。实施一期工程的同时借鉴以色列

节水农业模式并大搞平原蓄水、拦蓄地表水回灌补充地下水。在仍然缺水的情况下,启动二期工程,调水规模 $50 \times 10^8 \sim 100 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$,建立农业供水系统,农业用水保证率 75%,以解决农业缺水问题。目前国家可考虑把减少南水北调中线工程规模的投入,用在华北农业节水灌溉的技术改造上。

2. 北京、天津、石家庄、郑州等缺水城市在枯水期调水有限的情况下,宜优先保证一级城市供水,依次为二、三级。这些城市的污水经处理达标后,应充分回灌补充地下水,供城郊农业利用、发展蔬菜和花卉种植业;同时,充分地拦蓄雨水地表水、工业空调弃水并回灌补给地下水。在城市工业生产和生活中应大力推广节水技术,推广中水工程供水技术,提高工业用水的重复利用率。城市建设绿地、社区、园林时应充分考虑缺水的实际情况,不刻意追求欧式、美式、江南水乡园林建筑等大量消耗生活用水的建筑模式。

3. 充分认识储水的重要意义,加强受水区缺水城市储水的地下水库、地表水库联合调蓄的可行性试验研究工作,分析研究含水层入渗性能、地下水回灌的技术方法、回灌过程中产生淤塞的机理及消除方法,研究人工补给地下水的动力场、化学场、温度场的变化特征,寻找可以暂时储存调入水的地形地段建立地表调蓄水库,并在受水区缺水城市建立地下水库,进行地下水—地表水联合调蓄的科学技术试验。充分研究、利用缺水城市的水文地质条件和已有的地下水开采并补充地下水,以备枯水期开采利用。

4. 调水工程是解决水资源短缺的传统手段,但并不是万能的,必须吸取中外历史上有关调水工程草率上马的经验教训。建议国家在南水北调中线工程实施之前,对调水、用水、储水作出全面系统的科学论证,尽力避免工程建成后,不能全面发挥预定的作用,以及造成不必要的经济损失和生态环境的负面效应。
(责任编辑 王宏章)

科技动态

利用超声波照射红血细胞释放抗癌药物

据英《新科学家》2001年6月30日报道:在北爱尔兰科尔雷恩的 Gendel 公司工作的莱斯·拉塞尔最近宣称,一种拯救生命的药物不久就可能通过病人自己的红血细胞携带的药物“鱼雷”高度精确地射向有病的器官,然后用超声波集中照射有病的癌组织,使红血细胞“爆炸”,让药物精确地释放在它需要的位置,这样既可以杀死癌细胞又不致于使有强烈毒性的抗癌药物损害其他的健康细胞。

Gendel 公司正在研制一种自动化装置,可以容纳从病人身上抽取的约 20 毫升的红血细胞;然后让红血细胞通过电场,在超声波作用下,细胞膜打开一些小孔,并装进药物;再用电脉冲将小孔关闭,使药物密封其中。过 2~3 小时后,医生就可将这种装有药物的红血细胞重新注入到病人体内。这样,装有药物的红血细胞就会在体内循环,且循环时间可连续 4 个月,因此必然会到达癌细胞

上。这时用超声波照射肿瘤区时,循环到这里的红血细胞就会打开缺口甚至“爆炸”,释放出其中的药物。通过调节超声波照射时间的长短,可以调节药物的释放量或实现完全“爆炸”。由于超声波只照射有病区,因此在健康细胞处的装有药物的红血细胞不会爆炸释放药物,因而也不会损害健康细胞。

麦克黑尔说,利用电场和超声波实现在红血细胞内装药又释放药物的技术是对现在的装药技术的重大改进。在临床应用中,使用约 1 兆赫的低强度超声波照射病人的肿瘤。

Gendel 公司已在老鼠和猪身上试验这种技术,没有发现有什么不良作用。选择猪作为试验对象,是因为它们的红血细胞和循环系统和人类很相似。该公司希望将来用装有抗体、基因治疗药物和特定蛋白质等制剂的红血细胞治疗癌症和心血管疾病。
(刘先曙)