

Discussion on Feasibility and Scheme of the Project for Diverting Bohai Sea Water from the East to the West

Mingyi Xu

School of Water Resources and Hydropower Engineering, Wuhan University, Wuhan Hubei
Email: myxu@whu.edu.cn

Received: May 28th, 2019; accepted: Jun. 11th, 2019; published: Jun. 18th, 2019

Abstract

In order to solve the shortage of water resources in the northwest region, the “East to West Water Divert” project is envisaged which introduces Bohai Sea water into Xinjiang through Inner Mongolia. The enclosed structural basins in the desert will be filled by sea water to obtain lots of artificial seas, which have functions of sand restriction, increasing humidity, salt extraction, temperature regulation, energy storage, breeding, etc. The problems of engineering difficulty, energy consumption during operation, salinization, water vapor loss, capital investment, etc. are discussed. Based on Huo Youguang’s proposal and Chen Changli’s proposal, it is suggested that the project be divided into six phases and implemented from near to far step by step.

Keywords

Lop Nor, Water Resources, Sandstorm, Diverting Bohai Sea Water into Xinjiang, Pumped Energy Storage

对“东水西送”工程可行性及方案探讨

徐明毅

武汉大学水利水电学院, 湖北 武汉
Email: myxu@whu.edu.cn

收稿日期: 2019年5月28日; 录用日期: 2019年6月11日; 发布日期: 2019年6月18日

摘要

为解决西北地区水资源短缺问题, “东水西送”工程设想将渤海水经内蒙古引入新疆, 填充沙漠中的封

闭构造盆地, 得到一系列人造海, 可以发挥压沙、增湿、提盐、调温、蓄能、养殖等功能, 对其中工程难度、运行耗能、盐碱化、水汽损失、资金投入等问题进行了探讨, 并综合霍有光方案和陈昌礼方案, 建议将工程分为六期, 由近及远, 分步实施。

关键词

罗布泊, 水资源, 沙尘暴, 引渤入疆, 抽水蓄能

Copyright © 2019 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

我国西北地区有广袤的土地资源, 光照充足, 但是由于干旱缺水导致生态环境恶劣, 土地资源难以开发利用[1]。只要有足够的水资源, 该地区就能扩大耕地, 发展现代农业, 增加粮食产量, 吸纳大量人口, 很大程度上解决我国的耕地安全、粮食安全、人口安全问题。我国的“南水北调”工程是在陆地上将南方的淡水资源调配到北方, 但总的淡水资源并无增加。因此有学者打破思维定势, 将目光投向大海, 提出陆海统筹, 利用海水自然蒸发获取淡水资源的思路, 也即是调渤海水入新疆, “东水西送”的工程设想。

“东水西送”工程有“海水西调”、“海水西送”、“引渤入新”、“引渤入疆”等不同称呼, 基本思路是从渤海西北海岸提送海水达到海拔 1200 米高度, 然后从内蒙古自治区开始, 往西穿越沙漠, 将海水引入新疆的罗布泊, 填充沙漠中的干盐湖、咸水湖和封闭的构造盆地, 构成一系列人造海。大量海水依靠西北地区的光热资源自然蒸发, 湿润空气, 增加降雨, 从而达到治理沙漠、沙尘暴, 增加淡水资源, 彻底改变西北地区极度缺水状态的目的。

由于该工程构想规模宏大, 影响深远, 故引起较大争论。本文尝试对已有观点进行归纳, 对一些问题进行初步探讨, 以便于抛砖引玉, 共同为解决我国西北地区水资源缺乏问题提供一些理论构想。当然, 无论如何争论, 中国西北地区缺水的严酷现实摆在眼前, 我们需要的是提出更多开源节流的可选方案, 从中找到切实可行的解决途径去加以实施, 实现人与环境的协调发展。

2. 已有方案构想

“东水西送”这一宏大的工程设想从提出至今已有二十余年, 霍有光自 1997 年在《科技导报》、《中国科技论坛》等刊物上提出了东水(渤海)西调改造北方沙漠带的设想[2][3][4][5]。2005 年 9 月, 该学者的专著《海水西调与再造西北》得以出版。2006 年, 国务院研究室向国务院上报了《关于研究实施“海水西送工程”的建议》。2008 年 10 月, 举办了全国首次《陆海统筹“引渤济锡”发展战略研讨会》。2010 年 11 月, 在乌鲁木齐联合举办了《(新疆首届)“陆海统筹, 海水西调”高峰论坛》, 得到媒体广泛报道, 引起国内外的极大关注。

霍有光经历过无数次修改后, 提出了最便利的调水路线, 如图 1 所示: 从天津附近的渤海口取水, 逐级提升海水到乌兰察布市的黄旗海(海拔 1264 米~1266 米), 总调水路线为 440 公里。然后由黄旗海 - 库布齐沙漠 - 毛乌素沙漠 - 腾格里沙漠 - 乌兰布和沙漠 - 巴丹吉林沙漠, 走河西走廊戈壁滩, 至玉门镇北的疏勒河(海拔约 1300 米), 主干调水线路全长约 1900 公里。然后利用疏勒河“自东向西流”的天然河道(大约 550 公里), 不用开挖、衬砌, 自流进入塔里木盆地之东缘的罗布泊(海拔 780 米), 还可进一步引

至艾丁湖(海拔-155米)。从罗布泊到艾丁湖的直线距离仅180公里,可获得930余米的落差,能够补偿渤海水西调工程所耗费的部分电能。

这条线路走向在阴山以南,也被称为“内线”,而另一位学者陈昌礼教授提出的方案则走阴山以北 [6] [7],被称为“外线”。基本思路为:从渤海西北海岸提送海水达到海拔1200米高度,到内蒙古自治区东南部,再顺北纬42°线东西方向的洼槽地表,流经燕山、阴山以北,出狼山向西进入居延海(海拔820米),绕过马鬃山余脉进入新疆,然后分三支,往北注入准噶尔盆地,往南注入罗布泊,中间则注入吐鲁番盆地。

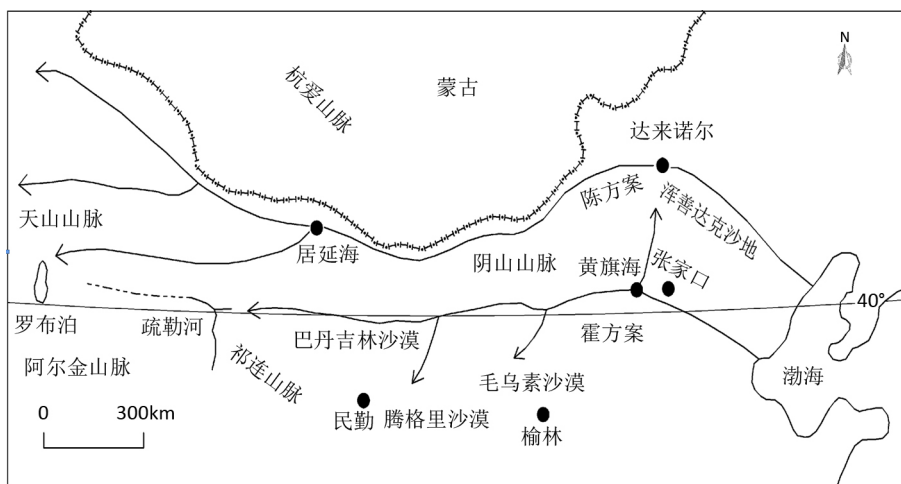


Figure 1. Inner and outer schedules of diverting Bohai Sea water into Xinjiang
图 1. 引渤入疆的内线和外线方案

两种方案各有利弊,两人为之争论不止。霍有光提出的内线方案,基本沿北纬40°线,具有路线短、见效快的特点;陈昌礼提出的外线方案,基本沿北纬42°线,具有规模大、收益高的特点。因此,宜将内线方案作为近期目标,外线方案作为远期目标,采取“早规划,早设计,量力而行,先近后远,分步实施,分步受益”思路,使工程能够在有效益的基础上持续实施,避免前期投入过大。

我国西部大开发以来,西气东输、西电东输、西煤东输等项目已顺利实施,而“引渤入疆”工程作为解决新疆缺水问题的大胆设想,可以先期进行一些理论探讨,便于与其它可选方案进行比较。

3. 工程问题探讨

对“东水西送”工程可能出现的问题,已有学者进行了探讨,并提出相应对策,现对其中的主要问题进行归纳[2]-[10],以供进一步讨论。

1) 工程难度问题

“东水西送”工程需要将海水提升上千米高差,似乎困难很大,但从现有工程技术来说,并无实质难度。从国际上看,已有美国加利福尼亚州的“北水南调”工程,干线抽水总扬程1154米,输水渠道1102公里,输水站总装机153万千瓦,年调水52亿立方米。从国内看,“引黄入晋”工程南干线抽水总扬程636米,输水线路总长453公里,年引水12亿立方米,已经建成运行。“南水北调”工程中线长度达1276公里,设计年调水量95亿立方米,主要采用明渠输水,用渡槽或隧洞穿越数条河流,施工难度不亚于“东水西送”工程,已经建成运行。这说明从现有科技条件来说,“东水西送”工程能够顺利实施,而且沿途大部分地区不存在拆迁和文物保护等问题,使得工程实施较为简单,费用也低。

调水对渤海并无实质影响,渤海面积为7.7万平方公里,平均水深12.5米,蓄水量大约为9625亿立

方米,即使每年调渤海水 1000 亿立方米,也只是渤海水量的约十分之一,影响不大。况且渤海毗邻黄海,黄海毗邻太平洋。渤海水被调走后,海水将源源不断进行补充,渤海的面积和水量并不会减少,只是水质会发生一些变化。如果实施“东水西送”工程,就相当于将海洋延伸到内陆,出现一片内陆海,如黑海、里海一样,起到防治沙漠、调节气候的作用。

2) 盐碱化问题。

为防止海水引起的盐碱化问题,引水时考虑两种情况,一种是将海水淡化后引入新疆,一种是直接引用海水,但是确保海水引入过程中和引入后不发生渗漏。由于海水淡化的成本很高,比如紧靠海边的天津多年来也没有采用海水淡化来缓解缺水的问题,就是因为费用太高。因此要大规模引入淡化海水的可行性较小,故主要考虑直接引入海水。

要在输送海水的过程中不发生渗漏,考虑采用封闭式输运方式,比如管道、隧洞、渡槽、防渗明渠等,其中一个有利条件是,由于引水线路中大部分通过沙漠中的盐碱干涸洼地,对周边的盐碱化影响甚微,要减低工程费用的话,此类线路可直接开挖成明渠即可,而在其余位置要采取较为严密的防渗措施,并定期观测和检修。

由于沙漠中的人造海是利用天然的洼地,原来是咸水湖,或者已退化为盐碱地,从地质学的角度看,除了表面的沙土,下面就是岩层,渗透性很弱,重新注入海水后,只是恢复历史上的咸水湖面积,并不会渗漏到其它地方,从而污染地下水,因此人造海的盐碱化危害能控制在一定范围。为保险起见,人造海宜逐步注入海水,观察渗漏情况,若出现盐碱化扩大趋势,则停止注入海水,恢复原貌即可,这需要在引水渠道上设置控制闸门来解决。

3) 水汽损失问题

已有的海水西调工程设想的两种方案都将罗布泊作为其中的一个终点。选择罗布泊的原因,简单来说是地形好、构造好、面积大、无拆迁。海水在罗布泊自然蒸发后,大部分水汽将转化为内陆降水,成为宝贵的淡水资源。

罗布泊历史上是水草丰美的地方,但随着气候干旱,人口逐步迁徙。据研究资料,罗布泊在早更新世湖水面积大于 20,000 平方公里,1942 年为 3006 平方公里,1962 年为 600 平方公里,1972 年干涸。从卫星图上看到的罗布泊大耳朵外圈海拔 780 米,包含面积 5350 平方公里,若以此为湖,简单按年蒸发量 2000 毫米计算,则年蒸发的水汽约为 100 亿立方米,若达到历史面积 20,000 平方公里,则年蒸发的水汽可达到 400 亿立方米。其中大部分转化为降水后,则将为周边地区补充大量淡水资源。

罗布泊深深嵌入亚洲腹地,地处新疆荒漠无人区,北缘是天山山脉,南缘是阿尔金山脉(以及祁连山)与昆仑山脉,盆地浩瀚而平坦,许多山峰高出盆地 3000~4000 米,这种“两山夹一盆”的地貌景观,孕育了独特的气象特征。罗布泊蒸发的大量水汽,无论是向北吹,还是向南吹,都能因“高山的水塔作用”形成降雨[6][7],雨水将利用两山的河流(如孔雀河、若羌河、米兰河、车尔臣河、疏勒河等)回流到罗布泊地区。祁连山年降水量自东向西减少,如冷龙山 700 mm,祁连山 400 mm,大雪山 300 mm,而天山情况恰相反,降水量为自西向东递减,如西天山 800 mm,北天山中段 600 mm,东段 400 mm。两者海拔相似,而年降水量相差较大的主要原因在于水汽供应量差别大。天山在西风带推动下,全年接受西域水汽,冷凝降水再由伊犁河回流巴尔喀什湖,故愈往东降水量越少,而祁连山随着罗布泊退缩干涸,水汽不足,为典型大陆性气候,故愈向西愈干旱[7]。若增加罗布泊水汽增发量,可以预见祁连山西段的降水量将增加。当然,有多大比例水汽凝结降落在塔里木盆地,还需要气候气象方面的详细计算研究。即使罗布泊蒸发的水汽发生逃逸,也将大部分降落在内陆地区。往南逃逸的部分可进入柴达木盆地和青藏高原,为三江源头补充淡水资源。往东逃逸的部分水汽则为河西走廊和华北平原带来降水量的增加。

4) 冬季运行问题

海水西调路线处于我国北方，冬季气温较低，表面会结冰，这是否影响工程正常运行？其实，只要有足够的水深，冰下照常可以流水，只是对过流流量有所影响，但正常运行并无大碍。其实，可以利用渠道冬季结冰的特点化害为利。由于冬季自然蒸发弱，此时可以减少调水，甚至不调水，降低渠道水位，使得冰层可以加厚。取冰制淡水，储层在沿线，等到夏季炎热的时候，这些淡水就可以很好发挥作用。在调水沿线植树种草，构造防风固沙林带，冬季储冰得到的淡水资源就可以灌溉这条林带。因此，调水线路就是一条绿化林带，将为防沙治沙、环保减排发挥巨大作用。

5) 运行耗能问题

如果按年调水 1000 亿立方米计算，将海水提升 1000 米高度，约需耗电 3000 亿度(1 度电=1 kWh = $1000 \times 3600 = 3.6 \times 10^6$ 焦耳，1 立方米海水提升 1000 米需要做功 $mgh = 1000 \times 10 \times 1000 = 10^7$ 焦耳，不考虑能量损耗，需消耗 2.78 度电)，这使得工程运行费用巨大，如何保证工程运行的经济性和持续性？首先，这笔费用相对于能获得的效益而言，是值得的。其次，可以考虑降低这笔开支。西北地区有富足的风电和太阳能资源，但风能和太阳能受自然因素的影响比较大，是随机性、间歇性的能源，若与抽水蓄能电站配合运行，就能充分发挥作用。“东水西送”工程可以在春秋季节提升渤海水到内蒙古高原的人造海，冬季则降低人造海水位，将海水回送渤海，此时进行发电，供给京津冀地区，减少煤炭等污染供暖耗能需求，达到具有年调节能力的抽水蓄能目的，日调节和周调节能力也同时具备。此时将“东水西送”工程作为抽水蓄能工程使用，能够提高京津冀电网的容量和稳定性。

同时，在“东水西送”工程的末端，由于水位高程逐渐下降，这部分势能又可以转化为电能，作为提水耗能来源。这需要利用已经建成的“西电东送”电力骨干网，或者新修一条电力干线，将新疆的电力输送到提水端，该电力线路也可以输送新疆丰富的风电和光伏发电，甚至火电，既补充东部的电力需求，也提高了西北地区的经济收入。总之，“东水西送”工程在综合运用的情况下，既是调水工程，也是蓄能工程，耗能问题直接就对应着发电能力，工程运行的持续性能得到保证。

6) 资金投入问题

“东水西送”工程实施需耗费大量资金，但是如果采用“分步实施、分步受益”的原则，逐年投入并非天文数字。在工程后期，产出效益已经能够覆盖工程投入，滚动式开发能够得到保证。主要担心的问题是，工程规模大，前期投入多，如果长期不能产生效益，则投资吸引力不大。首先要看到，“东水西送”是我国西北战略性基础工程，虽然投资巨大，但产出更大，因此作长期的投入是值得的。另外，也要考虑尽快见效的工程方案。

渤海水提升是一个先期工程，如果将该工程和抽水蓄能结合起来，则可较快见到效益。可以考虑沿秦皇岛市 - 承德市 - 滦河上游 - 桑根达来一线，建设一系列以海水为工作介质的抽水蓄能梯级电站。此条线路地处山区，拆迁费用低，便于利用合适的山区封闭构造，建立容量较大的调蓄水库，增加系统运行的灵活性。为不破坏原有的淡水水系，可全程封闭运行，只要解决海水的渗漏问题和对运行设备的腐蚀问题，就可在该期工程完成后，在京津冀中心负荷地区，获得大容量的抽水蓄能梯级电站群。该电站群具有年调节能力，在春秋季节利用富余电能蓄水，在冬季则向京津冀输出供暖电力，替代煤炭资源和一部分天然气资源。在电站群建设过程中，可和风电、光伏发电联合运行，作为电网的调峰容量，减少弃风弃光，充分利用可再生能源。这样工程建设是边投入边受益，并逐步取得工程建设经验，无资金浪费的后顾之忧。

4. 工程效益探讨

“东水西送”工程将海水引入西北地区的沙漠戈壁，形成人造海，可以遏制沙尘暴，也可作为水汽供应源，湿润空气，增加降雨量，改善生态环境。同时还可发展盐化产业、养殖业、种植业、旅游业等等，产生效益是多方面的，是一个持续受益的工程[2]-[10]。工程效益可主要归纳为以下几点：

1) 减少沙尘暴尘源

在“东水西送”工程沿线的沙漠中，将形成一系列人造海，总面积可以达到数万平方公里以上，从而镇压沙尘暴尘源。据央视国际《科教新闻》介绍，干涸的罗布泊湖底在太阳暴晒下，沉积在泥土层中的盐类物质风化成不足 0.02 微米的微小颗粒，在同等风速下，起尘量是沙尘的 16.7 倍。而罗布泊地区恰恰处于北半球的西风环流带，西风环流可将这些沙尘或盐尘吹到亚洲东部甚至更远的太平洋地区，导致沙(盐)尘天气。若恢复罗布泊历史水面 2 万平方公里，则将大大减少起尘面积。建成其它的人造海，如黄旗海、桑根达来-宝沙岱人造海、库兰图庙人造海、居延海等，可以减轻华北平原的沙尘暴天气，减轻飞沙对包兰线、京包线、包白线和包神线等铁路的威胁。只要海水注入这些人造海，海面覆盖的沙(盐)尘在大风时就不再扬起，护土压沙的效果将立竿见影。

2) 补充西北淡水资源

罗布泊等人造海自然蒸发，将大大增加各水汽交换单元山区降水量，在回流人造海的过程中，将增加西北地区的淡水资源，便于发展农业和绿化，进一步治理沙漠，减弱沙漠尘沙流动，减少沙尘暴尘源。一部分水汽往南逃逸到青藏高原，在三江源头形成降水，将减轻三江源头的沙化过程。一部分水汽往东逃逸到华北平原，也会增加华北平原的降雨量。其中黄河流域受益较大，流量增加后将补充上中游沿线的耕地用水和居民饮水。可以预见，西北地区淡水资源增加后，可进一步扩大农业种植面积，并发展机械化现代农业，昔日的荒漠戈壁将成为中国的又一重要粮仓，为保障粮食安全提供坚强后盾，使经济发展具备坚实基础。

在西北地区的淡水资源增加后，植树造林的面积将得以扩大。在绿化沙漠、治理沙漠的同时，可以吸收存储大量的二氧化碳温室气体，为减缓全球气候变暖做出重要贡献。冬季取冰制淡水并储存起来，合理使用，就可在数千公里的调水沿线打造出一条数千米宽的防风固沙林带，既可起到保证工程正常运行的作用，又可防沙治沙、节能减排，成为一道靓丽的“绿色”长城。海水自然蒸发的附带效益是降温作用，在夏季大量的水汽蒸发使得气温有所降低，而在冬季由于大量海水的储热作用，又使得气温不至于过低，这对于改善气候有良好的促进效果。增加的植树造林面积也同时将太阳能用碳的形式固定下来，并兼有蒸腾降温、覆盖保温等效果，对气候改善也是有利的。

3) 获取海盐及其它资源

人造海的自然蒸发过程，实质上就是太阳能海水淡化过程。西北地区丰富的光照资源将变废为宝，既晒盐又晒水。蒸发形成湿气和降水来改善沙漠的生态环境，留下的是浓度提高的盐水，可利用火力发电的余热来进一步浓缩盐水。依托沙漠人造海晒盐与发展盐化产业，既可对冲调水的成本，也可节约沿海地区盐场晒盐所用的土地。

盐是重要的化工原料，发展盐化工业附加值更高。渤海水含盐量为 23 克/升~31 克/升，30 立方米左右海水就能提炼 1 吨盐，效益十分可观。海水中还含有其它重要资源，如每升海水中含 0.03 克的氦，在核聚变时释放的能量相当于 300 升汽油燃烧释放的能量，可以提取并存储起来，在未来核聚变技术成熟时将发挥重要价值。制成品要运输出去，可考虑将引水渠道作为运河使用，用廉价的航运来完成这一任务，同时航运还可以运送煤炭等其它物资。对于附加值高的物品，可以考虑在沿线建设高速公路来运输，加快物流速度。因此，“东水西送”工程同时可作为一个交通工程，获得一条东西向的大运河，一条东西向的高速路。

4) 发展海水养殖和种植业

人造海不仅是盐产地，而且也是一种新型“农田”，可用于养殖盐藻、卤虫、轮虫、螺旋藻、某些耐盐鱼种和鸟禽等新形态农产品。如轮虫是虾、鳖、螃蟹的优良活饵料，在我国盐湖中已发现 12 个盐水产轮虫，其中最高耐盐上限可达 165 克/升。

沙漠人造海周边形成的盐沼带、滩涂可以种植盐生植物，如海蓬子、大米草、碱蓬、盐蒿等，作为饲料或燃料。盐生植物还可用于生物治污，如种植芦苇吸收富营养化渤海水，收割后用来发展造纸产业。新疆艾比湖一望无际的芦苇荡便是很好的例子。同时，渤海水被部分调走后，黄海水会自然进行补充，促进海水大循环，从根本上治理渤海污染。

5) 发展海水抽水蓄能产业

“东水西送”工程沿线有高差起伏，利用这个特点可以发展抽水蓄能，与内蒙古、甘肃、新疆的风电、光伏联合运行，水风光互补，可输出清洁稳定的电力资源。

调水可选起点葫芦岛市、沿线的朝阳市是国内少有的风能资源丰富的地区，年均风速大，风况稳定，据查明可开发风力资源 1100 万千瓦以上。临近的赤峰市是内蒙古的风能资源富集区，易于开发的风能资源在 1800 万千瓦以上。这些连续性差的电力资源正好可用于渤海水提升，在有较好调蓄水库的情况下，能够稳定地将渤海水提升到内蒙古高原。

罗布泊地区风力资源非常丰富，据统计，大于 5 米/秒的风力资源年均有 202 天，其中 6 级以上的大风有 100 多天。罗布泊湖心区地形非常平坦，恢复罗布泊水面后，风电杆可以竖立在人造海中，完全可以实现海水养殖业与发展风电产业并举。而塔克拉玛干沙漠(包括罗布泊地区)的光热资源在我国各沙漠中占第一位，年日照时数可达 3000~3500 小时，光伏发电大有可为。强大的风电、光伏电能可利用“西电东输”干线输送，也可就地为盐化工业提供能源，提高经济附加值。

由于“东水西送”工程的末端水位高程逐渐下降，水力发电后可作为提水耗能来源。可考虑新建一条“西电东输”电力干线，用于协调提水和发电的电力平衡，同时可以把甘肃、新疆的大量电力稳定输送到东部的华北平原，为京津冀地区提供清洁能源。因此，“东水西送”工程同时也是一项“西电东输”工程，以及与之配套的一系列抽水蓄能工程。

6) 打造沿线绿色旅游产业

恢复罗布泊水面后，将带来重大的旅游价值，例如以色列的死海就是国际旅游胜地。罗布泊地区有楼兰古城等历史文化遗迹，在交通和住宿便利后，将迎来大量海内外游客。除罗布泊外，“东水西送”工程沿线将出现多个人造海，游客不仅可以沿途观赏草原、海景，还可以观赏独特的沙漠景色。形成旅游带之后，将出现一些新兴城市，吸纳大量人口，从事工程维护、农业种植、盐化产业、旅游服务等，并逐渐发展与之配套的教育、医疗等产业。

总之，“东水西送”工程在综合利用后，将是一项高效经济的海水淡化工程，可同时获得蕴藏丰富的淡水资源和富有价值的海盐资源，将出现若干内陆人造海，若干海水抽水蓄能电站，配套建设一条“西电东输”的电力干线，一条东西向的大运河，一条东西向的高速路，获得一条东西向的绿化防护林带，一条具备独特景观的旅游线路，将产生十分可观的经济效益和生态效益。

5. 工程方案探讨

“东水西送”工程效益大，投资也大，为了用好每一份资金，必须充分发挥市场机制的作用。按照“谁受益，谁投资”的思路，除了国家进行总体规划和管理外，要鼓励国内外投资者参与项目开发，以市场化手段推进工程建设。比较霍有光和陈昌礼的引渤入疆方案，霍有光内线方案是从天津引水，需要经过华北平原人口稠密区，工程量虽节省，但拆迁费用高，总投入不一定最省，故要进行方案比较，如果可行，不失为一条便捷路线。另外，如果使用原有河道，工程上最经济，但缺点是原有淡水水系遭到破坏，同时引起的盐碱化问题不易控制。陈昌礼外线方案从葫芦岛引水，路线长，但主要经过盐碱地，拆迁较易解决，适于引用较大流量，以充分发挥海水西调的作用。综合起来看，将内线方案作为近期目标，外线方案作为远期目标较为合适，将工程分为六期，如图 2 所示：

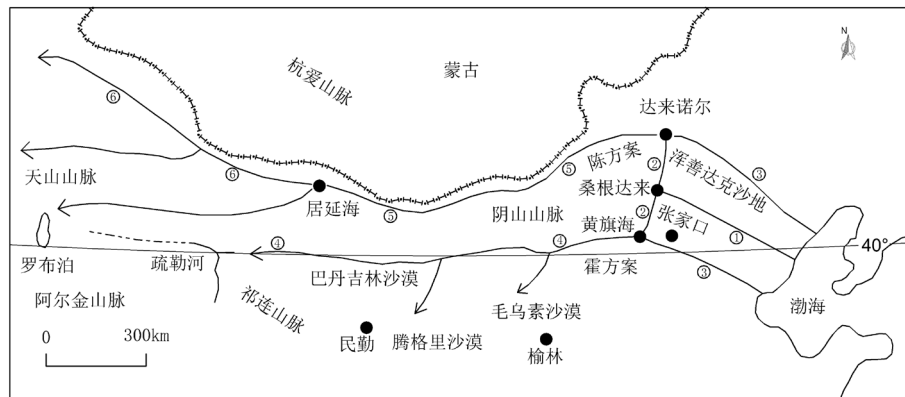


Figure 2. Six-phase schedule of diverting Bohai Sea water into Xinjiang
图 2. 引渤入疆的六期方案

1) 第一期工程

该期工程为前期验证工程，同时也是一个海水抽水蓄能工程。考虑沿秦皇岛市 - 承德市 - 滦河上游 - 桑根达来一线，年引用 100~200 亿立方米渤海水到内蒙古高原，主要采用双线隧洞方案，建设一系列抽水蓄能梯级电站。此线路经过山区地形，拆迁费用低，便于设置合适的调蓄水库，尽量减少海水盐碱化的危害。该期工程完工后，将获得一系列抽水蓄能电站，配合周边的风能和光伏发电，能够减少弃风弃光现象，同时也提高电网的调峰能力。由于在内蒙古高原形成较大库容的人造海，使得该电站群的最大特点是具备年调节功能，适合在冬季就近向京津冀地区输送清洁电能，减轻雾霾天气。

2) 第二期工程

该期工程为初步受益工程。从桑根达来往调水内线和外线扩展，开挖渠道，将渤海水在内蒙古高原展开，东北方向扩展到达来诺尔 - 查干诺尔一带，西南方向扩展到乌兰察布市的黄旗海，填充沿线低洼地带干涸的盐碱地和咸水湖，形成人造海，达到“引渤济蒙”的效果，初步获取海水压沙、增湿、提盐、蓄能的综合效益，为“引渤入疆”的内线和外线作进一步准备。初步形成人造海后，可以验证防沙治沙、海水养殖的效果，研究海水淡化工艺和人造海对周边地区盐碱化的危害程度，为下一步大规模工程展开做好准备。

3) 第三期工程

该期工程增加调水能力。可考虑在秦皇岛市 - 葫芦岛市一线，增加新的调水通道，提高渤海水的调水量，力争达到年引水量 1000~2000 亿立方米的远期规划，使工程效益得以充分发挥。可从葫芦岛市附近取水，经朝阳市，过赤峰市，利用西拉木伦河谷地，延伸到锡林郭勒盟，采用闸坝方式，沿地势较为平坦的路线，修建一条宽 200 米，水深 20 米的主干渠，利用当地丰富的风电资源和太阳能资源，将水位逐级提升，最后到达第二期工程完工后形成的咸水湖。这样，既可保证海水西调内线方案有充足的调水量，又为海水西调外线方案做准备。同时，可按霍有光方案中规划，直接从天津调水到黄旗海，以增加渤海水调用量。为避免拆迁困难，可主要采用隧洞方案，造价虽高，但对周边环境影响小。该线路可同时作为海水蓄能项目，提高京津冀及环渤海地区的供电能力。

4) 第四期工程

该期工程实施霍有光“引渤入疆”内线方案。从黄旗海开始，向西经包头市到达乌梁素海，在狼山、阴山南侧通过黄河的河套地区，然后穿越乌兰布和沙漠、巴丹吉林沙漠、河西走廊戈壁，到甘肃的嘉峪关附近，再利用疏勒河故道，自流进入罗布泊。整条路线基本在北纬 40° 线附近，为了在尽量增大引水量的同时降低工程难度，在通过黄河的河套地区时不穿越黄河，届时该处将出现两条河相向流动的奇观。

在条件允许的情况下，第四期工程和第三期工程可同时进行，便于在渤海水引用流量增大后，即可顺利引入罗布泊，尽快发挥工程效益。进入罗布泊时，如果要尽量存留淡水资源，也可不使用疏勒河故道，而是新开防渗渠道，在降水增多后，届时疏勒河可望恢复河水流动景象。

5) 第五期工程

该期工程初步实施陈昌礼外线方案。从内蒙古达拉诺尔 - 查干诺尔开始，将渤海水引入浑善达克沙地，逐渐形成若干人造海，镇压沙尘暴源头，然后继续向西跨过集二铁路，大致沿北纬 42°线附近，沿阴山、大青山、狼山以北东西向槽地，进入巴丹吉林沙漠北沿的拐子湖(海拔 970 米)，向西注入居延海(海拔 820 米)，逐渐扩大拐子湖和居延海，形成约 2000~5000 平方公里的水面。

6) 第六期工程

该期工程完成“引渤入疆”完整方案。注满居延海后，水面海拔达到约 1000 米，再引水绕过马鬃山余脉，向西进入新疆。从地形上看可分三支，北支引入新疆的准噶尔盆地，中支进入吐哈盆地，南支引入罗布泊。南支在第四期工程中已经完成，不必新增，但如果前期工程规模较小，调水量不足，则可开辟南支，增加罗布泊人造海面积。中支可由罗布泊引水，距离更近。主要是北支，通过北疆盐池 - 三塘湖一线北西向槽地，进入古尔班通古特沙漠，然后向西注入玛纳斯湖(海拔 257 米)和艾比湖(海拔 189 米)。该条线路虽长，但高程逐渐下降，工程并无太大难度，还可利用落差逐级发电，回收电能。

6. 结语

渤海深嵌入我国北方大陆，利用地利之势便于陆海统筹，将渤海水引入我国大西北，利用该地区丰富的光热资源，进行海水自然蒸发淡化。一方面湿润空气，增加降水，一方面得到海盐，经济效益明显。工程实施后，渤海水将沿人工渠道从东向西流动，在国民经济中发挥同长江、黄河相似的重要作用，由于流动的是海水，不妨称之为“海渠”。

“东水西送”工程不会改变我国陆地上其它地区原有水资源的数量，可以达到遏止沙尘暴源头，发展盐化工业，海产养殖业，保障西北绿化植被的作用。工程需要克服的巨大地形高差也可以化害为利，可规划为具备年调节能力的抽水蓄能电站群，然后与西北地区的风电、光伏发电联合运行，减少弃风弃光现象，充分利用可再生能源，为节能减排做出贡献。

在以往学者对这一工程设想的基础上，本文进行了总结和探讨，提供一点浅见。由于“东水西送”工程投资大，效益大，对水资源调配、西北地区气候、国民经济各要素都有深远的影响，因此需要反复讨论，取得共识，形成合力，循序渐进，才能使这一宏大构想落于实地，为解决西北地区水资源短缺的现实问题提供合理的可选方案。

参考文献

- [1] 朱震亚. 中国沙漠概论[M]. 北京: 科学出版社, 1990.
- [2] 霍有光. 关于西调渤海水改造北方沙漠的设想[J]. 中国科技论坛, 1997(3): 47-49.
- [3] 霍有光. 渤海水西调工程续论[J]. 科技导报, 1997(5): 34-38.
- [4] 霍有光. 实施陆海统筹引渤入疆恢复罗布泊生态环境建设工程的探讨[J]. 西部学刊, 2014(1): 5-9.
- [5] 霍有光. 海水西调与再造西北[M]. 石家庄: 河北人民出版社, 2005.
- [6] 陈昌礼. 大力开发和强化天山祁连山的“水塔功能”[J]. 科技导报, 2000(8): 33-36.
- [7] 陈昌礼. 海水西调与我国沙漠和沙尘暴的根治[J]. 中国工程科学, 2001, 3(10): 13-21.
- [8] 竹守章. 治水六大工程——简介《策解中国水问题》[J]. 西安交通大学学报(社会科学版), 2000(3): 56.
- [9] 鹿守本. 海水西调的可行性及生态价值分析——一个同类工程项目的旁证[J]. 太平洋学报, 2010, 18(12): 61-68.
- [10] 张文轩. “引渤入疆”工程的可行性[J]. 北京农业, 2013(27): 193-194.

知网检索的两种方式：

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择：[ISSN]，输入期刊 ISSN：2334-3338，即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入，输入文章标题，即可查询

投稿请点击：<http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱：ojswc@hanspub.org