

欧亚草原跨流域调水与内河航道工程技术分析

梁书民, 于智媛

(中国农业科学院 农业经济与发展研究所, 北京 100081)

摘要: 简要回顾了人类水利工程建设史和全球跨流域调水工程进展现状;根据自流调水、就近调水、技术可行原则,利用地理信息系统空间分析功能规划设计了欧亚草原9项跨流域调水工程和欧亚运河网络,并对关键工程进行了技术分析,对调水工程进行了技术经济评价,阐述了欧亚草原跨流域调水和内河航运工程的多重间接效益。本研究得出的主要结论是欧亚草原调水和运河工程技术可行,国力可承受,直接效益和间接效益明显,可以大大促进丝绸之路沿线国家的经济发展,具有深远的历史意义和重大的现实意义。

关键词: 欧亚草原; 跨流域调水工程; 欧亚运河; 工程技术分析; 技术经济评价

中图分类号: TV68

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2017)04-0107-12

Technical analysis on Eurasian grassland's inter-basin water transfer projects and inland waterways

LIANG Shumin, YU Zhiyuan

(Institute of Agricultural Economics and Development, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China)

Abstract: This paper briefly reviews the progress of water conservancy project in human history and status of global inter-basin water transfer project. According to the principles of gravity flowing water diversion, the nearest distance water diversion, and technique feasible, by employing geographic information system's spatial analysis function, this paper plans and designs nine inter basin water diversion projects in Eurasian Grassland and related Euro-Asia Canal system. Technical analyses were carried out for the key engineering projects. Technical and economic evaluations were carried out for nine water diversion projects. The multiple indirect benefits of water diversion projects and canal system are elaborated. The conclusions are the water diversion projects and canal system project are feasible, China's national strength can bear the huge cost, and the direct and indirect economic benefit of the project is obvious. The project can greatly promote the economic development of countries along the Silk Road, which has great historical and practical significance.

Key words: Eurasian Grassland; inter-basin water transfer project; Euro-Asia Canal; engineering technical analysis; technical and economic evaluation

1 研究背景

纵观人类发展史,世界上著名的古代文明和近现代强大的经济体都修建有发达的水利工程。最新考古发现表明,公元前3100年中国浙江的良渚文化修建了大坝体系,可能具有防洪、运输、生活用水、灌溉等综合功能,是世界上最早的拦洪水坝系统。中国战国时代的都江堰和郑国渠灌溉工程为大一统的

封建社会的形成奠定了基础;隋代的东西向大运河和元代的南北向京杭大运河大大促进了古代中国经济的繁荣和发展。欧洲古希腊的供水隧道和古罗马的城市供水工程在世界水利史上占主要地位,12世纪随着贸易的发展欧洲的运河工程复苏,14世纪中期文艺复兴以来的科学技术进步促进了欧洲的水利发展,16-18世纪是欧洲运河大发展的时期,法国、德国、英国开凿了许多运河。19世纪以后世界各地

收稿日期:2017-04-24; 修回日期:2017-05-26

基金项目:中国农业科学院科技创新工程项目(ASTIP-IAED-2017-07)

作者简介:梁书民(1966-),男,河北大名,人,博士,研究员,主要从事水资源、经济地理和农业经济学研究。

通讯作者:于智媛(1987-),女,辽宁本溪人,在读博士研究生,研究方向:农业经济与资源环境。

开挖的运河迅速增加,瑞典、希腊、中欧、俄国分别建造了发达的运河系统;到 19 世纪末美国建成了以密西西比河为主干航道的发达内河航运系统。跨流域调水工程最早可追溯到公元前 2400 年的古埃及尼罗河上游引水灌溉工程,但是古代和近代的跨流域调水工程的规模一般较小,调水距离短。20 世纪 40-80 年代是全球建设长距离大型跨流域调水工程的高峰期。20 世纪 80 年代以后,发达国家调水工程建设速度显著放缓,而发展中国家如印度、巴基斯坦、埃及、南非等仍在大力建设调水工程。当前世界上 5 大调水强国是加拿大、印度、巴基斯坦、前苏联和美国^[1-2],随着南水北调工程和许多省级调水工程的建设和实施,中国也正在成为世界调水强国。

在当今世界的调水过程中,北美洲西部北水南调工程、欧洲东部和亚洲北部北水南调工程和中国南水北调工程的规模最大,学术界提出和研究较早,均有具体的设计方案,并且局部得到实施。美国洛杉矶的 Ralph M. Parsons 公司于 1968 年提出了北美水电联盟 (NAWAPA) 大型跨流域调水方案,全工程单方调水投资折合 2016 年人民币 26.14 元,圣何塞大学经济学系的教授计算得出北美水电联盟工程的内部收益率 (IRR) 为 4.36%^[3-5],但是工程受到环境保护主义和反大坝运动的反对没有实施^[6],后来计划得到修改完善,调水量增加^[7-9]。前苏联水利工程师格尔迪在 20 世纪 80 年代初提出从鄂毕河经托博尔河向锡尔河和阿姆河提水调水计划,该工程由于苏联解体而停止,但是随着中亚水资源危机的加重,哈萨克斯坦提出要恢复西伯利亚-中亚调水工程的研究^[10-15]。在中国,毛泽东于 1952 年第一次明确提出了“南水北调”的伟大设想,目前中国的南水北调有东线、中线、西线总体规划,其中东线抽水调水工程已经于 2013 年通水,中线自流调水一期工程也于 2014 年顺利通水,规划的西线工程目前还未动工修建,近年来专家又提出西线调水的各种方案^[16-19]。

欧亚草原及毗邻地区的地形、气候和水文特征有利于建设跨流域调水工程和内陆航运网络。本文以保障全球食物供给为主要目的,在现有的研究基础上规划设计欧亚草原最大可能的跨流域自流调水工程,为开发利用欧亚草原及其周边地区丰富的水资源和土地资源、发展灌溉农业、建设世界级灌溉农业区提供工程技术方案,兼顾航运、发电、采矿业、工业、城镇生活和生态用水,以图实现欧亚大陆中心区域经济的综合发展。以就近调水和自流调水为基本

原则,以当前工程技术水平为基础,着重研究东欧和亚洲中北部北水南调、中国南水北调、亚洲东北部北水南调 3 大区域的 9 项大型和超大型跨流域调水工程,合称为欧亚草原调水工程;并对 9 项工程的工程技术可行性、技术经济效益、社会效益、生态环境影响等进行初步评价。在规划调水工程的基础上,设计欧亚大陆内河航道工程,通过利用调水通道和自然航道开发航运,并修建运河,形成欧亚草原内河航运网络和入海通道,并同欧洲已建成的内河航运网相连通。

2 调水线路与运河网络设计

2.1 调水线路设计

规划设计跨流域调水工程的总原则是立足于当前工程技术水平,达到调水效益最大化,主要表现在 10 个方面:自流调水,就近调水,农业为主,节水灌溉,循环用水,同步发电,运河航运,防洪调节,兼顾生态,技术可行。按照这些调水规划设计原则,欧亚草原跨流域调水工程可规划为 9 条调水线路,分别详述如下。

L1: 中国南水北调东线和中线,以华北平原为受水区;水源地为长江中下游、白龙江中下游、嘉陵江上游和汉江;调水起点为海拔 147 m 的汉江丹江口水库和海拔 2 m 的大运河扬州段。东线沿大运河扬水北调,最高点东平湖海拔为 40.5 m,干渠终点天津北大港水库海拔为 7 m。中线延伸水源地长江三峡水库正常蓄水位为海拔 175 m,干渠终点北京团城湖海拔为 49 m。

L2: 中国南水北调西线及延伸和大西线,以黄土高原、瀚海盆地、西辽河流域、河西走廊、塔里木盆地、准噶尔盆地、巴尔喀什湖为受水区;水源地为雅鲁藏布江上游、怒江上游、澜沧江上游、金沙江、雅砻江、大渡河、岷江、白龙江上游、洮河、黄河上游、湟水、大通河和庄浪河,其中最远的水源地调水水库为雅鲁藏布江米林县桑白水库,正常蓄水位为 3 174 m。调水起点为洮河岷县段、洮河九甸峡水库和黄河刘家峡水库,海拔分别为 2 320 m、2 232 m 和 1 735 m;干渠终点向西主要有巴尔喀什湖方向海拔为 450 m,南疆北方向海拔为 1 020 m,南疆南方向海拔为 1 500 m,向东主要有内蒙古鄂尔多斯方向海拔为 1 150 m,内蒙古霍林郭勒方向海拔为 950 m,蒙古东戈壁方向海拔为 960 m。

L3: 中国南水北调柴达木线,以柴达木盆地为受水区;水源地为昆仑山北坡诸河和内陆湖流域

(可可西里、西柴达木),海拔一般在4 000 m以上;调水起点为格尔木河和那凌郭勒河山口水库,正常水位海拔分别为3 400 m和3 300 m,环盆地干渠末端的海拔为2 800 m。

L4:东北亚北水南调中国东北线,以东北平原为受水区;水源地为石勒喀河、黑龙江(阿穆尔河)上游与右岸支流。水源地黑龙江漠河县套子水库海拔为360 m,调水起点嫩江四站水库海拔为300 m,干渠尾是辽宁义县大凌河,海拔为220 m。该线路在嫩江市以北基本同康熙年间的驿道重合。

L5:东北亚北水南调呼伦湖线,以呼伦贝尔高原为受水区;水源地为大兴安岭西坡诸河:激流河、根河、海拉尔河、哈拉哈河,以及呼伦湖西北部诸河:克鲁伦河、乌勒兹河、鄂嫩河、维季姆河;调水起点为诸河山麓水库。关于水源水库、调水起始点、干渠尾海拔,激流河-根河线分别为800、650、600 m;海拉尔河线分别为730、710、700 m;哈拉哈河线分别为850、780、760 m;维季姆河线分别为700、670、650 m;鄂嫩河上游线分别为900、890、880 m。

L6:东北亚北水南调蒙古戈壁线,以蒙古戈壁为受水区;水源地为治达河、埃格河(额金河)、色楞格河、鄂尔浑河。水源地治达河水库海拔为1 251 m,调水起点杭爱山隧洞海拔为1 231 m,干渠尾海拔为1 080 m。

L7:中北亚北水南调图兰低地上线,以图尔盖高地、图兰低地东部为受水区;水源地为克孜勒河、叶尼塞河上游、阿巴坎河、鄂毕河上游、额尔齐斯河上游。最远水源地克孜勒河水库海拔为569 m,调水起点厄斯克门水库海拔为388 m,干渠尾海拔为280 m。

L8:中北亚北水南调图兰低地下线,以库仑达平原、伊希姆平原、图兰低地西部为受水区;水源地为勒拿河、色楞格河中下游、贝加尔湖、安加拉河、奥卡河、丘纳河、马纳河、丘雷姆河、托姆河、鄂毕河、额尔齐斯河。最远水源地勒拿河水库海拔为459 m,调水起点舒尔宾斯克水库海拔为259 m,干渠尾海拔为120 m。

L9:欧洲东部北水南调里海咸海线,以里海低地、咸海低地为受水区;水源地为恩巴河上游、乌伊尔河上游、乌拉尔河、小乌津河上游、伏尔加河、顿河;调水起点为顿河-伏尔加河运河、伏尔加格勒水库、沃利斯克水库、乌拉尔河上游奥伦堡水库。关于水源水库、调水起始点和干渠尾海拔,伏尔加河分别为110、30和0 m;顿河分别为130、10和0 m;乌拉

尔河分别为245、70和55 m。

根据欧亚大陆水汽蒸发和运动规律^[20],向上风地区调水,蒸发乘数效应大。中北亚和欧洲东部北水南调3项工程将西伯利亚南部的径流调往西南方向的中亚地区,在里海低地和图兰低地发展灌溉,产生的水汽位于西风带上风位置,灌溉蒸发的乘数效应大,跨流域调水可形成良性循环;中国南水北调西线及延伸和大西线工程从位于中国西南部的西南季风带,沿青藏高原东缘、东北缘向西北干旱区调水,充分利用西南季风区的径流增加内陆地区的水汽供给,通过水汽蒸发的乘数效应可大大增加中国大陆的水资源供给量,也可形成良性循环,且具有可持续性。

2.2 内河航道网络规划

在跨流域调水工程基础上,通过利用自然航道和建设关键地段的连通运河可以形成以欧亚草原为核心的欧亚大陆内河航道网络。本节规划的欧亚大陆内河航道网络主要利用调水干渠、自然航道和已建成的运河系统,通过建设关键运河和入海通道形成连通欧洲、亚洲两大洲和太平洋、大西洋、印度洋三大洋的内河航道交通网。本节规划的运河和航道整治工程是欧亚草原调水工程的延伸工程,可以单独进行成本效益核算,一般不计入欧亚草原调水工程成本效益核算。延伸工程的总长度为57 132 km,主要是地中海航道、里海航道和已建成的欧洲内河航道,以及需新建的里海-黑海通道、里海-印度洋内河航道、地中海-波斯湾内河航道、黄河流域内河航道、中国东北和内蒙古高原入海内河航道和俄罗斯西伯利亚入海内河航道。

三江平原入海3通道。目前已有内河航道顺黑龙江或乌苏里江经阿穆尔河入鄂霍茨克海。规划新建松花江-绥芬河入海通道,自汤原县松花江南岸海拔85 m处向东南方向开凿运河,经过佳木斯、双鸭山、友谊,到宝清降为80 m;向南深挖过海拔112 m山岗至虎林,到兴凯湖水面海拔降为64 m,向南深挖过海拔100 m山岗降为59 m,同西部绥芬河海拔75 m水库来水会合,南流入日本海。同时可利用开辟兴凯湖通道,溯乌苏里江经兴凯湖绥芬河入海,成为三江平原连通太平洋的第三条通道。

黄河入海通道,中游3路东进,下游7路入海。自刘家峡水库至河西走廊的西北总干渠,在甘肃省景泰县漫水滩海拔1 710 m处向东开凿陡坡运河航道,至宁夏中卫沙坡头海拔1 239 m入黄河,沿黄河干流顺流而下,经青铜峡水利枢纽、三盛公水利枢纽、万家寨水库、壶口瀑布、三门峡水库、小浪底水

库,至河南郑州桃花峪海拔降为 110 m,需建 36 级船闸。自西北总干渠入黄河陡坡航道 1 460 m 处向东沿半山坡开凿运河,经黄河大柳树架设海拔 1 455 m 渡槽 2 处,长 853 和 969 m,向东经宁夏同心长山头乡,架设海拔 1 450 m 跨清水河谷渡槽,长 13.0 km,沿山麓东行,经大罗山北端海拔降为 1 445 m,到萌城乡海拔降为 1 440 m,向东南深挖河道并开凿 16.7 km 通航隧洞入环江西川,渠化环江和泾河,向东南经渭河入黄河,渭河口海拔为 325 m,渠化航道需建 25 级船闸。自宁夏平罗都思图河口海拔 1 090 m 溯河而上至海拔 1 350 m 南折,沿东侧等高线经毛乌素沙地西南部宽谷,在甘宁蒙三省区界点东折进入无定河上游,顺无定河而下抵达黄河,河口海拔 590 m,通道两端将都思图河和无定河渠化共需建船闸 23 级。以上形成黄土高原 3 条东西向航运通道。其中黄河干流航道有悠久的通航史,政府已有航道开发规划,具有优先建设的优势;泾河航道是捷径,利用调水工程自漫水滩向东一路顺水,将来可建设为欧亚运河干线航道。

黄河入海航道自小浪底水库以下可开发 7 条:(1)沿黄河干流自小浪底坝下经郑州、开封、济南,在山东省垦利县入渤海。(2)自郑州花园口黄河南岸开渠连通贾鲁河,经颍河、淮河、东淝河,开凿运河连通巢湖,经裕溪河、长江入东海。(3)自开封黄河南岸开渠连通惠济河,经涡河、淮河、洪泽湖,在金湖向东开挖运河,经宝应、盐城市、新洋港入黄海。(4)自河南兰考黄河南岸沿废黄河开渠,经南运河、新沂河入黄海。(5)自郑州桃花峪黄河北岸开渠连通人民胜利渠,经卫河、南运河、海河,在天津入渤海。(6)自河北邯郸魏县东风渠向北开挖运河,经滏阳河、子牙河、海河,在天津入渤海。(7)自黄河河南台前县沿南运河北行,在山东聊城连通马颊河入渤海。其中颍河航道利于向中国南方运输粮食和农产品,沿江港口条件优越,安徽省已有引江济淮工程规划,可建设为干线航道。

内蒙古高原入海 3 通道。自内蒙古正蓝旗闪电河海拔 1 310 m 处,经滦河入渤海,渠化航道需建 29 级船闸。自内蒙古克什克腾旗水头村达来诺尔与西拉木伦河分水岭最低点海拔 1 300 m 处,顺西拉木伦河向东,经西辽河、辽河在辽宁营口入渤海,渠化航道需建 27 级船闸。自内蒙古霍林郭勒西霍林河和乌拉盖河分水岭海拔最低点 947 m 处,顺霍林河向东南,沿松辽运河向南,经西辽河、辽河在辽宁营口入渤海,渠化航道需建 19 级船闸。其中滦河航道路径便捷,

有通航历史,为内蒙古高原入海的干线航道。

西伯利亚入海 3 通道。自西伯利亚安加拉河向南,经色楞格河、鄂尔浑河、蒙古戈壁、阴山北麓和滦河入海通道最为便捷,是西伯利亚入海的干线航道;自安加拉河向北至叶尼塞河干流航道,或经布拉茨克水库连通勒拿河上游、维季姆河和勒拿河中游,可以将内河航道延伸到西伯利亚广大腹地。自蒙古戈壁东干渠向东,沿干河床开凿运河连通贝尔湖,经乌尔逊河、呼伦湖、额尔古纳河、黑龙江入渤海、日本海或鄂霍茨克海,可形成第二入海通道。溯维季姆河向南沿呼伦湖北水南调工程也可开辟第三航运通道,但是需开凿可以通航的大口径隧道。

里海-印度洋 3 通道。自里海土库曼斯坦土库曼巴希港开凿运河连通捷詹河,修建 20 级船闸渠化捷詹河、哈里河至海拔 1 000 m,在阿富汗的赫拉特向南沿帕米尔高原山麓开凿运河,经法拉河、赫尔曼德河,在伊朗巴基斯坦边界海拔降为 960 m,入达什特河上游,修建 21 级船闸渠化达什特河,在瓜德尔西侧入阿拉伯海。自里海南岸沿克孜勒乌赞河上溯,在海拔 1 680 m 处开凿隧道连通迪亚拉河,在海拔 1 540 m 处开凿隧道连通卡尔黑河,在伊朗阿瓦士附近开凿运河连通卡伦河,经阿拉伯河入波斯湾,翻越伊朗高原共需建 75 级船闸。该通道是俄罗斯和伊朗研究共建里海-波斯湾大运河拟采用的方案。自里海西南岸沿库拉河、阿拉斯河上溯,开凿隧道连接海拔 1 267 m 的乌鲁米耶湖北端,在湖南端开凿隧道连接小扎卜河,经底格里斯河、阿拉伯河入波斯湾,共需建 56 级船闸。其中乌鲁米耶湖航道海拔较低,路径便捷,连通 4 国,可建设为主要通道。

地中海-波斯湾 2 通道。自波斯湾阿拉伯河上溯,经幼发拉底河至阿萨德湖海拔 400 m,在湖西岸中部向西深挖运河、开凿隧道和渠化自然河抵达地中海叙利亚港口拉塔基亚,需建 8 级船闸。或沿幼发拉底河上溯至土耳其的阿塔图尔克水库海拔 540 m,向西通过开凿运河、隧道和渠化杰伊汉河在阿达纳东部入地中海,需建 11 级船闸。其中叙利亚航道海拔较低,也较为便捷,是主要通道。

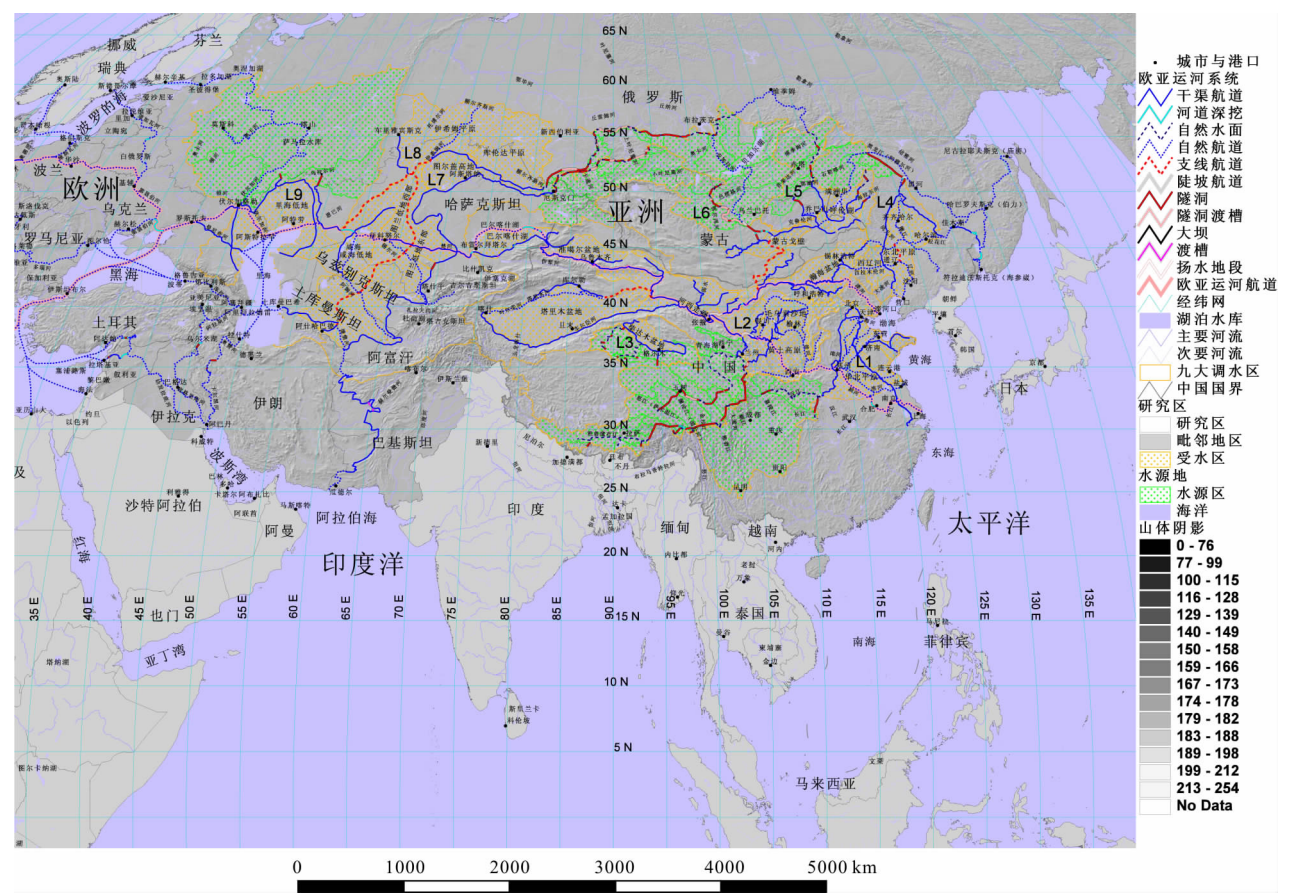
里海-黑海 3 通道。自里海伏尔加河口海拔 -10 m 上溯经阿斯特拉罕至伏尔加格勒南部,经伏尔加河-顿河运河海拔 80 m 入顿河,在俄罗斯的罗斯托夫入黑海;该通道已经建成,是欧亚运河主通道。自里海俄罗斯卡尔梅克和达吉斯坦边界海拔 -10 m,沿曼尼奇地堑向西开凿运河,最高海拔 25 m,经无产者水库、曼尼奇河,在罗斯托夫入黑海;该通道

有海拔低易建设的优势,发展潜力较大。自里海西南岸沿库拉河上溯,经第比利斯,在海拔 750 m 海湾处开凿隧道,连接里奥尼河,通过陡坡降航道连通黑海波季港,共需建 34 级船闸;该通道需翻越高海拔山岭,优势最弱。

大西洋 8 通道。地中海、黑海、里海连通大西洋 8 通道自西向东为:地中海-直布罗陀海峡;法国南部贝济耶附近的南运河-加龙河波尔多港;法国南部马赛附近的罗纳河-运河-马恩河-巴黎-塞纳河;黑海多瑙河-运河-美茵河-莱茵河荷兰鹿特丹港;黑海第聂伯河-运河-维斯瓦河-运河-奥得河-运河-易北河德国汉堡港;黑海第聂伯河-运河-维斯瓦河波兰格但斯克港;黑海第聂伯河-

运河-道加瓦河拉脱维亚里加港;里海-伏尔加河-奥涅加湖-拉多加湖-俄罗斯圣彼得堡。这些跨越欧洲大陆的大西洋通道和港口已经建成,为了便利欧亚大陆东西方内河航运,仅需开凿亚速海至第聂伯河海湾处运河。

本文规划的欧亚大陆内河航道主干线呈哑铃形,全长 17 576 km。其中中国张掖-俄罗斯罗斯托夫段长 6 880 km,为哑铃的中轴,是欧亚运河的核心地段;自核心地段向东北接雅布赖山东麓-阴山北麓-滦河航道入渤海,向东南接泾河-黄河-颍河-长江航道入东海,向西北接第聂伯河-维斯瓦河-奥得河-易北河航道入北海,向西南接黑海-地中海航道抵达罗马(图 1)。



3 调水开发潜力与工程技术分析

3.1 调水开发潜力

利用迈阿密模型^[21],根据各地的年平均降水量和年平均气温^[22]可以计算出光温潜力、气候潜力和实现光温潜力的灌溉需水量,即光温潜力需水量减去降水量;通过计算跨流域调水量同受水区径流量

(以地下径流为主)和受水区上游山区径流量之和,可以得出受水区可利用水资源量;进一步根据实现光温潜力的灌溉需水量和受水区可利用水资源量,可以计算出受水区的垦殖率和可灌溉开垦的宜农荒地面积。

欧亚草原受水区面积总计达 $532.95 \times 10^4 \text{ km}^2$,相当于新疆面积的 3.2 倍。调水量总计达 8 917.8

$\times 10^8 \text{ m}^3$,同长江大通水文站多年平均径流量 $8\,931.0 \times 10^8 \text{ m}^3$ 相近。

调水量加上受水区山地径流 $4\,436.8 \times 10^8 \text{ m}^3$,受水区自身径流 $3\,276.2 \times 10^8 \text{ m}^3$,总计可利用的径流资源为 $16\,754.8 \times 10^8 \text{ m}^3$ (表 1)。其中调水工程水源地的径流量以 GRDC 数据为准^[23],受水区山地和受水区径流量数据,是利用 GIS 格栅数据和空间分析功能,根据同地面坡度和干旱指数回归后得出经验公式计算径流系数^[24-25],进一步根据降水量和

径流系数计算得出径流深度,最后通过面积汇总得出的。

按照目标灌溉垦殖率,9 个受水区总计可灌溉耕地 44.52×10^8 亩,减去受水区当前耕地面积 18.17×10^8 亩,可增加耕地面积 26.35×10^8 亩,为全球耕地面积 259.4835×10^8 亩的 10.15%,其中中蒙受水区 6 项目可增加耕地 9.647×10^8 亩,为 2015 年中国耕地面积 20.2586×10^8 亩的 47.62%(表 2)。

表 1 欧亚草原受水区调水量

受水区	面积/ 10 ⁴ km ²	最终调水量/ 10 ⁸ m ³	受水区山地 径流/10 ⁸ m ³	垦区径流/ 10 ⁸ m ³	最终可利用量/ 10 ⁸ m ³	全灌溉需水/ 10 ⁸ m ³
华北平原	36.72	539.0	541.9	674.0	1754.8	2332.0
大西北内蒙古	182.29	2129.2	1006.1	929.1	4188.4	11567.9
柴达木盆地	7.56	54.9	68.6	7.8	131.3	361.2
东北平原	24.41	144.0	333.3	300.4	777.6	242.9
呼伦湖	14.86	160.6	77.2	85.5	323.3	107.4
戈壁沙漠	10.08	132.7	34.9	23.6	191.2	306.4
图尔盖图兰东	75.55	1611.7	1796.2	235.0	3642.9	6244.5
库仑达图兰西	124.81	1622.9	193.9	865.6	2682.4	4155.6
里海咸海低地	56.68	2522.7	384.8	155.2	3062.7	3828.4
总计	532.95	8917.8	4436.8	3276.2	16754.8	29146.2

表 2 开垦耕地测算和农业生产效益

受水区	目标 全域 垦殖率	全域灌 溉耕地 10 ⁸ 亩	可增加 耕地 10 ⁸ 亩	总计生 产粮油 10 ⁸ t	增产 粮油 10 ⁸ t
华北平原	0.608	3.35	0.00	2.26	0.63
大西北内蒙古	0.351	9.61	6.45	4.47	3.76
柴达木盆地	0.364	0.41	0.41	0.14	0.14
东北平原	0.800	2.93	0.29	1.23	0.47
呼伦湖	0.800	1.78	1.55	0.47	0.41
戈壁沙漠	0.624	0.94	0.94	0.23	0.23
图尔盖图兰东	0.583	6.61	6.01	2.94	2.79
库仑达图兰西	0.646	12.09	4.48	3.73	3.26
里海咸海低地	0.800	6.80	6.21	2.82	2.79
总计	0.557	44.52	26.35	18.30	14.49

自然生态系统的光温潜力同灌溉农田生态系统的谷物产量呈高度正相关关系,笔者根据经验估计后者为前者的 0.7 倍;灌溉农田生态系统的谷物产量同油料产量也呈高度正相关关系,笔者根据经验估计前者为后者的 2.3 倍。根据受水区可灌溉开垦

的宜农荒地面积、灌溉农田生态系统的谷物和油料单位面积产量,以及受水区现有耕地面积、谷物单产、油料单产和粮经农作物面积比例,可以估算出跨流域调水在受水区的谷物油料增产潜力,包括在受水区现有耕地上的谷物油料增产潜力和在受水区灌溉开垦宜农荒地的谷物油料增产潜力。受水区总计粮食油料产量为 $18.30 \times 10^8 \text{ t}$,其中当前耕地生产 $3.82 \times 10^8 \text{ t}$,调水灌溉后,当前耕地增产 $3.94 \times 10^8 \text{ t}$,新垦灌溉耕地生产 $10.55 \times 10^8 \text{ t}$,总计可增产 $14.49 \times 10^8 \text{ t}$,为 2015 – 2016 年度全球谷物油料产量 $31.134 \times 10^8 \text{ t}$ 的 46.54%。其中中蒙受水区增产 $5.652 \times 10^8 \text{ t}$,为 2016 年中国粮食油料产量 $6.5237 \times 10^8 \text{ t}$ 的 86.6%;大西北内蒙古受水区可增产 $3.76 \times 10^8 \text{ t}$,稍高于笔者以前粗略估计的 $3.32 \times 10^8 \text{ t}$ ^[26],本研究引入迈阿密模型计算生产潜力,较为准确可信(表 2)。

3.2 工程技术分析

欧亚草原跨流域调水工程兼顾供水和内河航运,包括干渠、自然航道、欧亚运河、隧洞与桥梁、河道深挖、渡槽、风电扬水和大坝,单线总长 70 037 km

(含大坝顶长),其中主要是干渠 30 421 km、自然航道 21 765 km、欧亚运河(大西洋-太平洋运河) 10 000 km(含支线,不含自然航道)。隧洞(桥梁)单线长 7 082 km,大流量调水地段需建复线隧洞,按照线段过水量大小估算,总计需加长建设复线隧洞(桥梁) 18 093 km,隧洞(桥梁)复线总长为 25 175 km。因此全工程单线建设长度为 48 272.2 km,复线建设长度为 66 365 km,复线总长度为 88 130 km,加上延伸工程总长度达 145 262 km,约为赤道长度的 3.62 倍(表 3)。该工程确实是巨型工程,但是对比 2017 年初中国高速铁路(2008 年始建)营业里程为 22 000 km,中国高速公路(1984 年始建)总里程达 13.0×10^4 km,前者 9 年建设 2.2×10^4 km,后者 33 年建设 13×10^4 km,二者重复建设期间每年建设 6 384 km;本工程复线建设长度 66 365 km,按 30 年建设期计算,每年建设 2 212 km,仅为这两项工程总建设强度的 1/3 稍强。若考虑到主要参与建设的有中国、俄罗斯、哈萨克斯坦、乌兹别克斯坦、土库曼斯坦和蒙古 6 国,该工程建设量虽然巨大,但仍然未超出 6 国当代的综合国力和工程技术建设能力。

(1) 大坝。欧亚草原调水工程须建设大坝 119 座,是调水工程的关键工程,其中许多为高坝、长坝,有的大坝处在地震烈度较高的地区。高坝主要出现在中国南水北调西线大西线工程,以青藏高原东南缘 V 型谷高坝最为典型,考虑到当前高坝建设技术的发展状况,笔者设计的调水线路上的大坝最大坝高限制在 315 m 以下。本规划为绕过九寨沟和黄龙寺自然保护区和缩短雅鲁藏布江大坝长度,将大西线大坝和引水隧洞向上游稍微移动,主要变动有白龙江尼傲大坝高 320 m 改为尼西大坝高 295 m,大渡河双江口大坝高 329 m 改为白湾大坝高 217 m 和温古大坝高 190 m,易贡藏布的郎玉大坝高 301 m 改为高 296 m,雅鲁藏布江比定大坝高 231 m 改为桑白大坝 229 m,坝顶长由 2 162 m 缩减为 1 410 m。长坝多出现在中北亚北水南调工程水源地西伯利亚南部山区,是第四纪冰川活动区,大坝多建在冰川 U 型谷上,大坝高度较低,但是长度较长,工程技术上不成问题。水库呈细长型,有的水库已经建成,可用于调水工程,如布拉茨克水库。调水线路有的须穿越地震多发带,如中国南水北调大西线横穿康定-甘孜地震带^[27],大坝抗震是调水工程应考虑的问题。目前西南地区正在建设和准备建设的一批 200 m 甚至 300 m 高的超高大坝都处在地震烈度较高的地区,中国的大坝抗震技术已经十分成熟,居世界前列。

(2) 隧洞。调水工程需建设大量长隧道、大洞径隧洞、大深埋隧洞和复线隧洞,本规划以就近调水为原则,采用多路调水方案,以减少复线隧洞数量和里程。笔者原规划的中国南水北调大西线沙鲁里山隧洞 103 km 为最长隧洞,隧洞直径以最大硬岩 TBM(隧洞掘进机)的直径 14.44 m 为高限。目前隧洞掘进技术进步很快,德国海瑞克公司生产的盾构机直径达 19.35 m,中国新疆规划的输水隧洞长度达 283 km^[28],本规划最长隧洞长度因大西线上移,增加为 115 km(沿松潘古道南北向延伸)。中国南水北调大西线工程山高沟深,大深埋隧洞较多,隧洞掘进中岩爆发生概率较大,隧洞掘进时需采取防范措施。岩石岩性影响输水隧道 TBM 掘进进度,中国南水北调大西线沿线以砂岩和板岩为主,砂岩硬度居中,板岩硬度较差,二者均属于 TBM 掘进的较佳岩层;图兰低地上线隧洞较长,主要分布在西萨彦岭,岩石主体是泥质及砂质页岩、硅质片岩、石英岩及石灰岩等,其中石英岩地段硬度较大,将影响 TBM 施工进度。地壳垂直运动对输水隧洞开凿也有影响,中国南水北调大西线在青藏高原东南缘开凿隧洞,需跨越活动断层,但是地壳上升速度变化剧烈的区域恰好是利用怒江自然河流输水的地段,以及念青唐古拉山南麓多段短隧洞地段,地壳变化对引水工程的影响不会太大。

(3) 运河。欧亚运河及支线是未来欧亚草原粮食运输的重要通道,且兼有输水功能,是调水工程的核心部分。翻越山岭和陡坡航道地段,是运河工程的难点,需修建船闸才能建成较高的航道等级。美国 1817-1924 年修建的伊利运河长 584 km,共建有 83 座水闸。元代姚演提出修建滦河航道工程通航上都,郭守敬勘察后认为难于施工而未能实施。笔者认为利用现代的工程技术可以把滦河建设为半年通航的 III 级航道。滦河正蓝旗至郭家屯河床的纵坡坡降特点是上游坡缓,而下游坡陡,正蓝旗至内蒙古-河北界之间河流长 110 km,河床海拔由 1 310 m 降为 1 152 m;内蒙古-河北界至郭家屯之间的河流长 200 km,河床海拔由 1 152 m 降为 781 m。按照当前最大单级船闸水头 45.2 m(长江三峡第四级船闸)计算,上段需建 4 座船闸,下段需建 9 座船闸;滦河中下游修建了 2 座大型水库,通航需建 2 座共 5 级船闸;郭家屯以下滦河干流渠化需建 11 级船闸,正蓝旗以下滦河航道通航总计需建 29 级船闸。欧亚运河及支线其他需建船闸的地段有自巴尔喀什湖向西翻越楚伊犁岭地段,黑辽运河在黑龙江呼玛县三卡乡-北疆乡翻越

小兴安岭地段,戈壁航道连接欧亚运河狼山西北麓段陡坡航道,欧亚运河龙首山西麓段陡坡航道,和上述的漫水滩-黄河陡坡航道。

(4)干渠和渡槽。调水工程的干渠具有分布广、线路长的特点。规划通航的干渠须要建成宽浅横截面;蒸发强烈地段的干渠须要建成窄深横截面;过境黄土高原的干渠,须采取生物和物理护坡措施,防治水土流失,并大量修建渡槽跨越黄土沟壑。甘新库姆塔格沙漠多流动沙山,个别地段须将调水线路下移,修建渡槽翻越沙山。在蒸发强烈又不须要通航的地区,可以修建倒虹吸涵洞输水,或建设传统的坎儿井渠,以减少蒸发,抗风害,抗沙埋。欧亚草原调水工程须建渡槽主要有:叶尼塞河和丘雷姆河 2 处跨河渡槽,雅布赖山西部和东部渡槽穿越流沙带,黄土高原干渠多处沟壑渡槽和湟水渡槽。其中黄土高原干渠渡槽主要分布在黄河西岸干渠段,渡槽较多,多为过水量大的短渡槽,工程技术难度不大,但是若建造为 IV 级航道,工程技术难度将相应增加。湟水渡槽海拔 1 730 m,过水量大,须建造宽度大、高度高的长渡槽,是输水干渠的瓶颈地段,工程技术难度较大。雅布赖山西部和东部 2 处渡槽海拔分别为 1 430 m 和 1 420 m,地处欧亚运河的关键地段,需建符合 II 级航道标准的宽渡槽,适宜建成双线渡槽以便于航运(图 2)。按各处渡槽的地形均可建为梁桥渡槽。叶尼塞河和丘雷姆河渡槽需跨越宽深的河谷,梁桥最高桥墩高度为 137 m,工程技术上是可行的。

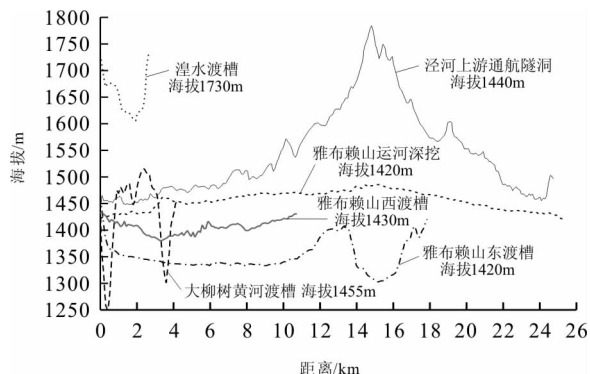


图2 欧亚草原调水与运河主要工程地形剖面图

3.3 有利因素分析

沿线的交通条件得到了改善。在中国开发大西北,交通建设提速的大形势下,中国南水北调线路沿线的交通条件有了很大改善,为大西线建设提供了便利的交通条件。拉萨-林芝铁路、成都-兰州铁路、成都-雅安铁路和重庆-兰州铁路即将完工,川

藏铁路、格库铁路(格尔木-库尔勒)、蒙新铁路在建设中,南疆环线铁路已经修到和田,内蒙古和西北地区发达的公路和高速公路网已经形成。原苏联已经建成了发达的西伯利亚铁路网和中亚铁路网,有利于修建欧亚草原调水工程。

可采取灵活多样的投融资模式进行项目建设。当前中国的经济形势是劳动力过剩、资本过剩、产能过剩,水利基础设施建设的工程技术力量雄厚。以政府投资为主导,采取灵活多样的投融资方式,如 BOT(建造-运营-移交)、BT(建造-移交)、TOT(转让-经营-转让)、PPP(公私合作)和 ABS(资产证券化)等,借助发行股票和国债可以筹集大量资金。也可以通过亚洲基础设施投资银行筹集资金,进行投资活动。通过对调水工程进行统一规划设计,统筹管理工程资金,工程项目由小到大,从易到难,分期分批建设,分段施工,可以提高建设速度,保证工程质量。

利用当前的水利工程和自然条件可以减少施工量。如可以利用现有水库直接调水,利用上游水库增加调节库容;利用受水区的地下水漏斗作为地下水库,通过自然河流补给地下水。充分利用现有水库、天然河道、地下含水层、蓄水池和地下水库调蓄受水区的外来水资源;依托已有绿洲,利用现有坎儿井和干支毛斗渠系统调配水资源,可以达到事半功倍的效果。

依托现代农业技术,改善垦荒条件,提高水资源利用效率。在灌溉垦荒中广泛采用先进的农业技术,如推广土壤改良技术,覆膜滴灌水肥一体化技术;推行农业机械化,培育农作物优良品种,采取先进的栽培模式;采用科学的防护林建设技术和雹灾和霜灾防治技术等,从而使垦荒条件得到改善,垦区的农业现代化水平和水资源利用效率得到提高。

统筹利用外来径流和本地径流。以水源地调水为主,统筹利用受水区径流和受水区的山区径流,统筹利用地表水、地下水、外来水、水库存水,增加供水保障水平,使各受水区之间旱涝互补,实现农业的抗旱稳产高产。

利用蒸发乘数效应可以减少调水量。内陆盆地灌溉有增雨效应,将来进行长期调水后,由于绿洲蒸发的乘数效应,下风区降水增多,可以使外来水资源得到重复利用,调水量或可以逐渐减少。据估算中国北方在生长季 72% 的降水来自亚欧大陆的水汽蒸发,黄河流域的蒸发乘数为 1.724^[29-30]。

4 技术经济与效益分析

4.1 技术经济分析

根据笔者对中国大西线南水北调工程的估算,工程复线建设长度为 24 945 km,总投资约为 $33\,571 \times 10^8$ 元,复线建设长度折合每公里造价 1.3458×10^8 元,调水量为 $2\,129.2 \times 10^8\text{ m}^3$,单方调水成本 15.77 元。

以每公里造价 1.3458×10^8 元估算,欧亚草原跨流域调水工程总计需投资 $89\,315.6 \times 10^8$ 元,其中中国南水北调大西北内蒙古线(L2 线)投资额最大,其次为库仑达图兰西线(L8 线)和图尔盖图兰东线(L7 线),投资额分别为 $17\,593.1 \times 10^8$ 元和 $13\,237.3 \times 10^8$ 元。9 项工程之间的单方调水成本差别很大,总平均为 10.02 元(表 3)。

欧亚草原跨流域调水滴灌垦荒工程效益巨大,

可分为直接效益和间接效益,其中直接效益可用于计算内部收益率(IRR),包括垦荒、发电、航运和售水 4 大效益。这样按 30 a 计算,欧亚草原跨流域调水滴灌垦荒工程总收入为 $716\,759.8 \times 10^8$ 元,总收入同总投资的比值恰好为 3.00(表 4)。

欧亚草原跨流域调水滴灌垦荒工程总投资为 $238\,919 \times 10^8$ 元,子项目投资额由大到小依次为调水工程投资、蓄水池成本、购买宜农荒地支出、滴灌设备投资和支渠投资(表 4)。按 30 a 建设期计算,每年静态投资为 $7\,963 \times 10^8$ 元。

中国十三五期间计划投资 $150\,000 \times 10^8$ 元用于交通建设,投资 $24\,300 \times 10^8$ 元用于水利工程建设,两项投资合计每年平均投资额为 $34\,860 \times 10^8$ 元,欧亚草原调水工程每年的投资额仅为交通及水利每年投资额的 22.8%,中国有能力包揽调水工程的全部投资。

表 3 单方成本核算

受水区	大坝个数	单线建设 长度/km	复合建设 长度/km	复合总长/ km	调水工程 投资/ 10^8 元	最终调水量/ 10^8 m^3	单方成本/ 元
华北平原	8	3711.3	4245.0	5446.1	5713.0	539.0	10.60
大西北内蒙古	38	18382.4	24944.8	29600.0	33571.1	2129.2	15.77
柴达木盆地	2	1443.7	1443.7	2114.5	1943.0	54.9	35.39
东北平原	8	2501.0	2501.0	6568.2	3365.8	144.0	23.38
呼伦湖	10	2251.6	2251.6	3630.2	3030.3	160.6	18.87
戈壁沙漠	8	2513.6	2513.6	2672.7	3382.8	132.7	25.49
图尔盖图兰东	19	6252.5	9835.9	12168.3	13237.3	1611.7	8.21
库仑达图兰西	23	6797.9	13072.5	15647.8	17593.1	1622.9	10.84
里海咸海低地	3	4418.2	5557.4	10282.5	7479.2	2522.7	2.96
总 计	119	48272.2	66365.4	88130.3	89315.6	8917.8	10.02

按照估算的总投资和总收入计算工程的内部收益率(IRR)和净现值(NPV),华北平原、柴达木盆地、东北平原、呼伦湖、戈壁沙漠 5 项调水工程建设期按 10 a 计算,里海咸海调水工程建设期按 20 a 计算,大西北内蒙古、图尔盖图兰东、库仑达图兰西 3 项调水工程建设期按 30 a 计算,各工程贴现率按 0.049 计算,工程建成后的管理维护费用按照总成本的 0.5% 计算,得到的 IRR 总计为 8.79%,其中最高为东北平原、呼伦湖和柴达木盆地,在 19% ~ 23% 之间;其次为蒙古戈壁和里海咸海低地,在 16% ~ 18% 之间;再次为华北平原和图尔盖图兰东的 IRR 在 10% 左右;大西北内蒙古的 IRR 为 7.92%;库仑达图兰西的 IRR 为 7.08%,为 9 项工程的最低值

(表 5)。

综合比较以上计算结果, IRR 决定于单方调水成本、产出与投入比值、建设周期和投资规模。 IRR 一般同单方调水成本呈反比; IRR 同产出与投入比值呈正比; IRR 同建设周期呈反比。长距离调水工程投资额较大,建设周期长, IRR 较低。

4.2 多重间接效益

欧亚草原是人类历史上的丝绸之路、茶叶之路、玉石之路等的必经之地,是古代东西方经济交往的要冲。研究区 10 国地处丝绸之路的中部和东部,包括 6 个主要受水国,中国、俄罗斯、蒙古、哈萨克斯坦、乌兹别克斯坦、土库曼斯坦,和 4 个上游国家吉尔吉斯斯坦、塔吉克斯坦、阿富汗、伊朗。

根据 *IMF* 数据,调水工程 10 国 2016 年的 GDP 总量为 $140\,866\times10^8$ 美元,人口总量为 $170\,568\times10^4$ 人,总国土面积为 $3\,457\times10^4\text{ km}^2$,分别占全球总量的 18.2%、23.3% 和 25.9%。人均 GDP 为 10 138 美元,

是全球平均的 81.5%;人口密度为 54.8 人/ km^2 ,稍低于全球平均值,是全球平均的 90.0%。欧亚草原 10 国总体上属于中等收入国家,正处于经济发展的关键时期。

表 4 总成本核算

10⁸ 元

受水区	调水投资	支渠投资	蓄水池成本	滴灌成本	荒地价值	总计投资	总收入/ 总投资
华北平原	5713	482	0	0	0	6195	3.94
大西北内蒙古	33571	2193	19910	5044	11109	71827	2.87
柴达木盆地	1943	167	962	320	213	3605	2.13
东北平原	3366	275	141	226	1050	5058	5.06
呼伦湖	3030	259	549	1211	3407	8456	2.07
戈壁沙漠	3383	217	1409	737	1266	7013	1.94
图尔盖图兰东	13237	743	24235	4696	10466	53377	2.93
库仑达图兰西	17593	731	7298	3502	10455	39579	2.51
里海咸海低地	7479	584	20506	4856	10383	43809	3.80
总计	89316	5651	75011	20592	48350	238919	3.00

表 5 效益核算

10⁸ 元, %

受水区	垦荒总价值	售水收入	售电收入	航运价值	30 a 总计收入	IRR	NPV
华北平原	0	22637	379	1409	24425	10.74	3264
大西北内蒙古	114096	39604	46035	6164	205899	7.92	15296
柴达木盆地	5164	1021	939	564	7688	19.11	1566
东北平原	3846	19716	203	1818	25582	22.25	6057
呼伦湖	13444	2986	81	977	17488	20.87	3849
戈壁沙漠	10363	2468	227	521	13579	17.54	2517
图尔盖图兰东	119612	29978	4684	2314	156588	9.63	16986
库仑达图兰西	61169	30187	5533	2361	99249	7.08	5634
里海咸海低地	113861	46923	2791	2688	166262	16.35	30956
总计	441554	195520	60870	18815	716760	8.79	86125

调水工程对欧亚草原 10 国具有多重间接效益,包括经济效益、社会效益和生态效益。主要经济效益有:维持快速经济增长,将中高速发展期延长 30 年;加快中国人均 GDP 赶上美国的速度,调水工程每年可拉动中国 GDP 增长 1.426%,使中国人均水平赶上美国时间提前 20 年;开发各国边疆,突破水资源缺乏和人口稀少的限制因素,实现均衡发展;加强农业基础,保障全球食物供给,使受水区 6 国成为全球主要食物出口国;推广高效节水灌溉技术,防洪抗旱效益明显,9 项工程总计可灌溉开垦的宜农荒地面积是当前全球灌溉面积的 58.6%;发展内河航

运,可以大大节省运输成本。上海经滦河口到欧亚运河东部中点的水运距离,仅为上海到美国新奥尔良的海运距离的 22.6%。主要社会效益有:欧亚运河是现代版的丝绸之路,适宜开辟游轮航线,促进沿线文化旅游产业发展;通过农业移民垦荒,可促进扶贫与农民增收;有利于加强民族团结,巩固各国边防;可以解决干旱区水资源缺乏问题,消除国际水资源争端;可以改善水源国和受水国的国际关系,提高调水国的国际政治影响力拓展生存空间,增强受水国综合国力;使农牧业社会走向工业化和农业现代化,彻底终结历史万年之久的农耕民族和游牧民族

之间的冲突,以调水工程为纽带,欧亚10国联合行动,可以逐步形成欧亚10国经济联盟。主要生态效益有:增加绿洲碳汇,提高生态服务价值^[31];促进产业与人口扩散迁移,减少人口稠密区的雾霾污染;改善受水区生态环境,恢复受水区水生生态环境;受水区通过接纳山区的生态移民,可以减轻山区人口对环境的压力,有效防治山地的水土流失。

从技术、经济、生态、国际关系等多方面综合评价可以得出9项工程的优先顺序。中国的5项工程中东北平原南水北调是振兴东北经济的关键工程,南水北调西线和大西线是我国开发大西北战略的核心工程,建设欧亚运河又可以大大促进丝绸之路沿线国家的经济发展,应当优先建设这2项工程;柴达木盆地南水北调工程和呼伦湖北水南调工程投资规模较小,内部收益率高,但是处于偏远地区,后者涉及中、蒙、俄3国,可作为第2批建设项目;南水北调中线延伸工程可扩大调水量,并有利于华北平原内河航运的发展,可作为第3批建设项目。外国为主的4个调水项目中里海咸海低地北水南调和中亚北水南调上线工程具有调水量大,内部收益率高的特点,涉及俄罗斯、哈萨克斯坦和乌兹别克斯坦3个大国,地处丝绸之路核心地段,可同中国大西线工程相连通,应当作为第1批建设项目;蒙古戈壁沙漠北水南调项目对蒙古国经济发展和融入丝绸之路经济带作用巨大,可作为第2批建设项目;中亚北水南调下线实际为上线的延伸工程,可以彻底解决中亚的水资源危机,可作为第3批建设项目。

5 结论与讨论

本研究得出的主要结论有:

(1)欧亚草原调水工程有利于推动区域经济全面开发,发展潜力巨大。本调水方案的受水区涉及了欧亚草原的绝大多数低海拔平坦地区,可以有效破解当地的水资源瓶颈,释放出巨大的发展潜力,促进全区域的经济的发展。

(2)工程规模浩大,工程技术可行。欧亚草原调水工程规模虽然十分浩大,在当今世界水利工程技术水平下是可行的。中国在调水工程的关键技术上领先世界,如大坝、隧洞、干渠、运河与船闸、渡槽等工程技术;俄罗斯拥有寒带水利工程建设先进技术,可与中国互补。

(3)经济效益显著,国力可承受。调水工程是欧亚草原10国未来30年经济增长的引擎。当前中国处于工业产能过剩期,交通网大规模建设基本完

成,是规划建设欧亚草原调水工程的好时机;调水工程经济效益巨大,同交通投资相比较投资规模并不大,远未超出中国的综合国力。

(4)具有多重效益和深远的历史意义。调水工程可以建立陆心地区世界大粮仓,重塑世界食物自给率地图;通过跨国水资源联合开发,实现多国经济共同发展,将成为国际合作开发边疆的典范;欧亚运河可以大大促进东西方的文化交流,具有深远的历史意义。

(5)涉及丝绸之路沿线国家,具有重要的现实意义。调水和运河工程可以成为“一带一路”倡议可选择的重要建设项目,利用亚洲投资银行进行投资,对加强中国同俄罗斯和中亚国家的经济合作具有重大现实意义。

欧亚草原调水和运河工程是多国联合投资建设的项目,国际关系应当是未来的重点讨论对象,具体应深入研究的问题如下。

(1)确定国际水权与解决国际水资源再分配问题。欧亚草原调水工程可能存在上下游水权纷争的国家除欧亚草原10国外,还有南亚次大陆和中南半岛国家,应先明确水权与土地产权,然后进行水资源再分配,以免发生国际纠纷。

(2)调水工程的国际投融资模式。国际水资源开发投资模式与管理模式值得探讨,调水工程的国际项目可以通过亚洲投资银行的进行融资,尝试国际合作投资、国际BT(建造-移交)、和国际资产证券化等灵活多样的投融资模式。

(3)水资源联合调度。上下游水资源分配是调水工程的核心内容,需加强国际合作,制定配水方案,签订政府间协议,进行水资源联合调度,以解决上下游国家之间的水资源争端。

(4)科学管理水资源。调水工程规模浩大,涉及10国,大小河流多于100条,需树立科学发展观,加强科学管理,引入智能化现代化的先进管理模式,达到调水效益最大化,实现水资源的可持续高效利用。

(5)树立共同发展目标,加强国际合作。有关国家应抛开社会制度和意识形态的分歧和束缚,建立伙伴关系,通过各方合作实现优势互补,高效利用水资源和土地资源;以保障全球食物供给,建设和谐世界为共同目标,凝聚各国力量,互利互惠,走共同发展的道路。

参考文献:

[1] 杨立信. 国外调水工程综述[J]. 水利发展研究, 2003,

- 3(6): 55–56.
- [2] 王光谦, 欧阳琪, 魏加华, 等. 世界调水工程[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- [3] Roland P, Kelly J. North american water and power alliance, NAWAPA plan can work[M]. La Verne, California: Energy Report, National Energy Research and Information Institute, 1982.
- [4] Beets M. NAWAPA XXI will bend the water cycle, save Calif. Texas[J]. Executive Intelligence Review – Economics, 2014, 41(18): 24–31.
- [5] Baker M M. Anti – NAWAPA water policy means food emergency[J]. Executive Intelligence Review – Economics, 2013, 40(22): 23–26.
- [6] Deniston B. Expanding NAWAPA XXI: Weather modification to stop starvation[J]. Century Science & Tecnology, 2013, 26(3): 49–57.
- [7] Deniston B. The nuclear – thermonuclear NAWAPA XXI[J]. Executive Intelligence Review – Feature, 2013, 40(34): 4–15.
- [8] Kirsch M. Nuclear NAWAPA XXI, Desalination, and the new economy[J]. Executive Intelligence Review – Feature, 2013, 40(38): 4–19.
- [9] 方 妍. 国外跨流域调水工程及其生态环境影响[J]. 人民长江, 2005, 36(10): 9–10+28.
- [10] 格尔迪, 须振伟, 曹寅白. 苏联西伯利亚向中亚和哈萨克斯坦部分调水问题[J]. 海河水利, 1984(S2): 68–72+96.
- [11] 栗宗嵩, 姜 伟. 国外跨流域调水工程简介[J]. 世界农业, 1982(2): 34–37.
- [12] 格里申科 H C, 俞 杨. 苏联水利建设的任务和发展远景——大型跨流域调水工程现状[J]. 地理译报, 1984, 3(3): 6–10.
- [13] 玛尔柯娃 O И, 袁子恭. 水资源区域再分配问题的设计方案[J]. 地理科学进展, 1982, 1(3): 29–32.
- [14] 邵宏源, 严定中. 苏联的调水工程规划[J]. 海河水利, 1984(S2): 49–55.
- [15] 张德骅, 魏昌林. 苏联的调水工程[J]. 中国水利, 1986(6): 42–44.
- [16] 梁书民. 中国城镇化的资源瓶颈与破解方略[M]. 北京: 中国农业出版社, 2015: 423–450.
- [17] Liang Shumin. A joint water diversion plan for China[J]. Journal American Water Works Association, 2013, 105(5): 59–60, E264–E277.
- [18] 郑 平, 姬士军, 张学彬, 等. 从雅鲁藏布江及怒江调水到西北干旱区的思考[J]. 水利水电施工, 2015(4): 96–99+115.
- [19] 王 欣, 侍克斌, 岳春芳, 等. 新疆跨区域调水可行性前期——怒江调水入疆可行性初探[J]. 水资源与水工程学报, 2016, 27(3): 38–142+147.
- [20] Van de Ent R J, Savenije H H G, Bettina S, et al. Origin and fate of atmospheric moisture over continents[J]. Water Resources Research, 2010, 46(9): 201–210.
- [21] 里思 H, 惠特克 R H 著. 王业遂译. 生物圈的第一性生产力[M]. 北京: 科学出版社, 1985.
- [22] Hijmans Robert J, Susan Cameron, Juan Parra. WorldClim version 1 [M/OL]. Berkeley: the Museum of Vertebrate Zoology, University of California, in collaboration with Peter Jones and Andrew Jarvis (CIAT), and with Karen Richardson (Rainforest CRC), 2005. [2016–01–15]. <http://www.worldclim.org/>.
- [23] Wilkinson K, von Zubern M, Scherzer J. Report No. 44, GRDC report series, global freshwater fluxes into the world oceans[M]. Koblenz: Global Runoff Data Centre, Federal Institute of Hydrology(BfG), 2014.
- [24] Farr T G, Kobrick M. Shuttle radar topography mission produces a wealth of data[J]. Eos Transactions American Geophysical Union, 2000, 81(48): 583–585.
- [25] Trabucco A, Zomer R J. Global aridity index (Global – Aridity) and global potential evapo – transpiration (Global – PET) geospatial database[DB/OL]. Washington, DC: CGIAR Consortium for Spatial Information, 2009. Published online, available from the CGIAR – CSI GeoPortal at: <http://www.csi.cgiar.org/>.
- [26] 梁书民. 中西线联合南水北调的宜农荒地资源开发潜力[J]. 水利发展研究, 2013, 13(12): 15–24.
- [27] 傅马利, 杨守一. 中国人民共和国地图集[M]. 北京: 中国地图出版社, 1994: 8.
- [28] 邓铭江. 深埋超特长输水隧洞 TBM 集群施工关键技术探析[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(4): 578–587.
- [29] Keys P W, van de Ent R J, Gord L J, et al. Analyzing precipitation – sheds to understand the vulnerability of rainfall dependent regions[J]. Biogeosciences Discussions, 2012, 9(2): 733–746.
- [30] Ellison D, Futter M N, Bishop K. On the forest cover – water yield debate: from demand – to supply – side thinking[J]. Global Change Biology, 2012, 18(3): 806–820.
- [31] 李 颖, 葛颜祥, 刘爱华, 等. 基于粮食作物碳汇功能的农业生态补偿机制研究[J]. 农业经济问题, 2014, 35(10): 33–40.