

# 全球大型跨流域调水工程及水资源农业开发潜力

梁书民<sup>1</sup>, Richard Greene<sup>2</sup>, 朱立志<sup>1</sup>, 孙炜琳<sup>1</sup>, 崔奇峰<sup>1</sup>

(1. 中国农业科学院 农业经济与发展研究所, 北京 100081; 2. 首都师范大学  
地球空间信息科学与技术国际化示范学院, 北京 100048)

**摘要:** 根据自流调水、就近调水、技术可行等原则,利用地理信息系统空间分析功能设计了全球9大区72项跨流域调水工程和相关粮食运输的内河航运网络,利用迈阿密光温和气候生产力模型计算了非受水区的节水灌溉粮食增产潜力和9大区调水灌溉受水区的粮食增产潜力,对受水区进行了缺水程度评价,对调水工程的经济效益和可行性进行了粗略技术经济分析与评价。主要结论为:受水区和非受水区的粮食增产潜力分别为  $36.18 \times 10^8$  t 和  $11.72 \times 10^8$  t,合计为  $47.90 \times 10^8$  t,稍高于预测的2100年世界食物增产量  $40.56 \times 10^8$  t;大多数调水项目经济效益好,可行性强,个别调水项目经济效益较差,可以通过优化设计增强项目可行性。笔者对未来全球食物供给形势持谨慎乐观态度,主张采取积极进取的全球食物生产战略,以保障世界食物供给。

**关键词:** 全球;跨流域调水工程;内河航运;迈阿密模型;粮食生产潜力;缺水程度评价;技术经济分析;经济效益评价

中图分类号:TV68

文献标识码:A

文章编号:1672-643X(2019)05-0236-011

## Global large-scale inter-basin water transfer projects and potential of water resources' agricultural development

LIANG Shumin<sup>1</sup>, RICHARD Green<sup>2</sup>, ZHU Lizhi<sup>1</sup>, SUN Weilin<sup>1</sup>, CUI Qifeng<sup>1</sup>

(1. Institute of Agricultural Economics and Development, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China;

2. College of Geospatial Information Science and Technology, Capital Normal University, Beijing 100048, China)

**Abstract:** Based on the principles of gravity-flowing water transfer, near-by water transfer and technological feasibility, 72 inter-basin water transfer projects and related inland waterway networks for grain shipping in nine regions in the world were designed using the spatial analysis function of geographic information system. The grain output increase potential in non-water-receiving areas and water-receiving areas of nine water-transferring irrigation districts were calculated using the Miami Model on light-temperature and climate productivity. The water shortage grade of the water receiving area was evaluated, and the economic benefit and feasibility of the water diversion project were roughly analyzed by tech-economic evaluation. The main conclusions are that the potentials of grain output increase in water-receiving areas and non-water-receiving areas are 3.618 billion tons and 1.172 billion tons respectively, totaling 4.790 billion tons, which is slightly higher than the predicted world's food output increase of 4.056 billion tons by 2100. Most water diversion projects are efficient economically with strong feasibility, and only a few water diversion projects' economic efficiency are poor, but the feasibility can be improved by optimizing the designation. The authors are cautiously optimistic on the global food supply situation in the future, and advocates the adoption of an aggressive global food production strategy to secure the world's food supply.

**Key words:** global; inter-basin water transfer project; inland waterway; Miami model; grain production potential; water shortage assessment; tech-economic analysis; economic efficiency assessment

收稿日期:2019-03-26; 修回日期:2019-05-06

基金项目:中国农业科学院科技创新工程项目(ASTIP-IAED-2019)

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

通讯作者:Richard Greene(1959-),男,美国人,博士,北伊利诺伊大学地理系教授,主要从事土地资源和经济地理学研究。

## 1 研究背景

“地球能养活多少人”是一个跨多学科的问题,涉及人口学、生态学、经济学、社会学、自然地理学、农学等。1998年美国人口学家科恩(Joel E. Cohen)的研究发现众多估计的世界人口峰值中位数在 $77 \times 10^8 \sim 120 \times 10^8$ 之间,同当时联合国预测的2050年人口数在 $78 \times 10^8 \sim 125 \times 10^8$ 之间相近<sup>[1]</sup>,前者中位数为 $98.5 \times 10^8$ ,后者中位数为 $101.5 \times 10^8$ 。2017年全球总人口为 $75.50 \times 10^8$ ,预计2030年人口为 $85.51 \times 10^8$ ,2050年人口为 $97.72 \times 10^8$ ,2100年人口为 $112.0 \times 10^8$ ,分别比2017年增加13.3%、29.4%和48.3%<sup>[2]</sup>。

世界农业发展经验表明,土壤肥料、灌溉和优良品种是推动农作物单位面积产量增加的主要因素。由于农业受气候波动影响较大,肥效的发挥和良种的推广都需要以灌溉为前提条件,在干旱半干旱环境下发展灌溉是推动农作物增产的最主要因素,目前基于水肥一体化的滴灌和微灌技术是最先进的大田农作物生产技术,节水增产效果最佳,推广潜力最大。世界耕地灌溉面积由1949年的 $0.92 \times 10^8 \text{ hm}^2$ 增加到2016年的 $3.00 \times 10^8 \text{ hm}^2$ ,同期的耕地灌溉率由6.9%提高到18.8%。2017年全球生产主要食物包括谷物、薯类折粮、豆类和油料籽(统称粮食油料)共计 $40.59 \times 10^8 \text{ t}$ ,4类农作物产量比重分别为70.2%、23.6%、4.2%、2.0%。1960-2015年世界谷物总产量由 $6.73 \times 10^8 \text{ t}$ 增加到 $28.49 \times 10^8 \text{ t}$ ,平均每年增加 $0.3956 \times 10^8 \text{ t}$ ,按4类农作物产量同步增加估计全球每年增加粮食油料产量 $0.4886 \times 10^8 \text{ t}$ 。按照线性趋势预测,世界粮油总产量2050年可达 $56.72 \times 10^8 \text{ t}$ ,2100年可达 $81.15 \times 10^8 \text{ t}$ ,将分别比2017年增加40%和100%;同FAO预测的世界粮食和油料产值2050年比2012年增加47%的结果相近。其中人口增长对粮食油料需求量增长的贡献率为56.9%;世界人均粮食油料占有量将由2017年的538 kg增加为2050年的580 kg和2100年的725 kg,由于收入增加造成的人均粮食消费量增加对粮食油料需求量增长的贡献率为43.1%。

当前学术界对全球农业生产潜力、水资源、灌溉农业的研究主要有:Hopper<sup>[3]</sup>研究了全球各大洲宜农荒地开发潜力;De Souza等<sup>[4]</sup>评价了不同气候带的开发潜力和绿色革命对世界农业发展的贡献;Mekonnen等<sup>[5]</sup>揭示了全球水资源短缺的地域分布;Gleeson等<sup>[6]</sup>考察了全球现代地下水分布;Döll等<sup>[7]</sup>

探索了全球地下水补给;梁书民等<sup>[8-9]</sup>推算了高分辨率全球径流场,并研究了中国水资源的农业开发潜力;Richis等<sup>[10]</sup>贡献了世界地下水资源空间数据(WHYMAP GWR);Gleeson等<sup>[11]</sup>揭示了全球地下水渗透率和孔隙度;Fan等<sup>[12]</sup>研究了全球地下水位深度分布。另外还有欧亚草原跨流域调水农业生产潜力研究<sup>[13]</sup>、主要粮食出口国粮食生产潜力分析<sup>[14]</sup>、对全球农业生态区的适宜耕种程度评价<sup>[15]</sup>以及FAO农业和粮食未来系列报告<sup>[16-17]</sup>。王光谦等<sup>[18]</sup>系统地总结了世界现有的跨流域调水工程,突出了跨流域调水对灌溉的重要性;Deniston<sup>[19]</sup>和席勒基础设施工程研究所<sup>[20]</sup>列举了几项超大型水资源开发工程,包括北美水电联盟工程,非洲刚果河-撒哈拉沙漠调水工程,南美洲亚马逊流域-潘帕斯草原调水工程,以及澳大利亚的园艺业开发工程。

本文的核心研究目标是计算全球节水灌溉和跨流域调水灌溉的增产潜力。所使用的基础地理信息主要有基于经验径流系数计算的全球径流深度;基于迈阿密模型计算全球光温生产潜力、全球气候生产潜力、全球光温潜力灌溉需水量。设计调水路线利用了全球数字高程模型<sup>[21]</sup>、全球河流和流域分布<sup>[22]</sup>以及全球土地利用类型<sup>[23]</sup>、全球土壤类型<sup>[24]</sup>等。联合国粮农组织(FAO)数据库可提供全球各国的耕地面积、播种面积、谷物面积、谷物产量以及全球10 km地面分辨率的灌溉率分布图<sup>[25]</sup>等,结合光温潜力和耕地分布情况可计算各国农作物的经济系数。国际灌区协会(ICID)提供的各国灌溉面积、喷灌面积和滴灌面积<sup>[26]</sup>可用于评价各国灌溉发展的现代化水平。

## 2 调水线路设计

跨流域调水工程的规划设计应遵循经济效益最大化原则,需要实现建设成本和运营成本最小化,产出最大化,和项目内部收益率最大化。对水源地的具体条件要求有:(1)河流径流丰富,集水面积较大,可调水量充足;(2)所在地区地势较高,调水起点海拔高于受水区,空间分布上接近受水区,能够向受水区自流调水。对受水区具体条件要求有:(1)地势平坦,地面坡度小,集中连片,面积广大;(2)干旱缺水,或季节性缺水,光温潜力高,高效灌溉农业发展潜力大;(3)接近水源地,海拔低,便于引水自流灌溉;(4)保护地球森林生态系统,尽量选择非林地,最好在具有旱作农业基础的地区调水灌溉开荒。对输水线路规划设计的具体条件要求有:(1)优化

输水线路长度和纵向坡度,实现工程成本和调水量的性价比最大化,单位调水成本最低化;(2)受水区输水线路沿山麓延伸,通过蓄水池调节自流分配水资源;(3)受水区的蓄水池和过境干旱区的渠段应采取工程技术措施防治蒸发损失,最好同光伏发电相结合;(4)调水干渠工程的规划设计应兼顾内河航运功能,以降低粮食运费,便利粮食运输。

按照上述原则规划设计跨流域调水工程,全球跨流域调水工程按受水区所处地理位置可分为9个大区,分别命名为:1 中北美洲,2 南美洲,3 非洲南部,4 非洲中西部,5 非洲东北部,6 欧亚草原西部,7 欧亚草原东部,8 欧亚大陆南部,9 澳大利亚大陆。

(1)中北美洲大区7亚区。主体工程是北美洲水电联盟工程(NAWAPA),位于中北美洲大陆西部,以3路扬水北水南调为主,主要水源地是北美洲西北部诸河流上游,主要调水目的地是干旱缺水的北美洲大平原西部和美国西部高原,辅助工程为墨西哥东西两海岸平原调水工程;美国加州中央谷地和墨西哥尤卡坦半岛调水工程利用本地山区水源调水,则可以自成系统。

(2)南美洲大区7亚区。主体工程是中路北水南调工程,主要水源地是亚马逊河南岸支流上游,主要调水目的地是拉普拉塔平原。其它调水工程主要有秘鲁东水西调,巴西东部圣弗朗西斯科河南水北调到巴西东北部沿海平原,以及阿根廷南部沿海平原利用本地水源灌溉工程。

(3)非洲南部大区4亚区。主体工程是卡拉哈迪盆地向心调水灌溉工程,主要水源地为赞比西河和奥兰治河上游;次要工程有莫桑比克沿海平原和马达加斯加西部沿海平原灌溉工程。

(4)非洲中西部大区5亚区。主体工程是刚果河南水北调撒哈拉沙漠西部超大型调水工程,水源地为刚果河上游诸支流,调水目的地为乍得湖盆地和撒哈拉西部平原,远抵西非沿海平原和北非中部地中海沿岸城市;辅助工程有尼日尔河中游和西非沿海平原灌溉工程。

(5)非洲东北部大区8亚区。主要工程有尼罗河水灌溉工程,目的地有南苏丹、撒哈拉沙漠东北部平原;索马里-肯尼亚-坦桑尼亚印度洋沿海平原灌溉工程,水源地主要为鲁菲吉河、朱巴河和谢贝利河以及东北非亚丁湾-红海沿岸平原灌溉工程,但是由于平原狭窄,该工程调水规模较小。

(6)欧亚草原西部大区3亚区。该大区是欧亚草原向心调水超大型工程的西北半部,以里海北部

沿岸平原和中亚图兰低地为调水目的地,按目的地位置和调水线海拔高度分为3个大型亚区,即西线里海平原、上东线图兰低地东和下东线图兰低地西,调水水源地为西伯利亚流入北冰洋诸河的上游和里海北岸诸河的上游,如勒拿河、叶尼塞河、鄂毕河、乌拉尔河、伏尔加河。

(7)欧亚草原东部大区8亚区。该大区是欧亚草原向心调水超大型工程的东南半部,以中国南水北调东、中、西3线为主体,调水目的地为华北平原、中国内蒙古和大西北以及柴达木盆地,水源地主要是青藏高原东部和东南部诸河,如雅鲁藏布江、怒江、澜沧江、长江、黄河。其他调水工程有中国东北平原、呼伦湖平原、蒙古戈壁沙漠北水南调3工程,以及蒙古西部山区2处内陆盆地灌溉工程。

(8)欧亚大陆南部大区23亚区。以季节性局部调水灌溉为主,大型工程较少。主要有南亚次大陆东部沿海平原调水灌溉工程6亚区;印度沙漠调水灌溉工程3亚区,含瓜达尔调水工程;中南半岛山间盆地季节性调水7亚区;西亚伊朗-土耳其高原内流河调水灌溉工程5亚区;南欧地中海气候区调水灌溉工程2亚区,包括西班牙中部北水南调和意大利波河平原调水灌溉。

(9)澳洲大陆大区7亚区。澳洲大陆水资源短缺,东部水资源较西部丰富。可进行调水灌溉的亚区主要有卡奔塔利亚湾沿海平原、墨累河-达令河盆地、大自流盆地东北部平原以及澳洲大陆西南部和西北部的沿海平原(图1)。

关于与调水工程相关的内河航道和水路粮食运输问题,粮食运输方式有5种:内河航运、海运、铁路、公路、空运;内河航运同海运运费率相当,铁路运费率是水运的2倍,公路运费率是水运的5倍,空运运费率是水运的9倍。长距离粮食运输必须采用水运或铁路运输,短距离粮食运输可采用公路,空运粮食除用于战争外一般不用于民用粮食运输。

欧亚草原东部受水区可开辟7条水路运粮通道<sup>[13]</sup>,北方冬季冰期停运,每年三季可用驳船运输粮食油料,三级航道的年运粮能力约为 $1.0 \times 10^8$  t,四级航道的约为 $0.5 \times 10^8$  t。若在欧亚运河东段将泾河和滦河2条干线建成三级航道,在黄河上中游、无定河、西拉木伦河、松辽运河、佳木斯-海参崴运河5条线路建四级航道,总计7条内河航运通道每年的运粮能力为 $4.5 \times 10^8$  t,基本可以满足从欧亚草原东部受水垦殖区每年向东部沿海港口运输约 $5 \times 10^8$  t粮食油料的需求,铁路可以完成剩余的粮食

运输。欧亚草原西部受水区的中亚-大西洋和印度洋水路运粮通道有6条,其中主干粮食运输通道2条,分别连接黑海与地中海和黑海与北海,位于欧亚运河西段,自欧亚运河巴尔喀什湖段向西,经里海北部和连通里海-黑海的伏尔加河-运河-顿河通道,到亚速海和黑海,然后分南北两路西进,南路经博斯普鲁斯海峡、爱琴海入地中海,可抵达南欧北非的地中海各港口;北路经第聂伯河、维斯瓦河、奥得河、易北河航道入北海。另有4条水运通道分别为:(1)里海-波罗的海通道伏尔加河-奥涅加湖-拉多加湖-圣彼得堡;(2)里海-波斯湾第一通道库拉河-乌鲁米耶湖-底格里斯河运河;(3)里海-阿富汗-巴基斯坦-阿拉伯湾通道;(4)黑海-北海通道多瑙河-莱茵河内河航道。

在非洲地区,当前通航河流有尼罗河及其支流青尼罗河、尼日尔河及其支流贝努埃河、注入乍得湖的沙里河、塞内加尔河和扎伊尔河及其支流开赛河、乌班吉河、桑加河。另有莫桑比克赞比西河下游、朱巴河下游、安哥拉宽扎河下游、坦桑尼亚鲁菲吉河下游<sup>[27]</sup>。调水后可发展内河航运的有奥兰治河、林波波河以及刚果河-撒哈拉沙漠-地中海大运河,即沿刚果河-撒哈拉沙漠西部调水的班吉-恩贾梅纳-尼亚美-加奥-因萨拉赫-的黎波里运河。非洲多为高原地形,河流中下游瀑布多,落差大,内河航运需解决货船翻越瀑布的问题。

在北美洲地区,目前内河航运发达,通航线路主要有五大湖-圣劳伦斯河、五大湖-伊利运河-哈德逊河-纽约和密西西比河及其西岸支流阿肯色河、密苏里河、明尼苏达河,还有加拿大的纳尔逊河-萨斯喀彻温河-哈德逊湾、北美洲西海岸的哥伦比亚河。北美洲北水南调后可发展内河航运的线路有美国西部的科罗拉多河、美墨界河格兰德河、密西西比河下游支流雷德河以及流经休斯顿的布拉索斯河。

在南美洲地区,通航河流有亚马逊河及其支流马代拉河、塔帕诺斯河和托坎廷斯河、巴拉那河及其支流巴拉圭河和阿根廷南部的科罗拉多河。南美洲北水南调后主要调水运河即可成为运粮运河,与巴拉那河、拉普拉塔河相连通,进入南大西洋。

在南亚和东南亚地区,印度和巴基斯坦调水工程主要用于满足国内粮食油料需求,印度河、恒河、布拉马普特拉河可以用于运输粮食,长距离调水运河也可用于运输粮食。缅甸、泰国、柬埔寨和越南南部则可以利用伊洛瓦底江、昭披耶河和湄公河向沿海港口城市运输粮食和油料。

在澳大利亚,通航河流有墨累河及其支流达令河和马兰比吉河。澳洲水资源缺乏,进一步发展运河运输困难较大。

### 3 调水与节水灌溉开发潜力

#### 3.1 相关指标及其计算方法

受水区调水开发潜力有关指标的分步骤计算方法如下:

(1)受水区面积  $A_d$ :在地理信息系统栅格数据模块中,采用摩尔魏德地图投影,取东经  $10^\circ$  为中央纬线,利用地图投影等积的特点,通过计算单元栅格点面积和受水区栅格总数可计算受水区面积。

(2)受水区光温生产潜力  $Y_i$  和气候生产潜力  $Y_{\min}$ :利用栅格数据模块和各栅格点的光温生产潜力和气候生产潜力,可以计算各国各个受水区的总光温与气候生产潜力和平均光温与气候生产潜力。

(3)光温生产潜力需水量  $P_{yt}$ :利用迈阿密模型计算受水区各个栅格的光温生产潜力需水量和受水区总光温生产潜力需水量。

(4)降水总量  $P_{re}$ :利用各个栅格的多年平均降水量计算和受水区总降水量。

(5)灌溉需水量  $P_d$ :实现光温生产潜力的灌溉需水量可利用公式  $P_d = P_{yt} - P_{re}$  计算。实际为类似天然降水的喷灌需水量。

(6)滴灌灌溉需水量  $P_{ddr}$ :实际考察中滴灌需水量为喷灌需水量的 62.5%。

(7)受水区径流量  $R_{od}$ :利用全球径流深度栅格计算获得,参考 GRDC 数据进行校正。

(8)水源区径流量  $R_{os}$ :利用全球径流深度栅格计算获得,参考 GRDC 数据进行校正。

(9)总计可利用径流量  $R_{ot}$ :  $R_{ot} = R_{os} + R_{od}$

#### 3.2 受水区水资源丰缺评价

根据可利用径流量  $R_{ot}$ ,受水区灌溉需水量  $P_d$  和滴灌灌溉需水量  $P_{ddr}$  等确定调水量和灌溉方式,可将在外来调水情况下受水区水资源丰缺程度由丰到缺划分为7个等级:

(1)本地水喷灌。本地水资源喷灌需水满足率  $R_{od}/P_d \geq 0.8$ ,受水区水资源最丰富,无需调水,利用当地径流即可满足受水区喷灌农业用水需求;

(2)调水喷灌。调水喷灌需水满足率  $R_{ot}/P_d \geq 0.8$ ,水源地和受水区水资源中等丰富,可以通过调水满足受水区喷灌农业用水需求;

(3)调水滴灌。调水滴灌需水满足率  $R_{ot}/P_{ddr} \geq 0.8$ ,水源地和受水区水资源弱丰富,可以通过调水

满足受水区滴灌农业用水需求;

(4) 调水一熟滴灌。调水滴灌一熟需水满足率  $R_{Ot}/P_{ddr1} \geq 1$ , 水源地和受水区水资源弱缺乏, 可以通过采用滴灌满足受水区农作物一熟制农业用水需求。其中  $P_{ddr1}$  为农作物一熟滴灌需水量, 农作物熟制按光温生产潜力每 8 000 kg/hm<sup>2</sup> 可保证一熟计算。

(5) 调水一熟覆膜滴灌。调水覆膜滴灌一熟需水满足率  $1 > R_{fdr1} \geq 0.8$ , 水源地和受水区水资源中等缺乏, 可以通过采用覆膜滴灌满足受水区农作物一熟制农业用水需求, 其中农作物覆膜滴灌一熟需水量满足率定义为  $R_{fdr1} = (P_{re} + R_{Ot}) / (P_{re} + P_{ddr1})$ 。

(6) 调水一熟覆膜滴灌中垦殖率。调水覆膜滴灌一熟需水满足率  $0.8 > R_{fdr1} \geq 0.6$ , 水源地和受水区水资源严重缺乏, 可以通过采用覆膜滴灌满足大部分受水区农作物一熟制农业用水需求, 但是受水区垦殖率需降低, 达不到最大值 0.8。

(7) 调水一熟覆膜滴灌低垦殖率。调水覆膜滴灌一熟需水满足率  $R_{fdr1} < 0.6$ , 水源地和受水区水资源最严重缺乏, 可以通过采用覆膜滴灌满足受水区农作物一熟制农业用水需求, 受水区垦殖率达不到 0.6。

### 3.3 跨流域调水受水区调水灌溉增产潜力

根据不同的灌溉方式计算熟制与一熟垦殖率, 然后计算播种面积与光温生产潜力, 进而计算经济系数(经济产量同生物产量的比值)与粮食油料生产潜力。根据全球灌溉统计数据、FAO 食物统计数据、耕地和灌溉分布图以及全球气候潜力、光温潜力、径流和覆膜滴灌垦殖率分布格栅数据, 计算得出全球旱作与灌溉耕地总经济系数为 0.2622; 根据经济系数估算受水区的粮油的光温生产潜力、当前粮油产量和调水灌溉增产潜力, 其中受水区当前耕地粮食油料产量按当地耕地面积、灌溉面积、光温潜力、气候潜力计算得出的光温生产潜力和经济系数折算。

计算结果为 9 大区 72 亚区跨流域调水工程总计受水区面积为  $1\ 712.2 \times 10^4$  km<sup>2</sup>, 稍高于俄罗斯的国土面积。滴灌需水量为  $15.0433 \times 10^{12}$  m<sup>3</sup>, 自流域外调入径流量  $5.759\ 5 \times 10^{12}$  m<sup>3</sup>, 滴灌垦殖率约为 48%, 可增产粮油  $36.177 \times 10^8$  t, 为 2017 年全球粮油产量的 89.13%, 跨流域调水 9 大区粮食油料增产潜力见表 1, 全球调水工程 72 亚区粮食油料增产潜力与缺水评价见表 2。

由表 1、2 分析可知:

(1) 中北美大区 7 亚区受水区面积最大, 为 393.7 km<sup>2</sup>, 可调入径流量为  $6\ 711 \times 10^8$  m<sup>3</sup>, 可增产

粮油  $4.563 \times 10^8$  t。其中大平原西亚区可增产量最大, 为  $2.049 \times 10^8$  t, 缺水评价等级为 4; 美西高原和科罗拉多 2 亚区缺水评价等级为 6。

(2) 南美洲大区 7 亚区受水区面积居中等, 水资源丰富, 可调入径流量最大, 为  $10\ 720 \times 10^8$  m<sup>3</sup>, 可增产粮油达  $5.602 \times 10^8$  t。其中中南部亚区可增产量最大, 为  $2.699 \times 10^8$  t, 其次为巴拉圭亚区为可增产  $1.511 \times 10^8$  t, 2 亚区缺水评价等级为 3; 本区只有智利亚区缺水评价等级为 6。

(3) 非洲南大区 4 亚区受水区面积较小, 可调入径流量为  $4\ 077 \times 10^8$  m<sup>3</sup>, 可增产粮油  $2.258 \times 10^8$  t。其中卡拉哈迪亚区可增产量最大, 为  $0.931 \times 10^8$  t, 缺水评价等级为 5; 本区奥兰治河亚区缺水评价等级为 6。

(4) 中西非大区 5 亚区受水区面积较大, 可调入径流量为  $9\ 319 \times 10^8$  m<sup>3</sup>, 可增产粮油  $3.930 \times 10^8$  t。其中中北部亚区可增产量最大, 为  $3.306 \times 10^8$  t, 缺水评价等级为 6; 本区德拉河亚区缺水评价等级为 6。

(5) 东北非大区 8 亚区受水区面积较小, 可调入径流量为  $5\ 429 \times 10^8$  m<sup>3</sup>, 可增产粮油  $2.334 \times 10^8$  t。其中南苏丹亚区可增产量最大, 为  $1.129 \times 10^8$  t, 缺水评价等级为 4; 本区索马里和埃及 2 亚区缺水评价等级为 6。

(6) 欧亚西大区 3 亚区受水区面积较大, 可调入径流量为  $8\ 132 \times 10^8$  m<sup>3</sup>, 背景气候潜力大, 宜农荒地资源丰富, 可增产粮油最多, 为  $8.837 \times 10^8$  t。其中图兰东、图兰西、里海咸海 3 亚区水资源可供量均较丰富, 可分别增加粮油产量  $2.793 \times 10^8$ 、 $3.260 \times 10^8$  和  $2.784 \times 10^8$  t。

(7) 欧亚东大区 8 亚区受水区面积较大, 可调入径流量为  $5\ 267 \times 10^8$  m<sup>3</sup>, 可增产粮油  $5.689 \times 10^8$  t。其中西北内蒙亚区是中国西线南水北调主体工程受水区, 可增产量为  $3.757 \times 10^8$  t, 缺水评价等级为 5。

(8) 欧亚南大区 23 亚区受水区面积较小, 分布较为分散, 可调入径流量为  $6\ 843 \times 10^8$  m<sup>3</sup>, 可增产粮油  $2.097 \times 10^8$  t。其中印度西北亚区可增产量为  $0.227 \times 10^8$  t, 为本区最大值, 缺水评价等级为 4; 其次是水资源丰富的加尔各答和印度东南 2 亚区, 可增粮油产量稍高于  $0.15 \times 10^8$  t, 其余各亚区增产潜力均不足  $0.15 \times 10^8$  t。本区里海东南、卡维尔、赫尔曼德、舒尔河 4 亚区水资源缺乏, 而且增产潜力不足  $0.1 \times 10^8$  t。

(9) 澳洲大区 7 亚区受水区面积最小, 仅为  $60.2 \times 10^4$  km<sup>2</sup>, 可调入径流量为  $1\ 097 \times 10^8$  m<sup>3</sup>, 可增产粮油  $0.869 \times 10^8$  t。其中卡奔塔里亚区可增产

量为  $0.345 \times 10^8$  t,为本区最大,缺水评价等级为4,其次为墨累河亚区可增产量为  $0.204 \times 10^8$  t,缺水评价等级为6。本区墨累河、菲茨罗伊、沙克湾、自流盆地、纳拉伯5亚区水资源缺乏,使本区成为水资源最缺乏的大区。

### 3.4 非受水区耕地节水灌溉增产潜力

根据世界灌溉学会的统计,2016年全球拥有耕地面积  $15.93 \times 10^8$  hm<sup>2</sup>,灌溉面积  $3 \times 10^8$  hm<sup>2</sup>,以喷灌、微滴灌为代表的高效节水灌溉面积仅占灌溉面积的17.5%。这表明全球通过推广高效节水灌溉技术增加粮油产量的潜力很大。根据经济系数和非受水区耕地气候潜力、光温潜力、当前灌溉率、覆膜滴灌垦殖率分布情况计算,当前世界耕地粮油总产量为  $40.59 \times 10^8$  t,其中受水区生产  $5.97 \times 10^8$  t,非

受水区生产  $34.62 \times 10^8$  t;非受水区当前耕地粮油产量  $34.62 \times 10^8$  t中,有  $30.23 \times 10^8$  t为气候潜力产生的,有  $4.39 \times 10^8$  t为灌溉增加的产量;在不进行跨流域调水,而利用本地水资源全面推广覆膜滴灌情况下,非受水区现有耕地可增加的粮油总产量为  $11.722 \times 10^8$  t,其中巴西和印度可增产量最大,分别为2.559和  $2.349 \times 10^8$  t;其次是中国和美国,分别可增产  $0.687 \times 10^8$  t和  $0.574 \times 10^8$  t;可增产  $0.2 \times 10^8$  t以上的国家有阿根廷、澳大利亚、泰国、缅甸、墨西哥、西班牙、法国和土耳其8国;可增产  $0.1 \times 10^8$  t以上的国家有印度尼西亚、俄罗斯、意大利、越南、菲律宾、古巴、尼日利亚、坦桑尼亚、马拉维和乌克兰10国。22国合计可增产  $9.622 \times 10^8$  t,占全球总增产潜力的82.1%(图2)。

表1 跨流域调水9大区粮食油料增产潜力

受水区	受水面积/ 10 <sup>4</sup> km <sup>2</sup>	光温潜力/ 10 (kg·hm <sup>-2</sup> )	滴灌需水/ 10 <sup>8</sup> m <sup>3</sup>	受水区径流/ 10 <sup>8</sup> m <sup>3</sup>	水源区径流/ 10 <sup>8</sup> m <sup>3</sup>	滴灌垦殖率	增产粮油量/ 10 <sup>8</sup> t
1 中北美	393.7	1689	22394	3090	6711	0.438	4.563
2 南美洲	132.5	2287	11955	2780	10720	1.129	5.602
3 非洲南	87.8	2358	9588	816	4077	0.510	2.258
4 中西非	294.9	2591	52952	476	9319	0.185	3.930
5 东北非	103.0	2516	15501	699	5429	0.395	2.334
6 欧亚西	256.1	1174	8893	1256	8132	1.056	8.837
7 欧亚东	279.3	1218	9365	2030	5267	0.792	5.689
8 欧亚南	104.6	2470	12811	2946	6843	0.764	2.097
9 澳洲	60.2	2307	6975	363	1097	0.209	0.869
总计	1712.2	1890	150433	14456	57595	0.480	36.179

全球跨流域调水受水区调水灌溉增产潜力和非受水区耕地节水灌溉增产潜力分别为  $36.179 \times 10^8$  t和  $11.722 \times 10^8$  t,合计为  $47.899 \times 10^8$  t,预测的2050年的世界食物增产量  $16.125 \times 10^8$  t是该增产潜力的33.7%,2100年的世界食物增产量  $40.557 \times 10^8$  t是该增产潜力的84.7%。至此本文得出的结论是对地球人口承载力应持谨慎乐观态度,对全球未来食物生产应采取积极进取的策略,以保障世界食物供给。乐观是由于食物需求未能超出当前农业生产技术水平下的食物生产能力;谨慎是由于有的农业生产能力经济效益差,挖掘潜力难度大,有的调水工程为超大型工程,实施难度大;积极进取的食物生产策略是指从易到难,稳步推进,逐步保障食物供给,如先推广高效节水灌溉技术,后发展跨流域调水灌溉,先建设规模小、效益大的调水工程,后建设

规模大、效益小的调水工程,对超大型调水工程采取由易到难、由近到远逐步建设的策略。

## 4 投入产出估算

本节以欧亚草原2大区9亚区为案例估算调水工程的投入产出情况,进一步对全球9大调水区进行经济效益初步评价,并且按照先易后难的原则确定建设先后顺序。欧亚草原调水工程共计11个,本节对其中的以外流河为水源地的9项工程进行投入产出估算和经济效益分析。根据笔者的估算,欧亚草原9受水区跨流域调水工程总计需投资  $8.932 \times 10^{12}$ 元,折合单线建设成本为  $1.8503 \times 10^8$ 元/km。欧亚草原跨流域调水滴灌垦荒工程总投资为  $23.892 \times 10^{12}$ 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。按30 a建设期计算,每年静态投资为 $7.963 \times 10^8$ 元。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,包括垦荒、发电、航

运和售水4大效益。按30 a计算,欧亚草原跨流域调水滴灌垦荒工程的垦荒总价值为 $44.155 \times 10^{12}$ 元,4项收入总计为 $71.676 \times 10^{12}$ 元,总收入与总投资的比值恰好为3.00<sup>[13]</sup>。

表2 全球调水工程72亚区粮食油料增产潜力与缺水等级评价

编号和名称	受水面积/ $10^4 \text{ km}^2$	光温潜力/ $10(\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2})$	增产粮油 $10^8 \text{ t}$	缺水等级	编号和名称	受水面积/ $10^4 \text{ km}^2$	光温潜力/ $10(\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2})$	增产粮油 $10^8 \text{ t}$	缺水等级
1201 中央谷地	5.3	1965	0.144	3	7203 柴达木	7.6	901	0.141	5
1202 尤卡坦	8.0	2553	0.380	2	7204 东北平原	24.4	942	0.468	1
1203 美西高原	54.5	1442	0.608	6	7205 呼伦湖	14.9	612	0.416	1
1204 大平原西	179.8	1525	2.049	4	7206 戈壁沙漠	10.1	781	0.232	3
1205 科罗拉多	56.9	1598	0.743	6	7207 乌布苏湖	2.1	528	0.022	2
1206 墨西沿海	17.2	2368	0.202	5	7208 杭爱山南	1.3	734	0.021	3
1207 墨东沿海	72.1	2085	0.437	5	8201 西班牙	2.6	1839	0.028	4
2201 中南部	62.2	2310	2.699	3	8202 波河平原	2.3	1687	0.038	2
2202 圣弗朗	13.8	2610	0.718	2	8203 赫尔曼德	16.7	2350	0.080	7
2203 秘鲁	5.2	2323	0.250	3	8204 里海东南	4.6	1960	0.054	6
2204 巴拉圭	31.1	2430	1.511	3	8205 卡维尔	4.7	2225	0.067	6
2205 智利	0.3	1930	0.005	6	8206 舒尔河	1.4	2554	0.013	7
2206 内格罗河	15.6	1844	0.292	4	8207 图兹盆地	0.5	1516	0.014	3
2207 德塞阿多	4.2	1444	0.127	3	8208 印度西北	13.1	2573	0.227	4
3201 莫桑比克	15.4	2486	0.766	3	8209 印度西南	10.0	2615	0.092	4
3202 马达加斯	8.6	2564	0.459	2	8210 加尔各答	6.1	2594	0.163	2
3203 卡拉哈迪	56.1	2313	0.931	5	8211 印度东南	5.7	2667	0.177	2
3204 奥兰治河	7.7	2197	0.102	6	8212 赖布尔	2.8	2597	0.082	3
4201 中北部	274.1	2592	3.306	6	8213 那格浦尔	4.2	2619	0.145	3
4202 塞内加尔	6.4	2640	0.198	4	8214 瓜达尔	0.9	2580	0.047	2
4203 尼日尔河	5.8	2617	0.302	3	8215 斯里兰卡	1.4	2626	0.062	2
4204 德拉河	2.1	2270	0.016	7	8216 孟加拉国	5.7	2547	0.129	1
4205 科托河	6.6	2613	0.108	5	8217 曼德勒	1.9	2585	0.063	2
5201 索马里	15.7	2635	0.195	6	8218 密支那	0.9	2484	0.039	2
5202 埃及	38.1	2320	0.550	6	8219 泰国西部	4.8	2644	0.129	2
5203 南苏丹	29.9	2629	1.129	4	8220 颂堪河	2.5	2560	0.074	1
5204 苏丹红海	0.8	2683	0.047	2	8221 蒙河	3.2	2604	0.095	2
5205 阿瓦什河	2.5	2715	0.072	4	8222 洞里萨湖	3.0	2628	0.128	2
5206 坦桑索马	14.0	2621	0.244	4	8223 湄公河	5.5	2620	0.148	2
5207 坦桑尼亚	1.3	2508	0.066	2	9201 墨累河	22.0	2090	0.204	6
5208 洛蒂基皮	0.5	2632	0.030	2	9202 沙克湾	5.4	2465	0.045	7
6201 图兰东	75.4	1418	2.793	3	9203 菲茨罗伊	6.1	2614	0.090	6
6202 图兰西	124.1	966	3.260	3	9204 卡奔塔里	12.3	2596	0.345	4
6203 里海咸海	56.6	1305	2.784	2	9205 自流盆地	6.2	2404	0.058	7
7201 华北平原	36.7	1735	0.632	3	9206 纳拉伯	6.6	2038	0.066	7
7202 西北内蒙	182.3	1259	3.757	5	9207 帕斯滨海	1.7	2100	0.062	2

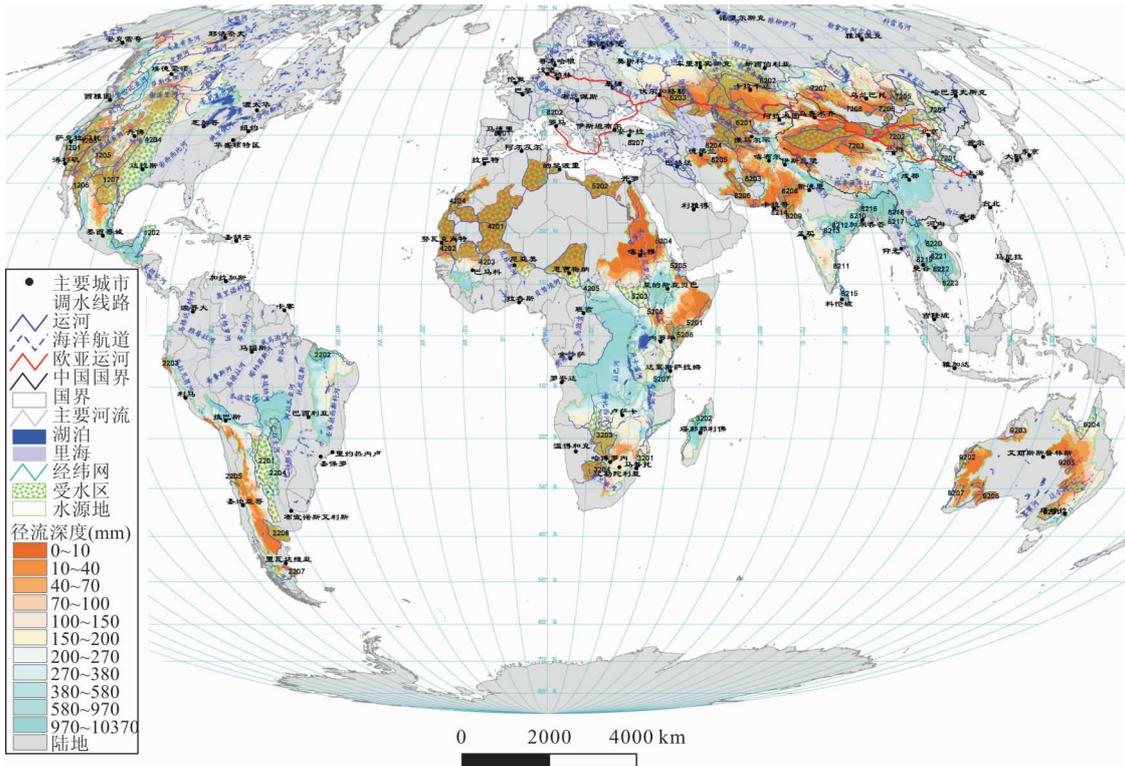
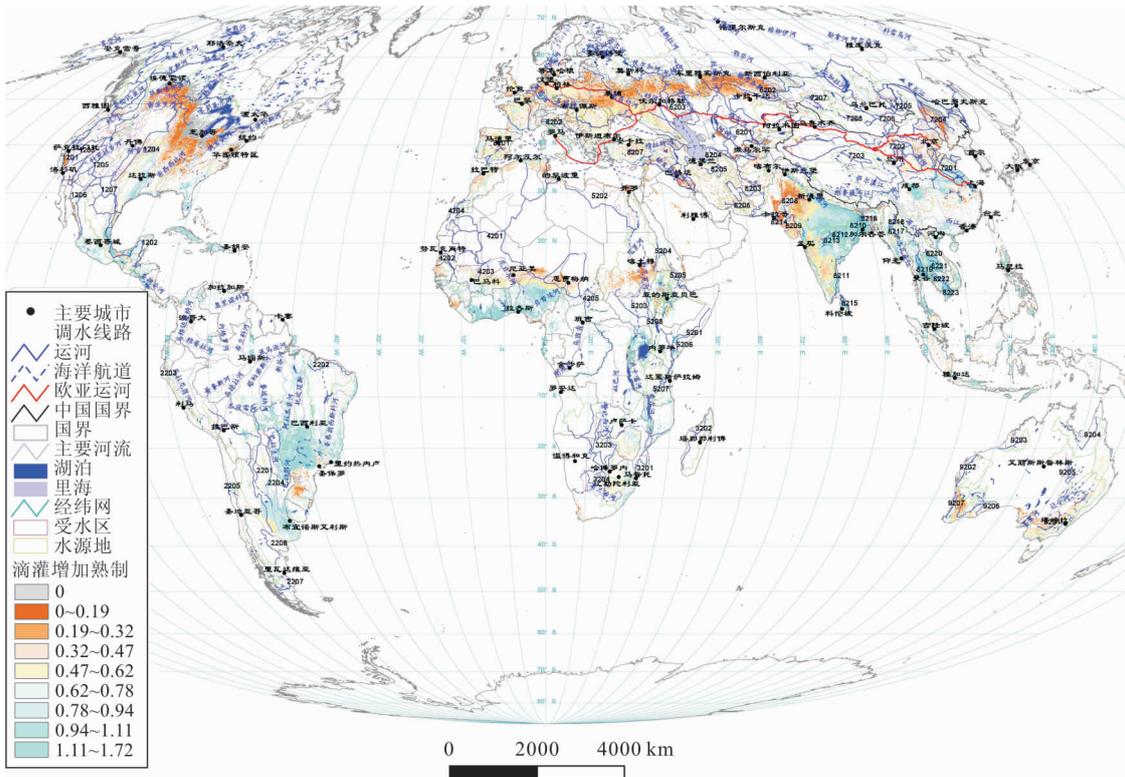


图 1 全球跨流域调水灌溉工程的水源区与受水区及径流深分布



注:图中数字为 72 亚区编号

图 2 全球耕地本地径流灌溉增产潜力

按照估算的总投资和总收入计算调水工程的静态投资回收期,结果为回收期短于 10 a 的亚区工程

有东北平原调水工程、华北平原调水工程、里海咸海低地调水工程,其经济效益最佳,建设优先度较高;

回收期介于 10 ~ 12 a 之间的工程有图尔盖图兰东调水工程、中国大西北内蒙古调水工程、库仑达图兰西调水工程,其总投资额度大,工程复杂,具有多重功能,工程收益也较大,经济效益居中,优先度较低;回收期长于 12 a 的有柴达木盆地调水工程、呼伦湖调水工程、戈壁沙漠调水工程,由于工程规模较小,建设周期短,内部收益率较高,按照工程容易者优先的原则,其优先度不低于超大型调水工程。

GIS 计算结果表明,全球跨流域调水工程 9 大区 72 项调水工程水源区面积总计为  $3\,563.42 \times 10^4 \text{ km}^2$ ,是俄罗斯面积的 2 倍多;建设调水线路总长  $20.471 \times 10^4 \text{ km}$ ,是赤道周长的 5 倍多。根据欧亚草原 9 项调水工程线路单线建设长度的单位长度建设成本,按照全球 9 大区跨流域调水线路的单线建设长度估算调水工程成本,并按照欧亚草原 9 项调水工程的辅助工程成本与线路建设成本的比率估算 9 大区的调水灌溉总成本,得出 9 大区 72 项调水线路工程成本大约为  $38.215 \times 10^{12}$  元人民币,加上支渠、蓄水池、喷灌滴灌设备、宜农荒地价值成本,5 项成本总计大约为  $102.220 \times 10^{12}$  元人民币,约为调水工程成本的 2.675 倍。全球调水灌溉总成本稍多于中国 2018 年的 GDP 总量  $90.03 \times 10^{12}$  元人民币;按汇率 1 美元兑 7.0382 元人民币,折合  $12.792 \times 10^{12}$  美元,是 2018 年世界 GDP 总量  $84.84 \times 10^{12}$  美元的 15.08%。

欧亚草原 9 亚区的总收益包括垦荒总价值、售水收入、售电收入、航运价值,约为垦荒总价值的 1.623 倍。按此推算,全球 9 大区调水垦荒总价值按

照增产粮食估算为每年  $3.618 \times 10^{12}$  元,每年总收益为  $5.872 \times 10^{12}$  元,按总成本  $102.220 \times 10^{12}$  元人民币计算,静态投资回收期为 17.41 a。

从粗略计算的静态投资回收期来看,9 大区中南美洲大区调水项目建设成本低,收益高,经济效益最佳,投资回收期最短,仅为 7.77 a;欧亚南大区跨越山脉的运河水运通道建设成本所占比重较大,拉高了单位调水量建设成本,经济效益最差,投资回收期最长,达 57.38 a,若取消 4 个水运通道中的 2 个,可以明显减少工程成本,如取消地中海-幼发拉底河-波斯湾运河通道和伊朗的里海-波斯湾第二通道(未被选作运粮通道)。澳洲大区总投资回收期长达 37.37 a,澳大利亚缺水评价等级为 7 的 3 个亚区调水工程经济效益较差,拉低了整体经济效益,也应考虑取消。中北美大区的总投资回收期为 29.08 a,其中美国西部山间盆地和科罗拉多河流域调水项目由于地形崎岖,需长距离扬水发展灌溉,地面坡度较大,无法集中连片开发,经济效益和开发条件远不如大平原西受水区,拉低了本大区调水项目的经济效益,可以通过调整规划和改变优先建设次序提高调水工程经济效益,缩短投资回收期。其他大区总投资静态回收期在 9.7 ~ 18.7 a 之间,接近或低于平均值,项目可行性均较强,但是大区内部亚区子项目之间的经济效益也有较大差异,一般缺水评价等级为 7 的项目可行性最差(表 3)。限于篇幅,本文对亚区之间的经济效益比较研究只涉及了上述欧亚草原 9 亚区,没有估算其他 63 个调水亚区的投资回收期。

表 3 全球 9 大区调水工程经济效益评价

简称	水源地面积/ $10^4 \text{ km}^2$	单线建设长度/ $10^4 \text{ km}$	调水成本/ $10^{12}$ 元	调水量/ $10^8 \text{ m}^3$	单位成本/ (元· $\text{m}^{-3}$ )	增产粮油量/ $10^4 \text{ t}$	静态投资回 收期/a
中北美	522.30	4.351	8.050	6711	11.995	4.563	29.08
南美洲	368.61	1.428	2.642	10720	2.465	5.602	7.77
非洲南	255.67	1.383	2.558	4077	6.273	2.258	18.67
中西非	311.83	2.154	3.984	9319	4.275	3.930	16.71
东北非	436.49	1.317	2.437	5429	4.488	2.334	17.20
欧亚西	473.92	1.747	3.831	8132	4.711	8.837	9.72
欧亚东	511.72	3.080	5.444	5267	10.335	5.689	10.40
欧亚南	452.67	3.946	7.300	6843	10.668	2.097	57.38
澳洲	230.21	1.065	1.971	1097	17.966	0.869	37.37
总计	3563.42	20.471	38.215	57595	6.635	36.179	17.41

## 5 结论与展望

调水灌溉工程对保障世界粮食供给意义重大。粮食增产途径有两类,一为内涵扩大再生产,主要指通过推广优良农作物品种和水肥一体化灌溉技术等增加单位面积产量,需要以开发利用水资源发展灌溉为前提;二为外延扩大再生产,主要指通过早作垦荒、灌溉垦荒或毁林开荒增加耕地面积。由于湿润半湿润地区的早作垦荒潜力已经挖掘殆尽;干旱半干旱地区的早作垦荒容易造成土地沙漠化;并且世界各国制定了保护森林的环境保护政策,禁止毁林开荒;灌溉垦荒将是未来耕地面积增加的重要方式。合理开发水资源,因地制宜发展高效节水灌溉是未来世界各国增加耕地面积,提高粮食油料产量,保障食物供给的有效手段。

本文涉及调水灌溉垦荒和利用现有耕地发展高效节水灌溉两种主要提高食物产量的手段,得出的主要结论有:

(1)调水垦荒工程是世界未来食物增产的重要工程。全球72项调水工程增产潜力巨大,经济效益明显,能够基本满足日益增长的人类对粮食油料的需求。调水灌溉工程能够实现受水区增产粮食油料接近世界对粮食油料需求的增长。

(2)高效节水灌溉投资少、见效快,应当优先发展。按照先节水后调水的水资源利用原则,在现有耕地上发展高效节水灌溉的增产潜力约为调水灌溉增产潜力的1/3,是近期世界食物生产增长的主要来源,其投资成本较低,经济效益较高,建设优先度一般较高。

(3)全球调水工程综合考虑各种环境因素,设计合理,工程技术可行。各类调水工程涉及的大坝、隧洞、运河、渡槽、内河航道、陡坡降航道和隧洞航道等工程技术均为成熟技术,中国在许多工程技术领域居世界领先水平。

(4)多数调水工程经济效益明显,技术经济可行性强。建设周期短、经济效益较好的调水项目可以优先发展,超大型调水项目可以分期建设,经济效益较差的项目则可以通过调整建设方案、优化设计增强其技术经济可行性。

(5)超大型调水工程遵循内河航运同步建设原则,利用调水运河发展内河航运,便于未来受水区的农产品廉价运输,提高农产品竞争力,对促进全球内陆地区的经济发展意义重大,如欧亚草原、非洲中部、南美洲中南部和北美洲大平原西部地区。

展望世界调水工程发展的未来,有待进一步研究的问题主要有:

(1)水资源开发资金筹措问题。水资源开发需要大量投资,非一国之力能及,需全球主要经济体和当事国共同投资。全球调水72项工程涉及的经济强国又是调水当事国有美国、中国、印度、巴西、意大利、加拿大、俄罗斯、澳大利亚、西班牙、墨西哥10国;主要当事国有阿根廷、哈萨克斯坦、乌兹别克斯坦、土库曼斯坦以及南部非洲和中西部非洲国家;其他GDP居世界前15名的经济强国有日本、德国、英国、法国、韩国。

(2)水资源开发资金国际合作问题。对于仅涉及一个国家的项目,其水资源开发资金筹措较容易,工程实施只决定于项目的投入产出比的高低和规模大小,如澳大利亚、马达加斯加、斯里兰卡、缅甸、西班牙、意大利、土耳其等国的工程,以及大国内部的中小型跨流域调水工程,如中国、印度、巴西东部、阿根廷南部、泰国西部。超大型跨流域调水项目由于其性价比高,可以建立国际合作开发机制,通过多边谈判达成共同开发协议,实施可能性较大。如北美洲水电联盟(NAWAPA)、欧亚草原向心调水、非洲南水北调、南美洲北水南调。敌对国家水资源联合开发较难实施,开展跨流域调水需严格遵守流域水资源利用协议,如印度-巴基斯坦,伊朗-阿富汗,埃塞俄比亚-索马里,苏丹-南苏丹,或需要等待国际关系缓和之后工程才能实施。

(3)大国在全球调水工程中的角色问题。世界政治经济大国中国、美国、俄罗斯3国应在调水工程建设中起引领作用,3国均有超大型调水工程,且优势互补,应当密切协作,协调各利益相关国共同参与,明确产权,利益共享,鼓励全球各国积极参与,各尽所长。中国是人口大国和食物进口大国,更应当对全球调水工程起主导作用,以便能够发挥发达国家的资本和技术优势,发展中国家的劳动力、水资源、土地资源等优势,共同建设人类命运共同体。

(4)调水工程与经济发展关系问题。调水工程将大大促进工程技术与装备制造业的发展,刺激制造业强国的经济发展,工程建设将有利于促进调水当事国的工程技术和农业技术进步、增加劳动力就业、加快城镇化发展和提高经济增长速度。中国向全世界发出了建设“一带一路”的合作倡议,并成立了亚洲开发银行,全球调水工程可以依托中国的融资平台开展建设,促进发展中国家经济快速发展。

(5)全球调水工程与中国经济发展。中国经济

正经历由高速发展向中高速发展的转型期,国内主要交通基础设施建设已进入尾声,房地产建设也接近饱和,急需新的大型基础设施建设项目维持经济的快速稳定发展,全球跨流域调水工程为中国经济发展带来了前所未有的机遇,在建设期可以促进中国的劳动力非农就业和城镇化发展,加快经济发展速度,建成后可保障国内食物自给,大大增强综合国力,使中国进入发达国家行列。

### 参考文献:

- [1] 科恩,陈卫. 地球能养活多少人[J]. 人口研究,1998,22(5):69-76.
- [2] 联合国粮食及农业组织. 统计数据库(FAOSTAT)[EB/OL]. [2019-03-12]. <http://www.fao.org/faostat/zh/#data/OA>.
- [3] HOPPER D W. The development of agriculture in developing countries[J]. Scientific American,1976,235(3):196-205.
- [4] DE SOUZA. ANTHONY R, FOUST J B. World-space economy[M]. Ohio,USA;Bell & Howell Company,1979.
- [5] MEKONNEN M M ,HOEKSTRA A Y . Four billion people facing severe water scarcity[J]. Science Advances,2016,2(2):e1500323.
- [6] GLEESON T,BEFUS K M,JASECHKO S,et al. The global volume and distribution of modern groundwater[J]. Nature Geoscience,2015,9(2):161-170.
- [7] DÖLL P,FIEDLER K . Global-scale modeling of groundwater recharge[J]. Hydrology and Earth System Sciences,2008,12(3):863-885.
- [8] 梁书民,于智媛. 用经验径流系数推算全球径流深度分布场[J]. 干旱区研究,2018,35(1):1-11.
- [9] 梁书民,于智媛. 我国水资源的农业开发潜力评价及对策[J]. 农业经济问题,2016,37(9):61-70+111.
- [10] RICHTS A,STRUCKMEIER W F,ZAEPKE M. WHYMAP and the groundwater resources map of the world 1: 25,000,000[M]. Springer,Dordrecht,2011:159-173.
- [11] GLEESON T,MOOSDORF N,HARTMANN J,et al. A glimpse beneath earth's surface:GLobal HYdrogeology MaPS (GLHYMPS) of permeability and porosity[J]. Geophysical Research Letters,2014,41(11):3891-3898.
- [12] FAN Y ,LI H ,MIGUEZ -MACHO G . Global patterns of groundwater table depth[J]. Science,2013,339(6122):940-943.
- [13] 梁书民,于智媛. 欧亚草原跨流域调水与内河航道工程技术分析[J]. 水资源与水工程学报,2017,28(4):107-118.
- [14] 周曙东,赵明正,陈康,等. 世界主要粮食出口国的粮食生产潜力分析[J]. 农业经济问题,2015,36(6):91-104+112.
- [15] FISCHER G, SHAH M, VELTHUIZEN H V, et al. Global agro-ecological zones assessment for agriculture (GAEZ) [R]. IIASA, Laxenburg, Austria and FAO, Rome, Italy:FAO and IIASA,GAEZ database,2008.
- [16] Food and Agriculture Organization of the United Nations. The future of food and agriculture trends and challenges [R]. Rome,Italy:FAO,2017.
- [17] Food and Agriculture Organization of the United Nations. The future of food and agriculture Alternative pathways to 2050[R]. Rome,Italy:FAO,2018.
- [18] 王光谦,欧阳琪,张远东,等. 世界调水工程[M]. 北京:科学出版社,2009.
- [19] DENISTON B. Expanding NAWAPA XXI:Weather modification to stop starvation[J]. Executive Intelligence Review-feature,2013(8):49-57.
- [20] The Schiller Institute. Maps of great infrastructure development projects around the world[R]. Washington D C, USA;Schiller Institute Inc. ,2018.
- [21] TACHIKAWA T . The characteristics of ASTER GDEM version 2[C]// Proc IGARSS 2011 Symposium, Vancouver, Canada,2011.
- [22] LEHNER B ,VERDIN K ,JARVIS A . New global hydrography derived from spaceborne elevation data [J]. Eos Transactions American Geophysical Union,2013,89(10):93-94.
- [23] The Land and Water Division of FAO. Global land cover - SHARE(GLC - SHARE)[R]. Rome,Italy:Food and Agriculture Organization of the United Nations,2013.
- [24] FAO SOILS PORTAL. Harmonized world soil database v1.2 [EB/OL]. [2019-03-16]. <http://www.fao.org/soils-portal/soil-survey/soil-maps-and-databases/harmonized-world-soil-database-v12/en/>.
- [25] SIEBERT S, HENRICH V, FRENKEN K, et al. Global map of irrigation areas version 5 [M]. Rheinische Friedrich - Wilhelms - University, Bonn, Germany, Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, Italy,2013.
- [26] ET DRAINAGE C I I ,DORGANISATION C. International congress on irrigation and drainage[M]. CIID bulletin. 1981.
- [27] HUDSON J C. Goode's world atlas[M]. USA;Rand McNally & Company,1999.