



地下调洪灌溉 (UTFI) : 全球应用前景分析 (下篇)

UTFI适宜性区域分析

将空间栅格UTFI适宜性结果汇总起来, 可以得出对UTFI有高适宜性的人口总数、城市数量和作物面积的估计值。对具有较高适宜性的区域(得分 >50)中人口和作物面积的数据进行分析, 可以发现合适的地区主要是人类居住区还是作物面积, 或者两者相当。表5总结了所有地理区域的结果。在全球范围内, 高和非常高适宜性的地区约有38亿人口, 作物面积为6.22亿公顷, 分别占全球人口和作物面积的约50%和40%。全球40%的作物面积(不包括牧场)包含在对UTFI适宜性高或者非常高的全球11%的土地面积中。这表明, 大量的农田可能会受益于更多的可用水量来扩大灌溉并增加已经灌溉地区的耕种强度。此外, 共计有197个城市的超过50万人生活在高适宜性的地区。

南亚(包括伊朗)、东亚和撒哈拉以南非洲在人口和作物面积有高和非常高的UTFI适宜性区域名单里名列前茅。从绝对值看, 南亚对UTFI有高适宜性地区的人口和作物面积的价值要高得多(与其他区域比较), 是因为印度、巴基斯坦和孟加拉国的人口密度高、耕种强度大。紧随其后的是东南亚, 与作物面积相比, 这里人口众多, 适宜性高。南美洲和中美洲人口和作物面积高适宜性的比例也不错($>45\%$), 尽管在绝对值方面远低于南亚、东亚和东南亚地区。北美洲的比例较低($<30\%$), 但UTFI高适宜性的作物面积绝对值很高(6200万公顷), 反映出美国

高平原地区的粗放耕作方式。UTFI在西亚、北非、欧洲、俄罗斯和中亚地区的潜力有限。从城市数量的数据也可以明显看出类似的趋势。整体看来, 南亚的适合开展UTFI的城市数量最多(39), 其中包括两个人口超过1000万的特大城市(德里和达卡)。

南亚和东亚UTFI适宜性得分比较高, 是因为它们在面对频繁的洪水和干旱时十分脆弱。此外, 这些区域有广泛的冲积含水层系统, 比如印度河-恒河-布拉马普特拉河流域穿过北印度、东北巴基斯坦和孟加拉国以及中国的华北平原含水层。这与高度依赖地下水进行灌溉的广泛农业系统相吻合, 导致许多地区出现了过度开采的情况。因此, 在这些地区, UTFI可能还为在含水层蓄水捕获洪水提供了条件, 这可以通过增加旱季的可用水量并减轻诸如恒河、印度河、黄河、长江等大型河流的洪水造成的破坏来帮助维持地下水的可持续发展。Chinnasamy等人(2018年)和Khan等人(2014年)研究了利用含水层蓄水来补给季风流量和对减少洪水的影响, 以及来提高恒河流域地下水位的潜力。这两项研究都指出, 这种方法在减轻洪水的负面影响和提高地下水位方面是有效的。然而, 为了地下水的可持续开发, UTFI干预措施也需要与适当的管理一起考虑进来, 包括合适的政策与规章制度。同时, 在规划和实施UTFI时, 区域内的巨大差距也是需要考虑的重要因素, 比如恒河流域, 西北部各邦地下水被过度开采, 而东部各邦的地下水开发力度不足。

干旱与洪水在撒哈拉以南非洲也非常普遍, 占自然灾害相关的死亡率的80%和经济损失的70%。其中干旱更为普遍, 而洪水一般多发在主要的河系和许多城市地区。这一点反应在高供需适宜性得分中。基于需求的适宜性比基于供应的适宜性更高、更广泛, 后者仅限于阿瓦什河、沃尔特河和塔纳河等主要流域及其周边地区。撒哈拉以南非洲的含水层潜力与南亚和东亚又有所不同。因为水井的产量和储存能力有限, 撒哈拉以南非洲的含水层生产力通常不高。此外, 撒哈拉以南非洲的地下水利用率有限, 与因为过度开采导致含水层枯竭的南亚和东亚相比几乎可以忽略不计。然而, 尽管基岩含水层的井产量总体很低, 撒哈拉以南非洲仍然有足够的地下水资源, 而且许多研究已经认识到在该区域开发浅层地下水的潜力和需求, 尤其是用于农业灌溉。因此, 含水层生产力和储存能力的限制加上地下水的有限使用, 可能会影响UTFI的实施与成本。然而, UTFI是对许多流域的洪水和干旱进行共同管理的一种补充方式, 同时通过增加地下水蓄水量以及发展地下水灌溉, 使农业在面对干旱事件时更有抵抗力。

在东南亚, 相对于作物面积而言大量人口有较高的UTFI适宜性, 主要是由于人口密度高。这一点

反映在该地区的城市数量上。该地区的特点是洪灾频发, 并且由于主要季风季节的年内变化, 导致干旱也反复出现。由于没有足够的应对能力, 这两种水文极端会对该地区最不发达的三个国家(老挝、柬埔寨和缅甸)以及其他较为发达的国家造成经济、农业和生命的巨大损失。例如在越南, 2016年2月至5月的干旱期间有200万人无法获得饮用水和生活用水, 110万人面临粮食安全问题, 超过200万人由于生计受损或丧失而失去收入。因此, 可行性分析表明, 考虑到该区域对极端天气时间的脆弱性与有限的应对能力, UTFI有潜力成为降低东南亚灾害风险并带来显著效益的有价值的新方法。UTFI的实际实施与成功依赖于很多参数, 包括技术、机构、金融、社会等各方面, 这就需要进行详尽的区域性分析, 本项研究并不涉及这个领域。

UTFI在某些地区的有限潜力反映出多余可用水量的缺乏, 比如中东和北非洪水和低种植强度、欧洲对干旱的脆弱性、俄罗斯和中亚的低耕种强度和低人口密度, 这反映在较低的需求适宜性得分上。但是, 这些区域内的空间异质性可能为在更局部的范围考虑和实施UTFI提供机会。



图 7. 根据 WRI 对 100 个人口最多的流域的调查确定的 16 个 UTFI 适宜性较高的流域的分布情况 (得分 >50)

UTFI适宜性:河流流域分析

本次空间分析选定了16个对UTFI有高适宜性(得分>50)的流域(从WRI认定的100个人口最多的流域中选出)(图7)。表6体现了这16个流域的详细信息,包括流域人口和作物面积(所有100个流域的数据见附录3)。在数量方面,撒哈拉以南非洲的流域最多(5个),但大部分的人口(77%)和作物面积(62%)则集中在南亚。这主要是因为恒河-雅鲁藏布江流域面积较大,人口密度高。

这里列出的100个流域并非穷尽的,但有助于明确UTFI在全球范围内某些重要流域的适宜性。可能还有其他有较高适宜性的流域并未包含在本研究中。如果将上述大型流域中的子流域也考虑在内,则在恒河流域的UTFI适宜性评估中,适宜性的空间异质性尤为突出(Brindha和Pavelic, 2016年)。这一点在流域范围内规划UTFI干预措施时非常重要。图7和图8中,几个整体得分低于50的比较大的流域(图7中未显示)有一些高适宜性的地区,

但整体UTFI适宜性仍然偏低(比如克里希纳河、长江、赞比西河、印度河流域)。

经济分析

由于UTFI规划最好能在流域范围内实施,又考虑到它也是一个独特的水文单位,因此有必要在流域范围内进行经济可行性分析。本文从不同区域选择了三个UTFI适宜性较高的流域。这是因为考虑到气候、水文、水文地质和社会经济变量的差异,预计实施UTFI的成本和收益会在空间上有所变化(Arshad等, 2013年)。

选定河流的流域特征

研究的三个流域分别是埃塞俄比亚的阿瓦什河流域,印度的拉姆根加河流域(恒河支流)以及泰国的昭披耶河(图8)。这几个流域的UTFI适宜性综合得分较高(表6),并且所在地域,即东非、南亚

表 5. 世界不同地区 UTFI 适宜性从高到非常高 (得分 > 50) 的总人口数量、城市数量及作物面积。

区域	人口数量		城市数量		作物面积	
	百万	百分比 ^a	小 ^b	大 ^c	百万公顷	百分比 ^d
南亚	1496	87	37	2	179	78
东亚	696	46	23	1	79	52
撒哈拉以南非洲 ^e	462	51	28	0	88	47
东南亚	385	72	12	0	60	55
南美洲	209	61	24	1	49	45
中美洲	119	74	15	1	28	62
欧洲 ^f	118	21	13	0	25	14
北美洲	104	30	13	0	62	27
西亚	73	31	9	0	12	30
北非	65	33	7	0	18	56
中亚 + 俄罗斯	40	19	7	0	15	9
其他 ^g	26	42	4	0	7	27
总计	3793		192	5	622	



图 8. 阿瓦什河、拉姆根加河和昭披耶河流域的位置分布

和东南亚, 实施UTFI可行性较高(图6; 表5)。此前对这三个选定流域展开了流域尺度水文研究, 再次确定了流域洪水的高发性、与干旱/缺水相关的问题以及水资源供需的季节性失衡这几个问题。在拉姆根加河展开了一项UTFI试点研究, 流域尺度的建模分析表明这里实施UTFI的潜力较大。表7总结了这三个流域的主要特征。三个流域都会面

临洪涝和干旱问题, 这是因为年内和年际用量较大, 影响农业、社会 and 经济发展。虽然大问题相似, 但在生物物理和社会经济特征方面这三个流域还是有很大不同。

阿瓦什河流域位于埃塞俄比亚东北部的干旱低地, 是该国开发利用率最高的流域。这得益于土地和水资源的可用性、良好的交通基础设施以及该国首都(亚的斯亚贝巴)也位于流域内。阿瓦什河自西向东流向与吉布提交界的阿贝湖, 其流域的大部分(约99%)位于埃塞俄比亚境内。阿瓦什河流域分为三个农业气候区(上游、中游、下游河谷), 降雨量从西部高地(约1700毫米/年)到东部干旱低地(约200毫米/年)递减。大部分降雨(60-80%)发生七八月份, 导致早期长, 出现缺水情况。流域内年际和年内降雨多变, 容易导致严重的干旱和洪水。干旱是一种反复发生的自然灾害, 洪水则仅限于季节性降雨密集的低地地区, 河流附近的居民点洪水泛滥。当地主要是雨养农业, 只有不到2%的种植面积

表 6. 位于世界不同区域的 16 个流域列表, 包括 UTFI 适宜性高 (得分 > 50) 的人口和作物面积

区域	流域	人口数量 (百万)	作物面积 (百万公顷)
撒哈拉以南非洲	沃尔特河	29	9
	谢贝利河	25	4
	阿瓦什河	12	2
	塔纳河	7	1
	萨维河	3	1
南亚	恒河 - 雅鲁藏布江	674	62
	戈达瓦里河	75	17
	默哈讷迪河	36	7
东南亚	湄公河	55	14
	昭披耶河	20	4
南美洲	马格达莱纳河	36	3
	巴纳伊巴河	4	2
北美洲	萨克拉门托河	7	2
	布拉索斯河	3	4
中美洲	巴尔萨斯河	12	2
	格里哈尔瓦河	9	4

能够得到灌溉。该流域极易受到与天气有关的事件的影响。这里的主要种植季节(称为Meher)时间与六至九月的多雨季节重合。在中低河谷,没有灌溉就无法种植,因为这里的年潜在蒸发量超出年降雨量一个数量级。据Adeba等人的研究,在雨季储存可用的地表水可以极大地减轻流域内的缺水问题。

拉姆根加河流域是恒河流域的主要支流之一。恒河是世界上流域面积最大(120万平方千米)、人口最多(6.55亿人)的跨境流域之一,流经印度、中国、尼泊尔和孟加拉四个国家。拉姆根加河流域的年平均降水量约为900毫米,其中90%集中在6月至9月的季风期,剩下的10%的降水则出现在其余8个月内。这也就导致该流域季风季节洪水频发、旱季却严重缺水,影响了生活和农业用水供应。一项持续12年的跟踪记录表明,12年中有4年发生了大洪水,平均淹没范围约为800至1000平方公里。作物种植集中在与季风期同步的雨季(6月至10月)和冬季(11月至3月),而夏季(4月至5月)则很少进行种植。主要的种植作物包括水稻、小麦和甘蔗。雨季的季风降雨通常能够满足农作物对水的需求,而其他时间,尤其是夏季,灌溉的作用就凸显出来,因为此时降雨较少限制了作物种植。尽管旱季面临缺水的问题,由于该地区拥有储量且回补快的中央平原含水层,该区域仍以大范围的地下水灌溉为主,正是这些含水层促进了生产并缓解了干旱的影响。但与此同时,这也导致了地下水的过度开采及相关的水质等问题,威胁着该区域未来的可持续发展。

位于泰国境内的昭披耶河流域覆盖该国30%土地面积,40%的人口,78%的劳动力,贡献66%的国内生产总值。该流域气候为热带季风气候,年降雨量在1000到1500毫米之间,其中90%集中在5月到10月。存在典型的季节性水资源不平衡问题:雨季洪水泛滥,旱季严重缺水。该流域洪水频发,造成了巨大的经济损失,干旱也一样。农业区主要集中在该流域的中游和下游,主要种植水稻和甘蔗。灌溉主要依赖地表水,旱季的灌溉面积受限于地表水的可用量。除此之外,地下水也是灌溉的替代水源。干旱同样也不可避免,而且受到下游大曼谷都会区快

速发展的城市化和工业化影响,加上旱季种植的增加,有逐渐加剧的迹象。因此,捕获地下水来缓解季节性缺水,对满足农业、工业、城市用水需求和增进流域可持续的地下水管理有显著影响。

模型框架

在流域范围内开发并应用的经济分析框架见图9。表8是分析中涉及的成本和收益组成部分的概述。为了使框架简单好操作,分析只考虑了较容易获得的成本和效益。考虑到将地下水的原地效益转化为货币价值的难度,一些效益并没有被纳入考量范围:改善依赖地下水的生态系统(假设并非所有的补给水都被开采),增强对气候变化的韧性,控制地面沉降和防止海水入侵。同样,分析也并未考虑补给水的机会成本(包括下游的使用),因为这需要对水文系统进行详细核算和建模。此外,由于补给水的预处理费用因地表水质不同而存在差异,研究只是间接地计算维护成本。

用于确认经济可行性的三个指标是效益成本比(BCR)、内部收益率(IRR)和净现值(NPV)。在证明固有参数的不确定性时,将一系列值视为模型中的关键变量进行情景分析。该模型的结构提供了一个统一框架来收集并使用本地数据衡量经济可行性,从而在三个流域之间进行比较。在UTFI建模项目的整个周期中,用于计算这些指标的年度成本和收益(现金流)基于下文讨论的一组变量和假设。表9总结了建模框架中的主要假设。

总成本和总效益由“设计补给量(DRV)”驱动,该术语用于定义在人类和环境要求之外的雨季中过量的地表水流量,它将给下游带来潜在的洪水风险并可以通过UTFI捕获并用于地下水补给。DRV是根据现有的水文模型研究(阿瓦什河和拉姆根加河)或流量观测(昭披耶河)确定的,并考虑了流域的水供应和需求。拉姆根加河的DRV是每年3.25立方千米。补给这个数量的水将使15年一遇的洪水淹没的面积减少24%。阿瓦什河的DRV是每年2.41立方千米。这是基于雨季(6月至9月)供需之间的平

均缺口,在考虑了家庭用水、工业、农业和环境流量所需水量后,使用土壤和水评估工具(SWAT)确定的。昭披耶河的DRV是每年3.36立方千米,平均每四年才具备一次可用性。该流域的DRV基于洪水频率,通过将观测到的月流量与一个阈值(5立方千米/月)进行比较来确定的。如果一年中的任何一个月超过了这个值,那这一年就被视作洪水年。基于这个标准,46年中有11年被归为洪水年,约等于每四年发生一次。因此,尽管DRV在阿瓦什河和拉姆根加河流域每年都可用,但在昭披耶河流域每四年才具备一次可用性。

假设在补给到含水层的总DRV中只有75%可以通过抽取地下水用于消耗,而剩余的25%将流出并作为基流成为地表水流的一部分。这个关于基流贡献的假设适用于所有三个流域,而且以综合水文模型得出的基流值为基础,该模型已经考虑了拉姆根加河流域的UTFI。尽管基流对生态系统服务有益,且其中一部分可能被下游获得并用于消耗,我们仅保守计算了来自回补量的效益。

UTFI涉及多个问题、多部门 and 多个利益相关方,因此对总成本和效益的分析是在聚合流域尺度上开展的,而没有具体提及任何特定的利益相

表 7. 阿瓦什河、拉姆根加河和昭披耶河流域的主要生物物理和社会经济特征概况

		阿瓦什河	拉姆根加河	昭披耶河
总体	整体 UTFI 评分	61	83	73
	国家	埃塞俄比亚	印度	泰国
	面积 (平方千米)	112,030	30,115	159,000
	经济状况 ^a	低收入	中等偏下收入	中等偏上收入
	人口 (百万) ^b	13.8	31.1	28.5
气候	雨季	6月至9月	6月至9月	5月至10月
	旱季	10月至2月	11月至5月	11月至4月
	年降雨量	200-1700	900-1000 毫米	1000-1500 毫米
	雨季降雨量	60-80%	> 80%	> 80%
	洪水频率 ^c	2-3年	3-4年	3-4年
	干旱频率 ^c	2-4年	4-5年	2-4年
	气候变化脆弱性 ^d	极端风险	极端风险	极端风险
农业与灌溉	作物面积 (占总面积的百分比) ^e	24	83	29
	作物密度 (%) ^f	99	188	163
	灌溉 (占作物面积的百分比) ^g	5	71	65
	主要作物	苔麸、玉米、甘蔗、棉花	水稻、小麦、甘蔗、玉米	水稻、甘蔗、玉米
地表水	河流长度 (千米)	1250	595	866
	流域产量 (立方千米/年) ^h	4.6	6.7	22.6
	跨境流域 ⁱ	是	是	否
地下水	含水层类型	火成岩和部分冲积沉积物	冲击岩 (非承压)	多个 (非) 承压的粗砂 / 砾石含水层
	地下水灌溉 (占总灌溉的百分比) ^g	1	69	13

关群体(如农民、水资源管理者、城市规划者等)。尽管我们可以将UTFI的部分效益(和成本)映射到特定的利益相关方,但为了保持一致,表8中的成本和效益首先是被单独估算的,然后才在流域尺度上整合。当从更具体的角度来考虑UTFI时,比如融资和机构分析,将成本和效益映射到具体的利益相关方就变得非常重要,而这并不是本研究的目的。相反,“最可能的”投资成本和效益是为了证明UTFI的成本效益。这将为在具有较高UTFI潜力的地区进行更详细和严格的评估提供依据。

确定成本

UTFI的所有成本可以分为三部分,基础设施成本、土地使用成本和地下水恢复成本。基础设施成本包括建设补给结构的资金和每年的运维成本。这里有两种不同类型的补给结构,一种是通过渗透池和渗透盆进行地表补给,一种是通过补给井进行地下补给。在含水层被渗透性土壤和底土覆盖的地方,渗透池用于补给地表水。在含水层上覆有不透土壤或目标含水层过深或承压的地方,则使用补给井。地下补给方法一般比地表补给的造价昂贵得多。我们对地表(S)和地下(SS)两种方法都做了成

本估算。然而在实践中,人们会根据流域的具体情况混合使用这两种方法。

补给井的数量和渗透池/盆所需的土地是DRV、年补给周期和补给率的函数。年补给周期是可获得多余地表水进行补给的雨季周期。这里假设为100天(表9)。补给率决定了通过这些结构能够有效进行补给的水量,在地表方法中是基于平均土壤渗透率得出的,而在地下方法中是基于水井产量得出的。建设补给设施所需的土地的获得成本,由文献中的土地租金水平决定。地表方法的土地需求是渗透率的函数。而地下方法的土地需求,则是由假设水井分布在井密度为20口井/公顷的不同地点来计算的(附录4,表A4.4)。

地下水恢复成本指的是抽取地下水用于灌溉的成本,包括建设灌溉设施如钻孔和安装水泵的资金成本,以及每年的运维成本(包括燃料)。计算资金成本时,每个流域中每个地下水抽水井的深度设为40米(附录4,表A4.13)。运行成本方面,当地燃料和水井的产量决定了抽水的费用。为简化分析,假设现有的地下水灌溉占总灌溉量的50%或更多,则使用柴油泵,且抽水时无需其他额外的灌溉设施。如果占比低于50%,那就需要开发地下水灌溉基础设施来恢复补给水。

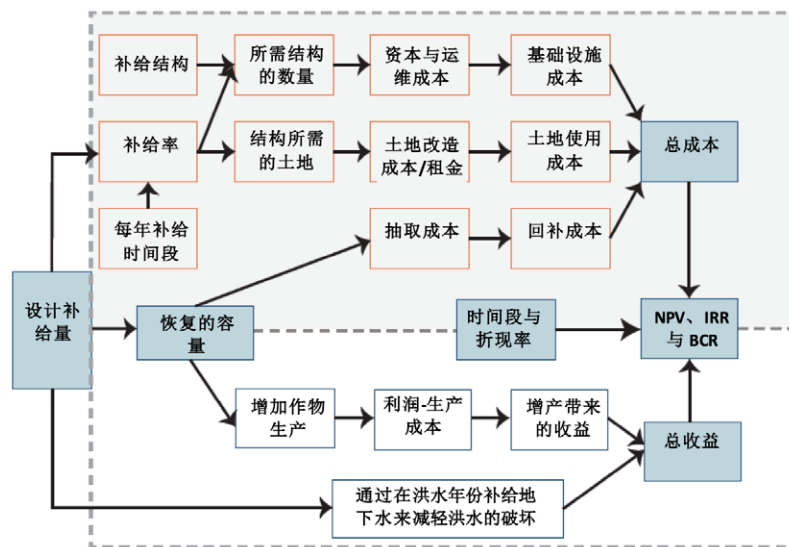


图 9. 显示成本和效益的主要来源的经济分析框架

表 8. 在经济分析中所考虑的成本和效益。

成本	
组成部分	描述
基础设施	建造补给结构所需的资金以及每年的运维成本
土地使用	购置建造补给结构所需的土地
地下水恢复	抽取补给的地下水用于灌溉的成本。包括建设灌溉基础设施的资金成本，即需要安装井眼和泵，以及每年的运维成本（包括燃料）
收益	
减轻洪水损失	通过在高流量时将地表水输送到地下，UTFI 调节并削弱了洪峰，从而减轻了对作物和基础设施的破坏以及生计的损失
增加作物生产	额外被补给的地下水将增加可用于灌溉的水量。这些水可以用于增加休耕地的作物生产或者旱季的种植。这些收益的货币价值可以通过考虑作物价格和生产成本来获得

确定效益

UTFI的效益可以分为两部分：减轻洪水损失，和通过增加灌溉用水提高作物产量。减轻洪水损失是指通过补给DRV减少洪峰流量，限制洪水对基础设施、农业和人们生计造成的损失。这一信息摘自相关文献，是基于过去每个区域被报道过的洪灾损失或者模拟损失得来的。额外的地下水补给会增加灌溉用水的可用量，可能增加一种种植作物。在给定的分析中，我们没有明确包含补给的时间和抽取补给水用于灌溉的时间，而只是假设补给将增加本地蓄水，从而能够将额外的水用于作物水分需求，而这两者很可能发生在同一水文年中的旱季种植期。这将增加作物产量，然后利用作物价格和生产成本将其转换为货币。作物产量增加带来的收益与DRV的可用性以相同的频率计算（阿瓦什河与拉姆根加河流域每年一次；昭披耶河流域每四年一次）。作物产量的提高是基于这样一个假设，即旱季受水量限制的农民将使用补给水来额外种植一种作物，从而增加种植强度。这是一个非常重要的假设（表9），因为可用水量可能并不是唯一一个限制使用地下水灌溉的因素，尤其是在埃塞俄比亚，那里地下水的开发和使用程度都很低。地下水基础设施的开发和使用是实施UTFI的重要前提。通过将地下水

开发的资本与运维成本纳入评估UTFI成本中，地下水开发的不足以及与其相关的成本也被计入其中。然而，我们也承认仅有资本投资并不一定会促进地下水开发，这需要有效的政策和机构来消除现有的障碍。现在的种植强度值低于200%（表7），表明三个流域都有足够的空间来增加种植强度。

对所有这些情况的经济分析持续了20年，而这也是折现率假设为10%的通常情况下泵的使用周期（表9）10%的折现率常见于多边开发银行在发展中国家开展成本效益分析时所使用的折现率。

情景分析

模型框架一节所述，为“基础情景案例”确定了成本收益指标，代表了流域内主要作物的关键变量的最可能的估值。针对每个流域分别确定了地表(S)和地下(SS)补给方法。通过改变关键变量DRV（影响成本和效益）、补给表现（影响成本）和作物价格（影响效益）来评估BCR和IRR值的敏感性。核查每个关键变量相对于基础案例的下界（减少20%）和上界（增加20%），每个S和SS补给方法得出八种情景（23）。假设减轻洪灾损失与DRV直接线性相关，且在情景中，其变化方向和比例与DRV相同

(增加20%或减少20%)。表10总结了基础情景案例和关键参数的下界值与上界值。

经济可行性结果

成本

表11提供了基础案例情景中地表与地下补给方法的成本(NPV单位:百万美元)以及三个流域中每立方米补给水的补给结构的摊余成本(不含地下水恢复成本)。据Ross和Hasnain(2018年)的估算,在发达国家(美国、欧洲、澳大利亚),补给地下水的成本(美元/立方米)比13个MAR方案(自然水源,非再生水)的成本要低一个数量级。

然而,尽管单位补给水的成本偏低,经济分析却表明,与阿瓦什河和昭披耶河流域建设UTFI基础设施相关的前期资金成本很高,且地下水灌溉基础设施的额外投资是地下水恢复成本的一部分。这表明,大规模实施UTFI的DRV要比单个MAR方案高出多个数量级。

由于额外的钻井和安装费用,这三个流域的地下水补给方案的成本都高于地表方案。尽管阿瓦什河流域的DRV最低(表9),但因为这里有相对产量较低的火山裂隙含水层(表8),再加上在撒哈拉以南非洲进行钻井成本很高,在这里实施地下补给方法的成本是最高的(表11)。

阿瓦什河流域用于恢复补给水的资金成本是最高的。这是因为该流域产水量低、几乎可以忽略不计的现有地下水灌溉量(表7)需要大量的抽水井,以及地下水基础设施建设的投资缺口较大。在阿瓦什河流域建设地下水补给和抽水基础设施的总资金成本为地下6.47亿美元,地表3.8亿美元。昭披耶河流域的地下水恢复的资金成本也很高,但低于阿瓦什河流域,这主要是因为前者相对较高的产量(意味着需要的井数量较少)和较低的钻井费用。由于有足够的地下水灌溉基础设施,不论是地表补给还是地下补给方法,拉姆根加河流域地下水恢复的资金成本都是0。在这三个流域中,地下水恢复运维成本都很高,从规划角度来说这是一个值得注意

的问题。这主要取决于区域内井的产量和柴油的价格。土地使用成本与其他成本相比相对较小。

效益

表12列出的是三个流域中不同收益流(NPV单位:百万美元)对基础案例情景的贡献。由于收益受恢复的地下水量影响,两种补给方法(地表和地下)的收益是相同的。在收益流的价值方面,昭披耶河流域与阿瓦什河和拉姆根加河流域存在明显不同,前者主要以减轻洪水损失为主,后两者则以提高作物产量为重。昭披耶河流域下游是高度发展的城市和工业区,因此减轻洪水损失有重大意义。而阿瓦什河流域和拉姆根加河流域的下游大部分土地用于农业生产,基础设施价值较低。这种对比也导致了模型中使用的DRV的隐性差异,其中昭披耶河流域每四年补给可用一次与阿瓦什河和拉姆根加盆地的每年一次截然不同。以与DRV频率相同的频率计算的收益(额外作物)导致系统生命周期内的NPV减少。这表明,没有减轻洪水损失的收益,降低DRV的频率会削弱总收益。这一点可以从昭披耶河流域单独种植一种额外作物的总体收益最低这一点明显看出(表12)。

在作物生产方面,阿瓦什河流域种植苔麸的价值相对较高。作物生产价值方面的差异可以追溯到苔麸相对较高的价格(表10),因此模型中经济作物有较高的水分生产率值。在拉姆根加河与昭披耶河流域,与水稻的经济水分生产率(拉姆根加河流域0.06美元/立方米,昭披耶河流域0.19美元/立方米)相比,苔麸的生产率(阿瓦什河流域0.35美元/立方米)较高。这是由市场高价驱动的。考虑到苔麸的物理水分生产率(0.53千克/立方米)与水稻的范围基本持平(拉姆根加河流域0.36千克/立方米,昭披耶河流域0.56千克/立方米),因此苔麸的盈利能力更高,分析中确定的苔麸的经济水分生产率值与文献中的记载(Arara等,2011年;Yihun,2015年)类似。造成拉姆根加河流域水分生产率最低的两个原因,一是水稻价格相对低(表10),二是水稻产量相对低。

表 9. 模型变量相关的假设

变量	假设
设计补给量 (DRV)	<ul style="list-style-type: none"> • DRV 可用且不影响下游的情况下可用于补给 • 阿瓦什河: 2.41 立方千米 (每年一次) • 拉姆根加河 :3.25 立方千米 (每年一次) • 昭披耶河: 3.36 立方千米 (每四年一次)
基流	<ul style="list-style-type: none"> • DRV 中, 25% 未恢复, 是因为这一部分的基流转移到了地表水 • 从未恢复部分获得的收益并不在考虑范围内
补给结构 (地下)	<ul style="list-style-type: none"> • 补给井的密度是 30 口井 / 公顷
年补给期	<ul style="list-style-type: none"> • 雨季每年 100 天
泵	<ul style="list-style-type: none"> • 使用柴油泵 • 如果地下水灌溉超过 50%, 则无需新基础设施用于补给水的恢复
增加作物生产	<ul style="list-style-type: none"> • 缺水限制了作物在旱季和干旱期间的产量。 • 农民投资用于抽取地下水的基础设施
减轻洪水灾害	<ul style="list-style-type: none"> • 补给地下水导致洪峰流量的减少继而减少淹没的面积和降低造成的损失。
时间段	<ul style="list-style-type: none"> • 20 年
折现率	<ul style="list-style-type: none"> • 10%

效益成本比和内部收益率

结合成本与效益, 表13显示了基础情境下的IRR和BCR值, 以及三个流域的最佳和最差案例情景。IRR值高于折现率(10%)且BCR值高于阈值1, 表明实施UTFI的经济可行性。

这三个流域的基础案例情景显示了在较高的IRR和BCR值下实施UTFI的高经济可行性。整体来看, 最高值出现在昭披耶河流域, 原因很简单, 那就是减轻洪水损失值较高(表12), 因为下游地区有城市和工业区, 很容易因为洪水造成巨大损失。此外, 与预期一致, 地下补给方法的BCR和IRR值始终低于地表方法, 原因如前所述(表11)。

IRR和BCR最差与最佳案例情景显示出一个较大的范围, 意味着对基础参数的高度敏感性。阿瓦什河流域和昭披耶河流域较高和较低的案例值范围仍然高于可行阈值。而拉姆根加河流域的情况则有所不同。这里地表和地下补给方法的较低案例

值都在阈值以下。由于拉姆根加河流域基础案例情景的BCR和IRR值低于阿瓦什河与昭披耶河流域, 当作物价格和补给率较低时, 这些值很有可能降到阈值以下。对于阿瓦什河与拉姆根加河流域而言, 最差案例情景与较低的作物价格和补给率相呼应, 反之亦然; 最佳案例情景则与较高价格和补给率相呼应。这表明, 成本和收益很大程度上由作物价格和补给率共同驱动, 而RDV只起到很少的作用。这可以解释为, DRV的任何变化都会对成本和收益产生类似的影响。在昭披耶河流域, 最差和最佳案例情景分别与低和高补给率相呼应。与阿瓦什河和拉姆根加河流域不同, 昭披耶河流域作物价格影响为0。这是因为, 在昭披耶河流域, 提高作物生产的收益只发挥很少的作用, 而大部分收益来自减轻洪水损失(表12)。

具备UTFI发展潜力的地区分布

空间多准则映射表明, UTFI适宜性高和非常高的地区约占全球陆地面积的约11%。这些地区分别占全球人口和作物面积的约50%和40%。全球最合适的地区大部分(49%左右)集中在南亚、东南亚、东亚和撒哈拉以南非洲这四个主要区域。其他UTFI适宜性低的区域有很大的空间异质性。这种广泛分布的适宜性与全球新兴趋势一致, 即从管理可用水量、降低灾害风险和适应气候变化的角度蓄滞洪水用于含水层的地下蓄水。为达到这些目标, 在持续时间较长的洪水期间利用河水进行战略补给, 与使用洪水/地表径流等其他形式的地下水回补大不相同。举几个河水补给的例子: 比如利用难以预测的洪水在干旱和半干旱区域进行引洪灌溉和约旦的干旱区域利用短时突发洪水进行补给。

图10显示了研究中认为有潜力将河水与洪水用于地下水补给的8个地区和区域。大多数地区/区域与UTFI适宜性高度一致。在科尔尼亚下游河谷(意大利)和纳莫伊河谷(澳大利亚), 这些地点位于适宜开展UTFI的边缘地区。虽然这样的全球性分析无法像局部研究那样具体, 但全球适合的地区和洪水补给研究之间的对应关系表明, 全球评估可以为未来在其它UTFI适宜性较高的地区和区域进行深入研究奠定基础。此外, 还对此前未涉及的美洲中部和南部、非洲和东亚的研究提供了新的机会。

此外, 适宜性分析的结果表明, 100个人口最多的流域中, 16个流域的UTFI适宜性较高。流域

内的差异性十分显著, 尤其是在较大的流域, 需要在子流域范围内进行分析以更好地确定在局部范围实施UTFI的潜力。

虽然空间映射指出全球许多地方实施UTFI的潜力巨大, 但要重申一下, 这只是明确UTFI实施潜力的第一步。本研究的结果仅可用于评估大规模的区域和流域范围的潜力。需要进行细致的研究, 包括实地调查和研究。比如对恒河流域实施UTFI的潜力的评估, 然后在特定位置进行实地考察, 就能很好地说明如何开展此类大规模评估。在对恒河流域进行的空间评估中, 作者们使用了采集空间变异的详细数据集, 包括地下水埋深、透射率(并非本分析中使用的含水层类型)和极端降雨事件(不考虑极端洪水事件)。

随后是对选定的拉姆根加河流域部分地区进行实地调查以确认适宜性地图。这突出了在考虑更广泛的流域条件的同时, 有必要进行充分的流域尺度上的具体分析和UTFI设计。

UTFI的经济意义

三个流域的成本收益分析表明, 如果UTFI的投资是针对有高适宜性的地理区域, 总则体上具有较高的经济可行性。受到流域的水文气候、农业和社会经济状况的多样性以及下游城市发展的差异的影响, UTFI相关的成本和收益差距显著, 因而经济可行性在空间上是不同的。这凸显了许多因素的重要性, 这些因素与UTFI的经济意义息息

表 10. 阿瓦什河、拉姆根加河、昭披耶河流域的情景分析中使用的关键变量值

变量	阿瓦什河		拉姆根加河		昭披耶河	
	S	SS	S	SS	S	SS
DRV (立方千米)	2.41 (1.93-2.90)		3.25 (2.60-4.32)		3.36 (2.69-4.03)	
作物	苕麸 b		水稻		水稻	
作物价格 (美元/吨)	668 (534 - 801)		207 (165 - 248)		336 (269 - 403)	
补给率	0.48 米 / 天	173 立方米 / 天	0.48 米 / 天	259 立方米 / 天	0.48 米 / 天	259 立方米 / 天
	(0.38-0.58)	(138-207)	(0.38-0.58)	(207-311)	(0.38-0.58)	(207-311)

相关,并且具有针对性。在某些情况下,这些与高度不确定性相关,这一点在前面的敏感性分析中已作讨论。IRR和BCR对地下水补给结构(补给率)和作物价格(以及作物选址)都高度敏感。DRV控制着所需补给结构的数量,因此需要资本投资。因此,选取最佳DRV对于确保不过度设计UTFI结构至关重要,否则将对经济可行性产生不利影响。

研究结果表明,在地下水开发有限的地区,建设用于补给的基础设施以及恢复补给水可能会产生高额费用。如果在所研究的领域范围内实施UTFI,总成本将变得非常可观(3.36-10.41亿美元)。像UTFI这样初始投入资金较高,但收益会在未来累积的项目在发展上可能受限,在财力严重不足的发展中国家尤其如此。通过在次级流域分多次实施项目,并在后期不断吸取前期的经验教训,可以将这种局限性降到最低。在大范围的土地上进行UTFI投资的可行性不高。由于水灾频次、地下水压力和旱灾

风险本身具有空间差异性,应在评估具体的需求和实施可能性后择地实施。UTFI结构的土地利用量是另一个可能成为潜在瓶颈的重要因素。解决与土地有关的问题需要进行详细规划,尤其是在人口密度和种植密度都很高的流域。使用社区拥有的已经废弃的土地/池塘可以作为处理这个问题的一种解决方法,就像在印度拉姆根加河流域的一个试点项目中做的一样。

实施UTFI系统,是为了保障农村供水(主要是农业和家庭用水)而不是向发达的城市或工业供水,因此需要不影响系统性能和项目目标的前提下,将资本和运维成本降到最低,要尽可能增强UTFI的经济可行性,密切关注项目的设计和和实施。选择的地点应该满足所有技术和非技术的先决条件。如果没有可盈利的和可持续的耕作制度,农民将不愿意参与到UTFI的实施和可持续运营所需的集体战略中。农民需要激励、知识和支持去

表 11. 阿瓦什河、拉姆根加河、昭披耶河基础案例情景的地表 (S) 和地下 (SS) 补给方法成本

		阿瓦什河		拉姆根加河		昭披耶河	
		(NPV 单位: 百万美元)					
补给方法		SS	S	SS	S	SS	S
基础设施成本	资本	332	65	196	143	284	178
	运维	120	25	77	56	29	19
地下水恢复成本	资本	315	315	-	-	85	85
	运维	273	273	122	122	63	63
土地使用成本		0.46	0.33	14	15	17	18
总计		1,041	683	409	336	479	364
美元 / 立方米		0.022	0.017	0.01	0.007	0.058	0.037

表 12. 阿瓦什河、拉姆根加河、昭披耶河流域基础案例情景下, 增加作物生产与减轻洪水损失的收益

变量	阿瓦什河	拉姆根加河	昭披耶河
(NPV 单位: 百万美元)			
增加作物生产	3263	545	300
减轻洪水损失	4	21	7962
总计	3267	566	8262

选择市场导向下的高价值灌溉作物,从而增加收入,提高项目可行性。

UTFI项目的融资可以使用基于市场的“受益者付费”方式,所有水资源管理改善的受益人,即用水户和其他直接或间接受益于防洪抗旱的人,来共同承担实施UTFI的成本。这与生态环境服务付费(PES)的原则是一致的。这里的服务包括降低灾害风险,是与通过实施UTFI减轻洪水与干旱相关的。在发达国家,水利基础设施项目的资金一般来自政府和私营部门,来自政府一般收入或对用水户和水服务提供者收取的费用。发展中国家则用有限的财力投入到基础设施开发项目上。在这种情况下,来自国际捐助机构对当地政府的外部支持就显得非常重要,尽管这并不适用于所有国家,或者说并不是所有国家都需要。项目开发的融资选择很大程度上取决于个案的具体情况,其中可能包括分配给气候投资、绿色增长、联合国可持续发展目标(SDGs)的实施计划以及私营部门企业社会责任(CSR)行动的资金等等。

研究区域的优先事项与UTFI的切入点

通过缩小产量差距和增加耕地面积来提高撒哈拉以南非洲地区的农业生产前景广阔。在旱季和干旱反复发生时期,主要依靠雨水的生产体系会受到水源不足的限制。气候的高度变化已经对该地区的粮食和生计安全产生了重大影响。撒哈拉以南非洲地区只有1%的种植面积采用地下水灌溉,而亚洲这一比例为14%。这突出了在撒哈拉以南非洲扩大灌溉面积的巨大潜力,尤其考虑到这个区域有丰富的地下水资源,而地下水是家庭用水的主要来源。许多研究已经认识到在撒哈拉以南非洲地区开发浅层地下水用于农业灌溉的巨大潜力。为了扩大旱季的农业生产,人们已经在该区域内的河漫滩以及湿地和湖泊周围地区的洪水退去的地方进行耕种。因此,UTFI可以将正在进行的地下水开发计划与战略性防洪相结合,从而提高农业生产,同时

表 13. 阿瓦什河、拉姆根加河、昭披耶河流域基础案例的 IRR 与 BCR 值, 以及最差与最佳基础案例情景

情景	地表 (S)		地下 (SS)	
	IRR	BCR	IRR	BCR
阿瓦什河				
基础案例	72%	3.93	41%	2.5
最差案例	33%	2.03	15%	1.2
最佳案例	112%	5.89	69%	3.95
拉姆根加河				
基础案例	30%	1.68	20%	1.38
最差案例	-10%	0.57	-22%	0.46
最佳案例	70%	3.03	50%	2.52
昭披耶河				
基础案例	122%	22.69	102%	17.24
最差案例	112%	19.56	93%	14.59
最佳案例	129%	25.4	110%	19.6

减轻经常遭遇洪水的主要河系(尼日尔河、沃尔特河、阿瓦什河)的损失。本研究为这些地区提出了可以减轻洪水和提高可用水量的替代方案,可以替代大坝和其它基于基础设施的措施。相对UTFI适宜性(图6)来说更高更广泛的基于需求的适宜性意味着撒哈拉以南非洲地区需要更广泛的措施来减轻洪水及其影响。由于撒哈拉以南非洲的地下水灌溉开发有限,实施UTFI将需要在实现地下水开发之后,或者与其同步进行。如果能做到这一点,会对粮食安全(通过增加农业生产)和减少贫困(通过降低灾害风险)产生积极影响,这二者都是撒哈拉以南非洲面临的重要问题。

南亚区域的情况基本与撒哈拉以南非洲相反:一方面存在人口密度高、贫穷和粮食不安全的问题,另一方面是高经济增长率和集约农业。南亚是与水有关的风险最为集中的地方,也是全球最缺水的区域之一。农民严重依赖印度河-恒河平原的高产冲积含水层以及印度半岛大部和其他地区的硬岩含水层的地下水资源,每年的总取水量为253立方米,为全球最高。农业生产常年依赖地下水,导致了严重的过度开采。在印度过度开发的地区,UTFI可以在国家级的项目上发挥重要作用,增加灌溉可

用水量,减少过度开采,增加对应对气候变化的韧性,比如《气候变化国家行动方案》、《国家水任务》,以及包括流域管理项目在内的总理农业灌溉计划(PMKSY)。以恒河流域为例,季风期间,在利用大量地下水进行灌溉的中上游(比如印度的北方邦和哈里亚纳邦)收集多余水量,还能帮助减轻流域下游每年的洪水(比如比哈尔邦和贾坎德邦)。印度已经有一个充分的理由来支持UTFI,政府已经将UTFI视作一种战略方针并设想在当前的五年规划周期内投资一个甚至更多的地区级灌溉计划。由于循证的强化,预计其他国家和地区的政策制定者与投资者将要求对UTFI进行深度的、本地化的可行性评估,将之作为在制定气候变化适应/减轻和减少灾害风险相关规划时的潜在干预手段。

在东南亚,强劲的季风之后往往是漫长的旱季,这是洪水和干旱到来的前兆。在泰国,昭披耶河下游地区洪水泛滥,中部地区旱季的可用水量有限,而UTFI可以帮助缓和这种情况并提供传统基础设施解决方案(堤防、水坝、拦河坝)之外的替代方案来管理洪水。通过UTFI对地下水进行补给的平均水量(0.84立方千米/年)是流域内第三大的蓄水量,仅次于普密蓬大坝与诗丽吉大坝。

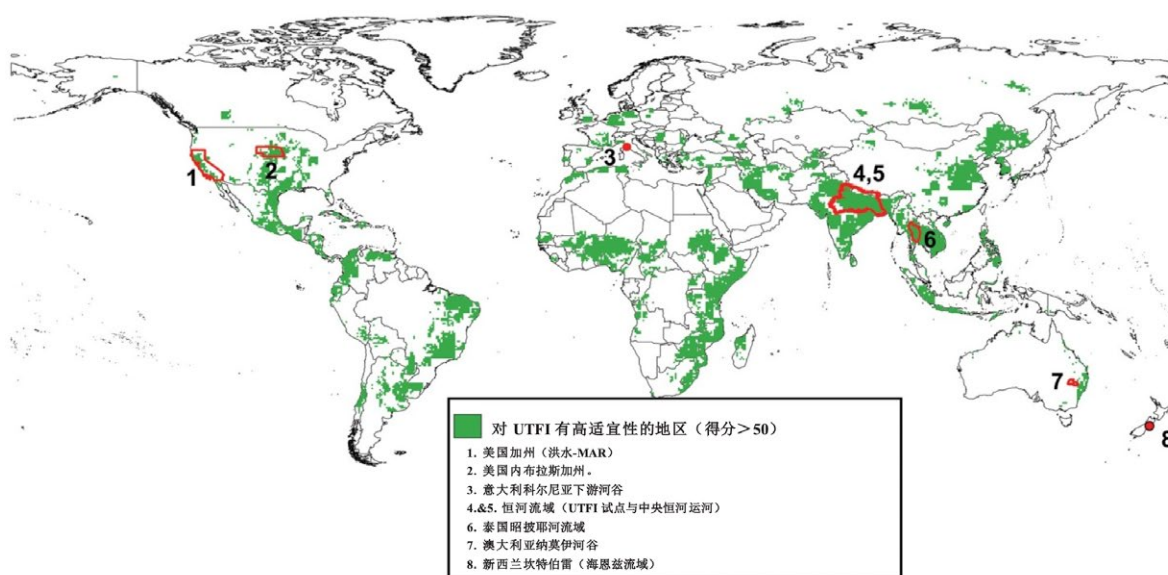


图 10. 之前的研究认为有潜力将河水与洪水用于地下水补给的 8 个地区 / 区域的位置

UTFI的实施与管理方法

除了一系列收益外,大量的分散式结构的实施与管理也会为土地可用量、融资和运维成本等带来新的挑战和风险。因此,UTFI在地方范围内的实施将需要更进一步的分析论证,且不限于空间和经济可行性。分析可以包括技术、社会经济、制度和相关问题,本研究对这些进行了简要介绍,但并未进行分析。在区域范围内,潜在的风险来自每个地点的运营。这些风险可能包括因补给水水质太差、临近地区溃水、堵塞和其他现象导致的补给表现差等因素造成的地下水水质下降,以及在获取补给水途径上的不平等。流域范围的风险取决于与UTFI关联的正面与负面影响如何在地方层面发挥作用。向上游补给地下水可能对下游减轻洪水产生积极影响,且/或对洪水提供的生态系统服务产生负面影响。对下游用户和机会成本的影响可能会是争论的重点,尤其是在跨境流域中实施UTFI时,因此必须将UTFI作为全面有效跨境水管理的一部分加以考虑。

UTFI的实施需要认真规划和分阶段开发以克服各种风险和挑战。这反过来也有助于确保执行工作适应和响应当地及全流域的条件和限制,以便能够取得令人满意的结果。UTFI通过为上下游地区提供多重效益而为MAR提供了一个流域层面的更大的视角。因此,尽管印度、美国、荷兰、澳大利亚、南非等国在MAR实施方面有数十年经验,与洪水补给相关的挑战和机遇依然明显,而这些可能会通过UTFI解决。

在认为UTFI可行的区域、国家或地区,需要考虑并采取下面的行动:

- 根据可用的数据和信息,以最精确的尺度绘制特定重点优先地区内UTFI的实施潜力。
- 通过当地适宜性评估,确定实施UTFI的合适地点。
- 利用最合适、最易接受的技术对UTFI进行规划。地下水补给基础设施的不同设计实例,见上文提到过的现有的国家级MAR指南。

- 更加详细的、更加严格的经济可行性评估,使用随机方法,比如,分析洪水与干旱的概率分布是如何影响BCR和IRR的,这将需要用投资成本支持UTFI基础设施的具体设计。

- 进行试点范围的现场测试与评估,以建立合理的概念证明,并示范这些主要风险可以有效解决。利益相关方对试点项目的成功至关重要,试点工作应仅在关键利益相关方的参与和支持下进行。在试点阶段,利益相关方的评价应该确定哪些机构被授权承担与运维相关的现场职责,以及其他可能相关的且在监管、许可和监测方面负有更高级别职责的机构。

- 参与UTFI规划与管理的利益相关方的能力建设,是这些机构正常运转的关键因素。建立人们对UTFI带来的正面收益的意识,对于确保对当地和高级别机构的认可和支持非常重要。

- 及时通知并影响政策制定者及其他利益相关群体,推广UTFI方法。基于丰富的运行经验和工具,就如何以及在哪里实施UTFI建立清晰的指引。有必要编制概述良好实践的门槛级手册和说明书。

结论

我们基于水的供应、需求和储存这三个类别的数据开展了全球范围内的空间分析确认哪些地区有实施UTFI的高适宜性。结果表明,适合UTFI的地区遍布全球所有居住的区域。在全球范围内,有高和非常高适宜性的地区,其总面积约为15.8亿公顷,人口约38亿,作物面积6.22亿公顷,分别约占全球人口总数的50%和作物面积的40%。

在流域范围内综合适宜性得分表明,在全球100个人口最多的流域中,有16个具有较高的UTFI适宜性。在这些适宜性高的流域中,埃塞俄比亚的阿瓦什河流域、印度的拉姆根加河流域(恒河流域的主要支流之一)、泰国的昭披耶河流域被选定为本研究的经济分析对象。结果表明,UTFI在所有三个流域中都具备经济可行性,尽管程度不尽相同,IRR值介于20%到122%之间。经济可行性对一些基础

参数的敏感性非常高,尤其是补给率和作物价格。最高的经济可行性出现在昭披耶河流域,在可用于补给的水量、补给表现和作物价格等不同情景下的IRR值从93%到129%不等。UTFI在昭披耶河流域的效益主要在于减轻洪水损失方面。而在拉姆根加河和阿瓦什河流域,主要效益则来自增加的作物生产。由于任何给定流域内的UTFI效益都会在空间上以及许多利益相关方之间分配,开展更详细具体的流域尺度分析并将之作为未来投资规划和可行性分析的一部分是非常重要的,包括将利益分配给不同利益相关群体。

UTFI涉及多个领域和行业,包括灌溉、洪水与水安全和降低灾害风险,因此提供了多个切入点和多种协同效应,可能有助于项目的实施以及增强有利影响。然而,跨部门工作还需要克服现有的制度障碍,因为很多部门之间是相互孤立的。

具体到一个国家的情况和优先事项,将决定UTFI方法及其实施的推进。比如,在欠发达的撒哈拉以南非洲区域,UTFI提供了一种可以同时管理洪水和干旱的方法来协调减少灾害风险的活动,而开发用于灌溉的地下水来增加作物生产可以促进地下调洪灌在南非的发展。

本研究存在明显的局限性,这与所使用的全球数据集所涉及的确定性程度以及做出的某些假设有关。在全球层面上独立数据集的缺乏限制了严格验证。然而,对空间分析和经济分析进行的敏感性分析表明,这些发现足够稳健可靠,可以在最广泛的层面上得出关于UTFI潜力的一般性结论。这里说的潜力并未考虑未来气候、城市化和水需求等因素,尽管在未来的几十年它们对与水相关的风险和灾害有显著影响。

本研究的结果,是为了向确定广泛地区(流域或者国家层面)迈出第一步,确认这些地方值得进行更细致具体的研究,明确UTFI的技术和经济可行性。印度拉姆根加河流域的案例为如何在实践中实现这一点提供了具体参考:在适宜性分析之后,对结果进行实地考察,并选择试点。类似的具体研究可以在其它被认为对UTFI有高适宜性的流域进行。此外,值得注意的是,UTFI的成功实施不仅仅取决于这里提到的技术和经济方面。UTFI的实施与管理还需要充分考虑社会、法律、政策、制度和环境等一系列因素。因此,结合当地实际情况的评估会大大受益于多领域视角的考量,从而界定和应对关键问题,因为它们是UTFI成功实施的核心所在。



本文综合摘译自:

<https://www.iwmi.cgiar.org/publications/iwmi-research-reports/iwmi-research-report-176/>

欢迎关注中国水科院微信公众号
地址:北京市海淀区复兴路甲一号
本刊联系方式:中国水科院 国际合作处
联系邮箱: dic@iwhr.com