



### 地下调洪灌溉 (UTFI) : 全球应用前景分析 (上篇)



# 地下调洪灌溉 (UTFI) : 全球应用前景分析 (上篇)

## 问题陈述

淡水资源可用量的多变性和不可预测性对全球水安全而言是一个巨大的挑战,尤其是对家庭、工业和粮食生产部门而言。水的多变性表现在反复发生的洪水和干旱事件中,除了对环境造成负面影响,还会给人们的生命、农业产出、畜牧和人们的生活带来损失,并引发了经济的涟漪效应。水的多变性预计会随着气候变化加剧而增大。据联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC),与水有关的危害发生的频率及严重程度都将上升,不仅增加了灾害发生的风险,还超过了社会的适应能力。此外,为了满足不断增长的人口对水和粮食的需求、供给工业生产以及满足城乡人口的需求,各行业对水资源的需求竞争加剧,这会进一步放大这些危害造成的影响。

紧急灾难数据库(EM-DAT)的数据显示,1995年至2015年间,洪水占有所有天气灾害总数的47%,受影响人口达23亿人,其中大多数生活在亚洲地区。同一时间段内,干旱只占据所有天气灾害的5%左右,但受影响人数达到11亿人,占全球受天气灾害影响总人口的四分之一以上。下面两个例子可以清晰表明社会在面对极端天气事件时的脆弱性。(1)2011年泰国洪灾造成465亿美元的经济损失;(2)2008年至2011年间肯尼亚旱灾造成的破坏和损失高达90亿美元。因此,高度依赖气候的农业产业极易遭受天气灾害的影响。这对致力于实现粮食安全和消除贫困的发展中国家的影响是巨大的。洪水和干旱造成的损失,占农作物和牲畜减产总量的83%。一份对67个国家的分析清晰地证实了这一点,其中2003年至2013年间140次中大规模自然灾害(包括与水无关的事件)造成的类似损失总计达800亿美元。

模自然灾害(包括与水无关的事件)造成的类似损失总计达800亿美元。

大多数江河流域在不同时期或者不同区域面临着截然相反的水少或水多的问题。1996年至2005年间,霍克斯特拉等人(2012年)分析了405个流域,发现有201个流域在一年中至少一个月的时间内面临着严重的水资源短缺问题,受影响的人口26.7亿。因此,需要制定更好的政策与计划,通过解决水的多变性问题来减少社会面对洪水和干旱的脆弱性,从而提高恢复力。

各种类型和规模的蓄水基础设施在适应水资源时空不平衡和不确定性方面发挥着重要作用。因此,投资建设此类基础设施可以提升水安全、加强全球粮食安全、刺激经济增长。地表和地下蓄水方案包括(大型和小型)水坝、自然湿地、农场水库、土壤水、雨水收集池、地下水含水层的补给等。

由于相对较大的储存量,地下水有较高的缓冲能力,通常比地表水资源更可靠、更不易蒸发,因此是蓄水管理的一个很有潜力的选择。与大型水坝相比,开发地下蓄水还有另外一个优势,那就是对环境几乎或完全没有影响。与水坝类似,这种蓄水方案可以用于截获雨季的多余水量并将之用于旱季,从而减轻洪水和干旱的影响。小农户利用地下水具有可靠性和便利性,与地表水系统相比,资金需求较低,近几十年利用地下水灌溉有所增加。这就为利用偶尔才枯竭的地下蓄水并用于储存多余的地表水流创造了可能性。因此,如果能采取有效的干预和管理措施,地下蓄水以其本身的优势将有可能解决水资源可用性的时空不平衡问题。通过对地表水和地下水的综合管理,可以挖掘使用地下蓄

水的机会和相关的潜在利益。人们发现, 这比单独关注地表水或地下水能更有效地适应水的多变性。

## 地下调洪灌溉(UTFI):概述

有一种新的用于水资源综合管理的实践方法, 通过被称作“地下调洪灌溉(UTFI)”的方法将雨季的多余水量有针对性地补给含水层。UTFI是地下水回补(MAR)的一种形式, 在全流域内选定关键补给点、安装地下水补给基础设施, 在流域尺度上进行干预。这种方法利用多余的雨季水流对地下蓄水能力枯竭的含水层进行补给, 以保护人们的生命和财产安全, 并通过增加旱季期间的水资源利用率来提高目标流域内的农业生产(图1)。多余的雨季水量会给下游带来潜在的洪灾风险。储存的补给水后期可以用于农业灌溉和其它用途。因此, 通过提高生态系统服务的提供, 比如洪水控制、地下水补给和保障旱季水资源可用量, UTFI可以实现流域尺度的水资源调节。这个方法为通常情况下孤立无援的地下水回补工作创造了新的价值, 并为上游和下游地区带来了更广泛的利益。同时直接将地下水回补与防洪抗旱联系起来。

## 实施UTFI的主要条件

在任何指定区域实施UTFI的三个主要条件包括:

- 供应——与洪水和干旱的影响有关。
- 需求——与干旱事件/影响和地下水可用量相关的用水。
- 储存——适合陆地景观和地下条件的UTFI干预措施, 创造更多的蓄水量。

从供应的角度来看, UTFI着眼于解决持续时间较长的季节性洪水, 这些洪水持续数周到数月不等, 且主要反复发生在雨季。受补给率限制, 这种方法并不能解决气旋、溃堤和骤发洪水导致的短期和极端洪水事件。在洪水条件下, 淹水地区的

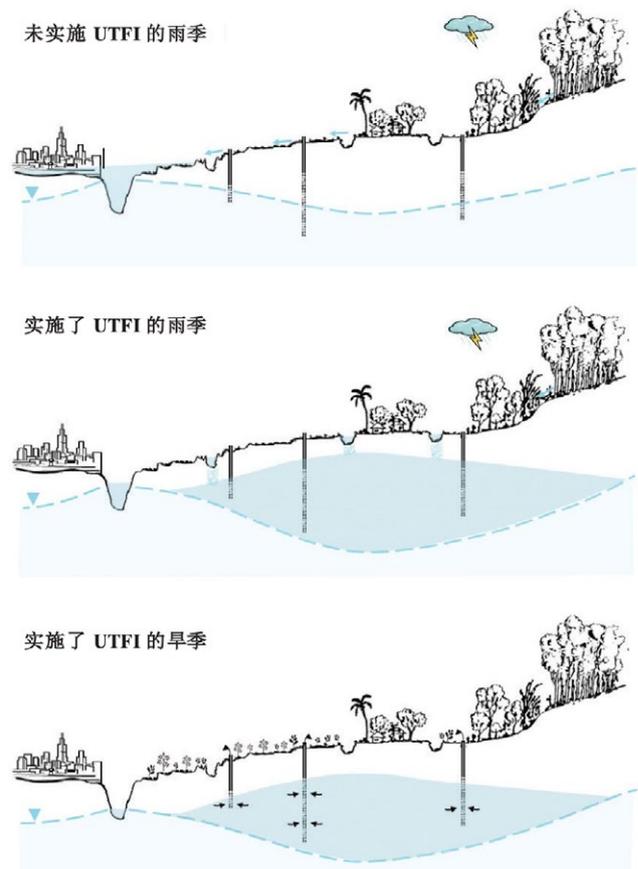


图1. 实施与未实施UTFI的易发洪水景观示意图。该图证明, 对地下水进行战略捕获与储存可以抵消可能会在下游发生的洪水, 同时还能提高地下水储量和农业生产

地下水自然补给可能比较高。因此, 与洪水期间的自然补给相比, 通过UTFI增加地下水补给应该有明显的不同, 并能提供更多的收益。UTFI方法的地下水恢复部分, 填补了灌溉和其他形式用水的需求缺口, 减轻了干旱、高地下水需求以及旱季有限的水资源可用量的影响。

最后, 从含水层的储存来看, UTFI是一种依靠选定适宜的水文地质条件, 实施适合该环境的设计的方法。用于储存的含水层通常位于最深50米的非承压或半承压地层。避开含盐地下水可以消除微咸水或盐土层混合相关的制约。在特定情况下, 枯竭的深层含水层会被优先考虑。如果有土地, 则最好选择最容易修建并维护的地表补给结构, 例如渗

**表 1. 实施 UTFI 的可行条件**

<b>供应</b>	洪水频率	持续时间较长的常规季节性洪水及其影响
	补给基础设施的运营管理	旨在捕获多余的水流，不一定在所有年份都按比例分配
<b>需求</b>	干旱、旱季期间	常规干旱的发生与影响或雨季变短导致的年内水的多变性
	灌溉	地下水已经用于灌溉或有潜力发展地下水灌溉
<b>储存</b>	目标含水层	非承压或半承压条件下的导水含水层，通常深度小于 50 米；有效储存量；地下水水质好
	补给基础设施	对水源进行充分预处理的简单、低成本技术，理想情况下由当地社区管理；有渗透性土壤和非承压区域的地区采用地表方法（流域、池塘等）；其它地区采用地下水方法（水井）。

透池。在低渗透性土层或浅层的弱含水层环境中，将水井用于地下水补给的方法优于前面的地表补给。表1总结了便于实施UTFI的主要条件。

### UTFI的起源及在印度的现状

UTFI的首次出现，是泰国湄南河流域进行的文案研究和实地考察的结果。此前，人们普遍认为，在该流域内兴建新的大型水利基础设施项目的机会有限，因为该流域基本上是“封闭的”；但周期性的大规模洪水和平原地区农业生产对地下水的过度开采，为UTFI的实施创造了条件。尽管初步评估的结果很好，但该流域并未实施UTFI。相反，人们将目光转向恒河流域，并在那里进行了UTFI实验，以评估其实际效果、利益、成本和利弊。

2015年，印度北方邦兰普尔县米拉克乡吉瓦·贾迪德村开始进行UTFI的中试演示和测试。吉瓦·贾迪德村位于印度恒河上游平原的拉姆根加河流域。吉瓦·贾迪德村试点研究地点的选择遵循以下三个主要步骤：第一，根据Brindha和Pavelic的区域性调洪灌溉适用性评估报告(2016)，缩小了合适的流域范围；第二，在有限的流域内开展广泛的实地考察，确认候选地点；第三，根据当地条件和包括当地社区在内的利益相关方的预期支持程度，选择一个合适的地点。

最终选择的研究区域一年中只有几个月(6月至9月)有季风带来的降雨，从而导致非季风季的需水量和地表水可用量之间存在很大的差距。洪水每年都会袭击拉姆根加河流域，其中几次比较大的洪水发生在2003年、2005年、2008年和2010年，平均淹没范围大约为800至1000平方千米。然而，地下水是该区域家庭和灌溉用水的主要来源，因此资源枯竭的风险越来越大。在试点所在地的兰普尔县，2004年六个行政区划中只有一个被归为地下水过度开采地区，而根据2013年的最新评估报告，开采过度的区划达到了四个。

由于人口密度过高和全年耕种过于密集，该流域大部分地区都面临着土地可用量不足的制约，因此，用于试点研究的UTFI基础设施被放置在一个闲置的乡村池塘中。经过抽水、清理和挖掘后，这个池塘的深度达到2米，面积达2625平方米(75米×35米)。共计十个补给井被安装在池塘的底部(图3)。水从邻近的灌溉渠被虹吸到池塘中。只有在季风季节水渠的水位足够高时，才会进行补给。

三年里，在补给季的62至85天内，平均补给水量大约在44,000立方米(从26,000立方米至62,000立方米不等)。补给率的年际变化似乎是由许多变量引起的，比如降雨量和降雨密度、补给水的质量、清淤操作的范围以及当地的水力梯度等。来自试点系统的补给水足以灌溉大约13公顷的农田(早春小麦

的灌溉需求为350毫米左右)。与仅从池塘底部渗透补给相比,带有补给井的UTFI系统使地下水总补给量增加了约3至7倍。



图3. 印度北方邦兰普尔县吉瓦·贾迪德村的 UTFI 设施 (供图: Prashanth Vishwanathan/ 国际水管理研究院)

整体来看,试点UTFI系统的补给水大约占该村自然总补给水量的1.3%至3.6%。由补给造成的地下水壅高有限,而在补给季开始时的补给率明显是最高的。UTFI对整体补给的贡献不高,加上有限的壅高,证实此次试点干预的规模很有限。这是因为一个试点对整个地下水平衡的贡献预计很小,特别是在高蓄水量且有冲积含水层的地区。如果UTFI这种方法能扩大到整个拉姆根加河流域,可能会产生更大的影响。他们采用地表水和地下水综合建模的方法,表明从流域补给50%的河流多余水量,可以将流域范围内地下水排放与补给的比值从168%降到103%,并减缓地下水位下降的速度,使水位相对于基线情景上升3.5米左右。

考虑到试点试验的规模较小,并不适合开展降低下游洪水可能性的相关研究。然而,在拉姆根加河流域范围的建模研究也显示,在不同情景下,截获10%至50%的多余水量可以将五年一遇的洪水淹没面积减少5.1%到27.1%。多项有关印度的研究报告均指出,上游的水资源开发(如通过雨水收集、强化补给、增加灌溉等)可以显著减少下游洪水量。

由于试点研究规模有限,UTFI方法的其他潜在收益或者体现不出来,或者未能进行评估。然而,这

些收益可能还包括提升依赖地下水的生态系统服务,提高对气候变化、地面沉降防治和防止盐水入侵的应对能力,增加流向河流、溪流和湿地的旱季基流,以及减少抽水成本和相关的碳排放等。而对地下水回补的研究中有大量证据表明,如果对地下水回补进行严格规划和评估,这些收益都是可能产生的。这些收益又会反过来产生次级收益,包括降低公共/私人在旱涝灾害和减灾方面的支出,提升粮食安全、农业生产、就业和农民收入等。

## UTFI政策环境

UTFI提供了一个管理解决方案,以解决粮食和水安全等基础发展问题以及与气候变化适应性和减少灾害风险相关的一系列问题,而这些问题是全球大多数国家和地区的政策优先重点(图4)。UTFI涉及多个领域,因此,与气候变化、水资源和农业相关的各个领域和部门都能够塑造和影响UTFI相关的政策。将UTFI与其他相关政策领域比如土地使用规划和城郊开发等结合起来,也将有所裨益。然而,鉴于政府机构彼此间通常是孤立的,因此在必要时开展跨部门工作还需要克服一些根深蒂固的障碍。

根据当地的环境和优先事项,各国可能会考虑图4所示的全部或部分问题以及基本驱动因素,作为UTFI的基本“价值主张”。如果能够成功实施UTFI,将有可能产生切实的社会经济效益。当前,许多国家的现有政府项目中,大量的公共基金和援助基金被用于抗洪和灾后恢复,还有对农民抽取地下水提供的补贴。这个方法几乎不会产生永久性的资产或者解决方案,无法应对有关水的多变性的错综复杂的深层原因。

针对地下水回补制定的监管和管理措施为UTFI提供了宝贵的支持。荷兰、德国、芬兰、西班牙、美国、南非、澳大利亚等国家的政策规章制度中专门提到了地下水回补。这些国家已经进行了长达60年的规划和实践。规章制度兼顾了数量和质量问题,其中最严格的管控措施是针对补给水来源于某种形式的循环水,比如经过处理的废水。印度作为发展中

国家表现突出的一大原因,是其在多个邦内由政府管理的流域管理项目支持下,通过地下水回补获得的额外地下水储存能力超过其它所有发展中国家,包括中国。印度的流域管理项目通常包括在利益相关者参与的情况下实施各种改良的土地与水管理实践,包括地下水补给。一般而言,这类项目会在该国最容易发生干旱的地区进行。现有的监管和惯常措施为UTFI提供了能够在不需要替代计划的情况下进行相应调整的基础。

在复杂的机构环境中,UTFI有多个切入点,涉及多个部门,因此全面了解当地情况是非常必要的,通过详细的多层次、多部门利益相关方的参与,为UTFI的实施确立清晰的目标和路径。Pavelic等人和Reddy等人提供了几个在恒河平原如何实现目标的案例。



图 4. 与 UTFI 方法密切相关的水务部门的关键问题和优先事项

### 全球范围内UTFI的协同效应

除了前文提及的在泰国和印度进行的研究,其他地方也对使用大洪水补给地下水的构想进行了独立评估。几个值得注意的例子包括美国内布拉斯加州和加利福尼亚州、澳大利亚纳莫伊河谷、横河上游流域的中央恒河运河、新西兰海恩兹中试、以及意大利托斯卡纳科尔尼亚下游河谷含水层系统。

加州水资源部正实施“洪水-地下水回补”的项目,探索将使用洪水补给地下水作为一种水资源管理战略(加州水资源部,2018年)。洪水-地下水回补

旨在应对加州发生的极端干旱和洪水时期,也将带来对水利和洪水基础设施进行修复和改造的需求。按照设想,洪水-地下水回补将显著提高加州的水资源可持续性和气候适应力。O’ Geen等人(2015年)利用土壤、地形和农作物的数据,确认加州有145万公顷的土地有良好到极佳的潜力进行洪水补给,约占加州农业土地总面积的20%。

印度北方邦的中央恒河运河,恒河(高峰期流量可达234立方米/秒)多余的水被引入灌溉渠,用于灌溉雨季的农作物。土渠和水浇地的渗漏,导致地下水位上升(地下水的平均深度从1988年的平均12米下降到1998年的平均6.5米),降低了灌溉抽水成本(节约成本1.8亿卢比,合约370万美元),提高了农业综合生产能力(平均每公顷净收入增长26%)。在新西兰海恩兹流域开展的一个试点项目,涉及将总量约244万立方米的河水改道,用于改善含水层的水量 and 水质。在澳大利亚,Rawluk等人(2013年)利用位于墨累-达令流域的纳莫伊河谷洪水期间的河水,探索了地下水回补的范围。研究表明,在取得显著的环境、社会和经济效益的同时,也会面临与制度安排以及环境和生态问题相关的挑战。此外,Pavelic等人(2015年)还概述了澳大利亚、伊朗、乌兹别克斯坦的案例研究,这些案例中的地下水回补依赖收集地表水径流对地下水进行补给。尽管这些案例的直接目的并不是将地下水回补用于缓解洪水,但用地表水补给地下水这种大型方案的存在,增强了UTFI方法的技术可行性和实用性。

### 研究目标

作为一种潜在的创新解决方案,UTFI能对改善洪水、干旱和地下水管理作出积极贡献,为农村和城市地区的社区创造长远益处。随着世界其他地区针对类似概念和构想进行独立讨论和探索,UTFI方法可能在增强更传统的水资源管理方式方面有广泛的潜力。

像其他水管理干预措施一样,在考虑UTFI方法之前,必须经过地方一级的严格评估与规划。然而,地方级规划与评估需要大量时间和财政资源来解决广泛的技术、社会经济、体制和环境问题。因此,开展预可行性研究评估UTFI实施的选址,并进行整体经济可行性研究是非常必要的,以确定是否需要更小范围内进行更详细的分析。在做出投资决定和采取实际步骤前,这种决策过程是非常必要的。据此,本报告的目标如下:

1. 全球范围内对UTFI潜力的广泛评估。为UTFI寻找合适的地区,是成功实施和取得成果的至关重要的第一步。这将有助于基于灾害风险(洪水和干旱)和地下水条件辨别有潜力实施UTFI的地区和流域。迄今为止,对UTFI潜力的评估仅限于在恒河流域和斯里兰卡的小范围分析。然而,在全球开展对UTFI广泛适用性和相对潜力的评估,将使人们对这种方法的范围有更广泛的了解。

2. UTFI在某些流域的经济可行性评估。减轻洪灾损失和提高水可用性为当地农业经济和广大民众带来的利益,是否能证明实施UTFI的资本投资和运维成本的合理性,弄清楚这一点是非常必要的。

## 空间分析

### 空间适宜性评估方法概述

空间映射此前被应用于为全球各种规模的地下水回补确认合适的地点。其主要包括以下步骤:第一,选取与适宜性映射相关的不同的数据层/变量;第二,根据对UTFI适宜性的重要程度,为各层分配权重,并将数据重新分类为少量的离散类别(从低到高);第三,叠加以进行复合空间分析;第四,敏感性分析。不同的研究大都遵循类似的一般原则,但在变量选择的数量和类型、映射的空间尺度以及为不同的变量和层分配权重的方法方面有所不同。此外,在补给方式的类型和水源方面也有所不同。大多数旨在通过地下水回补确定地下水

补给、储存和恢复潜力的研究,都使用地质、坡度、土壤、地下水位、含水层渗透率与透射率、地下水质、岩性、含水层类型、含水层存储能力、土地覆盖和线性构造等变量。大多数案例中,可用于地下水补给的可用水量及灌溉或其他用途的补给水的需求并不是分析中包含的明确标准。另一方面,除了水文地质变量外,UTFI还在适宜性映射中使用了洪水和补给水需求量作为关键因素,比如此前在南亚进行的相关研究。

### 空间分析数据

在特定地点的UTFI潜力主要取决于年际和年内水的多变性程度,以及该地区面对这种变化造成的影响的脆弱性。影响农业和人类居住地的大洪水和干旱的频繁发生,是有可能实施UTFI的地区的一个关键特征。尽管洪水和干旱的影响证实了UTFI的效益,特定地点的合适的水文地质特征仍然是实现这些效益的关键所在,因为它们反映了实施UTFI的范围。

因此,为了UTFI适宜性评估,反应这些水文地质特征的数据被分为三个大的主题组,分别是水供应、水需求和水储存(表2)。与供应相关的变量解释了通过UTFI收集并储存在含水层中的洪水的实际可用性和社会经济影响。与需求相关的变量解释了干旱发生的频率和造成的影响。与存储相关的变量解释了决定地下水补给结构的适应性的水文地质条件。表2总结了分析中使用的数据。该分析在全球范围内开展,其空间分辨率为30弧分,相当于赤道处约55平方千米的像素数。

洪水和干旱发生的频率及其造成的经济损失和死亡数量的相关数据来自哥伦比亚大学国际地球科学信息网络中心(CIESIN)主持的社会经济数据和应用中心(SEDAC)。来自CIESIN的空间数据的分辨率为2.5弧分,网格单元按照相对频率的分值从1到10(较高的频率得分反映出干旱或洪水的较高频率/较大影响)进行分类。洪水频率基于达特茅斯洪水观测台(DFO)编制的全球重大洪水事件来计算,

干旱频率则使用标准化降水的加权异常(WASP)计算。CIESIN的经济损失与死亡数据,是灾害频率数据和每个灾害事件预期损失的函数,这些数据来自上报至国际灾害数据库EM-DAT中的历史损失,以及人口、国内生产总值(GDP)、农业国内生产总值和基础设施(道路密度)的空间栅格数据。

与储存相关的数据包括含水层类型以及地下水的埋深和含盐量。理想情况下,含水层深度与储存能力相关的数据也应该包括在内,但这些细节问题并不能在全球范围内获得。按照世界范围水文地质编图及评价计划(WHYMAP)分类的含水层类型,为地质、含水层渗透率、储存和生产力提供了广泛的指标。地下水埋深对补给作业有很大的影响:第一,特别浅的地下水位由于有发生渍水

的风险不适宜UTFI;第二,深水位由于安装成本过高或补给效益有限也不适宜UTFI。潜水面深度的数据来自Fan等人(2013年),在模拟的稳态条件下以30弧分的分辨率提供地表以下的深度。这一水平不能反应季节性波动或地下水开采的响应,但它提供了长期储存能力的基本指标。地下水盐含量的数据来自WHYMAP,圈定了总溶解固体含量表示的含盐量高于或低于5000毫克/升的地区。因此,这个值被当作利用含水层补给和恢复足量用于生产的地下淡水使用的极限值。由于补给结构的涉及可能根据土壤的渗透性进行调整,因此未考虑土壤类型和深度。一般而言,渗透性土壤覆盖含水层的任何地方都可以使用地表补给方法,如渗水池/渗水坑等。那些被不透水土壤覆盖或者位置太深、位于承压层

**表 2. 用于全球范围内空间分析的数据总结,按照三个主题组排列**

主题组	层	来源	分辨率
供应	洪灾频率	SEDAC	2.5 弧分 (合计为 30 弧分)
	洪水造成的死亡	CHRR 和 CIESIN, 2005 年; CHRR、CIESIN 和 IBRD, 2005 年, 2005 年	
	洪水造成的经济损失		
需求	旱灾频率	SEDAC	2.5 弧分 (合计为 30 弧分)
	干旱造成的死亡	CHRR、CIESIN 和 IBRD, 2005 年 d, 2005 年 d; CHRR、CIESIN 和 IRI, 2005 年 f	
	干旱造成的经济损失		
储存	地下水埋深	Fan 等人, 2013 年	30 弧分
	含水层类型	WHYMAP (Richts 等, 2011 年)	30 弧分
	地下水含盐量	WHYMAP (德国联邦地球科学和自然资源研究所 BGR 与联合国教科文组织 UNESCO, 2006 年)	30 弧分

其中:

$UTFI_{SC}$  = 最终适宜性得分

$T_G$  = 主题组得分 (其中 G 代表供应、需求和储存)

$W_{DL(i)}$  = 主题组 G 第 i 个数据层被分配的权重 (如表 3 所示)

$R_{FL(i)}$  = 主题组 G 第 i 个数据层中的特征被重新分类的值 (如表 3 所示)

n = 主题组的层数

$$UTFI_{SC} = T_{supply} + T_{demand} + T_{storage} \dots\dots\dots (1)$$

$$T_G = \sum_{i=1}^n (W_{DL} * R_{FL})_i \dots\dots\dots (2)$$

的含水层,可以使用灌水井或者渗水井等地下补给方法。农业及人口数据并未与储存相关因素分开考虑,以说明对储存的需求。这是因为这些数据已经被间接包含在用来确认洪水和干旱造成的经济损失和死亡人数的CIESIN数据集中。

### 空间分析使用的方法

为空间分析制定的框架见图5。三个主题组的每个数据层按照其在该主题下的相对重要性被分配一个权重(WDL),每个数据层内部的特征按照它们与UTFI潜力的可能相关性被赋予一个重新分类的值(RFL)。表3总结了分配给每个层的权重和每个层中特征的重新分类值,以及选择相应权重和重新分类的原因。通过叠加分析将各层结合成为主题组,以得出每个主题组的综合适宜性得分(Ti)。随后将主题组进行合并,每组给予同等的权重以获得最终

的UTFI适用性评分(UTFISC)。选择加性聚合是因为它为识别决定各因素在决定最终得分方面的相对贡献提供了一种简单直观的方法。最终的适宜性得分在0至100分之间进行归一化,并被分为四个均匀分布的适宜性级别:非常低(0-25)、中等(>25-50)、高(>50-75)和非常高(>75-100)。由于洪水(代表供应)和干旱(代表需求)迹象是UTFI的基本前提,因此分析中省略了没有严重洪水或干旱的地区。

### 敏感性分析

当使用空间适宜性评估方法时,由于固有的主观性,标准权重通常是不确定性的主要因素。因此,在开展研究时通常会进行敏感性分析,并在结论中确认不确定性的水平。在本次研究中,UTFI适宜性地图是通过改变分配给每个主题组中层的权重来进行检查的。这样操作的主要目的,是检查

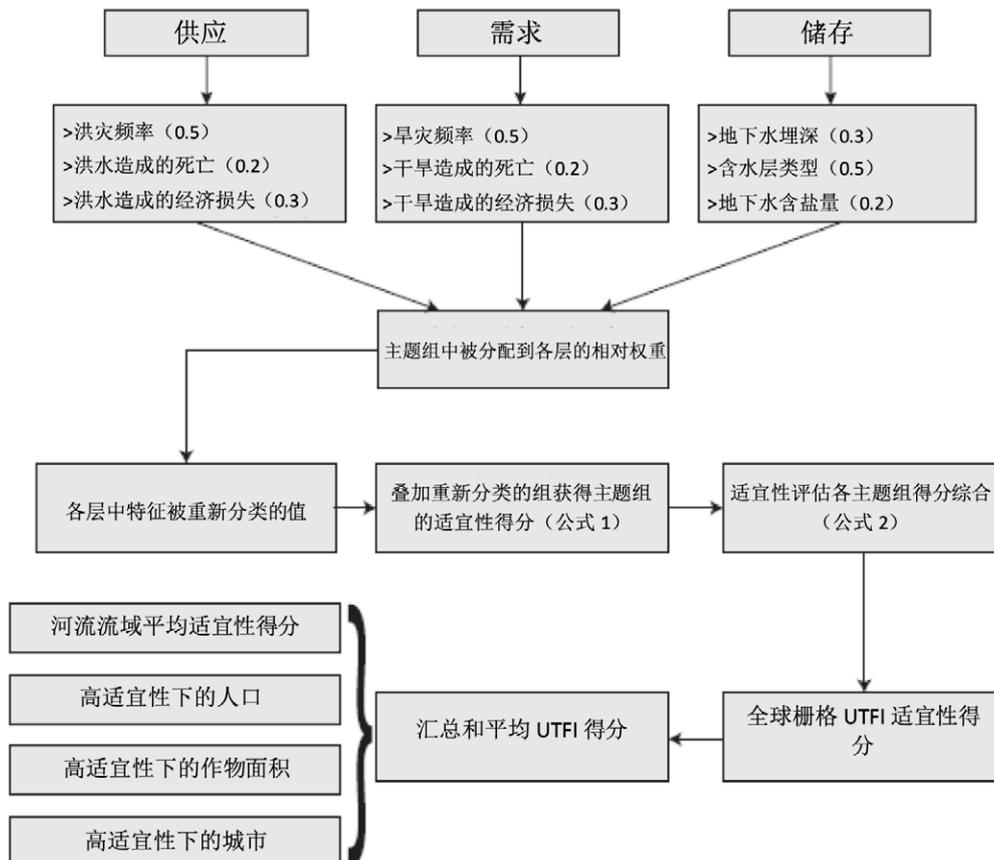


图 5. 全球适宜性评估采用的框架

**表 3. 被分配到三个主题组中每个数据层的权重和每个层中特征被重新分类的值**

主题组 (T)	层 (D <sub>L</sub> )	权重 (W <sub>D<sub>L</sub></sub> )	特征 (F <sub>L</sub> )	各层中特征被重新分类的值 (R <sub>F<sub>L</sub></sub> ) <sup>a</sup>
供应 <sup>b</sup>	洪灾频率	0.5	频率得分 < 4	1
			频率得分 4-6	2
			频率得分 6-7	3
			频率得分 8-10	4
	洪水造成的死亡	0.2	频率得分 < 4	1
			频率得分 4-6	2
			频率得分 6-7	3
			频率得分 8-10	4
	洪水造成的经济损失	0.3	频率得分 < 4	1
			频率得分 4-6	2
			频率得分 6-7	3
			频率得分 8-10	4
需求 <sup>c</sup>	旱灾频率	0.5	频率得分 < 4	1
			频率得分 4-6	2
			频率得分 6-7	3
			频率得分 8-10	4
	干旱造成的死亡	0.2	频率得分 < 4	1
			频率得分 4-6	2
			频率得分 6-7	3
			频率得分 8-10	4
	干旱造成的经济损失	0.3	频率得分 < 4	1
			频率得分 4-6	2
			频率得分 6-7	3
			频率得分 8-10	4
储存 <sup>d</sup>	地下水埋深 (单位: 米) <sup>i</sup>	0.3	< 3 米	0
			3-30 米	7
			> 30 米	3
	含水层类型 <sup>ii</sup>	0.5	河流沉积中的含水层	3
			主要地下含水层	3
			复杂水文地质构造中的含水层	2
			碳酸盐岩中的含水层	1
			当地和浅层含水层	1
			不可再生的含水层	0
	地下水含盐量 (毫克 / 升) <sup>iii</sup>	0.2	≤ 5000 毫克 / 升	7
> 5000 毫克 / 升			3	

UTFI适宜性得分对基础权重变化的鲁棒性,并确定评估中最关键的变量。一个主题组中所有层的权重(表3中的WDL)在±20%的范围内浮动,这与其他类似研究的选择范围差别不大。通过将每个主题组的三层中每一层的权重设置为最低(-20%)和最高(+20%),最终可获得八个情景(也就是23),总计可获得24个情景。然后通过确定不同适用性类别的绝对值和百分比变化,来评估UTFI适宜性地图对给定权重的敏感性。

### UTFI在区域性范围和流域范围内的适宜性

根据联合国地理公约中对区域的定义,对最终的UTFI网格适宜性得分进行进一步分析。附录1列出了各国及其联合国规定的次区域名单,包括具有UTFI高适应性的人口和作物面积。在每个区域或次区域中,确认了具有UTFI高适应性的总人口数、城市数(人口在500万到1000万和大于1000万的)以及作物面积。其中采用了人口数、城市数量、作物面积的栅格数据。

通过平均栅格得分数据得出流域整体适宜性得分,然后进一步考虑河流流域层面的UTFI适宜性。为此,世界资源研究所(WRI)使用HydroSHEDS方法(基于多尺度航天飞机高程导数的水文数据和地图)以30弧秒的分辨率圈定了100个人口最多的河流流域。这100个流域上生活着全球大约60%的人口。

### 空间分析的限制

任何空间分析都取决于基础数据集。全球数据集通常受到数据约束和较差的分辨率以及固有的不确定性和假设的限制。比如,地下水埋深数据并不能反映当地的水文地质复杂性,这可能导致高估或低估含水层对UTFI的适宜性。由于不同国家/地区在监测/数据访问和可用性方面的差异,还可能存在固有偏差。比如,由DFO收集的洪水事件数据可能会偏向于媒体报道过的造成巨大损失的事件,而忽略损失相对较小的小规模洪水。同样,使用WASP方法论计算的干旱事件数据并没有考

虑其他干旱指标,这些指标更多地与水资源和农业影响有关,可以更好地表现出特定区域感受到的缺水情况。模拟的地下水埋深数据并未明确考虑取水对地下水水位的影响。实际上,浅层地下水水位可能更深更适合,但如果超采造成水位过深,也可能让更多地方变得不太适合。

部分可能对UTFI可行性产生影响的重要变量数据,比如水源水质和洪水类型,由于缺乏连贯数据故并未考虑在内。同样,UTFI更适用于持续时间较长的季节性洪水,而不是突发洪水或者海岸洪水,这是由于受到补给能力的物理限制以及与所需临时滞水储存相关的潜在附加成本影响。洪水的类型无法与洪水的发生和影响数据区分开来,这些数据结合了所有类型的洪水。本分析的一个重要局限就是没有考虑气候变化的影响,而这将影响洪水和干旱风险的空间和时间分布。显然,在该领域还需要更进一步的分析研究,但了解在气候变异的记录水平下调洪灌溉的可行性是非常重要的第一步。

## UTFI适宜性结果

### 空间分析

基于前述进行的分析,可以得出如图6所示的全球级别UTFI适宜性地图。总的来看,大约有26%的全球土地面积具备不同程度的UTFI适宜性,其余74%(黄色部分)由于没有洪水或/和干旱而没有被包括在内。其中高适宜性的地区(得分>50分,图6中浅绿色和深绿色的区域)约占全球土地面积的11%(15.80亿公顷),分布在世界各地。高适宜性土地面积占比大的国家(超过国土面积的40%)主要位于南亚(印度、孟加拉国、斯里兰卡、巴基斯坦)、东南亚(泰国、菲律宾、柬埔寨、越南)、东非(埃塞俄比亚、肯尼亚、坦桑尼亚、苏丹、索马里、津巴布韦)、西非(尼日利亚、贝宁、多哥)和中美洲(哥斯达黎加、尼加拉瓜)。其他高适宜土地面积较大的地区则集中在具体的区域,比如中国的华北平原、美国的高平原、伊朗的西部地区以及巴西的东部和东南部地区。

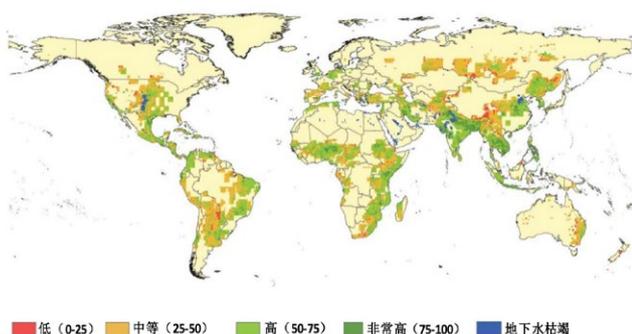


图 6. 空间栅格分辨率为 30 弧分的 UTFI 适宜性全球地图

相比之下，欧洲、西亚、北非、俄罗斯和中亚地区的高适宜性土地面积相对较少（低于国土总面积的40%）。然而，这些广阔的区域存在着高度的易变性，比如在某几个国家或某些国家中较小的地区，显然有很高的适宜性。举例来说，黎巴嫩（西亚）、乌拉圭（南美）、荷兰和比利时（欧洲）等国虽然在 UTFI 潜力整体较低的区域，但实际上它们显示出良好的潜力。整体来看，分布在五大洲（不包括澳大利亚和南极洲）的41个国家有超过40%的领土的 UTFI 适宜性被定为高到非常高。

被认为地下水枯竭的地区与 UTFI 适宜性地图的重叠，明确了枯竭和高适宜性重合的地方，因此 UTFI 可能会在缓解地下水位下降趋势方面发挥潜在作用。全球地下水枯竭的数据来自 Döll 等人（2014年），其中枯竭率最高的地区会成为多边形。这表明几乎90%的地下水枯竭发生在有 UTFI 高适宜性的地区（图6）。这些重叠区域大多集中在印度西北部的枯竭含水层，中国的华北平原，美国高平原的部分含水层，巴基斯坦东北部和伊朗西部。另一方面，中东和北非区域的枯竭含水层（包括阿拉伯半岛和西北非洲的努比亚砂岩含水层）并不适合开展 UTFI，因为洪水带来的地表水可用量有限，降低了总得分中与供水有关的部分。UTFI 到底能在多大程度上帮助减轻适宜地区的地下水枯竭仍然是一个悬而未决的问题，因为这取决于多个因素，包括现有的供需缺口、总体需求管理以及现有的政策和规章制度。

### 敏感性分析: UTFI 适宜性级别

根据前面所得到的24种情景中全球土地面积的最大和最小变化，分析 UTFI 适宜性级别（低、中、高、非常高）对分配给各层的权重的敏感性（见前文“敏感性分析”部分）（表4）。相对于基础案例（表3中 UTFI 适宜性得分与权重）在任何方向上的微小变化都是显示结果高度鲁棒性的理想条件。结果表明，对各层基础权重最敏感的级别是低适宜性级别，相对于基础案例在-17.4%到+21.8%之间变化。其他适宜性级别的敏感性水平都很低。把高适宜性地区（得分>50）放到一起看（将低于高和很高适宜性级别加起来），则敏感性在-5.9%到+7.0%之间。这意味着两个有利的 UTFI 适宜性级别（高和非常高），对分配的基础权重具有鲁棒性。此外，还可以根据所分配的权重范围获取适宜性级别的总体趋势。

（下篇待续）

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