水利水电国际资讯摘要
IWHR International Digest

2023
3
总336期

中国水利水电科学研究院　主编：孟志敏　责编：孟 圆 刘一帆

欧盟大型NBS项目经验谈

气候变化背景下全球可用淡水资源现状盘点

美国中西部特种作物干旱预警决策支撑

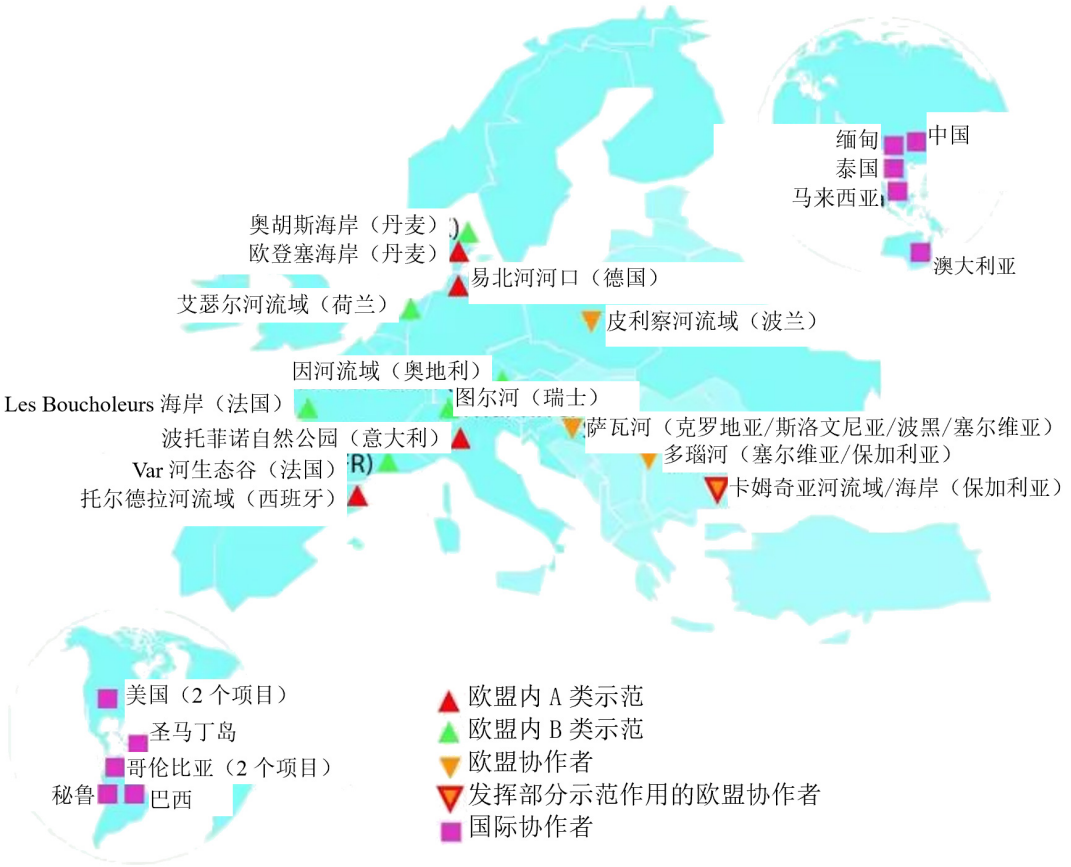
颗粒形状对推移质输沙率的影响

灌溉技术对用水的影响分析

欧盟大型NBS项目经验谈——借自然之力，降低极端天气风险

大自然承受着风暴、强降雨、洪水和干旱等极端事件造成的伤害，但其本身可以作为解决方案的一部分，帮助减轻极端天气和气候变化的影响。获得欧盟资助的大型基于自然的解决方案（NBS）项目——RECONECT——便旨在增加对NBS的认识、促进实施，以期减轻水文气象灾害风险，目前该项目已实施了五年。

大规模NBS包括建立蓄滞洪区、湿地和洪泛区、林地恢复和造林、梯田和挡土墙、红树林、滩涂和沙丘，目前已在城市、农村、山区和沿海地区得到诸多应用。与管道、水库、砖墙和堤坝等灰色基础设施相比，NBS更环保、社会接受度和经济可行性更高。然而，由于政府、居民、企业、活动家团体和非政府组织等各方利益不一致甚至相互冲突，大规模实施NBS具有挑战性。



RECONECT遍布全球的基于自然的解决方案项目站点地图。RECONECT项目为拥有实施基于自然的解决方案成功经验的合作伙伴（示范者）和计划实施基于自然的解决方案但缺乏必要资源和方法的合作伙伴（协作者）提供了合作的平台。

荷兰地方水务局局长 Co Verdaas 在 RECONECT 项目第 8 次大会开幕式上强调，提高项目公众接受度任务复杂而艰巨。本次会议共有 60 名参会代表出席，他们来自欧洲和其他地区的 34 个合作伙伴组织。Verdaas 还负责荷兰“还地于河”项目的堤防工程养护工作，该项目已于 2016 年结束，是荷兰迄今为止实施的规模最大的基于自然的解决方案项目。

“如今，不是水务部门建议什么，社会和企业就会照着做。这是荷兰面临的现状。”Verdaas 说，“过去水务部门直接发布指令，并不会与受到指令影响的群体充分联系沟通。现在得让这些人参与进来一起研究，但如何参与，依然是个头疼的问题。”

结对：一起学习，一起反思

贝尔格莱德大学副教授 Jasna Plavsic 从寻求开发基于自然的解决方案的合作伙伴的角度分享了她的见解。她认为大多数人面临的主要风险是洪水。也有一些人还面临着洪水引发的山体滑坡或者干旱等灾害风险。RECONECT 项目的一项主要目标是构建这类灾害事件的全球网络，然后评估所需何种措施、实施的地点，以及已经实施何种措施。“地方政府不会为了启动一个基于自然的解决方案项目而拆除一个堤防工程。借助已有的知识基础可以更加高效。”

RECONECT 是一个大规模项目，合作伙伴数量众多，且可能处于基于自然的解决方案项目实施过程的不同阶段，这也给项目落地带来挑战。

养护和修复人造梯田可以减少陡坡侵蚀，减轻浅层滑坡引发的灾害风险。梯田修复也是基于自然的解决方案措施的一种，能够提升水土保持能力（意大利，波托菲诺自然公园）。

经验更丰富的地区往往处于项目实施的最后阶段，而另一些地区才刚刚开始，因此，不同伙伴之间的分享能让我们受益良多。

保护欧洲的盐沼

欧洲近 80% 的盐沼分布在丹麦的海岸线上，丹麦政府也决心保护这些受到气候变化威胁的重要地区。须通过空间规划，让盐沼适应海平面上升，否则盐沼将面临完全消失的风险。

这是居住在洪涝灾害高发区的人们必须面对的问题。洪涝灾害也会对自然造成威胁，因此基于自然的解决方案必须能够为自然带来显著益处。通过将一些堤防工程的选址远离海岸线，可以降低洪水风险。从景观的角度来看，应尽力保障海岸线不受人为干扰。

鼓励当地社区选择基于自然的解决方案涉及土地使用权问题:需要考虑居民如何使用土地，是不是几代人都在一个特定地区务农，转变土地利用方式是否会遭到该地区土地所有者和居民的抵制等问题。同时，这也是一种政治讨论，体现在政府如何对土地利用进优先排序。

鼓励市民积极参与 助力培养主人翁意识

来自汉堡项目团队的代表 Christian Ebel 分享了成功促进利益相关者参与项目的心得。在一场面向德国汉堡市居民的活动中，他向参与者介绍了什么是基于自然的解决方案，以及汉堡市目前已实施哪些基于自然的解决方案。在一组问题的指引下，参与者就政策、自然、城市和经济这

丹麦欧登塞 Seden Strand，RECONECT 项目中的一个大规模基于自然的解决方案示范点。将现有堤防工程迁至地势较高的地方，并重建蜿蜒河道，恢复自然水文过程，提高防洪标准。此外，该地区还是蟾蜍和候鸟的栖息地，建有鸟类观察塔，开辟了多条小径，增加了该地区的休闲娱乐价值。

四个领域的问题分享了自己的认识。

“这是当地居民首次参与由公共部门组织、收集意见的活动。他们意识到我们的项目可以对加强防洪安全做出积极贡献。培养实际居住在这一区域的人们的主人翁意识是非常重要的。为了实现这一目标，须创造机会，倾听和采纳他们的意见。”

还地于河：建立卓有成效的解决方案

“还河于地（Room for the River）”是荷兰规模最大的基于自然的解决方案项目，旨在通过加强防洪建设，保障河流沿岸 400 万居民的安全。该项目已于 2016 年结束，项目期间，8 个省、12 个水务部门和多个地方社区携手，成功降低了洪泛区水位，建造洪涝缓冲带，加深侧槽式溢洪道，并修建分洪道。荷兰东部城市奈梅亨（RECONECT 大会的召开地点）市中心位于瓦尔河沿岸，市内河道弯度大，导致当地极易受到洪涝灾害的影响。

瓦尔河，左侧是可容纳高水位河流的富余空间，右侧是荷兰奈梅亨市

还地于河项目的利益相关者负责人 Carsten Schipper Hein 分享了他如何在项目的各个阶段与受影响的社区进行沟通。

项目面临的最大挑战是动员 200 户家庭和 50 家企业搬迁，以便为河流腾出更多空间。项目组一对一地沟通，协商双方满意的价格。这个过程耗时长久，但对这个地区的居民具有重要意义，而且对于项目的成功非常必要。

“我们以建筑工人和其他相关人员为沟通主力，让人们了解项目幕后的工作人员。在项目的早期阶段，请居民与桥梁设计师沟通后提出想法和建议。”

镜桥，由奈梅亨市民共同设计

基于自然的解决方案：实地考察

参会者考察了荷兰包括大型人工育滩工程 Sand Motor 在内的多个基于自然的解决方案项目场地。这一项目将在未来 20 年里帮助附近海岸抵御海水侵蚀。借助洋流、风和海浪缓慢将沙子平行于海岸搬运，逐渐形成沙丘。这一解决方案具有成本效益，意味着不需要每年额外进行采沙作业，可以为海底生态系统提供更多恢复时间。

国际水利环境工程学院代尔夫特水教育学院城市水系统副教授，兼 RECONECT 项目负责人 Zoran Vojinovic 认为，RECONECT 项目包含的基于自然的解决方案的多样性从多功能设计视角为此类解决方案提供示范。特别是以可持续和经济可行的方式，将减少水文气象灾害风险与地方和区域发展目标相结合，促进共同制定土地利用规划，这是项目的附加价值。

在项目实施过程中，至关重要的是从示范站点收集详细信息、定性和定量数据，为研究者、从

业人员和决策者提供信息支持，增进他们对基于自然的解决方案的了解。通过详细分析所有基于自然的解决方案项目站点的优缺点，制定设计标准和指导准则。实施方要积极促进利益相关者间的知识交流、能力建设和对话。这一过程的目的是获取关于基于自然的解决方案的最新知识，促进基于自然的解决方案在全球的规模化应用。

位于荷兰海牙沙丘后面的 Sand Motor 工程

本文摘译自：
https://www.preventionweb.net/news/reducing-risks-caused-extreme-weather-nature-based-solutions

气候变化背景下全球可用淡水资源现状盘点——世界气象组织《全球水资源状况报告》

2022 年 11 月 29 日, 世界气象组织(WMO)发布首份《全球水资源状况报告》(以下简称《报告》), 在全球淡水资源需求日增而供应有限的背景下, 通过评估气候、环境及社会变化对地球水资源的影响, 支撑更有效的淡水资源监管。

《报告》概述了全球河流流量以及主要的洪水和干旱事件, 分析了陆地淡水储量的变化, 突出了冰冻圈的重要作用和脆弱性。《报告》指出, 由于降水类型受到气候变化和拉尼娜事件影响, 2021 年全球大片地区比常年更加干燥。与过去 30 年水文数据平均水平相比, 河道流量低于平均水平的流域面积几乎是高于平均水平面积的两倍。

WMO 秘书长佩蒂瑞·塔拉斯(Petteri Taalas)教授表示:“人们往往是通过水感受到气候变化的影响, 如干旱更为严重和频繁, 洪水更为极端,季节性降雨更不规律, 以及冰川加速融化等, 这会在经济、生态系统和人们日常生活的方方面面产生连锁反应。然而人们仍对淡水资源的分布、数量和质量的变化不甚了解。《报告》旨在填补以上知识缺口,纵览全球各地的水资源可用量现状, 为气候适应和气候减缓投资提供依据, 助力实现联合国关于在未来五年人人可获取洪水和干旱等灾害预警信息的目标。”

《报告》中提到, 目前全球有 36 亿人每年至少有一个月面临供水不足的问题,预计到 2050 年, 此类人口数量将超过 50 亿。

报告的第一版关注了河道流量，即在任何给定时间流经河道的水量;同时评估了陆地水储量，即陆地表面和地下以及冰冻圈（冻结水）的水量。

为尽可能扩大地理覆盖范围，报告主要基于建模和美国宇航局测量陆地水储量的 GRACE（Gravity Recovery and Climate Experiment）遥感信息来获得相关信息并编制了随附的地图。建模结果通过观测数据验证。

《报告》提及，当前经验证的水文数据仍然不足。世界气象组织发布的《统一数据政策》旨在加快河流流量和跨境流域信息等水文数据的收集和共享。

河道流量

与 30 年水文基准期的平均水平相比，2021 年全球大片地区较常年更加干燥。这些地区包括自 2019 年以来遭遇持续干旱的南美洲的拉普拉塔河、亚马逊河南部和东南部，以及北美的科罗拉多河、密苏里河和密西西比河流域；非洲的尼日尔河、沃尔特河、尼罗河和刚果河等河流的流量也低于正常水平；俄罗斯部分地区、西西伯利亚和中亚地区的河流同样也是如此。相反，北美的一些流域、亚马逊河北部和非洲南部的赞比西河和奥兰治河以及中国阿穆尔河流域和印度北部的河流流量则高于常年。《报告》所分析的河流流域中，约有三分之一与 30 年水文基准期的平均水平相符。

中国河南省、印度北部、西欧以及莫桑比克、菲律宾和印度尼西亚等受热带气旋影响的国家和地区发生大洪水，造成大量人员伤亡。而埃塞俄比亚、肯尼亚和索马里等地区连续几年降雨量低于平均水平，引发区域干旱。

陆地水储量

陆地水储量指储存在地表以及地下的全部水量。《报告》指出，与 2002-2020 年的平均水平相比，2021 年，美国西海岸、南美洲中部和巴塔哥尼亚高原、北非和马达加斯加、中亚和中东、巴基斯坦和北印度的陆地水储量低于正常水平。非洲中部、南美洲北部，特别是亚马逊流域和中国北部的陆地水储量均高于正常水平。《报告》点明了几个陆地水储量呈现长期负增长趋势的热点地区。这些地区包括巴西圣弗朗西斯科河流域、巴塔哥尼亚高原、恒河和印度河源头，以及美国西南部地区。

相比之下，五大湖区、尼日尔盆地和东非大裂谷以及亚马逊流域北部等地区的陆地水储量呈现正增长趋势。

总体而言，陆地水储量呈负趋势的区域面积大于正趋势。由于过度抽取地下水用来灌溉农田，部分热点地区这一趋势仍在不断加剧。冰雪消融也对阿拉斯加、巴塔哥尼亚和喜马拉雅山等多个地区产生了重大影响。

冰冻圈

冰冻圈包含冰川、积雪、冰盖以及多年冻土，是世界上最大的天然淡水库。作为河流的发源地，高山通常被称为天然“水塔”，为约 19 亿人提供淡水。冰冻圈水资源的变化关系着粮食安全、人类健康、生态系统的完整性和维持，并对经济和社会发展影响重大。这类变化还会进一步引发灾害，如冰川湖溃决导致河流洪水和山洪。

随着温度不断上升，冰川的年度径流通常会呈现先增后减的趋势,即先持续增加至峰值水位，而后径流量逐渐下降。就长期适应方面的决策而言，对冰川径流变化和峰值水位出现时间进行长期预测具有关键意义。

世界气象组织在今后的《全球水资源状况》报告中将鼓励在流域和区域一级定期评估冰冻圈的变化和水资源的可变性。

本文摘译自：
https://public.wmo.int/en/media/press-release/state-of-global-water-resources-report-informs-rivers-land-water-storage-and

美国中西部特种作物干旱预警决策支撑

气候模型预测，美国中西部将在未来遭遇更多骤发干旱，面对这一挑战，当地特种作物种植者能够获取的信息和资源仍不充分。对此，美国国家抗旱中心（NDMC）一科研团队在《应用气象学与气候学杂志》（2022 年 7 月刊）发表了名为《中西部多年生特种作物的干旱信息需求应对》论文。

气候模型预测表明美国中西部在未来将遭遇风暴强度增加和骤旱更加频繁的双重夹击，所谓骤旱（flash drought），指的是在极端高温和干燥天气的共同作用下，旱情快速出现并蔓延。

干旱预警是增强农业韧性，以应对不断变化的气候条件的关键工具；但在美国中西部，为大豆、玉米等商品作物种植提供干旱预警信息占据了大多数资源，果树和坚果等特种作物种植所需的预警信息则少得多，而后者往往最容易受到极端天气的影响，应对不断变化的气候条件的能力也最为薄弱。

为了提高抵御干旱等气候风险的能力，需要根据特种作物种植的实际情况和切实需求设计相适应的监测和预测工具。美国国家干旱减灾中心研究人员探究了中西部地区苹果、葡萄和蔓越莓在生长期的不同阶段的面临的决策需求和风险。研究人员发现，既有对产量和品质产生短期影响的担忧，也有对未来产能产生长期不利影响的隐忧。信息的缺失是造成该种忧虑的原因之一，而已有的信息在可用性上也存在显著不足。为此，研究团队开发了作物的决策支撑时间表，勾勒出每一种作物需要气候信息服务的关键时期。

在另一篇题为《地方抗旱准备的规划策略与障碍》（发表在《美国规划协会会刊》）的文章当中，该研究团队则深入探讨了社区尺度的干旱规划可以发挥的关键作用。

地方政府在帮助社区准备、应对干旱等极端气候方面发挥着关键作用。规划者有责任确定并因地制宜地实施恰当的策略，以减轻极端气候可能造成的破坏性影响。尽管抗旱减灾规划对于能力建设和增强韧性极为重要，社区尺度的干旱规划相对较为少见。相反，大多数干旱规划工作都是在州一级进行。干旱规划往往也并非独立规划，而是属于水资源管理、土地利用和减灾规划的一部分。

为了更好地了解社区尺度干旱规划的现状，美国国家干旱减灾中心研究员 Tonya Haigh 领导的团队调查了地方规划者对不同抗旱减灾策略的看法，以及他们在应对干旱时面临的阻碍。研究人员向美国各地的数百名美国规划协会会员发放了问卷调查，询问受访者在干旱规划方面的经验、所在社区面临的威胁、应对这些威胁的能力，以及所辖区域内规划者之间的关系。

研究人员发现，地方土地利用规划是一个颇具潜力的干旱规划工具，但目前此方面的应用还较少。他们还发现，只有少数受访者对制定独立干旱规划感兴趣，或者正在制定独立干旱规划。经费似乎并不是主要的挑战，而是政治意愿、数据可用性和协作等制约因素，此外加强不同层级规划者之间的良好沟通也被认为十分关键。

本文摘译自：
https://drought.unl.edu/Publications/News.aspx?id=397

颗粒形状对推移质输沙率的影响

《自然》第 613 卷，第 298 至 302 页（2023）

摘要

从修复一条河流乃至探索一颗行星，推移质运动，即在风力或水力的作用下河床上的沉积物颗粒翻滚升降的机制都是研究重要的一环。尽管这种运动现象广泛存在，但对推移质输沙量的预测始终难以精确。许多研究都将预测的不确定性归因于颗粒粒度的变异性，却很少有研究涉及颗粒形状的影响，尽管学界一直推测颗粒形状对输沙率会产生一定作用。本研究发现，颗粒形状对推移质输沙率有着重要影响，且影响程度与许多泥沙输移数据的分散程度相当。据此提出了一个理论，可解释颗粒形状对流体阻力和颗粒摩擦的作用，并预测输移运动的发生和输移效率取决于被输移颗粒的阻力系数和体摩擦（bulk friction）系数。实验证实了这些预测，也表明实际上很难从颗粒外观直观判断颗粒形状对输沙率的影响。研究人员提出了形状校正的输沙规律，但超出了实验测量能力。研究结果能够提高输沙预测的准确度，并有助于球形粒子相关理论与自然沉积物颗粒行为研究的相互促进。

本文摘译自：
https://www.nature.com/articles/s41586-022-05564-6

明确取水量与耗水量——灌溉技术对用水的影响分析

概要

采用新的灌溉技术，如变速灌溉（VRI）或者安装喷滴一体喷头之前，首先应了解这些新的技术和装置到底能够为生产者和所处流域带来哪些益处。对水循环各个要素的分析有助于揭示农田尺度的水资源变化如何产生了流域尺度的影响。而耗水量这一概念对明确此关联关系尤为重要；但它往往也是一个难以界定的概念。本文明确提出了作物生产中耗水量的定义，并提出相应指南，用以评估一项减少了灌溉取水量的新技术是否也能够减少耗水量，从而增加了流域内可供其他水用途或满足日后之需的蓄水量。

引言

美国内布拉斯加州及其周边各州同世界上许多地区一样，农业灌溉是最大的用水行业。为了满足未来的用水需求，应对经济、环境、社会和政治等的用水制约，灌溉用水的优化利用十分必要。

灌溉技术的发展提高了灌溉用水效率，即灌溉用水被植物吸收利用的比例较高，而被土壤吸收、下渗补给地下水或者直接蒸发到大气中的比例较低。变速灌溉和低能耗精准灌溉（LEPA）等先进灌溉技术减少了地下水或地表水的抽取量和引调水量，并且具备减少地下水抽取量和抽取能耗，降低过度灌溉造成减产的概率或者严重程度，减少坡面灌溉径流，减少硝酸盐淋滤等多种益处。虽然提高灌溉效率可能减少用水量，但用水量减少并不一定意味着未来可用水量或下游可用水量增加。

定义“耗水量”

人类对水循环的干预往往是为了维持地表水或地下水淡水供应，或者满足下游的淡水需求。在这一背景下，**“耗水量”系指未回流至其所处周边流域的消耗用水量**。一般来说，一个流域内的最大耗水源是蒸散发（ET），即土壤水分蒸发和作物或植物蒸腾损失总量。工业过程中利用水进行蒸发冷却，水以水蒸汽状态散失到大气中，也被视为耗水量。但是，引水式水电站引水发电，并将水流输送回原供水河流的，并不属于耗水量，因为除了少量直接蒸发损失之外，下游用水者仍然可以使用这些水。

对节水的误解

一提到灌溉技术的效率提高时，一种常见的误解是通过减少抽水或引调水量实现“节水”之后，未来可用水量或者下游用水量一定会提高。在一个效率低下的灌溉系统中，造成“效率低下”的主要原因发生在根区，即灌溉用水增加了根区与含水层之间包气带土壤的蓄水量。最终，这些水要么流回原来抽水的含水层，要么流入较浅的表层含水层，最终补给了地下水（图 1）。如果农田中没有安装挡水结构，灌溉用水可能形成径流，流入河流供下游用水者使用。灌溉技术的进步提高了灌溉系统的效率，进而减少了流入含水层、进而补给地下含水层的灌溉用水。对整个流域而言，“耗水量”，即“被消耗”且没有回流至水系统，无法供其他用水者重新使用的水是一个关键概念。在探讨灌溉技术变化在流域尺度产生的影响时，最佳“节水”方法是减少耗水量。减少耗水量是为

其他用途节水的重要手段。

这种误解常见于变速灌溉技术。内布拉斯加州的利益相关者对地下水位持续下降及其对河道流量的影响感到担忧，这不无道理。在适当的管理下，变速灌溉能够减少灌溉抽水量，但人们往往误认为，减少地下水抽取量必然会对地下水位和河道流量产生积极影响。考虑投资新灌溉技术的决策者须切实评估技术对水资源产生的实际影响，充分考虑用水量的变化以及耗水量的总体变化。内布拉斯加州内的多个自然资源区(NRD)实施水资源分配制度,限制了可用于灌溉的水量。这会阻碍生产者实现最高作物产量。新技术的采用可以帮助生产者充分利用用水配额实现产量最大化。在此情形下，新技术减少了水的损失，而耗水量不会减少，甚至还可能增加，相应地地下水补给、深层渗漏或回流至水系统的径流量减少。

耗水量概念的应用

在不增加耗水总量的前提下维持当前的耗水率在许多流域是可行的，但对部分流域而言，减少耗水量可能是必要之举。有研究建议减少如灌渠附近植被的蒸散量等“无益耗水量”。能否产生实际效果还要视具体情况；然而，在不影响作物产量或影响极小的情况下减少耗水量确有必要。

对于灌溉农田，**“耗水量比率”系指耗水量变化与灌溉用水量变化之比**。耗水量比率可用来估

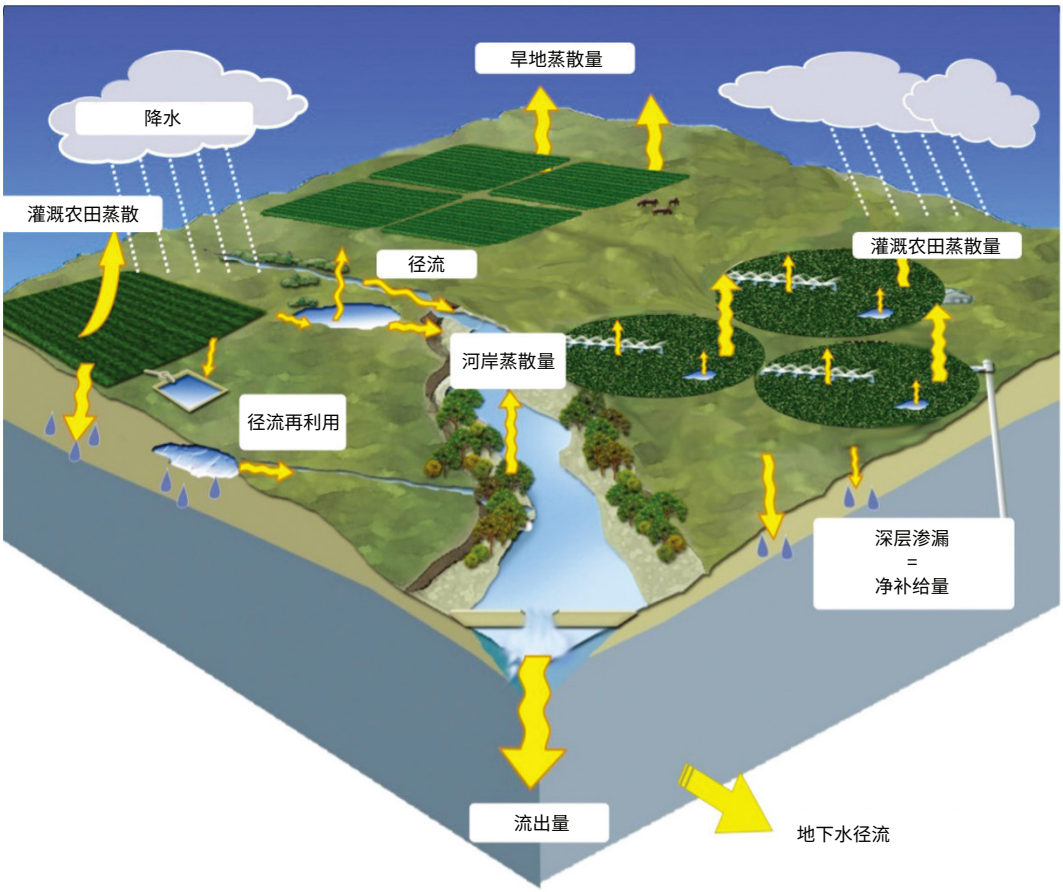


图 1 流域尺度的水平衡。一些“损失”的水回流至流域中。从长期来看，增加下游可用水量和未来可用水量的最佳方法是减少蒸发蒸腾量（ET）为主的耗水量。在本文中，蒸散既包括植被覆盖土壤表面的蒸散量，也包括池塘和河流的直接蒸发量。

计新灌溉技术与传统灌溉技术相比可能减少的耗水量。

从水法的角度,《内布拉斯加州地下水管理和保护法案》对有益用水和耗水的定义是:有益用水系指水被用于造福人类或其他物种的用水活动;耗水系指根据法律规定的水专用权或法律允许的其他用水权,通过恰当且足够高效的实践在不浪费水的前提下,为实现相应目的而消耗的水量。

下面将探讨说明灌溉技术对灌溉农田耗水量影响的两种场景。

情景 1:灌溉管理新技术

在这一情景下,我们重点关注确定灌溉时机和灌溉深度的新技术,例如用遥感数据分析代替用手感估计土壤含水量等更传统的方法。

本文利用 Payero 等人(2008)在北普拉特的内布拉斯加大学林肯分校中西部研究、推广与教育中心的地下滴灌玉米田获取的实地数据来解释耗水量的概念。利用季节性蒸散量、季节性灌溉深度和作物产量数据,本文使用两个方程式来估算季节性蒸散量与季节性灌溉用水量的函数关系(图 2)。增加灌溉用水量不能够再提升产量的情况即为过度灌溉。

本文将**"边际耗水量比率"**(mCU)定义为季节性灌溉用水量的微小变化引起的耗水量变化(即蒸散量 - 灌溉曲线的斜率,图 2)。在所有情况下,mCU 的初始值都为 1(季节性灌溉用水量非常少,mCU 数值的范围为 0 至 1),表示所有灌溉用水都变成蒸散量。随着灌溉深度增加,mCU 开始小于 1,表明部分额外灌溉用水(边际灌溉用水)成为耗水量,另有部分边际灌溉用水经由径流、深层渗漏成为非消耗性损失。在灌溉深度超过实现最大产量所需的灌溉深度后,边际灌溉用水不再影响蒸散量(mCU=0)。在这一范围(mCU=0)内,任何减少灌溉用水量的灌溉技术变更都无法降低耗水量。这也构成了评估新灌溉技术对耗水量影响的框架。

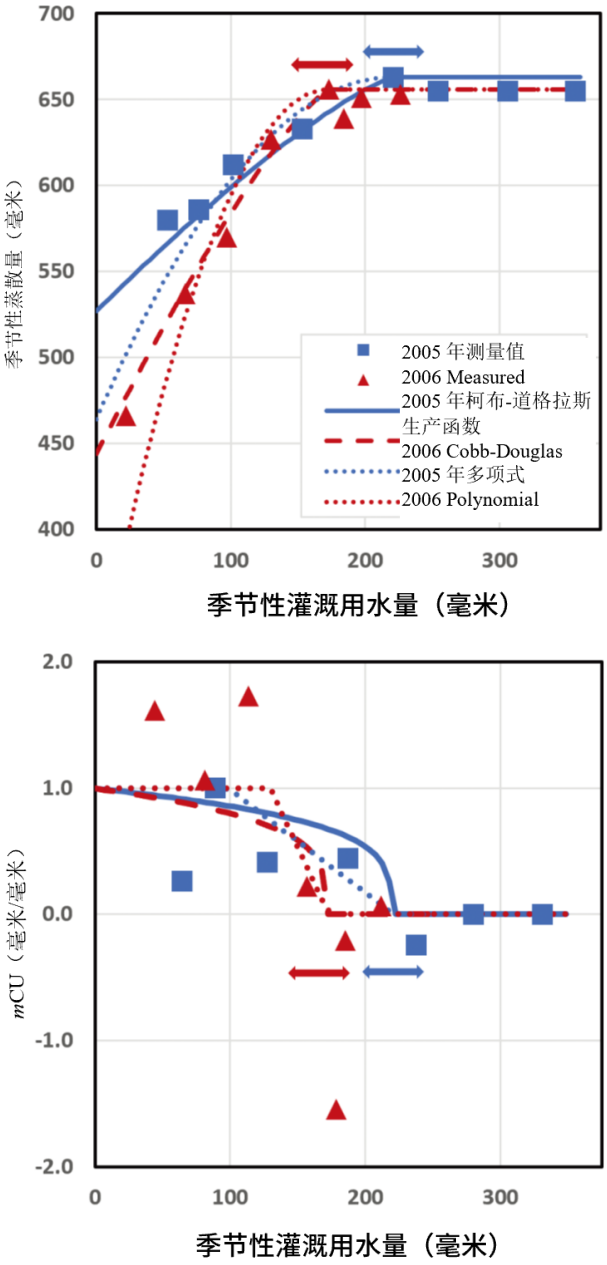


图 2 给定用水方法的 ET 和 mCU 折线图。实心箭头表示充分灌溉管理范围,与作物的最大产量点和季节性蒸散量平台期有关。通过 mCU 数据可以观察到,在非充分灌溉条件下,更有可能减少耗水量。

考虑灌溉管理的实际,我们认为充分灌溉深度为图 2 中实心箭头所表示的范围。超过这一范围可视为过度灌溉。低于这一范围可视为非充分灌溉。

假设图 2 中的农田采用传统的中枢灌溉系统，且灌溉制度管理不善，导致季节性灌溉用水量达到 300 毫米（约 12 英寸）。如采用技术改善灌溉制度，将季节性灌溉用水量降低至 250 毫米（约 10 英寸 [但仍然处于图 2 中的过度灌溉范围内]）。250 毫米到 300 毫米的 mCU 为零，表明采用这一技术并不能减少耗水量。如果在灌溉制度得到良好管理的前提下，在 2005 年利用技术将季节性灌溉用水量从 250 毫米降低至 200 毫米（约 8 英寸）（图 2），mCU 将介于 0.0 至 0.5，表明耗水量小幅减少。

假设将一个管理良好的传统中枢灌溉系统变更为一个管理良好的变速灌溉系统。为方便对比，研究人员采用了内布拉斯加州米德（Mead）和布鲁尔（Brule）的实地研究数据，这些数据表明玉米和大豆的 mCU 介于 0.13 至 0.99，平均值为 0.43。这表明，取水量减少 25 毫米（1 英寸）可将耗水量减少 11 毫米（0.43 英寸）。而如果将一个管理不善的传统灌溉系统变更为一个变速灌溉系统，mCU 预计将接近于 0（处于图 2 的过度灌溉范围内），无法减少耗水量。

总而言之，该方法可帮助预测采用新灌溉管理技术带来的潜在益处。减少取水量必然能够带来一些积极影响，包括节约能源和减缓水质退化（例如，通过减少深层渗漏减少硝酸盐淋滤）。然而，耗水量的减少实际上难以预测。如果新技术只能在过度灌溉范围（mCU= 0）内减少季节性灌溉用水量，则其无法减少耗水量。在充分灌溉范围（mCU 约为 0.2 至 0.5）内减少季节性灌溉用水可以在一定程度上减少耗水量，尽管可能会有导致作物产量小幅下降的风险（虽然蒸散量减少通常会造成产量损失，但在不减少产量的情况下，小幅减少蒸散量也是可能的）。如果技术能够在非充分范围（mCU>0.4）内减少季节性灌溉用水量，则耗水量将大幅减少（40% 至 100% 的取水量减少来自蒸散量减少）。这对于决策者决定何时进行成本分担，以及确定技术将实现何种益处尤为重要。

情景 2：改善施水方法的新技术

内布拉斯加州的灌溉面积持续增长。2002 年至 2007 年，全州灌溉面积增加了 3780 平方公里，许多老旧灌溉系统已完成升级改造，采用了更高效的施水方法。随着内布拉斯加州灌溉系统实现大范围升级改造，也应考虑它们对产量和水资源的影响。

情景 2 涉及的施水方法的改变主要是系统更换，例如，从地面灌溉变更为喷灌，这可能导致施水效率发生重大变化；也包括系统装置升级，例如将位于可旋转平移式喷灌机顶部的喷头更换为喷滴一体喷头；或者在系统检修期间进行系统维护，以提高灌溉均匀度。这些变更使灌溉管理人不需要通过增加灌溉用水量来补偿低灌溉效率，因此通常能够减少灌溉用水量。

随着施水方法的改变，耗水量也会受到影响。水质量平衡（图 3）表明，蒸散量是农田灌溉系统水损失最重要的组成部分，而蒸散量也是灌溉耗水量的主要组成。在图 3 所示系统中，作物蒸腾量仍然是蒸散量的主要组成；蒸发量也可能很高，并且施水方法可能影响蒸发量。

例如，在沟灌系统中，大量灌溉用水通过径流和深层渗漏流失（图 3）；然而沟灌系统的蒸发量与之相比却微不足道。假设将一个形状特殊、无法安装中枢灌溉系统的沟灌农田转变为地下滴灌系统。如此一来可以提高灌溉用水效率，显著减少径流和深层渗漏损失。但是，系统的耗水量可能不会变化，因为蒸散总量保持不变。沟灌系统的“损失”并不是真正意义上的损失，因为损失的水最后仍会回流至流域。

如果将中枢喷灌系统（图 3）转变为喷滴一体喷头或地下滴灌系统，则液滴蒸发损失量减少可能导致耗水量减少，在露点较低的半干旱地区尤其如此。灌溉能够提高各种气候和环境条件下的作物产量；但是当地条件可能对灌溉系统性能具有影响。内布拉斯加州州内气候条件差异巨大，既有年降水量超过 75 厘米的半湿润气候，也有

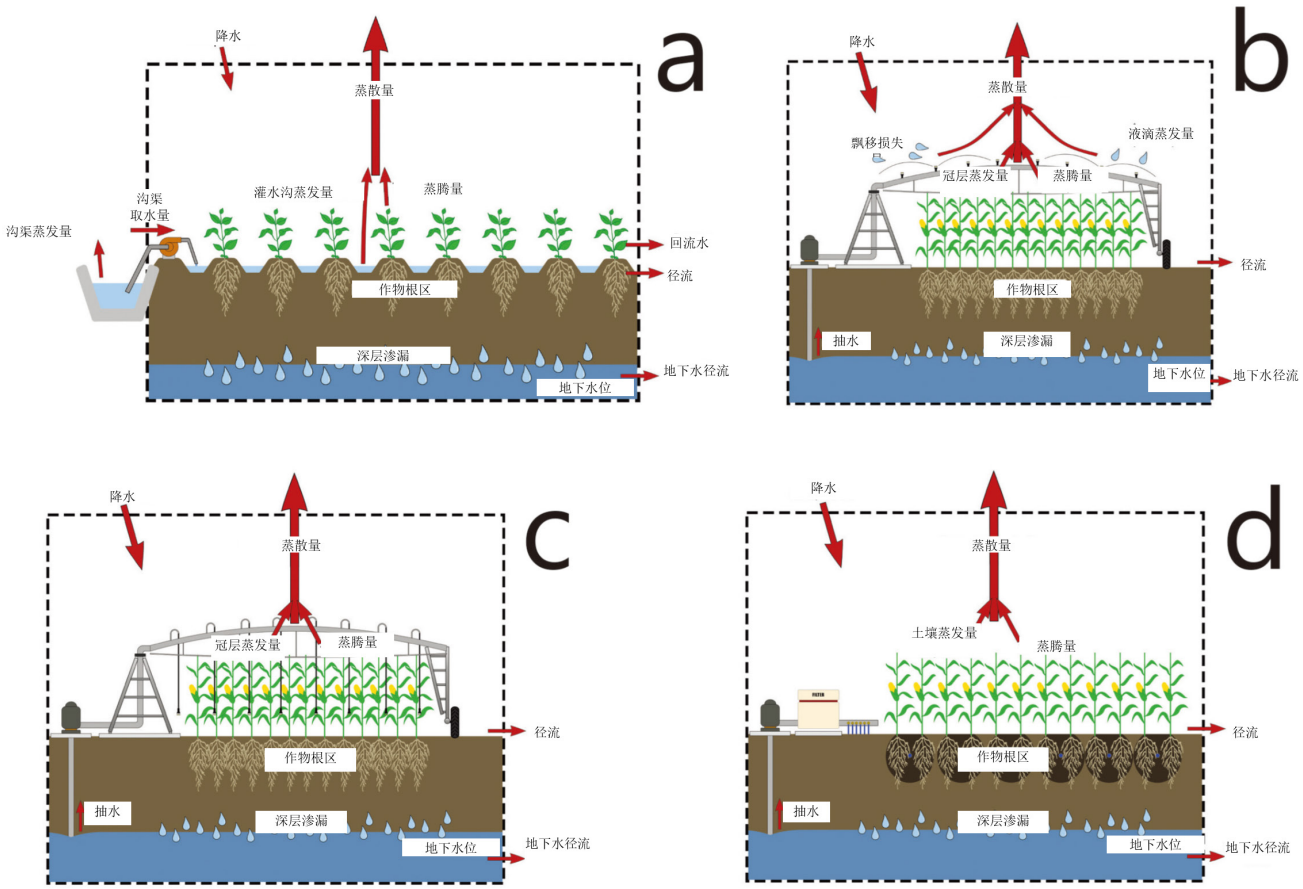


图 3 农田系统潜在水流说明图：沟灌系统（3a）、顶部喷头中枢喷灌系统（3b）、喷滴一体喷头中枢灌溉系统（3c）和地下滴灌系统（3d）。蓝色阴影部分为含水层（处于饱和状态的砂砾层）。

年降水量不足 50 厘米的半干旱气候。这些条件将影响灌溉系统液滴蒸发率，灌溉用水渗入土壤的速率，以及深层渗漏量等效率。在露点较高的地区，液滴蒸发速率相对较低。

虽然水损失不可完全避免，但仍可以通过设计灌溉系统的组件最大程度减少损失，而这通常也能够实现改善水质的效果。在耗水量方面，采用新的施水技术是否导致蒸散量发生变化视情况而定。如果改变施水方法能够减少土壤蒸发量、液滴蒸发量等蒸发损失，就可以在不降低产量的前提下减少耗水量。这也就是为何低能耗精准灌溉和移动式滴灌等技术在大平原中较为干旱的地区（例如得州狭长地带）的应用更加广泛；在具体情形下，减少液滴蒸发损失（由于露点低）的潜力巨大，且持续下降的地下水位也导致水井出水量减少，迫使人们最大程度减少耗水量。本文提出在基于施水方法下考虑水损失可帮助生产者和决策者决定是否投资于不同的施水方法。

结语

耗水量的概念尽管难以清晰判断，但对于从业者确定农田尺度灌溉管理与流域尺度水资源管理的关联关系非常有用。流域管理者的任务通常是维持流域的给定耗水率，有时也需要采取措施减少流域耗水量。我们的方法侧重于在维持产量的同时，寻找减少耗水量的方法。虽然减少取水量的技术往往能够改善水质，降低能源成本，但对耗水量的影响却没有那么明显。

本文提出了两种情景方法，可以协助评估在给定情况下采用相关技术是否能够减少耗水量。对于改善灌溉管理的技术，是否能够减少耗水量取决于季节性灌溉的减少处于哪一范围：过度灌溉、充分灌溉还是非充分灌溉。对于改变施水方法的技术，尤其是在半干旱和干旱气候条件下，耗水量的减少主要是通过减少液滴蒸发量实现的。

在考虑灌溉技术时，对其能够实现的益处进行切实评估有助于作出更明智的决定。在管理实践中考虑耗水量可以明确对抽水量减少和长期影响的预期，节约用水，造福后代。

本文摘译自：
http://extensionpubs.unl.edu/

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
2023 年 3 月 10 日