



水利水电国际资讯摘要 IWHR International Digest

中国水利水电科学研究院 主编：孟志敏 责编：孟圆 刘一帆

2020
10
总283期

联合国水机制“非传统水资源”技术分析简报



联合国水机制“非传统水资源” 技术分析简报

执行摘要

水资源短缺是制约可持续发展的核心挑战,是造成社会动荡,引发国内和国际冲突的潜在触发点。水资源匮乏还会影响人类传统的季节性迁徙路线,加之水安全问题,很可能会重塑人口迁徙模式。全球约60%的人口生活在缺水地区,即一年当中至少有部分时间人类的用水需求无法得到满足。随着干旱地区和人口稠密地区的水资源紧缺进一步加剧,下一代人很有可能要为当下世人的行为承受代价,面临无水可用的危机。因此,水资源短缺地区必须以可持续的方式开采和利用一切可用的水资源,最大程度地遏制水危机加剧。

下一代人很有可能要为当下世人的行为承受代价,面临无水可用的危机。

依赖降雪、降雨、河川径流和浅层地下水等来源的常规水资源开采已无以为继,不足以满足水资源短缺地区不断增长的淡水需求。考虑到干旱地区实现水可持续发展所面临的挑战,利用非常规水资源来弥补供水缺口应大有可为。为解决水

资源短缺问题,世界多地纷纷加入到非常规水资源利用的实践中来。

缺水国家需要启用全新思路来进行水资源规划,创造性地利用非常规水资源,实现水的可持续发展。

下至海床,上至高空大气,可利用的非常规水资源形式多样。然而要捕获这些非常规水资源,需要多种技术的干预和创新。从空气中收集水的方式包括使用云播种技术增加雨量,以及从雾中收集水;从地面收集水则涉及从微尺度收集原本会蒸发掉的雨水;以上技术都可用于解决局部的水资源短缺问题。在地下水方面,开采海上和陆上深层地下水以及加大未开发地下水的可持续开采,是具备进一步开采潜力的地区的重要选择。中水回用是节约用水和充分利用水资源的关键,经处理的城市污水和农业排水得以物尽其用。淡化海水也是一种开发潜力巨大的水资源。通过物理运输方式送水,例如拖曳冰山、利用船舶水舱和货舱压载输水等开始走入人们视野,但其实践仍处于起步阶段。

下至海床,上至高空大气,可利用的非常规水资源形式多样。利用这些非常规水资源需要技术的干预才能实现。

城市污水和淡化水等一些非常规水资源的水量是已知的(分别为 380 km^3 和 35 km^3),深层地下水储量更大,预计在1600万-3000万 km^3 之间。其中,有10万-500万 km^3 的深层地下水形成时间少于50年,属于可再生水资源;剩余的大部分为不可再生深层地下水,深埋于海底和陆地的地质环境中。地球大气层中约有1300万 km^3 的气态水,主要从海洋、内海、湿地和植物表面蒸发而来。南极冰层含有2700万 km^3 的水,其中每年有2000 km^3 形成冰山。海水量为13.5亿 km^3 。只需利用如此巨量的深层地下水、大气水、南极冰和海水的一小部分,就可以有效缓解干旱地区的水资源短缺问题。

非常规水资源的利用对于干旱地区实现可持续用水至关重要,缓解水危机,助力循环经济发展。

由于缺乏实践,很难评估拖曳冰山和压载水等一些非常规水资源的前景,预测其开发和利用的潜力也同样困难。与主要的非常规水资源相比,在微型集水区收集的雾水和雨水水量很小,但却可以为解决局部地区水资源短缺问题贡献重要力量。

非常规水资源可以缩小供水缺口,但是鉴于信息和数据有限,如何量化这些水资源弥补用水缺口的程度仍然是一项挑战,也是有待解决的一个问题。此外,尽管非常规水资源的诸多优势已经证实,由于面临重重障碍,大多数非常规水资源的潜力仍未得到充分开发。

由于干旱地区水资源供应不足事件频发,过度开采导致地下水位下降等问题,制定和实施水资源可持续发展的战略已迫在眉睫,以求充分挖掘非常规水资源的利用潜力,提出应对方案,营造有利的环境来解决眼前的挑战。关键是要采取以下行动:(1)

评估在水资源短缺地区利用非常规水资源增加供水的潜力;(2)重新审视特定国家和地区的非正规水资源,纳入水资源短缺国家和流域的政治议程、政策和水资源管理过程中的优先事项,并以行动计划作为支撑,扩大资源的广泛利用;(3)完善制度,加强协作,避免方法不成体系,明确水务专业人员和机构的作用和责任;(4)通过全面分析创新的融资机制、分析替代方案的经济和社会成本(例如运水车或从水井远距离输水),阐明在水资源可持续开发上有所作为能带来的多种效益,消除对高昂成本的顾虑;(5)培养高技能人才,以解决评估和利用一些非常规水资源及其环境、生态系统和经济权衡的复杂问题;(6)鼓励私营部门投资非常规水资源利用项目;(7)鼓励社区参与,借此加强对当地情况的了解来增强本地化干预,并将性别主流化目标和过程纳入社区项目中;(8)增加科研经费,研究和开发水资源短缺地区潜在的非常规水资源。

全球亟需进入水资源管理新阶段,一步步解决高效水资源管理面临的障碍,实现对各种形式的非常规水资源的监测、数字化和量化。

水资源越来越多地作为国际和跨境合作的媒介,成为支撑粮食生产、人民生计、生态系统、适应和减缓气候变化以及促进可持续发展的重要手段。如今世界尚未实现2030年可持续发展目标(SDG)6及其他可持续发展目标中包含的水相关目标的跨越式发展,利用非常规水资源潜力开展国际、区域、跨界和国家层面的合作,就显得尤为重要。好在,世界各地的水资源专家和政策制定者已开始重视非常规水资源在水资源可持续未来方面的作用,将水资源视为支撑循环经济的基石。

主要的非常规水资源开发方式

雾水收集

雾中的水分也可作为饮用水源,用于解决无法实现可持续供水且降雨量有限的干旱地区的缺水问题。但这些地区须满足一些特定的条件如:经常发生大雾天气;雾浓度较高;持续有风,比如来自一个方向的信风($4-10\text{ m/s} = 14-36\text{ km/h}$),并且有足够的空间和高度拦截雾气,实现雾水收集。雾水收集作为一种被动、实用、无需费力维护且可持续的选择,可以为大雾天气频发的地区提供干净的饮用水。

作为全球自然水循环的一部分,大气中的水量维持在 $12,900\text{ km}^3$,占地球上总水量的 0.001% 和淡水总量的 0.04% 。在特定条件下,地面的空气中会含有雾水,也就是直径通常为 $1-50\text{ }\mu\text{m}$ 的悬浮液滴。雾水源于空气中这些细小水滴的积聚和悬浮,在陆地或海洋上方形成大量湿空气,是沙漠环境中的重要水源。雾水的收集通过以下过程实现:悬浮液滴在垂直网格上发生碰撞,然后聚结成水,流入集水沟、水箱或配水系统中。

通常,雾水收集系统由聚丙烯网组成,通常称为拉舍尔网。在拉舍尔网无法承受大风荷载的地区,就会采用其他织物和构造作为替代。例如,在恶劣环境下,会使用三维间隔织物来替代易于撕裂的拉舍尔网。安装在特定位置的雾水收集器的数量、大小和类型取决于雾的特性,例如,雾的厚度、持续时间和发生频率,以及地区气候和地形、需水量,及相关地区运行和维护雾水收集系统所具备的资金和人力。雾水产量很大程度上取决于雾的强度、持续时间和发生频率。雾水收集地点的雾天天数在60至360天之间,雾水收集网的日雾水产量在 $2\text{至}20\text{ L/m}^2$ 之间。

雾水收集系统适合安装在一些降水稀少的山区和沿海地区。选址是有效收集雾水的关键,应从

两个主要评估参数着手。首先,选在可用水源距离较远而难以获取,或替代水源(运水车)花费过高的地区。其次,研究目标地区的气象条件,确定雾强度和持续时间是否适合采用雾水收集系统。基于这些考虑,全球范围内建立了多个雾水收集点提供饮用水,并一定程度上用于畜牧业和农业。

雾水收集项目遍及世界各地:智利、佛得角、厄立特里亚、危地马拉、尼泊尔、摩洛哥、秘鲁、纳米比亚、南非、沙特阿拉伯、埃及、阿塞拜疆、埃塞俄比亚、阿曼、以色列、哥伦比亚、也门、多米尼加共和国、厄瓜多尔和加那利群岛等。最大的雾水收集项目位于摩洛哥西南部的Ait Baamrane地区,该地区常年干旱,年降水量仅为112毫米,但平均每年雾天有143天。鼓励地方机构和当地社区的参与,确保性别尊重成为当地的主流意识,是实现雾水收集系统可持续的主要驱动力。

云种散播增加降雨量

地球大气层中约有 1300 万km^3 的气态水,来自于海洋、内陆海、湿地表面的蒸发以及植物的蒸腾作用。这些水蒸气储量随着蒸发-冷凝和降水循环(每年完成8-9次水文循环过程,每次持续约40-45天)而不断更新。因此,大气中的水汽量是取之不尽的淡水来源,也成为增加雨水的有效途径。

云种散播技术可以在适当条件下用来增加目标地区的降雨量。云播种一般在对流层的中下位置作业,将吸湿性物质播散到云层周围,使水滴或冰晶通过水蒸气凝结或冻结过程,在异质核上活跃起来。随后,人造水滴和天然水滴与冰晶之间的碰撞-聚结形成大的雨水凝结体(水滴、霰、冰雹、雪花等),最终以降水的形式滴落。云种散播通过多种不同的

技术来改变包括对流风暴、大面积层云和地面雾等不同类型的云的降水状况。据估计,云层中以降水的形式释放到地面的水分不超过10%,这意味着人工增雨技术在增加降水方面有着相当可观的潜力。

尽管人为改变天气领域相关的科学研究和实践稳步发展,但对云动力学和相关微物理学研究仍然有限。

50多年来,云播种技术在各种体育赛事和庆祝活动中被用来增加降水,防雷,散雾以及改善天气状况。由于处在对流层的上层,大气中的流动水分携带着90%的南北向水汽从热带穿过对流层下层,虽仅相当于地球周长的10%,但足以覆盖横向数百英里,纵向可达上千英里的区域。尽管大气中的水分可提供迫切所需的降水,但其也会引起洪水、泥石流和山体滑坡等灾害,目前尚未研发出控

制大气中水分的技术。但在建模、分析和观测方面有了进一步发展,对单个云过程及其潜在相互作用的科学认识有了深入了解。

云种散播技术通常在云底或云顶作业,或者在云内其他所需高度直接作用来实现降雨。在不同项目中,反应试剂由轻型和中型飞机、小型地对空和空对空火箭、炮弹和地面发生器完成输送(图1)。还可能使用可以负荷的气球和装有试剂的烟花型装置。播种策略的选择很大程度上取决于云的类型和特征、播种材料和投放方式。

播种技术的目的是刺激和/或加速形成体积较大的水汽和冰晶,更早地释放到地面。根据云的类型和反应试剂作用的区域不同,这一过程可能涉及水滴和冰晶吸收水蒸气而凝结,以及液滴、冰晶、雪花、冰霰和冰雹之间的碰撞-聚结。

云的类型对于云种散播的成效至关重要。大陆和海上形成的云有明显不同。大陆云中的液滴由于

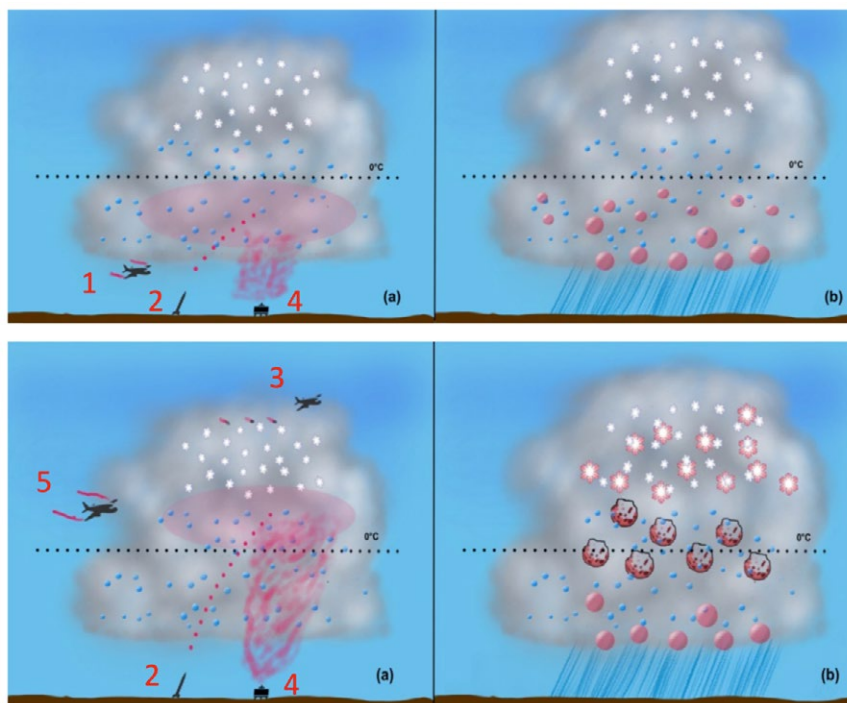


图 1: 使用飞机、火箭或地面结晶或冷凝核发生器进行云种散播增加降雨量:(a) 云种散播方式的选择,(b) 反映云种散播的预期结果。云种散播方式包括:(1) 云底飞机播种;(2) 火箭播种;(3) 云顶飞机播种;(4) 地面发生器播种;(5) 飞机穿透云层直接播种。

尺寸较小且浓度较高,通常碰撞-聚结的效果并不是很好。形成降雨需要较大的水滴,这意味着大陆云的降水模式要比海洋云复杂。

并非所有云都适合用来人工降雨,实现这一过程需要满足一些特定的条件如,充足的水含量,云层气温高低部分的垂直深度,以及发育动态。由此可见自然情况下云层降水过程蕴含能量巨大,也表明通过改变质量或能量平衡来增加降水是不可行的,只能通过不稳定态(对流、相和胶体的不稳定性)来增加降水。因此,只有对这一系统有了确切的了解,谨慎使用气溶胶颗粒增加或替代天然颗粒,才有机会增加云层降水量。

人工云种散播技术是将特定的气溶胶颗粒喷入云环境中,与自然颗粒争夺水蒸气。这些气溶胶颗粒中有形成冰的颗粒,如具有像天然冰晶一样的晶格结构的碘化银,或其他化学化合物,如包含各种助剂的盐基吸湿颗粒、干冰颗粒或液氮。这些人工降雨所需的材料通常被称为试剂。试剂的化学成分和变化存在很大差异。现有研究致力于优化试剂组成,提高试剂效率。为了在实验室条件下测量试剂的性能,通常会使用不同类型的专用大型和小型云室,在其中模拟与所研究的云环境相似的温度、湿度、液态和冰水含量、气流、电场等参数。播种引起的水滴冻结和蒸汽凝结会伴随潜热释放,迫使云浮力和热对流的产生,进一步促使滴液增大。

各个国家应用云种散播技术的实践表明,根据现有的云资源和类型、试剂类型和播种方式、云含水量和云底温度,每年可以增加的降水量在10%到20%以上。利用飞机和火箭将播种材料直接输送到云层效果相对较好,降水增加较多。然而,目前尚不明确数值变化差异的原因,影响估值对目标地区自然降水的估值联系密切。

微型雨水收集

在降雨量有限且季节内和季节间降雨变化较大的地区,如干旱和半干旱地区,大部分的降水会随着地表径流和蒸发而流失。由于植被覆盖率低,土壤

层浅而坚硬,干旱进一步加剧。这些因素也促使人们开始关注微型集雨系统,它能最大限度地利用少量降雨和径流水满足作物生产和当地社区的需求。

在降雨量有限的地区,微型雨水收集系统可支持当地社区的用水需求。

微型雨水收集系统主要有两种类型。第一种是通过屋顶系统集水,收集径流并将其存储在水箱、蓄水池或类似装置中。这些水可作为家庭用水或喂养牲畜,但这一家庭用水的水质问题尤其受到关注。第二种是用于农业的集水系统,涉及收集从水库或耕种区等流域面积较小的根带集水区流出的雨水(图2)。由于径流事件的间歇性,因此有必要在雨季存储足量的雨水,以备日后之需。



图 2: 微型雨水收集系统

微型雨水收集系统,也称为原位集水系统,覆盖相对较小的地表径流集水区(从几平方米到几千平方米不等),片流短距离流动。集水区的径流水会作为附近农业区域用水,直接浸润植物;或存储在小集水区中,供人类或动物再利用。集水面可能是天然的,也可能用一种能引导径流的材料进行处理,尤其在渗透率较高的沙土区域应用性较强。

农业领域采用了不同形式的微型集水区。等高堤由沿着坡田或山坡等高线堆筑的土、石或垃圾堤组成,将雨水截留在堤后,增加渗透。半圆形、梯形或“V”形堤交错放置,让水可以聚集在堤后。当环区(hoop area)充满水时,多余的水就会流到等高堤的边缘。这些系统最常用于种植果树或灌木。

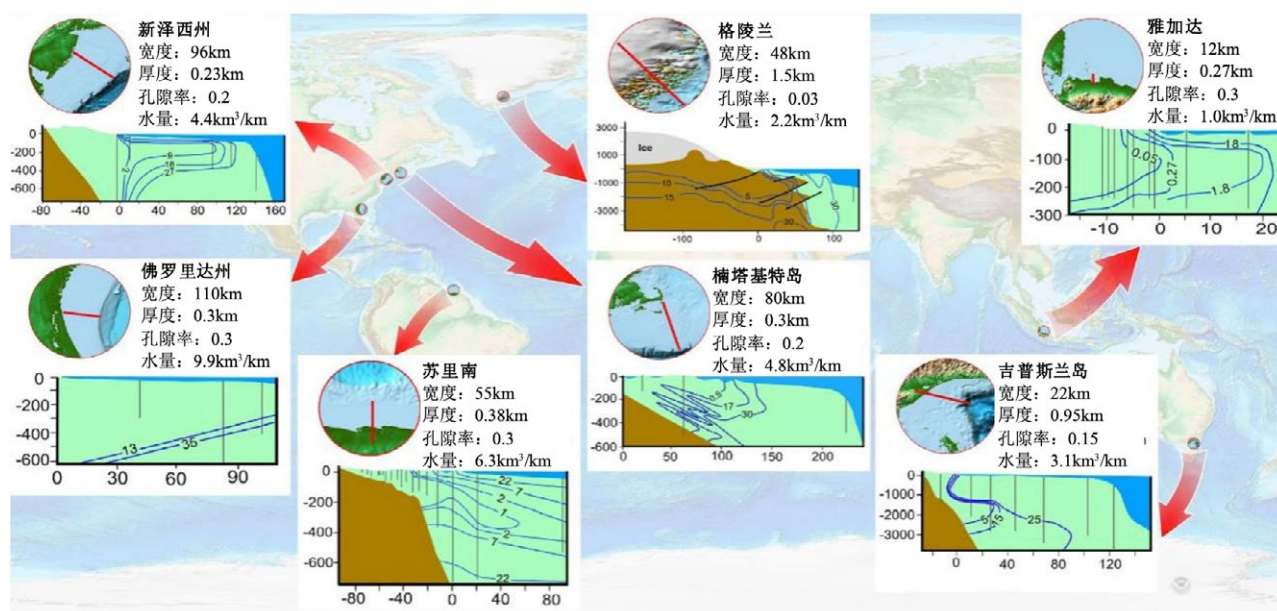


图 3: 横截面图显示了世界范围内储量可观的由大气降水转化的地下水。蓝线表示盐度等值线 (ppt)。灰色竖线表示海上油井位置。

另外一种微型集水系统是meskat型系统, 不同于交替部署集水区和耕种区, 这种系统将田地划分出一个单独的集水区, 位于种植区上方。集水区内会清除植被, 增加径流。耕种区周围会堆筑“U”形堤, 截留径流。在突尼斯, 橄榄树种植就是应用了这一系统。巴基斯坦俾路支省也使用了类似的系统“Khushkaba来种植大田作物。

深层陆上和近海地下的淡咸水

浅层地下水资源的开采速度超过了预计的现代补给量。目前, 全球地下水开采量的年估值为750-800 km³。在城市和农作地区, 过量抽水已导致水位下降数十米、地面沉降和盐碱化等问题。地球上可利用的地下水总量估计在1600-3000万km³之间。其中只有约10-500万km³的浅层地下水资源形成时间不到50年, 是可再生的。而其他更多的地下水资源埋藏在深层(深达1 km)区域的含水层或近海位置。

近海海底淡水是指储藏在海底含水层中的水。可将海上油气勘探和开采的技术用于海底含水层作

业, 在适当的情况下(主要是资金成本允许), 可直接用于开采海底含水层中的水源。当陆地淡水开采成本上升到与开发海底淡水相比不具有优势时, 海底含水层中的大量淡水和微咸水则更具投资回报。

在过去的50年中, 在大陆架的钻探活动证实了海底含水层中存在淡水和咸淡水资源(图3)。这类水资源存在于深度600 米以下距陆地不到100 公里的细粒隔水层中, 近海淡水量约为0.8-9.0 km³/km。据估计, 浅层的(<500 m)可渗透的砂岩和石灰岩储层中封存了多达5 × 10⁵ km³的淡水和咸淡水(< 1 ppt)。相比较而言, 2015年美国从陆上含水层抽取的地下水总量约为117 km³。

当前从承压含水层中抽取的深层地下水仅涉及了采矿过程相关的研究, 需要进一步扩大研究面, 增大开采规模, 实现将其作为饮用水源的目标。

虽然大规模开发海底淡水资源的概念相对较新, 但经由海水深层补给地下水的形式利用海底淡水已有近千年的历史。例如, 在公元一世纪, 希腊地

理学家Strabo报告了在叙利亚Arwad附近利用近海淡水温泉一事。

虽说海水深层补给地下水和海底含水层是两种不同类型的海底淡水资源, 其实这两类资源都值得经过深入探究后再合理利用。

美国东海岸(如新泽西州、马沙文雅岛;图4)是开展海底含水层研究的理想地点。这里早在20世纪70年代到2010期间就进行了广泛的钻探和测试。在过去的250万年里, 由于巨大的冰盖遍及各大洲, 海平面比如今要低得多, 这些淡水资源就这样深埋在了海底。例如, 在末次盛冰期, 海平面要比现在低120米; 平均而言, 海平面要比现在低40 米。

最近已开发出可对海上淡水成像的海洋大地电磁法和受控源电磁法(图4)。这项新的技术可以推广至全球范围内使用, 用以表征近海淡水, 降低钻井勘探成本。海上淡水导电性能弱, 其地层电阻率约为100 Ohm-m。在确保淡水储存在较为密致的隔水层条件下, 使用水平井可以实现连续30年以上日开采量19,200 m³的海底淡水开采量。水平钻井技术的进步不断降低钻井成本。南非开普敦也可以考虑作为备选地点, 该地区2017年经历了长期干旱。有人担心近海淡水生产可能会影响陆地水资源或造成地面沉降。迄今为止, 尚未进行近海淡水资源开发方面的实践。

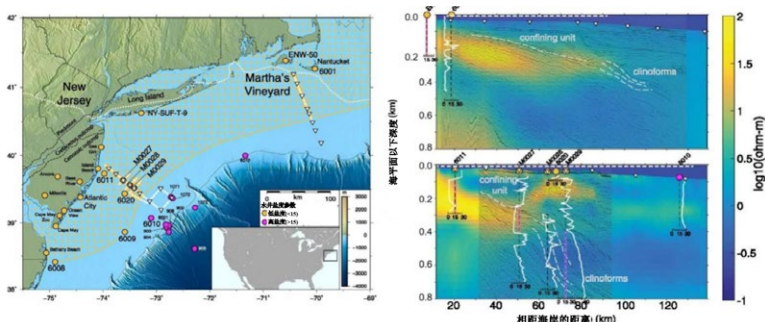


图4: 图表显示了高盐度(粉色)和低盐度(黄色)海上油井的位置, 以及海洋电磁勘探的位置(a)以及沿马沙文雅岛(b)和新泽西州(c)的海上淡水联合电磁受控源和大地电磁反演。

陆上深层地下水

承压含水层和化石含水层的地下水是陆上淡水资源的重要来源(图5)。位于地表以下两个不透水层之间由多孔岩石构成的饱和含水层称为承压含水层。含水层受到上方和下方的不透水物质挤压, 当水井穿透含水层时, 压力释放, 水就会升至含水层之上。同样, 化石含水层即含有地下淡水的地质构造, 这些淡水在数千年甚至数百万年前就储存在这里, 如今很难回补。如果在承压含水层中钻井, 则内部压力(取决于岩石输送水的能力)可能足以在无需泵的情况下, 就使水从井里升到井面, 有时甚至完全升出水井。这种井称为“自流井”。

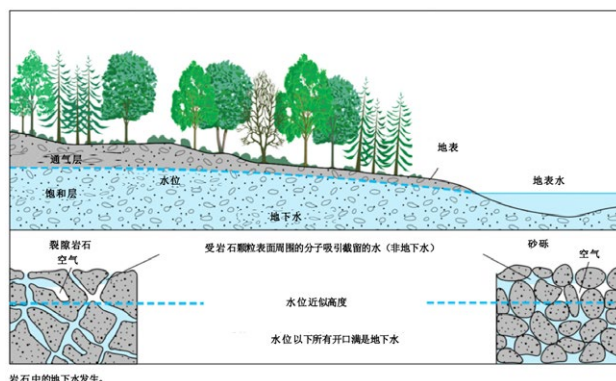


图5: 承压地质构造中的地下水

陆上化石含水层可能位于低渗透性隔水层之间, 也可能位于地表以下无法补给的非密闭层。美国的奥加拉拉含水层大多属于前一种类型, 而北非的努比亚砂岩含水层系统则属于后一种类型。在过去的250万年中, 当时这些地区的气候通常比较凉爽和湿润, 因此那时含水层的补给量相对较高。由于这些含水层当前的补给量相对较低, 因此只要是从这些含水层中取水, 都可视为开采资源。这些远古形成的封闭水层是埋藏在陆地水层中的重要资源, 安全完好的封存着保障一代又一代后人的用水。

城市污水

城市污水的来源: (1)生活污水, 包括厕所污水, 厨房和浴室及其他家庭用途产生的洗涤水; (2)商业设施和机构产生的废水; (3)排入城市污水处理系统的工业废水; (4)最终排入城市污水处理系统的雨水和其他城市径流。

人口增长和城市化提高了人们生活水平, 增加了用水需求, 产生的废水也随之增多。这也意味着随着社会的发展, 未来几年产生的污水只会有增无减。同时, 通过收集和处理污水, 将其用于农业、水产养殖、农林业/园林绿化、补给含水层, 以及直接或间接饮用等, 城市污水的处理和利用也为解决干旱地区水资源短缺的问题提供新思路。

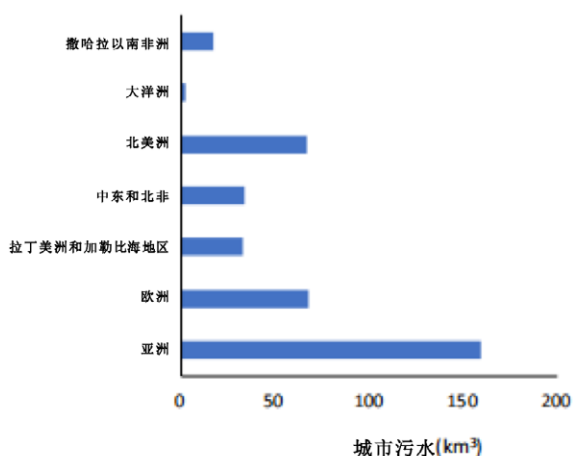


图 6: 亚洲地区产生的城市污水量约占全球污水量的 40% (基于 (Qadir et al., 2020) 的数据计算得出)。

城市污水的价值过去常常被忽略, 如今越来越多地被视为是水、营养素、贵金属和能源的宝贵来源。随着城市污水量的增加和资源回收创新, 人们逐渐关注并积极开展从城市污水中回收水、营养素和能源等方面的实践。据估计, 全世界每年会产生 380 km³ 的污水, 相当于每年流经尼亚加拉大瀑布的水量的 5 倍以上 (图 6)。预计到 2030 年和 2050 年, 全球污水产量将分别增至 470 km³ 和 575 km³。全球每年产生的污水中的氮磷钾含量分别达到 16.6

Tg (Tg = 百万吨)、3.0 Tg 和 6.3 Tg。若能从污水中完全回收这些营养素, 将补充 13.4% 的全球农业营养素需求。除了营养素回收和经济效益外, 还会带来一些关键的环境收益, 例如, 最大程度地减少富营养化, 减轻对自然资源开发的压力等。

从能源角度来看, 污水中所含的能源可以满足 1.58 亿户家庭的用电需求。这些估值和预测基于每年报告的全球城市污水年产量中涉及的最大理论水量、营养素和能源。

尽管城市污水中存在着许多宝贵资源, 并且一些国家正在开展中水回用项目 (Jimenez and Asano, 2008), 但污水中资源的回收潜力还未得到充分开发。大多数发展中国家没有能力建设大规模的污水处理厂, 污水处理系统建设还不完善, 难以满足不断增长的城市人口的需求。在一些国家, 特别是在撒哈拉以南非洲, 主要城市的卫生基础设施建设速度远不及人口增长速度, 使得城市污水的收集和管理效率低下。

好在城市污水收集、处理, 并将经过处理的城市污水用于适用用途和生产性用途的研究和实践也在不断革新求变。这将需要根据城市污水产生的特定来源及其适用用途或安全处置方法来评估可行的处理方案。充分发挥城市污水的资源回收潜力, 需要采取技术手段以外的行动, 探索资源回收和再利用的商业机会。有必要促进和加快资源回收创新方法的实施, 特别是在中低收入国家, 大多数城市污水仍未经处理直接排入环境中。人们对淡水需求的激增也使水资源紧缺的威胁加剧, 在循环经济背景下, 没有任何理由不从安全管理下的污水系统中回收资源的价值。

农业排水

充分排水是实现可持续灌溉的前提条件, 特别是在地下水和高水位中的盐分或涝渍可能损害作物的情况下。作物生产用水的一小部分会形成排水, 其中含有盐分和农药、化肥以及土壤和水改良

剂等农用化学品残留物。为了保持表土层中适当的盐分平衡,形成有效的根带,渗入根带下方的排水的盐度须高于所用的灌溉水的盐度。

用农业排水进行灌溉需要进行盐分管理,但可以带来农业生产力提高、固碳、经济和生计效益。

在干旱和半干旱地区,灌溉一直是影响农业发展的重要因素,随着世界人口的增加,灌溉农业持续扩大,但是现在每年的可再生淡水资源大部分已被其他用途占用。在水资源短缺国家,市政、工业和农业部门之间的淡水资源争夺非常激烈。这导致农业可用淡水量减少,在人口增长率较高并严重遭受环境问题困扰的欠发达干旱地区的国家中,这种现象预计将继续存在并进一步加剧。在这些国家中,农业排水回用已成为灌溉用水的重要来源。根据盐的含量和类型,通过实施相关的灌溉和土壤管理规范,农业排水可用于不同的作物生产。

循环使用含盐分的水直到其不可再用于任何经济活动,将盐碱灌溉区恢复到更高的生产水平,可以在不扩大生产面积,避免由此带来的其他影响下,促进食品、饲料和可再生能源生产(图7)。改变传统的方式是要回用盐水,直到其不能再用于任何经济活动而非单纯改变盐水处理方式。这么做可带来额外的效益,例如增加土壤固碳量,从而减缓气候变化影响。因此,不可将含盐排水视作是多余的,并因此忽略它,特别是在严重依赖灌溉农业的地区,这些地区已经在输水和配水系统等基础设施上进行了大量投资来保障供水,实现灌溉和粮食安全。

对含盐排水进行地方管理有两种选择:(1)在蒸发池中处理,进行区域存储;(2)回用于灌溉用途。前者错失有效再利用含盐排水得机会,只有在这些含盐排水的生产性用途不具经济可行性的情况下,才可考虑采用这种方法。对于后者,由于排水所含盐分高于所用灌溉水,所以通过传统灌溉方法,将排水直接回用于灌溉下游作物的可持续性要低于原始灌溉水。因此在依赖排水回用,包括

最终用于灌溉盐生植物的灌溉方案中,所有灌溉步骤都需要过量灌溉才能产生排水,将其收集在瓷砖排水系统中;可持续性取决于社区参与灌溉方案的设计和管理;以及是否需要在流域范围内,使用水文和生态模型来评估使用各种水源的不同替代方案的长期后果。

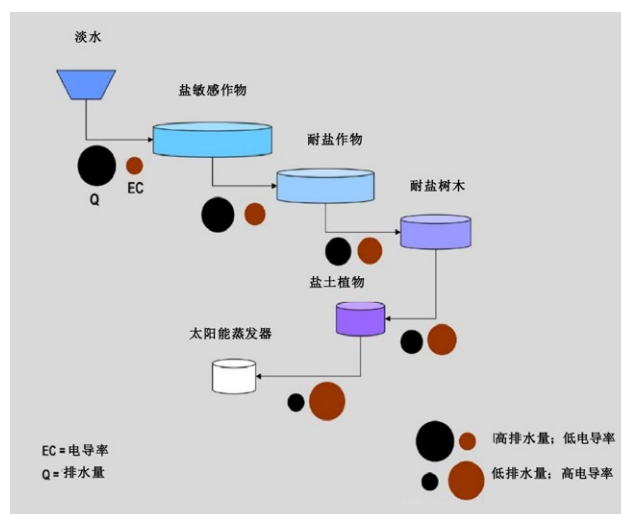


图7: 按顺序回用含盐排水可有效促进食品、饲料、可再生能源生产, 以及土壤固碳。

冰山拖曳运水

冰山是由于波浪作用和冰下应力从大陆冰川崩裂的一块巨大的冰。冰山可以提供大量可再生的,且不会严重污染环境的未开发淡水源。世界上约有75%的淡水冻结在冰中,而其中约90%位于南极地区。南极冰层的总含水量为2700万 km^3 ,其中每年约有2000 km^3 以冰山的形式崩裂,从冰层中分离。

将冰山从极地冰盖拖到亟需水的水资源短缺国家,听起来可能并不像是一种切合实际的解决方案,但自20世纪50年代以来,科学家、学者和政治家一直在考虑将冰山作为具有开发潜能的淡水资源。其实冰山拖曳技术具有可行性,因为加拿大石油和天然气行业在发现有碰撞危险时会定期将冰山拖离海上平台。尽管尚未大规模实践,但随着世界各地淡水需求的不断上升,冰山的增加,以及

冰山捕获技术的进步,冰山拖曳技术的相关的实践值得期待。

在水资源日益短缺的背景下,通过拖曳冰山实现物理运水的方法逐渐受到关注,但这种方法实践仍处于起步阶段。

在现代科学技术的支撑下,跨越大洋将一座冰山从极地地区拖到更温暖的气候区似乎是有可能实现的。冰山拖曳的技术可行性考量涉及四个方面:(1)找到合适的来源和供应;(2)计算必要的拖力要求;(3)准确预测和核算在途中溶化的水量;(4)估算整个项目经济上的可行性。

不是任何的冰山都能进行拖曳。由于冰山的巨大的尺寸、重量和密度,拖曳过程会有很大的翻滚危险。因此,扁平状的,横向尺寸远大于厚度的矩形冰山是理想选择。

由于可移动的冰山很多,且尺寸和形状不一,因此可通过遥感技术来选择适合长距离拖曳的冰山。最早发现于南极洲的扁平状冰山,是尺寸最大,最适合拖曳的冰山样本。冰山每年溶入海洋的水量为 $3,000\text{ km}^3$,接近世界年淡水消耗量($3,300\text{ km}^3$)。在相对较小的范围内,10万吨的冰山可以成功拖曳。而适合向水资源短缺地区供水的最小冰山尺寸约为100万吨。

除了供水以外,冰山还可以产生能量。如果将冰山运到低纬度地区,可通过热梯度获得大量能量。对于使用化石燃料的常规电站,冰可帮助降低冷凝温度。

压载水

压载水(淡水或盐水)存储在船舶的水舱和货舱中,可以确保船舶稳定、航行安全和结构完整性,船舶可以根据港口的船舶重量变化进行调整。如果船舶在没有货物的情况下航行,或已在一个港口卸出一些货物,正驶向下一个港口,则可在船上注入压载水,保持所需的安全运行条件。根

据《2004年国际船舶压载水及沉积物控制与管理公约》(以下简称为《压载水管理公约》)中环境方面的规定:在任何情况下,在排出压载水之前要对压载水进行处理。

许多不同的水处理技术可用于市政和工业。但是,如果未经调整就将它们用于处理压载水,这些技术将无法达到压载水处理标准所要求的水平。

压载水处理标准有两种:《压载水管理公约》D-1标准和《压载水管理公约》D-2标准。D-1标准要求船舶须在远离沿海地区的公海中才能交换至少95%的压载水量。理想情况下,这意味着位置在距离陆地至少200海里,水深至少200米的地方。在那里很少会有存活生物。因此,船舶在释放压载水时,就不太可能会带来可能有害的物种。D-2标准规定了允许排放的活生物体的最大数量,包括对人体健康有害的特定指标微生物。自2017年9月起,所有船舶均必须至少达到D-1标准,所有新船舶均必须达到D-2标准。自2019年9月起,所有船舶均必须满足D-2标准。此外,所有船舶必须有压载水管理计划;压载水记录簿;以及国际压载水管理证书(国际海事组织,2019年)。

压载水处理措施可分为机械物理处理和化学处理。处理过程主要包括通过过滤器或水力旋流器机械分离较大的颗粒。经常会使用网目尺寸约为 $40\text{ }\mu\text{m}$ 的自动自清洁过滤系统,水中仅残留较小的生物体。其他物理措施包括:(1)应用超声波和空化,机械破坏颗粒和生物体;(2)高能技术,例如,加热;或(3)紫外线照射。结合高性能过滤器和紫外线辐射,有几种经《压载水管理公约》批准的方法可完全依靠物理处理方法来达到D-2标准。尽管这些系统不会对人类或环境造成化学危害,但也有缺点,即能耗高,在高浊度或高溶解有机物含量高的水中可能存在性能问题,降低紫外线穿透性。

据估计,2013年世界海运贸易量为93.5亿吨,2013年全球压载水排放量约为31亿吨($31\text{ 亿 m}^3=3.1\text{ km}^3$)。这表明压载水占与世界海运贸易相关的货物总量的三分之一。

淡化水

海水淡化过程是指,去除海水(盐含量在30,000和50,000 mg/L之间)或微咸地下水(盐含量在800到10,000 mg/L)中的盐分,成为可饮用水。淡化水是一种重要的水资源,在水文循环所能提供的范围之外,提供了不受气候影响且可稳定供应的高质量水资源;海洋蕴藏着地球上97%的水资源,如此可观的水量为海水淡化提供了源源不断的原料。

全球现有约16,000个海水淡化厂,淡化水日产量达9500万 m^3 (每年350亿 m^3),淡化的清洁水可用于工业、商业、生活、旅游和高价值农业。几乎一半的海水淡化产能(44%)来自不断增长中的中东市场,其他地区的增长速度甚至更快,特别是亚洲。其中中国、美国和拉丁美洲最为显著。

生产饮用水的海水淡化技术分为两类:热法和膜法。在过去的十年中,由于其相对较低的能耗和水生产成本,海水反渗透法(SWRO),这一目前应用最为广泛的膜法技术已成为全球海水淡化的首选方法。2015年之后,甚至大多数中东国家也停止或大幅减少了基于热法的海水淡化厂的建设项目。

在过去的十年中,膜技术和材料科学的发展推动了海水淡化方式的更新升级。压力交换式能量回收系统,更高效的反渗透(RO)膜元件,纳米结构的反渗透膜,创新的膜容器组件,以及高回收率的反渗透系统等最新技术进展,将进一步降低海水淡化所需的能源,成为有效降低淡化水成本的关键环节。预计到2030年,这些领域的技术突破会大大降低淡化水的生产成本。

海水淡化成本的稳定下降趋势,加上更严格的法规要求带来常规水处理和中水回用的成本增加,未来海水很可能成为有吸引力和竞争优势的水源,并在未来15年内使海水淡化成为全球沿海地区抵御干旱的可靠的手段。目前,海水淡化仅为全球沿海中心城市提供了约10%的城市供水,到2030年,这一比例预计将达到25%。

目前,全球有150多个国家以各种形式利用海水淡化技术来满足用水需求,为3亿多人提供饮用水。尽管成本不断下降,但大多数海水淡化厂仍位于高收入国家(67%),占全球海水淡化产能的71%。相比之下,低收入国家的海水淡化产能不足0.1%。

海水淡化技术面临的一个主要挑战是,过程中产生的高盐度浓缩物,即“浓盐水”如果排放不当,可能会影响海水淡化厂排水口区域的水生环境。长期的实践经验表明,只要设计和处理得当,海水淡化厂的排放不会对环境构成威胁,也不会对排放区域的海洋生境造成严重影响。海水淡化过程中的浓盐水产量约为1.42亿 m^3 /天,约为淡化水日产量的1.5倍。而使用咸淡水海水淡化厂生产的浓盐水比淡化水产量少6到10倍。从浓盐水中提取稀有金属相关的研究在稳步推进,涉及的纳米颗粒增强膜、仿生膜和正向渗透等新兴技术可用来从浓盐水中有效提取稀有金属。此类技术旨在降低20%-35%的能耗以及20%-30%的资金成本,同时提高工艺的可靠性和灵活性,大幅减少浓盐水的排放量。

环境友好和经济可行的浓盐水管理,是维持海水淡化系统长期可持续发展的关键。



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