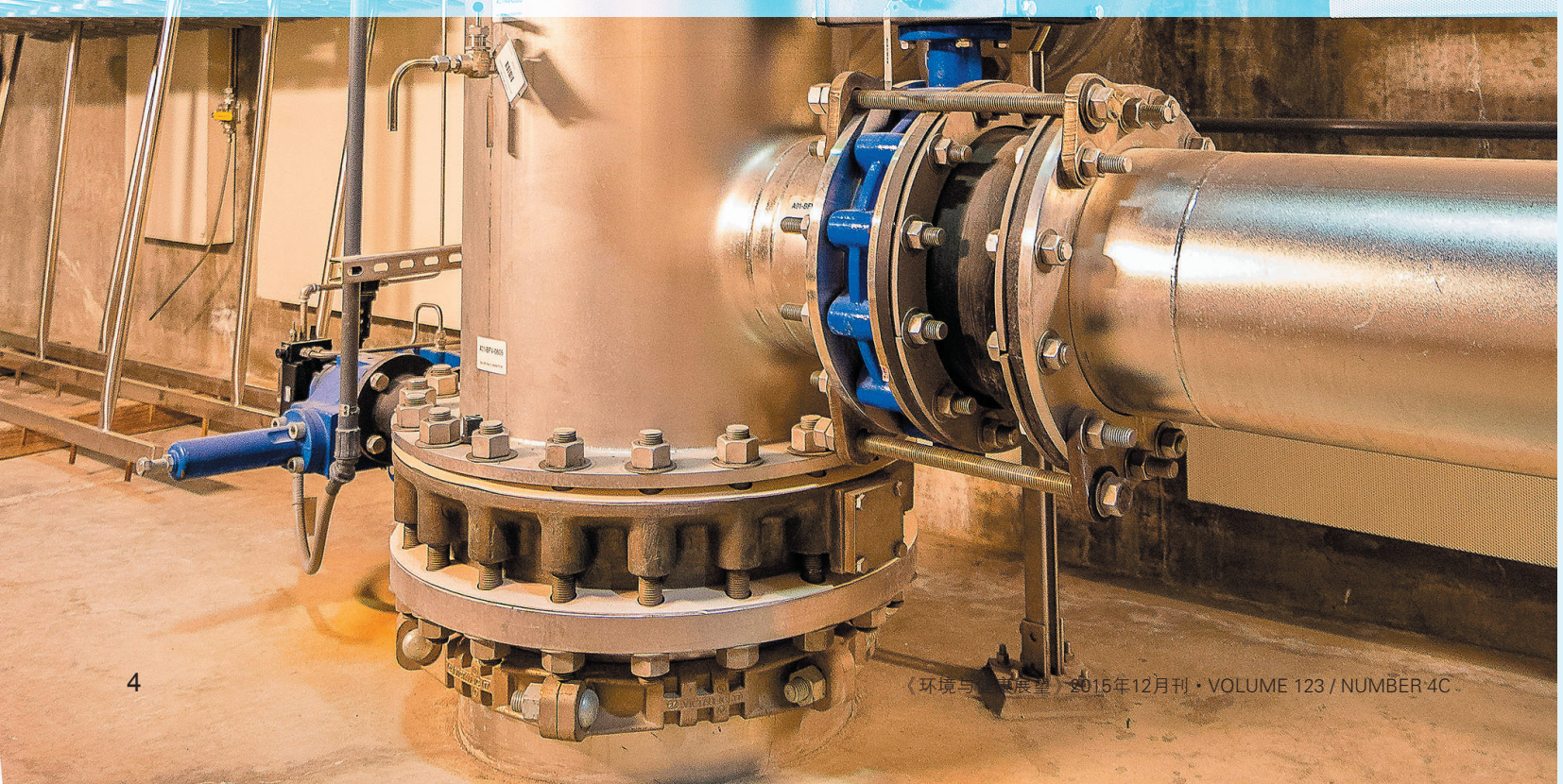
超前意识

饮用水再利用策略受到追捧

先进的水处理设施使得城市可扩大供应净化水作为饮用水，这个图片展示的是将处理的水输入微过滤器，是（加州）橙县地下水补给系统 (Orange County Groundwater Replenishment System) 的其中一部分。

© 2014 Jon Zich/CostaMesaPhotography.com



2011年德克萨斯州Wichita Falls市的市政府官员焦虑地注视其水源供应消失殆尽。德克萨斯州（以下简称德州）以及美国西南大部分地区一场历史上严重的干旱从2011年持续至今，使生活在这片区域的民众饱受缺水之苦。几十年来，Wichita Falls市的饮用水，几乎全都取自两个水库——Arrowhead湖和Kickapoo湖。而目前这两个水库的水位，已从水库容量的88%降至55%。

Wichita Falls市政府首次制定了限制居民用水的5项强制性规定。但随着水位不断下降，他们意识到是时候采取进一步的措施了。Wichita Falls市公共工程局的运营主管Daniel Nix回忆道，“我们曾经提醒过TCEQ [Texas Commission on Environmental Quality，德州环境质量委员会]”，“如果这种情况持续恶化，预计到2014年我们将无水可用”。

Wichita Falls市政府意识到他们需要一个新水源，他们心中已有一个目标：城市废水。由于前些年的干旱，Wichita Falls市已经开始从其他两个湖泊，Kemp湖和Diversion湖，取水质较差的咸水补充其饮用水供应。其饮用水采用了先进的处理技术，包括微滤和反渗透。Nix有信心用同样的技术来将废水净化成饮用水。

随之而来的问题是，无论是德州还是联邦政府，对“直接饮用再生水”（direct potable reuse, DPR），即直接将废水转化成饮用水，没有制定任何法规。然而，鉴于Wichita Falls市的具体情况，旱情紧急再加上已有了可以解决这一问题的现成技术，德州环境质量委员会开了绿灯。Nix说，“我们与德州环境质量委员会共同制定了指南.....以设定处理的水平，确保这些水是完全可以安全饮用的”。

此后，Wichita Falls市花了1300万美元铺设了一条12英里长的管道，从废水处理厂连接到饮用水处理设施。经过处理的污水采用先进的处理技术将其进一步纯化，按50/50比率与水库水混合，并再次处理，储存在地面水罐约24小时后输送给居民。

该系统于2014年7月9日开始使用，每天可提供百万加仑的混合水。“从我听到的绝大多数市民反映，水的味道好极了，它甚至比纯湖水还好喝，”Nix说道。“质量很好，没有人得病，我们的水厂没有任何问题。我很高兴Wichita Falls市的举措，我们的例子说明在美国其他地方也可以做得到。”

广泛需求

Wichita Falls市绝不是唯一一个竭力寻找新的方法来向市民提供饮用水的城市。在斯德哥尔摩环境研究所2011年报告中，作者Frank Ackerman和 Elizabeth A. Stanton的结论是，美国西南部地区“是靠持续不断地抽取地下水，以满足今天的需求；这些地下水将随着下一个世纪的人口增加和收入增长而被耗之殆尽。”

2014年的研究显示水供应和人类需求之间的最新变化。该研究分析了科罗拉多河（美国许多西南部地区的主要水源）从2004年12月到2013年11月的卫星图像，这些图像表明在此期间河流失去了近5300万英亩英尺，大部分的损失是因为地下水枯竭——地下水被抽出来补充地表水。

由于供求间的紧张关系，政府重新审视废水，将其看作是一种宝贵的资源。北美每年产生的废水估计约22万亿加仑。其中3/4经处理后达到可接受的排放标准，只有3.8%处理后的废水是有意地被再利用于其他领域，例如，用于灌溉和工业冷却。

将废水净化处理后转化为饮用水并不是一个新想法。纳米比亚的Windhoek拥有世界上第一个直接饮用再生水设施，自1968年以来一直提供饮用水。（美国）弗吉尼亚州北部的Upper Occoquan Service Authority于1978年推出了美国国内最早的“间接饮用再生水”（indirect potable reuse, IPR）的方案，把经净化处理后再生水送回水库。

直接饮用再生水是把净化废水直接引入饮用水，而间接饮用再生水是将处理过的废水引入地表水；在那里，水渗滤至含水层，最终被抽取作为饮用水。2007年，加利福尼亚州（以下简称加州）的橙县水资源管理区（Orange County Water District, OCWD）引进了世界上最大的间接饮用再生水设施，被称为地下水补给系统，每天高度处理7千万加仑的废水。

地下水补给系统的项目主管Mehul Patel说，净化废水提供了本区250万居民约1/5的饮用水。目前还没有不良影响或投诉，他说，目前扩建工作正在进行，到2015年5月地下水补给系统可增加至每天1亿加仑。

橙县水资源管理区依赖其大量含水层和Santa Ana河作为水源，但橙县南部的城市主要依赖来自于北加州和科罗拉多河的输入水。Patel说，“我们看到了对输入水严重依赖这一趋势，本地河流水供应没有增加，而干旱周期伴随着人口的增长而增加，所以我们早就决定，应该想想其他办法，着手把再生或再循环用水作为可利用的水源之一。”

该水资源管理区已经有几十年的经验，使用反渗透处理废水，然后泵入海岸附近的地下，以防止海水入侵（过度使用地下水的沿海区域会导致盐水渗入淡水含水层）。该反渗透设备，自1977年以来一直运行，已接近其使用寿

命。Patel说，“因此我们想到：如果我们把它扩大利用，并用它作为另一个来源补充含水层，而不仅仅是保护含水层不被海水入侵会是怎样？这就让我们想到建立这个地下水补给系统。”

监管现状

据全美国水与污水公共事业的美国水资源创新和环境管理水务公司主管Mark LeChevallier介绍，虽然加州公共事业界早已知道，几十年来，地表水向下渗透的自然过滤，改善了地下水质，但到目前为止，加州对间接饮用再生水还没有任何监管。他说，在20世纪60年代，加州的一些供水系统开始通过转移地表水进入地下水盆地扩大其含水层。

现在被输送到地下水盆地的净化废水可能比地表水或地下水更清洁，LeChevallier指出，间接饮用再生水的心理上的好处可能大于实际好处。他们将其称为“自然之吻”，他说。“你把水倒入水库，随着间接饮用再生水下降到库底与库水混合，人们不会感觉到处理后的废水和饮用水之间的界线。”

因此，如果处理后的废水可净化成优质水，没理由不能以更快、更直接的方式引入作为水源供应，如Wichita Falls市那样的举措。

在加州，2010的白皮书叙述反对的一个理由是，“由于缺乏相关的公共健康保护的权威信息，州政府监管机构过去通常认为这种举措是不可接受的。”然而，趋势和需求促使城市和供水公共事业界兴建直接饮用再生水系统。2009年，加州水资源控制委员会（California State Water Resources Control Board）通过一项决议，要求一个独立的专家小组来研究这个问题，并于2016年底前就直接饮用再生水系统该采用什么监管标准给出建议。

水再利用协会（WateReuse Association）的执行主任Melissa Meeker说，该组织的研究基金会已拨款约1200万美元用于26项科研项目，这些项目涵盖监管、公用事业和社会关注。间接饮用再生水在技术和安全性方面都证明没问题，因此，研究集中在例如实时监测、风险评估和公共教育，”Meeker说，“但是，当我们用直接饮用再生水系统时，因为没有环境缓冲，所以需要有较高的安全性。一旦有问题，系统将即时自行采取措施，不会提供被污染的水。”

美国环境保护署（EPA）地下水和饮用水办公室主任Peter C. Grevatt介绍说，EPA仅根据《安全饮用水法》（Safe Drinking Water Act）对饮用水进行监管，并没有特别针对处理后的废水作为饮用水这一供水方式实行监管。但他证实，该机构在密切关注各州变废水为饮用再生水的发展，并积极与各州饮用水管理行政机构保持沟通对话。

Grevatt说，EPA目前暂不考虑建立任何饮用再生水规章，仅将其角色定位在支持各州寻求建立自己的规章。

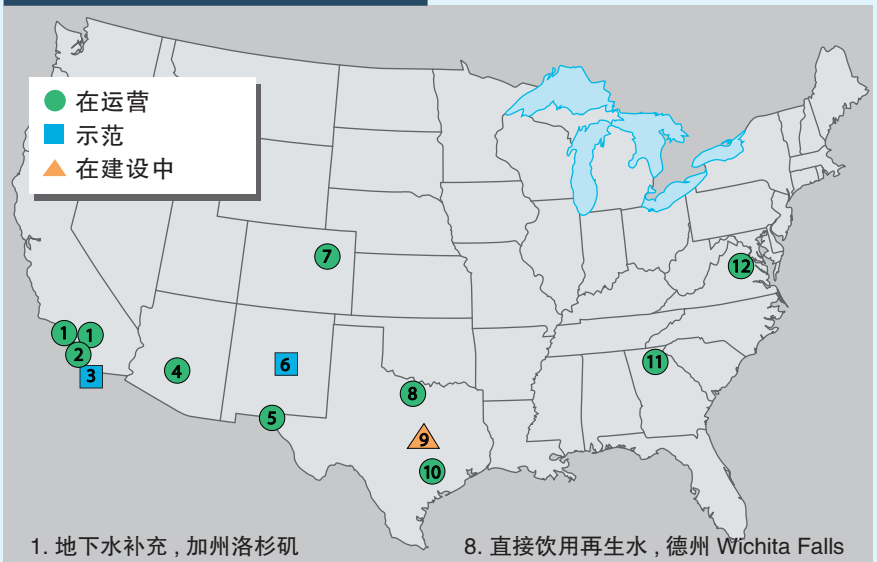
尖端技术：三步程序

“具有环境缓冲作用的间接饮用再生水已到了一个转折点，国家水资源研究所（National Water Research Institute）负责专家评审小组的执行所长Jeff Mosher如此说道。“我们曾经颇为热衷地利用废水来增加水资源供应，但是情况在变化。”他预测，对直接饮用再生水系统感兴趣的多为小社区，那里水库或地下水资源匮乏，直接饮用再生水将是唯一可行的选择。

根据加州和德州工厂的操作经验，净化废水再生技术在过去的几十年里已取得很大的进展，其特点是设有多项安全防护设施和备用安全设施。

在净化过程中，第一步是微滤，即除去固体、微粒、微观水平的细菌。橙县水资源管理区微滤用的是0.2 μm的膜孔径，大约人的头发直径的1/300。第二步是采用去除所有有机物和无机物

美国饮用再生水项目图



1. 地下水补充，加州洛杉矶
2. 地下水补充，加州橙县
3. 直接饮用再生水，加州圣地亚哥
4. 地下水补充，亚利桑那州 Scottsdale
5. 地下水补充，德州 El Paso
6. 直接饮用再生水，新墨西哥州 Cloudcroft
7. 地表水扩充，科罗拉多州 Aurora
8. 直接饮用再生水，德州 Wichita Falls
9. 直接饮用再生水，德州 Brownwood
10. 直接饮用再生水，德州 Big Spring
11. 地表水扩充，佐治亚州 Clayton County
12. 水库水扩充，弗吉尼亚州 Fairfax County

的反向渗透。第三步称为高级氧化，即通过过氧化氢和紫外光之间的化学反应。所产生的羟基自由基来分解小分子量的有机物。最后，在把净化过的水输送到间接饮用再生水水库或直接饮用再生水水罐之前，在水中加入矿物质以调节其pH值和硬度。

Mosher指出，尽管间接饮用再生水的环境缓冲不能进一步净化水质，但是如果在水处理过程中出现任何差错，水的渗滤过程为我们提供了相应的应变时间。他说，“如果经过处理的废水被注入地下后发现有问题，你将有6个月的时间去应对，将水抽出来后进行处理。”“但是，直接饮用再生水缩短了这段应变的时间。所以，我们正在研究如何提高监控检测以获取更多信息，确保水质安全”。

水处理运营商说，严格的监控对任何污水净化是必不可少的。“像我们这样的项目比大多数常规饮用水厂需要更多的监控和在线检测，”橙县水资源管理区的Patel介绍道。LeChevallier说，科学家们在这方面面临的最大挑战，是在直接饮用再生水系统领域缺乏对化学和微生物风险的评估标准，而这也正是目前对直接饮用再生水所做的研究。

“显然，废水经过处理后可以达到很高的质量水平，因此，我不想说废水处理存在类似与橙县废水处理工程中我们所关注的风险，”Grevatt说，“但是我认为，任何废水处理，最后的饮用水质量安全将完全取决于工作人员的能力与水厂对水资源的质量管理。在社区寻求直接饮用再生水时，必须确保饮用水公用事业公司拥有充足的资金和技术能力来管理运营中的水处理系统。”

向公众宣传饮用再生水

社区考虑引进废水转化项目时，需要考虑到公众的支持。总部位于旧金山的水回收顾问和加州大学Santa Cruz分校水研究中心的特聘研究员Bahman Sheikh说“如果你告诉他们所喝的水来自污水，人们就会有健康风险的担忧。”

例如在圣地亚哥，1998年饮用再生水遭到了压倒性的反对。当2004年对圣地亚哥的居民进行调查时，反对和赞成饮用再生水的比例为2：1。但到了2014年，79%的受访者支持多元化战略的饮用水，其中包括回收水。2014年11月18日圣地亚哥市议会一致批准了全面推进间接饮用再生水工程。水再利用协会的宣传部经理Zachary Dorsey说“在公众反对和阻挠再生水期间，水利部门和当地的环保组织对公众进行了大量的教育宣传，”“与此同时，加州的干旱状况也更为恶化。”

橙县、圣地亚哥及其他地方的公关经验为其他各地提供了效仿的经验。例如，Meeker提到使用不同的术语，使得结果也不一样。她说，“当你谈论的再生水被称之为‘净化’水”时，人们觉得更能接受。她还说，这不仅仅是转换术语，“在许多情况下，因为对水的高科技处理和更频繁的监测和检测要求，这种再生水是最安全的可饮用水。”

Meeker还意识到了向使用再生水最警惕的人群提供导向消息的重要性。以她的经验，这种最警惕群体主要是育龄妇女和母亲。她说，医生是废水再利用最有效的代言人。

Wichita Falls市的公共工程局邀请了当地的医生、环境学和化学的教授来参观，向他们展示直接饮用再生水的运作过程。Nix说，“他们非常满意我们的做法”。Wichita Falls市政府做了一盘关于该项目的录像，在该录像中邀请医学以及专家向公众解释为何他们可以信任该技术。

该局还寻求当地媒体的帮助。Nix说，“我们让媒体了解我们与德州环境质量委员会共同合作的每一个环节，”“关键是让公众知情，而不是制造信息和知识的真空地带。如果公众没有准确的信息，他们会凭自己的理解去解读。”

Patel说宣传饮用再生水的很大一部分的工作是教育人们了解饮用水的来源。“很多普通市民并不知道他们已经用了多年从外地引入的输入水，他们居住的地方缺乏天然水源，”他说。“在你说‘我们要把污水变成饮用水’之前，需要告诉他们这一必要性。你需要先解释为什么饮用再生水是必要的、经济上是可行的，然后才谈科学。”

当饮用再生水计划获得认可，并可能成为一种趋势时，更加容易获得公众的支持。“这是一个巨大的资源，” Sheikh说。“你想想，加州仅有约11%的废水被回收利用，这意味着其余89%的废水流入海洋。如果你把它想像成一条河，这是一条巨大的河流，正好从你家门前流过，而且你需要它。如果能将这条河回收利用的话，它近在咫尺。”

Richard Dahl，波士顿自由撰稿人。他还定期为麻省理工学院（Massachusetts Institute of Technology）撰写文章。

译自*EHP* 122(12):A332–A335 (2014)
翻译：黄长志

***本文参考文献请浏览英文原文**
原文链接
http://dx.doi.org/10.1289/ehp.122-A332