

美国加州再生水利用经验剖析及对我国的启示

陈卫平

(中国科学院生态环境研究中心城市与区域国家重点实验室,北京 100085)

摘要 开发利用再生水具有巨大的社会经济价值,是实现可持续发展的重要环节。在美国加州,再生水利用已经成为其水资源的重要组成部分,具有详细的规划、系统地法律法规和完备的管理体系,走在了世界的前列。总结分析了加州再生水利用相关的法律法规与灌溉终端用户管理的一些经验,并对2个典型案例进行了剖析。科学的再生水利用规划、严格的源水水质控制方案、简单易操作的再生水水质标准、明确的管理体系以及完备的风险控制体系都是加州再生水成功利用的关键环节。基于对加州再生水利用经验的分析,提出了4条建议以推动我国再生水利用事业的发展。

关键词 再生水利用 再生水灌溉 风险管理

中图分类号 X3 文献标识码 A 文章编号 1673-9108(2011)05-0961-06

Reclaimed water reuse experiences in California and hints to China

Chen Weiping

(State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences,
Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China)

Abstract For the water shortage regions, water reuse has many advantages and is the key step for sustainable development. In California, reclaimed water is extensively used and is an integral part of the water management plan. California is the leader for water reuse around the world for its systemic policies and laws as well as advanced management experiences. In this study, the water reuse experiences in California were summarized. The successful use of reclaimed water in California can be attributed to its scientific water planning, strict source control, simply and handleable reclaimed water quality, clear-cut responsibilities and detail risk management plans. Based on California's water reuse experiences, four suggestions were put forward for water reuse in China.

Key words reclaimed water reuse; irrigation; risk management

人们对开发替代水资源的迫切需求和日益严格的污水排放标准推动了当今世界污水再生利用的快速发展。再生水利用被联合国环境署认定为环境友好技术^[1]。我国水资源短缺且分布不均,水资源短缺已成为制约我国社会经济发展的重要因素之一。污水再生利用可以一定程度缓解区域水资源严重短缺的问题,同时也可减轻污水排放对区域生态环境的压力,是解决我国水资源危机的有效途径。目前,全国大多数城市,尤其是华北和地下水开采严重的城市,都已展开了再生水利用工程,并且取得了较好的效益^[2-3]。但由于再生水中存在多种病原微生物、微量有毒有害化学物质、较高的盐分和氮磷营养物质,其利用带来的风险不容忽视。如何降低再生水利用过程中的健康与生态风险已成为迫切需要解决的问题。

美国在再生水利用的科学研究、相关法规及指

南的制定方面都走在了世界前列,其中加州由于其对再生水利用规划的前瞻性和系统性、实践的科学性、法律法规的完备性,而成为美国各州再生水利用的佼佼者,其很多有关再生水利用的法规和指南被美国环保局采用,也被世界其他国家借鉴。笔者对美国加州再生水利用的法律法规和实际管理经验进行了系统分析,以期为我国再生水利用事业发展提供借鉴。

基金项目: 国家“水体污染控制与治理”科技重大专项
(2008ZX07314-003)

收稿日期: 2010-06-10; **修订日期:** 2011-03-01

作者简介: 陈卫平(1976~),男,研究员,主要从事再生水利用生态环境风险研究工作。E-mail: wpchen@cees.ac.cn

1 加州再生水利用现状

加州再生水利用可以追溯到19世纪初期,但真正大量使用是在20世纪后期,到2003年再生水年使用量已经是1970年的3倍,达6亿多 m^3 。目前再生水利用已经成为加州水资源的有机组成部分。在最新的用水规划中,加州再生水利用目标为在2003年基础上增加4倍,到2020年达到年利用25亿 m^3 ,占规划新增水源的40%左右^[4]。

图1显示了2003年加州再生水利用的分布情况。在加州,再生水被应用于城市绿化杂用(高尔夫球场、墓地、高速路中间绿地带、公园、校园、居民区等灌溉;城市灭火、融雪、冲厕等)、农业灌溉、景观用水(湖泊河流补给水,湿地恢复等)、工业回用(工业冷却水、锅炉用水等)以及地下水回灌等多个方面。农业和城市绿地灌溉是其主要用途,约占再生水利用总量的70%。

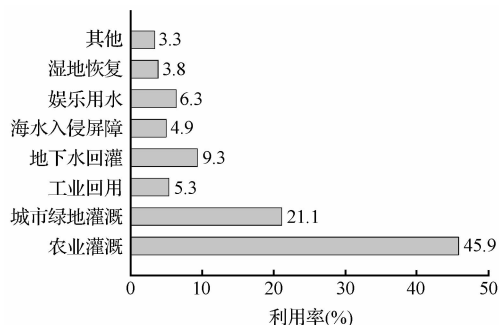


图1 加州再生水利用分布图^[5]

Fig. 1 Water reuse in California

2 加州再生水利用法律法规

2.1 再生水利用管理机构

在美国,各州对再生水利用负主要责任。再生水利用的司法权可能属于单一机构,也可能分属于几个机构。在国家污染物排放消减法案(The National Pollutant Discharge Elimination System, NPDES)或州废物排放要求(The Waste Discharge Requirements)的授权下,加州的9个区域水资源管理局均有权发行排放许可证。排放于溪流、河流或海洋等自然水体中的处理污水,要遵循NPDES法案要求;而排放于陆地的处理污水,如再生水用于灌溉,则需遵循加州废水排放要求。再生水使用的相关规章制度由加州各区域水资源管理局、加州公共卫生署及当地卫生署制定并强制执行。在由地区委员会批准颁发给个体再生水经销处或生产厂商的许可证中,

通常明确地列出这些规章制度的具体要求。

2.2 再生水利用相关法律政策

在加州水法中明确指出,再生水利用是加州水源的重要组成部分,加州各立法机构应尽可能采取各种措施鼓励再生水利用,以满足其日益增长的用水需求。同时亦指出在可以利用再生水的情况下,将饮用水用于非饮用目的是不合理的,是一种浪费。为促进再生水的利用,加州从再生水源水水质控制、再生水生产与输送、以及再生水利用风险控制等多个层面进行了详细立法和管理。

2.2.1 再生水源水水质管理

为提高再生水源水水质,加州政府要求各区域水质管制局必须对工业排放充分监测并严格执行工业废水预处理法案(The Industrial Wastewater Pretreatment Program),确保工业污水在排入市政污水管道之前能充分去除有害物质,并尽可能将工业污水分开处理。为减少再生水中盐分,加州通过了水软化与预处理装置方案(The Water Softening and Conditioning Appliances Bill),要求授权的当地机构限制或禁止硬水软化设施的使用以减少公共污水处理系统盐分的输入。为了控制非点源污染,在加州水资源管理局2004年颁发的备忘录中明确了各相关机构的责任并列出了地表径流的管理方案,以实现地表径流的有效管理,提高再生水源水水质。

2.2.2 再生水水质标准及处理要求

在加州再生水水质管理标准体系中,对于污水处理水平及消毒效果(总大肠菌群的数量)进行了严格限定,但对一些具体水质指标没有限值规定(其水质指标必须符合加州公共卫生署规定的排放标准,见2.1节排放许可证)。当利用过程中可能会发生人体接触时,再生水水质必须达到严格的处理水平;无人体接触的情况下,再生水处理水平可相对宽松。

目前,加州再生水水质管理分为三类:二级处理-23类再生水,二级处理-2.2类再生水,和三级处理类再生水。其中数值代表再生水中总大肠菌群的平均数量(表1)。三级处理类再生水可用于各种非饮用途径(用于地下水回灌需另行评定),而二级处理类再生水的只能用于一些规定的类别。

除了表1中所列再生水用途之外,加州还分别对地下水回灌及工业回用制定了相关法规。当再生水用于地下水回灌时,加州公共卫生署需对提议项目提案中包括提供的处理工艺、出水水质和出水量、

传输操作特性、土壤性质、水文地质特点、残留时间以及至取用点的运输距离在内的所有相关方面都进行系统评价,对项目的要求依评价结果而定。当再生水用于提高或维持水生生态系统功能时,目前加州并未做出具体要求。

表 1 加利福尼亚州污水再利用标准
Table 1 Wastewater reuse criteria of California

再生水类别	处理要求	浊 度 (NTU)	总大肠菌群 (MPN/100 mL)	用途类别
三级处理类	氧化、絮凝、 过滤、消毒	平均值 2, 最高 5	平均 2.2; 30 d 最高值 23	无限制的城市利用; 农业回用(食物作物); 无限制的娱乐用水
二级处理-2.2 类	二级处理、氧化、消毒	无	平均 2.2; 30 d 最高 23	限制的娱乐用水
二级处理-23 类	二级处理、氧化、消毒	无	平均 23; 30 d 最高 240	限制的城市利用, 非食用作物灌溉

2.2.3 再生水厂处理设施的可靠性管理

加州政府颁布了系列规定以保障再生水厂设施的可靠性,包括设计与运行各个方面,如故障预警系统、电力供应系统、应急储备与处置系统、处理工艺以及化学品供应、储存与流入设施等。对于处理工艺,加州有多种可靠性功能可供选择。

2.2.4 再生水交叉连接控制与回流距离管理

加州政府规定必须采取措施尽可能避免再生水管网与饮用水管网的交叉连接。安装防倒流装置和气隙分离装置是 2 种较常使用的避免交叉连接的措施。防交叉连接设施必须得到再生水管理机构的批准方可安装,且安装后每年都必须进行测试和检查。为了有效区分各类管网,加州饮用水管网通常为蓝色,污水管网通常为红色,而再生水通常为紫色。

在再生水灌溉区与饮用水供应水井、临界区、居民区及道路等设施之间设立回流距离是有效降低其环境风险的常用措施,但回流距离因再生水水质和利用方法而异,在此方面加州也有相关的规定。例如,在城市回用和农业回用(粮食作物但非商业处理),要距饮用水源井 15 m,在作为景观用水时,如果底部不密封,距饮用水源井至少 150 m。

2.2.5 再生水管网管理

管网建设是限制再生水广泛利用的主要因素。在设计管网过程中,必须考虑其可靠性以及公众健康的保护。加州政府规定在设计城市再生水配水系统时必须将以下保障措施考虑在内:

- (1)再生水销售商须确保提供给用户的再生水能满足特定用途的水质标准。
- (2)考虑到再生水需求时常发生季节性变化,

管网设计时必须考虑到季节性储存设施。

(3)为避免再生水的误用,管道、阀门和消防栓应做标记或用颜色标记(如紫色管道),以区分再生水和饮用水。

(4)饮用水与再生水管网不允许有交叉连接。美国自来水工程协会建议,污水分配管网至少应比家庭用水管网深埋 30 cm,并在较低的压差下工作。

(5)如果饮用水要作为再生水的补充水源,则应采用相应监管机构(如公共卫生署)批准使用的气隙分离装置将其分开,另外还需在饮用水供应连接点安装一个降压原理的回流保护装置以确保再生水不会污染饮用水源。

3 加州再生水利用终端用户管理经验

3.1 灌溉管理

科学的灌溉管理(包括灌溉周期、灌溉量和灌溉方式等)可有效降低再生水灌溉的风险。低强度灌溉会增加根系层盐分的积累,对植物健康和生长造成不利影响。而采取低频率高强度的灌溉方式,可将根系层累积盐分滤去。科学的灌溉用水量是影响再生水利用一个重要因素。不充分灌溉会导致作物根系周围盐分的积累而降低作物产量。然而,过量灌溉则会抑制土壤的通透性、滤去营养物质、诱发次生盐渍化和污染地下水。灌溉需水量依作物品种、植物生长阶段和气候条件而定。加州政府提供了专门的网站来帮助用户确定合理的灌溉量(www.cimis.water.ca.gov)。

喷灌可导致叶片与再生水的直接接触,一些植物物种对此比较敏感,但它们在直接灌溉或滴灌时

并不表现出敏感性。从健康安全角度出发,滴灌系统由于是完全封闭系统而起到了最好的保护作用,然而滴灌技术要求较高,堵塞时有发生,尤其当污水出自初沉池和氧化塘时。而在采用喷灌和滴灌时,盐分易于累积。因而,在选择灌溉方式时要综合考虑多种因素,如再生水水质、盐分累积及毒性危害等。

3.2 肥料管理

处理后的再生水中仍然含有一定量 N、P 等植物营养物质,因而再生水用于灌溉时,用户应适当的调整其肥料管理,充分利用再生水的营养价值,从而减少肥料的施用量。同时,需考虑到使用再生水灌溉致使 N 过量带来的风险。过量的 N 可降低农作物产量和质量,同时如果与其他营养物质,如 P、K 比例失调,将加剧这些物质的缺乏。为使作物产量和品质达到最优效果,在作物特殊生长阶段可进行追肥。倘若再生水中 N 的含量较高,可选择具有高 N 需求的作物品种,以降低深层 N 渗漏和地下水污染的可能性。

3.3 盐度管理

盐度对作物的影响主要取决于土壤盐度、灌溉用水盐度、浸出率(leaching factor, LF)及生长作物自身的耐盐度等多方面的因素。图2显示了不同土壤浸出率下灌溉用水盐度和土壤盐度的关系。可以基于这三方面因素选择合适的作物品种,或者根据灌溉作物的种类调整水质及灌溉管理策略。例如,为避免盐度问题的出现,可忍受盐度为 3 dS/m 的草坪草用盐度为 2 dS/m 的再生水进行灌溉,浸出率应高于 0.15;当用盐度为 2 dS/m、浸出率为 0.15 的再生水进行灌溉时,所选植物的耐盐度应在 3 dS/m 以上。

由于再生水盐度相对较高,盐度始终是潜在的风险因素,因此需考虑到以下管理策略:

(1)将再生水与含盐量较低的水混合使用。可将2种水同时注入到同一水库中,混合用于灌溉,或者用2种水进行轮灌。

(2)选择种植耐盐植物。一些作物在高盐度时可以做出渗透调整,这样在含盐量相当高的土壤中仍可维持良好的生长。一些敏感物种在灌溉水盐度大于 1 dS/m 时就会受到影响,而一些耐盐物种在灌溉水盐度大于 10 dS/m 时才有所响应。因而,根据实际情况选择种植耐盐植物,可以有效解决再生水灌溉盐的问题。

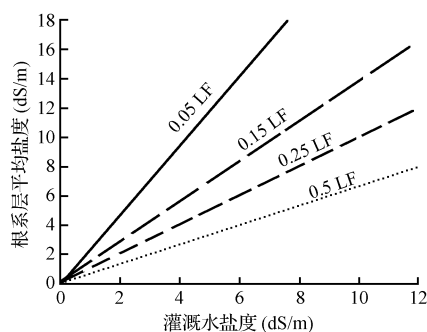


图2 不同土壤浸出率(LF)下灌溉水盐度和土壤根系层盐度的关系^[6]

Fig. 2 Relationship between electrical conductivity of irrigation water and average root zone salinity as a function of leaching fraction

(3)用额外的水洗去过量的盐分。可以用下面的公式计算滤去根系层盐分所需的额外水量:

$$LR = \frac{EC_{iw}}{5(EC_e) - EC_{iw}}$$

其中: EC_{iw} 是灌溉用水的盐度, EC_e 是作物的耐盐度。例如,可忍受盐度为 3 dS/m (EC_e) 的草坪,用盐度为 2 dS/m (EC_{iw}) 的再生水进行灌溉,LR 应为 0.15。为避免灌溉用水盐分积累,每次灌溉还应使用大约 15% 的额外用水。

(4)增加土壤淋溶潜力。如果有硬土层或隔水粘土层的存在,需调整土壤剖面以改善其透水性,以便增加淋溶。通过耕作改善土壤的排水性、在土壤中加入有机质或添加石膏,均会大大减少根系层盐分积累的伤害,也可安装人工排水系统以增加土壤排水功能。

4 加州再生水利用案例管理解析

4.1 贝克斯菲尔德市农场再生水利用实例分析

在加州中部贝克斯菲尔德市的一个占地面积大于 2 000 hm^2 的市政农场,再生水利用历史已有 80 多年,平均每年使用约 1 400 mm 再生水进行灌溉。再生水被储存于水库中,用以满足大麦、玉米、棉花、苜蓿和高粱的季节性灌溉需求。为使再生水得以成功利用,灌溉时特别注意了 2 个问题。其一,由于再生水属污水处理厂二级出水,未经脱氮处理,故其中 N 的含量非常高(每公顷 1 000 mm 的再生水灌溉大约可输入 250 kg N)。再生水中的含 N 量可满足多数作物的氮肥需求。而对于棉花, N 则会导致其生理周期后期的过速生长。为解决这一问题,农场主

选择在作物生长早期利用再生水进行灌溉,以有效利用氮素,后期则更换为N含量低的井水或河水灌溉,或者两者轮灌以减少N含量;其二,过半城市农业土地盐含量及钠含量较高,因此有必要进行额外淋洗。在此情况下,可采取漫灌或沟灌进行大量灌溉,也可添加石膏增强渗透性,另外可选择种植大麦和苏丹草之类的高耐盐植物。

4.2 梅森公园再生水利用实例分析

梅森公园(William R. Mason Regional Park)位于南加州Irvine市,占地约40 hm²,其中包括3.7 hm²的湖泊。园中心的人工湖是游客流连忘返的景点,也吸引了迁徙鸟类及其他当地野生鸟类。公园使用经三级或深度处理的再生水进行灌溉以及用于湖泊景观用水。公园根据再生水的特点制定了针对公园的灌溉时序和灌溉方式。合理的再生水灌溉管理确保了公园在不使用饮用水作为水源的情况下仍可为公众提供良好的娱乐、休闲场所。具体的管理对策包括:

(1)鉴于再生水中盐分含量通常较高,应用额外水源淋洗过量的盐分。

(2)再生水含有一定量的营养物质,草地施肥时充分考虑了再生水中营养物质的含量。

(3)通过最大程度地延长灌溉周期(2次灌溉之间的间隙期),刺激深层根系的生长。这也为地面维护和市民娱乐带来便利。

(4)采取缩短灌溉期、增加灌溉频率的灌溉方式以减少地表径流。例如,若总灌溉运行期为15 min,则可将其分作3次5 min的灌溉。

(5)选择在晚上10点至次日上午7点之间进行景观灌溉,将公众与再生水的直接接触降到最低程度。

(6)选择种植耐盐性更好的植物种类,此规定是在发现再生水灌溉后几种受胁迫植物物种不能生长后所做的调整,主要是因为再生水中含盐量相对较高。

(7)避免再生水与木材结构设施的接触,防止木质材料的快速腐烂,应尽可能选择塑料而非木材;为防止金属生锈,可选用镀锌钢材并经常喷漆。

(8)为降低人体暴露于病原体的可能性,对厕所和设置在公共场所的饮水器定期进行漂洗消毒。

5 启示与建议

污水资源化不是权宜之计,而是按照科学发展

观的要求实现可持续发展的必由之路和重大战略。在加利福尼亚州再生水得到了广泛成功的应用,有效地缓解了加州水资源短缺的现状。综合文中对加州再生水利用法律法规及管理经验的剖析,其成功利用主要归结于以下几个方面:

(1)科学的再生水利用规划。再生水可以用于多种途径,而每种利用途径对水质的要求不尽相同。在加州各个区域,其管理部门都结合实际情况制定了详细完备的再生水利用规划,选择其最佳利用途径。如在洛杉矶附近的Palmdale市每年排放2 000多万m³污水,根据当地情况,污水处理厂租用了大片的土地,将污水经过二级处理后用于农业灌溉,取得了明显的经济效益。灌溉作物(小麦、玉米和阿尔法草等)长势良好,不需额外施肥。目前的环境监测结果显示20多年的再生水利用没有造成任何不良环境影响。与此同时,再生水灌溉也避免了过量的氮污染地表水体(二级处理不能有效除去污水中的氮)。

(2)严格的源水水质控制方案。通常的污水处理过程并不能有效去除那些有潜在危害的物质,如重金属和一些难降解的有机污染物等。从源头上控制这些污染物进入城市公共排污系统,是提高再生水水质、降低其利用风险的有效途径。加州各水资源管理局严格执行工业废水预处理法案,根据不同排放情况设定不同标准,同时执行水软化与预处理装置方案以及地表径流的管理方案。这些方案的实施确保了再生水源水水质。

(3)简单易操作的再生水水质标准。加州政府认定,如果再生水可以达到要求的处理水平,再生水中的化学物质将不会对人体或者水体构成危害。因而在现有的加州再生水水质管理标准中主要基于对污水处理水平及消毒效果的限定,对一些具体水质指标没有限值规定,根据处理水平和消毒效果将再生水的利用标准分为三类,而每一类的使用对象有明确规定。这些简单明了的标准,提高了再生水利用的可操作性,为扩大再生水利用提供了坚实的基础。

(4)明确的管理责任。在加州,再生水的管理主要由2个部分负责。水资源管理局主要负责再生水利用的审批(特殊情况需公共卫生署审核),而公共卫生署则负责再生水利用的监督与管理,确保再生水利用项目符合规定要求。管理机构责任相对明确,申请再生水利用项目程序简单易操作。

(5)完备的风险控制体系。在加州,从再生水的源水水质、生产、输送到终端用户等多个层面形成了一个详细完善的再生水安全利用风险管理体系。在加州再生水利用有明显的标示,采取各种措施以降低再生水利用场地公众和放牧牲畜接触再生水的可能性,以有效减缓再生水利用的健康风险,同时采取各种措施降低再生水利用的环境风险,如盐分的累积等。

目前,我国的再生水利用事业还处于起步阶段,但发展迅速,其利用潜力和安全保障有待提高。目前,我国再生水相关配套法规还不健全,出水水质稳定性和可靠性难以持续保证,也缺乏一个系统完善的风险管理体系。综合加州的再生水利用的经验,为推动我国再生水的利用,建议如下:

(1)再生水利用应作为战略性计划纳入区域水资源管理,尤其是缺水城市。

(2)从再生水的源水管理、再生水水厂质量监督与管理、再生水输送管理、再生水终端用户管理等多个层面形成一个详细完善的再生水安全利用管理体系,完善相关法律法规和标准,促进再生水利用。

(3)加大力度控制再生水厂上游水源及再生水厂处理工艺的可靠性,完善再生水管网水质安全的保障技术,提高再生水水质。

(4)提高全民对再生水的认知程度,结合宏观政策和投资支持,加强价格优势对再生水利用的推

动作用,提高再生水利用率。

(5)开展再生水利用的生态影响综合评估与长期风险相关研究,建立科学管理方案,确保再生水安全利用。

参考文献

- [1] UNEP and Global Environment Centre Foundation. Water and Wastewater Reuse: An Environmentally Sound Approach for Sustainable Urban Water Management. United Nations **2006**. 48
- [2] 张克强, 张洪生, 宁安荣, 等. 国内外城市再生水灌溉绿地的研究与应用. 农业环境科学学报, **2005**, 24 (增刊): 384-388
- [3] 李家国, 宫辉力. 北京市“中水”回用系统分析与优化. 冶金动力, **2006**, 114(2): 21-24
- [4] California Water Planning 2009. <http://www.waterplan.water.ca.gov/cwpu2009/index.cfm>
- [5] CSWRCB (California State Water Resources Control Board). 2003. Recycled Water Use in California. http://www.waterboards.ca.gov/recycling/docs/wrreclaim_atb.pdf
- [6] Rhoades J. D., Kandiah A., Mashali A. M. The Use of Saline Waters for Crop Production. FAO Irrigation and Drainage Paper 48, **1992**, Food and Agriculture Organization, Rome