

王文,杨云,崔巍,等. 沿海地区非常规水资源开发利用方法与策略[J]. 江苏农业科学,2015,43(4):1-4.  
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2015.04.001

# 沿海地区非常规水资源开发利用方法与策略

王文,杨云,崔巍,张鹭

(河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室,江苏南京 210098)

**摘要:**总结了几种主要非常规水资源的开发利用方法及其特点,包括海水淡化、微咸水利用、雨水收集利用、污水回用等。在沿海开发过程中,要充分考虑常规水资源与非常规水资源的综合利用规划,以保障水资源的可持续开发利用,并避免后期基础设施改造带来的投资浪费。

**关键词:**海水淡化;污水回用;微咸水利用;雨水利用;水资源;沿海

**中图分类号:** F323.213 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002TV213.9-1302(2015)04-0001-04

水资源已经成为制约沿海地区经济社会可持续发展的重要瓶颈。与内陆地区相比,沿海地区水资源具有以下特点:(1)处于流域汇流末端,径流总量相对较大,但受上游污染影响,地表径流水质通常较差,尤其是平原地区的中小河流水质问题较为突出;(2)地表水受海洋潮汐作用产生的咸潮影响,地下水含水层往往淡咸交错,易受海水入侵影响;(3)地貌通常为河口三角洲平原或海积平原,地势低平,地表蓄水条件差,但同时存在海湾、泻湖等海洋环境的可蓄水地貌;(4)非常规水资源丰富,海水资源取之不竭,可通过海水淡化的形式转化为淡水资源,同时地表、地下微咸水资源量巨大,进行低成本处理后可以直接加以利用。沿海地区水资源开发利用方法与其他地区相比有很多独特之处。沿海地区非常规水资源开发利用方法主要包括海水淡化、微咸水利用、雨水收集利用以及污水回用等。本研究系统讨论非常规水资源开发利用方法相关的管理措施及存在问题,以期为保障水资源的可持续开发利用提供参考。

## 1 海水淡化

海水淡化不受气候变化的影响,可以作为沿海缺水地区稳定、可持续利用的水源。随着海水淡化技术的发展,海水淡化成本降低,海水淡化对沿海地区水资源可持续利用的意义越来越重大。

### 1.1 海水淡化应用现状

过去几十年间,各国的咸水(包括海水、微咸水)淡化设施数量迅速增加。截至 2012 年 6 月,全球安装的咸水淡化设施总生产能力为 7 480 万  $\text{m}^3/\text{d}$ ,2007 年为 4 760 万  $\text{m}^3/\text{d}$ ,1963 年仅为 1 000  $\text{m}^3/\text{d}$ 。全世界有 150 个国家拥有咸水淡化企业,但咸水淡化产能的 40%~50% 分布在波斯湾周边国家<sup>[1]</sup>,很多波斯湾国家的大城市饮用水完全来自海水淡化<sup>[2]</sup>。2010 年以色列海水淡化量为 3.07 亿  $\text{m}^3$ ,占全部供水量的 20%;2020 年该国海水淡化量将增加到 8.09 亿  $\text{m}^3$ ,占

全部供水量的 46%<sup>[3]</sup>。目前新加坡的海水淡化量约占全部供水量的 10%,2060 年该比例将达到 30%。

### 1.2 海水淡化技术与成本

目前最常用的海水淡化技术包括反渗透、低温多效蒸馏 2 种。低温多效蒸馏海水淡化技术具有水质好、可利用工厂余热或低品位热源等优点,但能耗高。反渗透技术采用足够的压力使咸水中的水分透过半透膜分离出来,其能源消耗大大低于蒸馏法。早期的大型咸水淡化厂主要采用蒸馏法进行海水淡化。过去 20 年中,除了海湾国家,其他地区的淡化工厂绝大多数采取反渗透技术<sup>[1]</sup>。目前我国反渗透海水淡化综合产水成本为 5~6 元/ $\text{m}^3$ ,蒸馏海水淡化综合产水成本为 6~8 元/ $\text{m}^3$ 。国外部分地区反渗透海水淡化综合产水成本约 4~5 元/ $\text{m}^3$ ,比如以色列平均成本为 0.65 美元/ $\text{m}^3$ <sup>[4]</sup>。2012 年,中国已建成海水淡化工程 95 个,日产淡化水总规模达 77.4 万 t。2015 年,我国海水淡化产水将超过 220 万  $\text{m}^3/\text{d}$ ,海水淡化对解决海岛新增供水量的贡献率达 50% 以上,对沿海缺水地区新增工业供水量的贡献率达 5% 以上。

### 1.3 海水淡化存在的主要问题

海水淡化存在的主要问题之一是能耗较高。尽管过去 20 年间淡化能耗已经降低了一半以上,但降低能耗仍是海水淡化技术发展的重要目标<sup>[1]</sup>。同时,发展风能、太阳能、潮汐能、核能等能源形式与海水淡化相结合的工艺与技术也是发展方向。此外,海水淡化厂排放的高浓度海水可能会改变附近的海水盐度,摧毁或损坏海洋生物栖息地<sup>[5-6]</sup>。因此,在海水淡化厂建设过程中需要注意对环境的影响,对浓排水进行适当处理并选择正确的排放方式。

## 2 微咸水利用与海水直接利用

### 2.1 微咸水利用

微咸水没有严格的定义,联合国粮食及农业组织(FAO)将其定义为矿化度 1.5~7.0 g/L 的含盐水<sup>[7]</sup>。沿海地区在地表与地下均有大量因海水入侵而形成的微咸水。沿海蓄淡水水库也常存在水质咸化现象(如浙江省胡陈港水库),形成大量微咸水。微咸水可以作为低成本的咸水淡化水源<sup>[1]</sup>。一般采用反渗透技术淡化微咸水。与海水淡化反渗透技术相比,采用微咸水反渗透技术的反渗透膜受生物及悬浮物质的

收稿日期:2014-06-09

基金项目:国家科技支撑计划(编号:2012BAB03B03)。

作者简介:王文(1967—),男,江苏泰州人,博士,教授,从事水文水资源及水文遥感研究。E-mail:w.wang@126.com。

损害较小、能耗较低、不需要复杂的后处理、成本较低。但由于各含水层的水文化学特性不一致,微咸水本身水质不固定,会给淡化处理带来一定困难,而且由于离海较远,淡化后的废水处理较为困难。在一定技术条件下,微咸水水资源也可以直接利用。很多国家都有在不同条件下使用微咸水进行农业灌溉的实例。美国德克萨斯州西部的 Pecos 河谷 8.1 万  $\text{hm}^2$  土地利用平均矿化度约 2.5 g/L(最高达 6 g/L 以上)的地下水灌溉了数十年<sup>[8]</sup>。印度南部 Haryana 州 9 个地区广泛使用平均矿化度 5 g/L 以上的微咸浅层地下水进行灌溉,包括咸水直接灌溉、咸水和淡水混灌、咸水和淡水轮灌等 3 种方式<sup>[9]</sup>。此外,微咸水灌溉还可被应用于耐盐作物与不耐盐作物轮作,用微咸水灌溉耐盐作物(或其特定生长阶段),用淡水灌溉不耐盐作物<sup>[10]</sup>。研究发现,利用微咸水灌溉最有利的方式是滴灌<sup>[11]</sup>。微咸水在我国农业灌溉、水产养殖、冷却用水以及咸水淡化等方面都有成功应用案例。研究者在黄淮海平原、西北地区等缺乏淡水资源的地区进行了多次微咸水灌溉试验。1990—2001 年天津市静海县累计微咸水灌溉面积达 58 273  $\text{hm}^2$ ,年最高灌溉面积达 8 427  $\text{hm}^2$ <sup>[12]</sup>。目前微咸水应用实践研究重点在于利用微咸水灌溉的适宜作物、灌溉方式及其与产量之间的关系。

## 2.2 海水直接利用

海水可以直接应用于工业冷却用水(包括直流冷却与循环冷却)和生活清洁用水。2011 年,我国海水直接利用量为 604.6 亿  $\text{m}^3$ ,主要作为火(核)电的冷却用水。海水直接利用量较多的为广东省、浙江省、山东省,分别为 252.1 亿、182.3 亿、57.4 亿  $\text{m}^3$ 。我国香港地区于 20 世纪 50 年代末开始采用海水冲厕。海水直接利用成本很低,但存在供水设施海水腐蚀与生物附着问题,因此利用海水的同时要开发相关的耐腐蚀材料、防腐涂层、防生物附着等技术。

## 3 雨水利用

雨水具有无需缴纳水资源费的优点,而且在海岛上雨水可能是唯一的天然水源。与其他水源相比,雨水水质通常更好,无需进行复杂处理,利用雨水几乎无任何不良环境影响。

### 3.1 雨水利用形式

农村与城市的雨水利用形式有很大不同。农村通常是集中收集雨水,用于生活、农业灌溉。农村雨水利用属于微型水利工程,具有面广量大、群众性施工等特点。干旱地区农村传统的雨水利用形式主要是水窖,湿润半湿润地区主要是沟塘。现在的农村雨水利用技术在原有基础上,一方面采用新的集水技术,另一方面提高雨水的田间利用效率,比如通过地面覆膜、膜侧种植等方法将雨水采集与作物种植相结合,实现雨水在田间的直接利用。2010 年,我国颁布了国家标准《雨水集蓄利用工程技术规范》(GB/T 50596—2010),对农村地区雨水利用工程的设计、施工、验收、管理、经济评价进行了规范。城市雨水利用主要包括 2 个方面,一是雨水的生活利用,将雨水收集处理后作为非饮用水,用于洗衣、冲厕、家庭绿化、景观等;二是通过减小不透水面积、地面铺砌透水砖、增加坑塘湿地等方式增加雨水自然下渗。

### 3.2 雨水利用现状

雨水的收集与利用在世界各国非常普遍,其中德国在雨

水利用技术水平与普及程度方面最为突出。德国有专门的全国性非政府组织——雨水利用专业协会(FBR),由政府部门、企业和个人共同组成,进行雨水利用技术的开发、推广、宣传。当前国外雨水利用技术的主要特征是设备集成化。雨水收集最适合的下垫面条件是各种屋顶(包括农用大棚顶以及城镇建筑的屋顶)。根据屋顶材料的不同,其径流径数一般可达 0.7~0.9<sup>[13]</sup>。很多厂商开发了从屋顶雨水收集、截污、输送、储存、过滤、渗透、抽水到控制的一系列产品、成套设备<sup>[14]</sup>。由于雨量年内分配均匀性差异、雨水水质差异等,国内外在雨水利用技术手段上(雨水储存容器设计、雨水截污与过滤装置、施工技术等)存在一定差异<sup>[15]</sup>。

### 3.3 国内外雨水利用管理

各国对雨水利用普遍采取各种鼓励或刺激政策。在德国,很多城市征收雨水排水费。比如波恩对 1  $\text{m}^2$  屋顶及周边封闭区域每年征收约 1.8 美元的排水费,如果采取措施收集雨水或将其渗入地下,就可以减收雨水排水费<sup>[13]</sup>。德国很多城市还采用资助、补贴的形式鼓励市民修建集雨箱、地下水入渗井。1994 年,在德国 Osnabruck 每户可以得到 600~1 200 美元的资助,用于修建集雨设施,如果将收集的雨水用于补给地下水,还有 3 美元/ $\text{m}^2$  的进一步补贴<sup>[13]</sup>。英国、美国、澳大利亚、日本等许多国家的很多地区也采取了类似政策。澳大利亚悉尼市根据建筑面积大小,征收 40.96~1 820.46 澳元的雨洪服务费,对于有雨水收集设施的建筑,可以减收相关费用。美国西雅图市、威斯康星州等地区对购买集雨桶的居民给予补贴<sup>[14]</sup>。有些国家、地区甚至将雨水收集设施的建设作为强制建筑标准。印度有 20 多个邦在 2002 年以后立法强制要求将雨水收集设施作为新建大型建筑的组成部分。也有相反的情况,美国有些州(科罗拉多州、犹他州及华盛顿州)规定雨水属于州有财产,个人在未得到相应水权的情况下不得收集雨水,这种限制雨水收集的政策非常罕见。我国目前尚没有全国层面的关于城市雨水资源化利用的强制性规定,尽管一些政策法规鼓励、推广雨水收集利用。但很多城市制定了地方性的强制性雨水利用规定。北京市《关于加强建设工程用地内雨水资源利用的暂行规定》规定:新建、改建、扩建工程(含各类建筑物、广场、停车场、道路、桥梁和其他构筑物等建设工程设施等)均应进行雨水利用工程设计建设;2007 年,江苏省南京市颁布的《城市供水和节约用水管理条例》规定,规划用地面积 2 万  $\text{m}^2$  以上的新建建设项目,应当配套建设雨水收集利用系统。

### 3.4 雨水利用的意义与存在问题

雨水收集利用不仅可以作为 1 种供水措施,解决部分生活用水和生态用水问题,还可以作为 1 种防洪措施,减轻暴雨对城市排水系统造成的压力,降低城市洪水风险<sup>[16]</sup>。当地震等因素破坏公共集中供水设施时,收集的雨水可以作为分散的应急水源满足应急用水需要<sup>[17]</sup>。雨水利用存在的问题包括以下几方面:一是雨水往往具有季节性与时机性,可靠性比较低;二是雨水存贮设施的容量通常很小,供水量有限;三是如果在人口稠密的城区将珍贵的土地用来储存雨水,其成本非常高,如果要对已有建筑进行改造以适应大规模雨水收集要求,成本会更高<sup>[18]</sup>。因此,对于沿海新开发地区,比如新的滩涂围垦区,应做好规划,在建筑设计与市政规划中,预先考

考虑雨水利用的建筑设计需要。

#### 4 污水回用

污水回用是指城镇污水经处理后形成再生水(别称中水),回用于工农业生产或城镇生活。污水回用来源稳定,既可以有效节约淡水资源,又可以减少污水或废水排放量,减轻环境污染,还可以缓解城市排水管道负荷,具有明显的社会效益、环境效益、经济效益。因此,污水不是纯粹的废弃物。

##### 4.1 国内外污水回用现状

目前,全世界每天产生的生活污水量 6.8 亿~9.6 亿  $\text{m}^3$ ,仅约 4% 的污水经过了三级处理。2000 年以来,经过二级以上处理可供回用的污水处理量平均每年增加 200 万  $\text{m}^3/\text{d}$ <sup>[19]</sup>。全世界污水回用率较高的国家包括以色列、西班牙、新加坡、澳大利亚等国。作为 1 个位处干旱地区、水资源严重匮乏的沿海国家,以色列是全世界污水回用率最高的国家。以 2010 年为例,以色列生活污水总量为 5.08 亿  $\text{m}^3$ ,处理回用 4.5 亿  $\text{m}^3$ ,回用率为 88.6%<sup>[3]</sup>。新加坡污水回用起始于 1974 年,目前新加坡有 4 个用污水生产高品质清洁水的处理厂,总日产量约 52 万  $\text{m}^3$ 。新加坡为这种再生水专门创造了个名词“NEWater”(新水),并将其作为解决新加坡水资源问题的“国家的四个水龙头”之一,其他 3 个“水龙头”分别为当地流域产水、外国输入水、海水淡化水。“新水”目前能够满足新加坡约 30% 的用水需要,2060 年可达全部用水的 55%。据新加坡环境与水资源部统计,2012 年新加坡污水处理率为 91.6%,“新水”实际全年供应量为 1.1 亿  $\text{m}^3$ ,占全部供水量的 17.8%。澳大利亚的污水回用率在各国中也是较高的,2009—2010 年回用总量约为 2.8 亿  $\text{m}^3/\text{年}$ ,预期到 2015 年回用率能达到 18.7%~20.3%<sup>[20]</sup>。美国污水回用率较低,城镇人口每天产生污水 1.21 亿  $\text{m}^3$ ,回用率 7%~8%<sup>[19]</sup>。

截至 2010 年底,我国城镇生活污水处理能力已达 1.25 亿  $\text{m}^3/\text{d}$ ,城市污水处理率已达 77.5%,再生水生产能力为 1210 万  $\text{m}^3/\text{d}$ ,2010 年全国废水排放总量为 617.3 亿  $\text{m}^3$ ,也就是说,全国再生水生产量约占污水排放总量的 7%。根据国务院 2012 年发布《“十二五”全国城镇污水处理及再生利用设施建设规划》,2015 年我国再生水利用率将达到 15%,再生水规模由 2010 年的 1 210 万  $\text{m}^3/\text{d}$  提高到 3 885 万  $\text{m}^3/\text{d}$ 。

##### 4.2 污水回用的应用领域

过去几十年间,污水回用领域在不断扩展。目前污水回用的主要领域包括农业、城市景观与绿化、生活杂用,以及少部分工业用水及地下水回灌。其中,农业灌溉用水是最主要的回用领域,以色列 84% 的再生水用于农业灌溉,美国 29% 的再生水用于农业灌溉<sup>[21]</sup>。2006 年,世界卫生组织(WHO)专门出版了 4 卷本的《污水、排泄物与灰水的安全使用指南》,指导在农业和水产养殖中安全使用污水、排泄物、灰水。再生水的应用领域应包括价值更高的领域,如城市用水、工业用水、饮用水及景观用水。新加坡的“新水”基本用于工业,少部分混入水库中,成为饮用水源的一部分;在不缺水的欧洲北部国家,再生水主要用于城市、环境(包括地下水回灌)及工业<sup>[22]</sup>。地下水回灌也是一个重要的应用方向。2010—2012 年,澳大利亚西澳州首府珀斯进行了为期 3 年的利用经过高级处理的污水回灌 120~220 m 深地下水试验,结果表

明,再生水可以作为珀斯供水系统的重要来源<sup>[23]</sup>。用再生水进行地下水回灌时的核心问题是水质。美国要求回灌到饮用水水源地的水质量必须达到饮用水标准<sup>[24]</sup>。

##### 4.3 污水回用的相关政策与管理措施

美国环保署(EPA)于 1980 年发表了第 1 版《水回用指南》,此后在 1992、2004、2012 年做了 3 次更新,为美国各州的污水回用实践提供参考<sup>[25]</sup>。在美国城镇的“全面水管理”(total water management)体系中,污水回用已经成为组成部分之一<sup>[14]</sup>。在欧洲,没有欧盟层次的规定或指南,有些国家或地区发布了自己的规定或标准<sup>[21]</sup>。我国对于污水回用没有全国性的法规。北京市、天津市等 10 多个城市出台了再生水利用、管理的地方性法规与规范性文件,如《天津市城市排水和再生水利用管理条例》(2003 年)、《天津市住宅建设中水供水系统技术规定》(2003 年)、《宁波市城市排水和再生水利用条例》(2008 年)、《北京市排水和再生水管理办法》(2010 年)、《昆明市再生水管理办法》(2010 年)。北京市、天津市、山东省青岛市等严重缺水的地区还把中水回用列入城市总体规划中,2003 年青岛市制订了我国首部城市污水处理回用规划——《青岛市中水利用规划》,此后北京市等许多城市也编制了城市污水处理回用规划。2012 年国务院发布《“十二五”全国城镇污水处理及再生利用设施建设规划》之后,各地都加紧制定相关管理办法与规划。影响污水回用推广程度的一个重要因素是经济效益。目前我国再生水平均制水成本为 1.5~3.5 元/t。各地再生水价格不一。如北京市再生水价格为 1 元/t(居民自来水价为 4 元/t);天津市居民生活用再生水价格为 2.2 元/t,发电企业用水为 2.5 元/t,其他用水(包括工业、行政事业、经营服务业、洗车、临时用水等)为 4 元/t(居民自来水价格为 4.9 元/t)。再生水价格相当于居民生活用水价格的 20%~40%,相当于工业用水价格的 15%~20%。虽然表面上中水有价格优势,但目前中水系统仍未接入市政管网,中水运输成本为 15~20 元/t,远高于民用自来水。北京市从 2001 年开始大力推广中水进社区,但回收居民生活用水后再经中水设施进行净化加工,因设备、人员、电力损耗等成本,中水水价比自来水还要高,而且水质没保障。此外,目前再生水行业尚未享受相关税收优惠政策,再生水的制水成本与销售价格的差额完全由财政补贴。在财政实力较差的地区,存在财政补贴不稳定的情况,直接影响再生水企业生产积极性以及再生水的推广应用。

##### 4.4 污水回用的发展方向

现有技术已经可以把污水处理到所需要的水质标准。但是在再生水开发利用中,仍需要继续开发低成本、低能耗的水处理技术,对污水回用的健康风险进行深入分析,并且根据污水回用领域不同,采用不同的处理方法。再生水供水设施与管网建设滞后,需要加大投入。一方面要建立有效的激励机制,包括金融、财政、税收优惠扶持政策及再生水定价机制,另一方面要完善相关政策、法规与技术标准体系,建立污水再生回用管理体系,并从长远角度考虑将其纳入水资源综合管理体系。通过建立合理的价格机制,完善收费制度,补偿再生水设施的投资、建设、运营支出,促进相关企业良性发展。

#### 5 结语

在水资源越来越紧缺的今天,非常规水资源开发利用在

水资源综合管理体系中的地位越来越重要。我国已明确提出,将非常规水源开发利用纳入水资源统一配置。在沿海地区,非常规水资源开发利用尤为重要。不同非常规水资源开发利用特点见表 1。沿海地区水资源开发利用应在海岸带综合管理大框架下,从取水、蓄水、供水、用水、排水等环节进行全过程统筹规划管理。在取水环节,要综合运用常规水资源与非常规水资源,降低对常规水资源的依赖,实现各种水资源联合运用;在蓄水环节,御咸与蓄淡兼顾,并将蓄水工程与防

洪安全、应急保障等相结合;在供水环节,完善水质标准体系,加强供水计量管理,将集中供水与分散供水相结合,实现就近供水、分质供水;在用水环节,完善定价机制,根据用水者的用水需求及地理位置,开展水资源梯级利用、分质利用,提倡水重复利用,采取各种措施节约用水;在排水环节,加强污水排放监管力度,提高城市污水回用率。在全球气候变化的背景下,非常规水资源开发利用不仅是重要的水资源保障措施,也是应对气候变化的重要手段。

表 1 沿海地区非常规水资源开发利用形式

开发利用形式	特点	存在问题
海水淡化	不受气候变化影响,成本不断降低,施工期较短,产水规模较具弹性	能耗、供水成本较高,供水范围通常较小,且海水淡化厂建设对周边海域环境造成一定影响
微咸水利用与海水直接利用	微咸水分布较广,可以直接用于灌溉,淡化成本较海水低;海水直接利用成本低于其他利用方式	应用范围有局限性
雨水利用	无水资源费,水质较好,工程规模小,既满足生活生产用水,也有助于降低城市发生洪水的风险	来水可靠性比较低,供水量有限,在城区安装改造雨水收集储存设施成本较高
污水回用	污水来源稳定,污水回用具有综合性社会效益、环境效益、经济效益	需要继续开发低成本、低能耗的污水处理技术,基础设施配套建设有待加强,相关政策、法规、价格与技术标准体系有待完善

参考文献:

[1] Bennett A. 50th Anniversary: Desalination: 50 years of progress[J]. Filtration & Separation, 2013, 50(3): 32-39.

[2] Missimer T M, Sinha S, Ghaffour N. Strategic aquifer storage and recovery of desalinated water to achieve water security in the GCC/MENA region[J]. International Journal of Environment and Sustainability, 2012, 1(3): 87-99.

[3] Rejwan A. The state of Israel: national water efficiency report [EB/OL]. [2015-03-31]. [http://www. water. gov. il/Hebrew/ ProfessionalInfoAndData/2012/04 - The - State - of - Israel - National - Water - Efficiency - Report. pdf](http://www.water.gov.il/Hebrew/ProfessionalInfoAndData/2012/04-The-State-of-Israel-National-Water-Efficiency-Report.pdf).

[4] Watereuse Association Desalination Committee. Seawater desalination costs White Paper[EB/OL]. [2015-03-31]. [https://www. wate- reuse. org/sites/default/files/u8/WateReuse\\_Desal\\_Cost\\_White\\_Paper. pdf](https://www.watereuse.org/sites/default/files/u8/WateReuse_Desal_Cost_White_Paper.pdf)

[5] Lattemann S, Hoepner T. Environmental impact and impact assessment of seawater desalination[J]. Desalination, 2008, 220(1/2/3): 1-15.

[6] Elimelech M, Phillip W A. The future of seawater desalination: energy, technology, and the environment[J]. Science, 2011, 333(643): 712-717.

[7] Rhoades J D, Kandiah A, Mashali A M. The use of saline waters for crop production[R]. FAO Irrigation and Drainage paper 48, 1992.

[8] Miyamoto S, Moore J, Stichler C. Overview of saline water irrigation in Far West Texas[C]//Replogle J R, Renard K G. Speciality Conf. Irrigation and Drainage Division of ASCE. New York: ASCE, 1984: 222-230.

[9] Boumans J H, Van hoorn J W, Kruseman G P, et al. Water table control, reuse and disposal of drainage water in haryana[J]. Agricultural Water Management, 1988, 14(1/2/3/4): 537-545.

[10] Rhoades J D. Using saline water for irrigation[J]. Scientific Review on Arid Zone Research, 1984, 2: 233-264.

[11] Shalhevet J. Using water of marginal quality for crop production: major issues[J]. Agricultural Water Management, 1994, 25(3): 233-269.

[12] 王恩军, 张兰英. 天津市地下咸水资源开发利用现状与前景

[J]. 地下水, 2002, 24(2): 82-84.

[13] Habitat U N. Blue drop series on rainwater harvesting and utilisation - book 2: beneficiaries & capacity building[M]. Nairobi: UN - HABITAT, 2005.

[14] Rodrigo D, Calva E J L, Cannan A. Total water management, EPA/600/R-12/551[R]. 2012.

[15] 邵孝侯, 翟亚明, 廖林仙, 等. 沿海围垦区非传统水资源开发利用[J]. 水利经济, 2012, 30(3): 54-57.

[16] Fletcher T D, Deletic A, Mitchell V G, et al. Reuse of urban runoff in Australia: a review of recent advances and remaining challenges [J]. Journal of Environmental Quality, 2008, 37(5): 116-127.

[17] Stockholm Environment Institute. Rainwater harvesting: a lifeline for human well-being[R]. United Nations Environment Programme, 2009.

[18] Lechte P M S, Goonrey C M, Perera B C, et al. Examining the technical feasibility of using stormwater as an alternative supply source within an existing urban area—a case study[J]. Australian Journal of Water Resources, 2007, 11(1): 13-29.

[19] Global Water Intelligence. Municipal water reuse markets 2010 [R]. UK: Media Analytics Ltd. Oxford, 2010.

[20] Marsden J A. Progress against the National target of 30% of Australia's wastewater being recycled by 2015 [EB/OL]. [2015-03-31]. [http://www. environment. gov. au/resource/progress - a- gainst - national - target - 30 - australias - wastewater - being - re- cycled - 2015](http://www.environment.gov.au/resource/progress-against-national-target-30-australias-wastewater-being-recycled-2015).

[21] Bryk J P, Carpenter G. National database of water reuse facilities: summary report[R]. 2011.

[22] Bixio D, Thoeye C, de Koning J, et al. Wastewater reuse in Europe [J]. Desalination, 2006, 187(1/2/3): 89-101.

[23] Water Corporation. Groundwater replenishment trial - final report [R]. Water Corporation, 2013.

[24] Safe drinking water act, EPA. 816-H-01-003[R]. Washington D C: U. S. Environmental Protection Agency, 2001.

[25] Guidelines for water reuse, EPA/600/R-12/618[R]. Washington D C: U. S. Environmental Protection Agency, 2012