



Research
Environmental Protection—Article

新型水循环之海水冲厕的可持续应用

柳晓明^{a,b,c}, 戴吉^{a,b,c}, 吴镒^{a,b,c}, 江峰^d, 陈光浩^{a,b,c}, 徐浩光^{a,c}, Mark C.M. van Loosdrecht^{e,*}

^a Department of Civil and Environmental Engineering, The Hong Kong University of Science and Technology, Hong Kong, China

^b Water Technology Center, The Hong Kong University of Science and Technology, Hong Kong, China

^c Chinese National Engineering Research Center for Control and Treatment of Heavy Metal Pollution (Hong Kong Branch), The Hong Kong University of Science and Technology, Hong Kong, China

^d School of Chemistry and Environment, South China Normal University, Guangzhou 510006, China

^e Department of Biotechnology, Delft University of Technology, Delft 2629 HZ, the Netherlands

ARTICLE INFO

Article history:

Received 18 April 2016

Revised 17 June 2016

Accepted 4 November 2016

Available online 20 December 2016

关键词

可替代水资源

海水冲厕

SANI

城市水系统

生命周期评估

摘要

水安全日益严重地威胁着全人类的健康和福祉。因此,寻找可持续替代的水资源已成为一个亟待解决的问题。尽管海水淡化和污水回用在一定程度上可以缓解城市的用水紧张,但是这两项技术的高能耗和高费用阻碍了它们的广泛应用。其实,城市用水中20%~30%是用于冲洗厕所,经过简单处理后的海水完全可以达到冲厕用水的水质要求。当然海水冲厕和再生水冲厕一样需要配备单独的管道系统。本文通过生命周期评估和敏感性分析方法,在与常规淡水系统进行比较的基础上,系统地研究了海水冲厕、海水淡化以及污水回用这三种替代水资源的方法,在城市水系统中的相对节约淡水的潜力、对环境的影响以及广泛应用的前景。结果表明,海水冲厕具有环境可持续性,其应用主要取决于城市的有效人口密度和距海岸的距离。在有效人口密度超过3000人·km⁻²及距海岸30 km以内的沿海城市,海水冲厕所带来的总环境影响明显低于其他两个替代水资源。如进一步结合应用适合含盐污水处理的硫酸盐还原、自养反硝化和综合硝化(sulfate reduction, autotrophic denitrification, and nitrification integrated, SANI)处理技术,海水冲厕的潜在应用范围可以扩大到距海岸60 km的沿海城市。对于符合这些要求的沿海城市,建议将海水冲厕纳入城市水系统,从而促进城市水循环的可持续发展。

© 2016 THE AUTHORS. Published by Elsevier LTD on behalf of Chinese Academy of Engineering and Higher Education Press Limited Company. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

1. 引言

淡水是维持生命最重要的自然资源之一。由于缺乏有效的水资源保护措施,全球供水水质受到严重威胁。同时,随着全球人口的快速增长,可利用淡水的总量日趋不足[1]。迄今为止,大约80%的全球人口受到水资源短缺或水质不安全的影响[2]。当我们将经过处理的污水视为可利用的淡水资源,采用淡水足迹(blue water footprint)这一概念来评估淡水资源储备时,水资源短缺

仍然是一个严重的全球性问题[3]。为解决水资源不足的问题,众多研究者提出三种潜在解决方案:污水回收再利用、雨水收集和海水利用[4–6]。一方面,海水占地球水资源总量的97.5%[5]。另一方面,全球一半以上的人口居住在沿海地区[7]。因此,如果能利用海水替代部分淡水资源,那么,将有效解决水资源短缺问题。

采用反渗透(reverse osmosis, RO)法进行海水淡化是一项成熟的海水利用技术。虽然众多研究者在该技术的优化研究上已经取得了长足的进步,但是这项技术的高

* Corresponding author.

E-mail address: M.C.M.vanloosdrecht@tudelft.nl

成本和高能耗仍然在一定程度上阻碍了它的大范围推广[5,6]。与海水淡化技术相比,香港长时间大范围使用的海水冲厕技术则是一项操作简单、低成本、低能耗的海水利用方法。海水经过格栅和消毒工艺即可达到冲洗厕所的水质要求[8]。自1958年以来,香港开始逐步实施海水冲厕。迄今为止,香港80%的冲厕水为海水。这一举措可节约至少22%的淡水[8,9]。香港50多年来使用海水冲厕的经验强有力地证明了海水冲厕系统可以有效提高城市水资源的利用效率[4]。

此外,海水中硫酸盐的存在奠定了新型含盐污水处理技术——硫酸盐还原、自养反硝化和综合硝化(SANI)工艺的发展基础[10,11]。通过将微生物硫循环整合到基于碳和氮循环的传统生物污水处理中,SANI工艺利用硫酸盐还原细菌和自养反硝化细菌去除污水中的碳和硝酸盐。与传统活性污泥法相比,使用SANI工艺进行污水处理可以缩减30%~40%的占地,实现60%~70%的生物污泥减量,降低10%的能耗,减少10%的温室气体排放[10-16]。经过500天的实验室小试[13,14]、225天处理量为 $10\text{ m}^3\cdot\text{d}^{-1}$ 的中型规模试验[10,15]以及在香港沙田污水处理厂进行的 $1000\text{ m}^3\cdot\text{d}^{-1}$ 大规模试验[16],SANI工艺的优点和适用性已得到充分证明。结果表明,与其他城市水循环系统相比,海水冲厕与SANI污水处理工艺相结合,可以产生更好的环境和经济效益。为明确海水冲厕-SANI系统的环境可持续性,应使用生命周期分析方法研究该系统在气候变化、能源消耗和土地占用等方面的影响。

本研究以海水淡化、污水回用冲厕和海水冲厕作为三种不同的替代型水资源方法,结合不同的污水处理方法,形成五种具有代表性的城市水系统方案,并综合对比了不同城市水系统方案的环境可持续性[17]。评估的环境影响因素包括淡水富营养化、能源消耗、气候变化、臭氧消耗和土地占用等。由于水资源不足问题严重危害着中国内地东部沿海城市的日常生活[2,3],因此选择香港、深圳、北京及青岛四个具有代表性的城市作为研究对象。为解决水资源短缺问题,香港和深圳需要购买东江水,北京和青岛则需要通过南水北调工程引进淡水。本研究首先对这四个城市进行不同水资源使用状况的环境评估,然后再对影响每种水资源使用的因素进行敏感性分析,从而确定影响城市水系统方案选择的最重要的影响因素,如城市到海岸的距离、有效人口密度和缺水比例等。最后,建议引入海水冲厕系统的适当条件。

本研究为选择环境可持续的替代型水资源提供了参考信息。

2. 材料和方法

2.1. 生命周期评估

根据ISO标准,生命周期模型的建立分为四个阶段:①研究目的和范围;②清单分析;③影响评估;④结果解释[18]。

2.1.1. 研究目的和范围

海水冲厕后冲厕水自然与其他生活污水混合,一起排放到污水处理厂进行后续处理。由于污水中含有20%~30%的海水成分,经过处理后的出水应该采取海洋排放处置,以免对当地淡水生态系统造成影响。因此,本研究中生命周期的研究范围是从抽取水源到污水处理厂直至最终排放至自然水体的整个城市水系统。如图1(a)显示研究水系统的组成,主要包括集水区、自来水水处理、供水系统、污水收集系统、污水处理及处理水排放[19,20]。本研究的目的是评估使用各种替代水资源对缺水城市的潜在环境影响。所有影响因素都以每供应 1 m^3 水资源造成的环境影响为参照基础。

图1(a)红色椭圆内的范围为本研究的系统边界,包括:①水源取水,如当地淡水、引进淡水或海水抽水;②饮用水处理过程,如常规淡水处理、RO脱盐或污水回用;③给水配送管道以及污水收集系统;④污水处理工艺,包括传统活性污泥法或SANI工艺;⑤处理水海洋排放(如适用)。本研究的环境影响评估结果包括基建和运行阶段。由于对改造项目进行必要拆除工程的影响微不足道[21-23],所以未将其纳入研究范围。

图1(b)显示五个代表性的城市水系统方案。常规淡水处理-传统活性污泥法污水处理(FWA)方案是指用单一管道系统进行常规淡水供应并应用传统活性污泥法进行污水处理,并以此系统作为系统比较的基准;在海水淡化-传统活性污泥法污水处理(FRA)方案中,用反渗透方法进行海水淡化以取代FWA方案中从其他区域引进的淡水资源;在海水冲厕-传统活性污泥法污水处理(DSA)方案中,海水经过格栅和筛网处理后,经消毒后通过独立管道系统供应冲厕,所产生的高盐污水用传统活性污泥法进行污水处理;在海水冲厕-SANI污水处理工艺(DSS)方案中,SANI取代DSA中的传统活性污泥法进行污水处

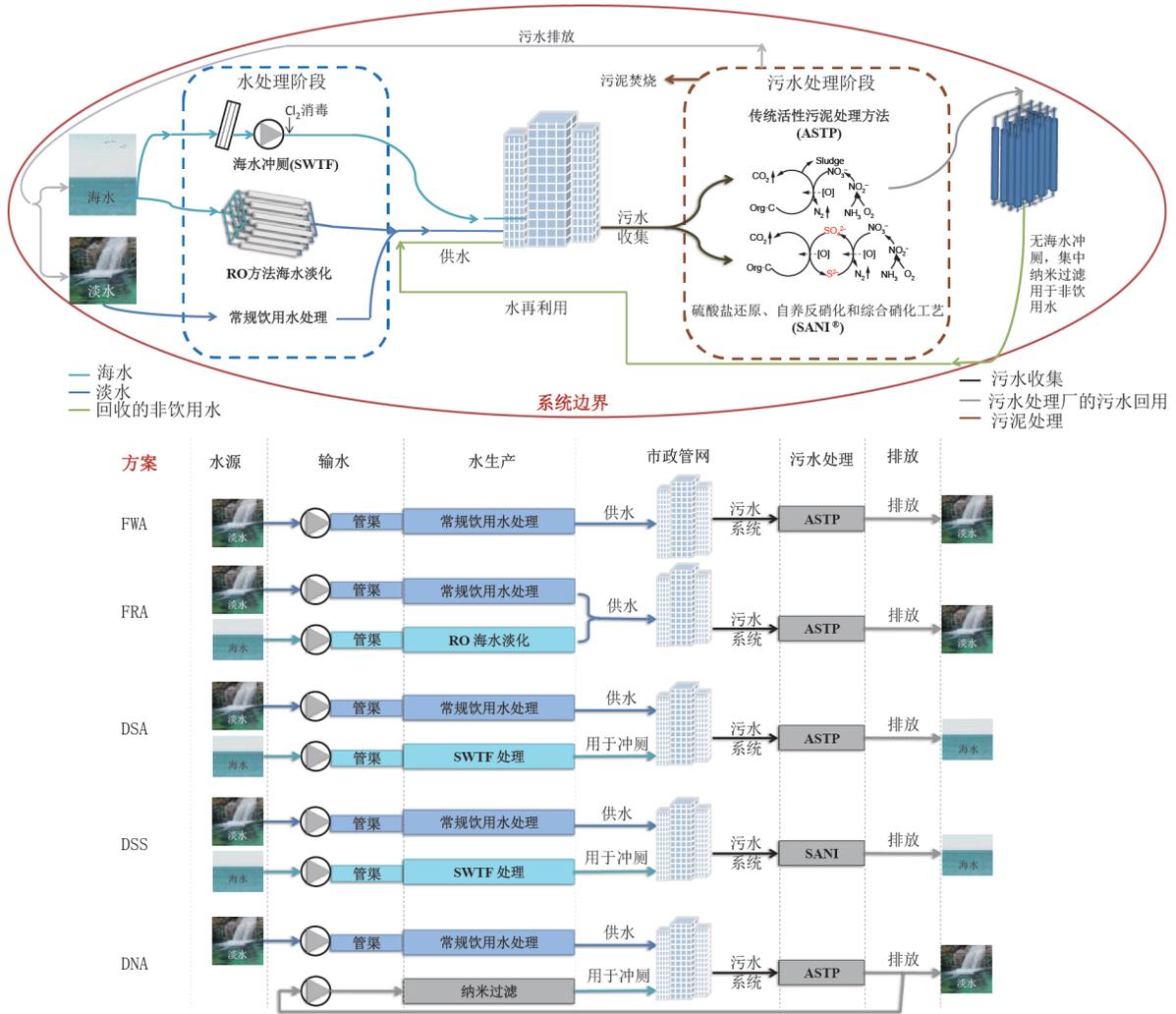


图1. (a)城市水系统是一个完整的从自然界提取水直至最后排放回自然界的水运输与处理系统。本研究将海水、淡水和污水回用作为城市中不同类型的给水水源。基于各种水资源的需求，需考虑的评估因素包括水处理工艺、水源配送、污水收集相关管道系统、污水处理工艺以及处理水的排放；(b)本研究比较的五种城市水系统方案为：常规淡水处理-传统活性污泥法污水处理(FWA)、海水淡化-传统活性污泥法污水处理(FRA)、海水冲厕-传统活性污泥法污水处理(DSA)、海水冲厕-SANI污水处理工艺(DSS)以及污水回用系统(DNA)。

理；在污水回用系统(DNA)方案中，污水经过深度处理后，作为非饮用水并通过独立管道系统供应冲厕。

2.1.2. 清单

生命周期清单包括各种材料、化学品和能源的投入。这些数据主要来源于香港特区政府水务署和渠务署发表的数据及一些相关文献数据的补充[11,14,23–26]。所有输入值都基于 1 m^3 单位水资源。为简便起见，不同城市水系统方案中的相似设施的清单均假设相同。详细的清单输入数据详见附件信息(SI)中的表S1至表S5。

2.1.3. 影响评估

采用ISO 14044标准和ReCiPe(H)方法并运用SimaPro 8.1软件，对生命周期影响因素中的气候变化(CO_2 当量)、人体毒性(1,4-DB 当量)、淡水富营养化(P当量)、

占地($m^2 \cdot a$ 当量)和臭氧消耗(CFC-11当量)进行了生命周期评估计算。本研究同时也采用Ecoinvent 2.0方法评估能耗因素的影响。

2.2. 特定案例研究和一般情况

香港、深圳、北京和青岛这四个城市的地理条件和用水状况有所不同，但都遭受水资源短缺问题的困扰，因此作为代表性城市进行对比研究。香港和深圳均需从东江引进淡水资源，而北京和青岛的水资源严重依赖南水北调工程。表1初步总结了这四个城市的用水状况和地理条件。详细信息及其来源请参见SI中的表S1。

影响这些城市的潜在水资源使用状况的主要因素有：淡水引水距离、城市与海岸的距离(简称“海岸距离”)、淡水供应情况、冲厕水占总用水量的比率以及有效人口密度。其中，有效人口密度只考虑了居住区的人

口密度,并未将农田、森林等未居住区纳入城市面积。在对环境指标进行敏感性分析时,只考虑表2所列的关键条件。这些条件代表了使用海水冲厕的最不利情况。然而,考虑到城市中各种水资源的可用性等固有特性有所不同,这些参数应有相对较大但合理的变化范围。详细的计算方法和相关公式详见SI的相关部分。

考虑到原始数据的有效性,本研究将水务署和渠务署收集的数据的不确定性定义为5%,文献补充数据的不确定性定义为10%,管网估算长度和淡水引水距离的不确定性定义为15% [27]。为了提高模拟结果的精确度,本研究同时采用蒙特卡罗模拟方法完成10 000次迭代计算。迭代计算中的参数设为均匀随机分布。

3. 结果

香港、深圳、北京和青岛四个城市均因水源供应不足面临严重缺水。香港和深圳购买非本地淡水(来自东江)满足水资源需求,而北京和青岛分别通过1432 km和1467 km长的引水线路从中国南部引入淡水资源 [23]。这两种解决方案既不环保也不经济。因此,基于海水淡化(FRA)、海水冲厕(DSA和DSS)和再生水(DNA)等各种系统组合可为这四个城市提供不同于常规淡水供水系统(FWA)的城市水系统方案。

3.1. 淡水节约

使用海水或再生水旨在减少对常规淡水资源的依赖。图2概括了引入不同城市水系统方案时四个城市常规淡水的用水量。理论上,FRA方案中的海水淡化可以

取代所有非本地的淡水需求,但实际上海水淡化耗费大量物资和能源,并不现实。因此,在FRA方案中,每个所选城市的需水量为当地淡水资源可持续利用的上限水量。比较这四个城市的供水需求量,深圳和香港的自身水资源的短缺比北京和青岛更为严峻。在DSA、DSS和DNA方案中,海水和再生水只能替代用于冲洗厕所的淡水,约占城市淡水总需求的20%~30%,远远不能解决香港和深圳的水资源短缺问题,因此两地都需要从东江引水以满足需求。相比之下,如北京和青岛两地利用海水或再生水冲洗厕所的话,不仅可以缓解淡水资源短缺问题,也可大大降低对南水北调工程的依赖。

3.2. 环境影响

五个城市水系统方案在香港、深圳、北京和青岛四个城市实施的环境分析结果详见图3。

总体而言,在六个评价指标中,对环境影响最严重的是FRA方案,主要原因在于使用RO淡化海水,尤其在香港和深圳。与其他方案相比,若在此方案中80%的淡水需求都来自海水淡化(图2),环境影响将增加三倍。除了FRA方案,其他城市水系统方案对四个城市的环境影响相对接近(这里暂时不考虑水体富营养化问题)。如在青岛、香港和深圳实施DSS方案,将产生较小的环境影响,这主要是由于海水冲厕和SANI工艺本身的低能耗的特点。如考虑水体富营养化问题,本方案除了对减少北京地区的水体富营养化的贡献外,并不比其他方案(图3)更具吸引力。这是因为北京离海岸距离太长(270 km),海水输送及将含盐处理水进行海洋排放都会显著增加对环境的影响。因此,海岸距离是考虑海水冲

表1 香港、深圳、北京和青岛的用水状况和地理条件

	年淡水取水量 ($10^8 \text{ m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$)	冲厕用水量 ($\text{m}^3 \cdot \text{人}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$)	城市人口 (10^4 人)	居住区面积 (km^2)	有效人口密度 ($\text{人} \cdot \text{km}^{-2}$)
香港	12.2	34	707	280	25 000
深圳	18	34	1 050	1 200	8 700
北京	23.5	34	1 850	2 500	7 400
青岛	6.0	34	500	1 300	3 800

表2 敏感性分析中的关键条件

指标	初始值	变化范围
有效人口密度($\text{人} \cdot \text{km}^{-2}$)	3 000	3 000~30 000
城市与海岸的距离(km)	300 km	0~300
淡水引水距离(km)	70	30~300
冲厕用水与总用水量的比率(%)	20	20~40
淡水供应(%)	70	0~100

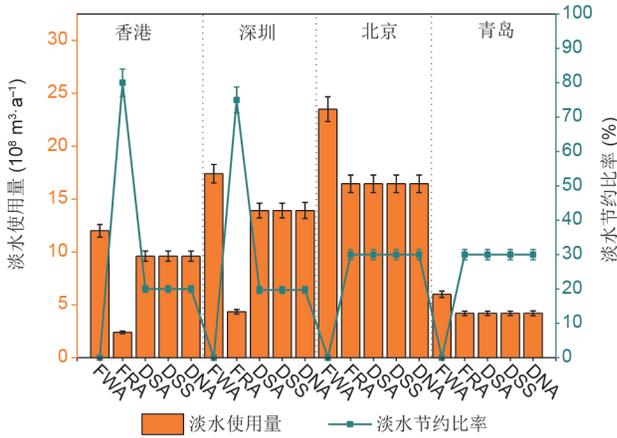


图2. 四个城市中五种城市水系统方案下的淡水需求总量(包括住宅、工业和景观用水)和节约淡水量。

厕能否应用的一个重要条件。

北京和青岛的供水和排水市政管网长度远远超过香港和深圳,相应造成的负面环境影响也要大得多。多数研究表明,城市供水系统中的输送过程对气候变化和能源消耗的影响达30%~70%。在人口密度低于 $4000 \text{ 人} \cdot \text{km}^{-2}$ 的城市,单位体积的水运输需要相对更长的市政管道 [21,24,28,29]。另外,中国北方城市人均用水量偏低,意味着北京和青岛的管道系统对环境的负面影响较大。总之,当有效人口密度过低时,市政管网每单位长度的水运输效率就会过低,因而导致较大的环境影响。由于城市的快速发展带来城市有效人口密度的增加,每立方米水运输所产生的环境影响也将随之减少

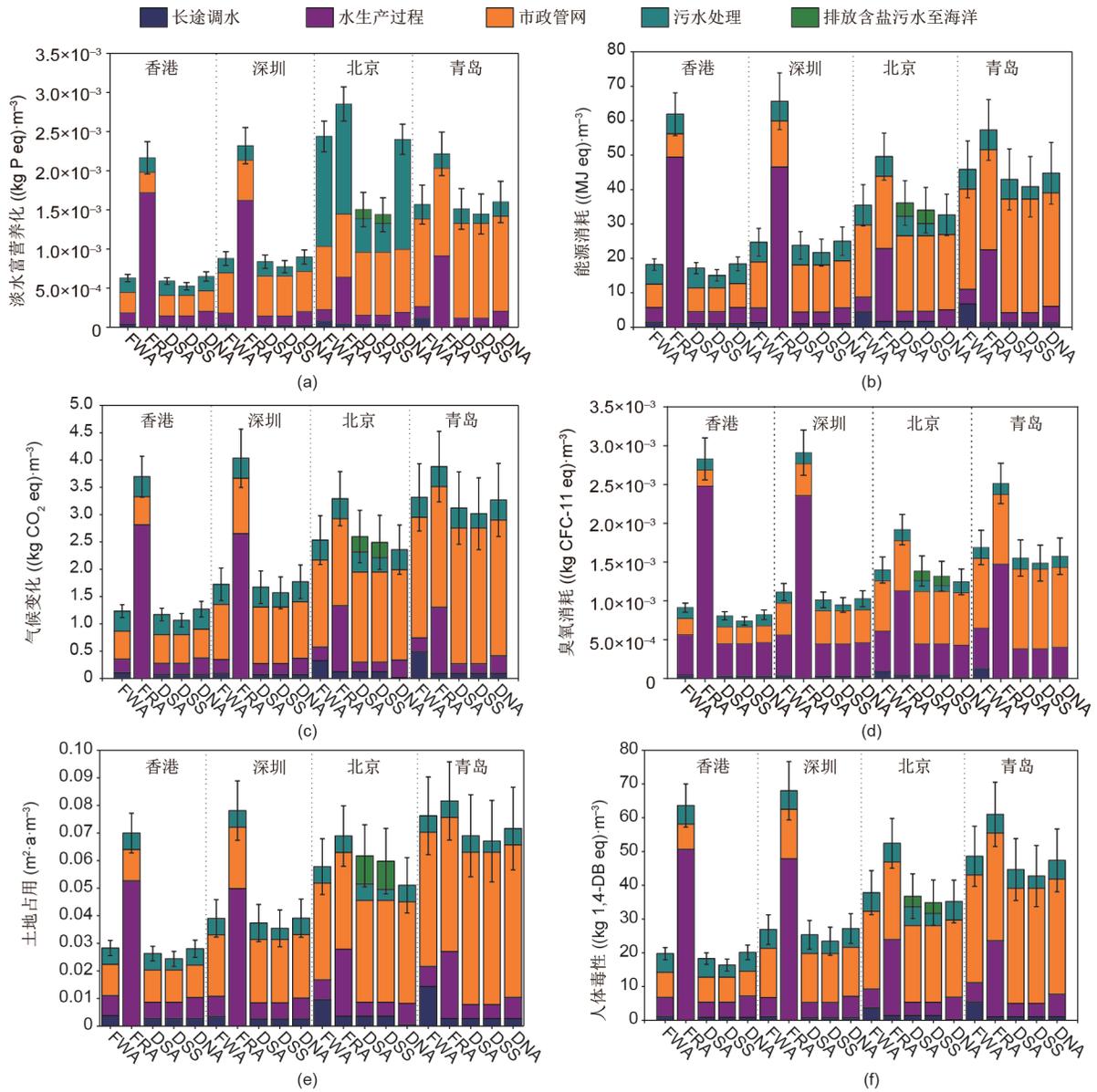


图3. 五个城市水系统方案在香港、深圳、北京和青岛实施的环境影响比较。(a)淡水富营养化; (b)能源消耗; (c)气候变化; (d)臭氧消耗; (e)土地占用; (f)人体毒性。

[30]。显而易见,有效人口密度也是决定环境影响的另一个重要因素。基于海岸距离和有效人口密度这两个重要参数,可以通过建立简单模型来预测使用各种替代型水资源对环境的影响,帮助决策者根据城市的具体情况选择最佳的水资源供水方案。下一节将详细比较上述各参数对环境的影响程度,同时比较不同城市水系统方案的适用性。

4. 讨论

4.1. 敏感性分析

图3(b)、(c)、(e)和(f)显示不同城市水系统方案在能源消耗、气候变化、土地占用及对人体毒性各影响因子的生命周期的评价结果。这些指标显著依赖于城市的地理条件和发展状态,如海水和淡水的输送距离以及城市有效人口密度。将城市地理条件和发展状态作为变量对上述四个环境影响指标进行敏感性分析的结果如下(由于FRA方案中海水淡化对环境产生的影响远大于其他城市水系统方案,故将此方案排除在外)。

以淡水输送距离及其淡水比率、城市有效人口密度、海岸距离和冲厕耗水占城市总用水量的比率作为变量分析四种城市水系统方案的环境影响结果,如图4所示。总体上,基于海水冲厕的方案(DSA和DSS)均比基于淡水和污水回用方案(FWA和DNA)的环境影响更大。用于敏感性分析的参数设置取最不利于海水冲厕的条件,以确保基于环境影响分析结果而推荐海水冲厕的可靠性。这些参数包括相对较短的淡水取水距离(70 km)、低有效人口密度($3000 \text{人} \cdot \text{km}^{-2}$)和较长的海水引水距离(距海岸300 km)。在此假设下,本敏感性分析研究显示的环境影响高于类似研究。其中最受关注的是气候变化这一影响因子,其值高于最近的相关研究($0.6 \sim 1.6 \text{ kg CO}_2 \cdot \text{m}^{-3}$)[21,31,32]。这是因为此分析的假设都是基于在海水冲厕最不利的条件下进行的。因此图4所示的敏感性分析结果仅限于分析最重要的影响参数。在与海水冲厕有关的方案(DSA和DSS)中,环境效益随着海岸距离的减小而增加,而海岸距离并不改变DNA的环境影响。

图4表明有效人口密度是对生命周期结果影响最大的参数,而有效人口密度和环境影响之间存在幂律法则关系。与有效人口密度相比,其他参数的影响都低得多。在所有城市水系统方案中,环境影响都会随着有效人口密度的降低而剧增。此变化在人口密度达到 $12\,000 \text{人} \cdot \text{km}^{-2}$ 以上时开始显著降低(图4)。这表明,在人口密

度超过 $12\,000 \text{人} \cdot \text{km}^{-2}$ 的大城市,因市政管网对水资源的输送和污水收集造成的环境影响可得到有效减少。因此,拥有高人口密度的纽约、上海、广州、东京、首尔和新加坡等大城市的水系统比人口密度较低城市的水系统更加环保和具可持续性。

第二个重要的参数是海岸距离。该参数仅对与海水冲厕有关的方案(DSA和DSS)中的生命周期结果影响显著(结果显示该参数与环境影响呈线性关系)。显而易见,随着海岸距离的增加,需要更长距离的管道输送海水和排放含盐处理水,因此对环境的影响会越来越严重。海岸距离如从0增加到300 km将导致能量消耗增加约20%,气候变化和人体毒性分别增加约24%和10%。其中,土地占用是受影响最严重的指标,约增加45%。因此,近海城市在考虑应用海水冲厕时,其可行性应通过建立生命周期模型进行详细的评估。

其他参数如淡水输送距离、淡水供应率及冲厕水与总用水量的比率,在敏感性分析中的变化范围分别为30~300 km、0~100%和20%~40%。尽管变化区间较大,但这些参数对环境的影响不明显。与海岸距离和有效人口密度相比,这三个参数对供水系统的环境影响很小,几乎可忽略不计。此结论与图3所示的案例的结果一致。由此可见,市政管网的优化能较大幅度减少城市水系统的环境影响。市政管网的基建和输水过程的能源消耗是对环境影响的主要因素,且与管道长度密切相关。较高的人口密度可以减少人均管道长度并提高水运输的能源效率。可见有效人口密度对环境存在显著影响。

总之,基于敏感性分析结果,有效人口密度和海岸距离是两个最重要的影响参数。因此,进一步针对这两个因素在使用不同水源的情况下进行环境影响分析。由于气候变化和土地占用是环境因素中敏感性最高的,所以针对这两个因素进行了评估。

4.2. 海水冲厕的潜在应用

图5比较了不同水系统方案对土地占用的环境影响。根据由有效人口密度、海岸距离和土地占用这三个参数组成的函数绘制图中的曲面。 x - y 平面上的阴影区域反映了推荐采用海水冲厕作为供水替代方案的地理条件。

总体而言,图5(b)、(d)所示的DSS对FWA和DSS对DNA的阴影面积大于图5(a)和5(c)所示的DSA对FWA和DSA对DNA的阴影面积,主要原因是DSS中的SANI工艺占用较少的土地而产生额外的环境效益。DSA适用于位于海岸30 km以内的城市。但如果采用DSS,当海岸

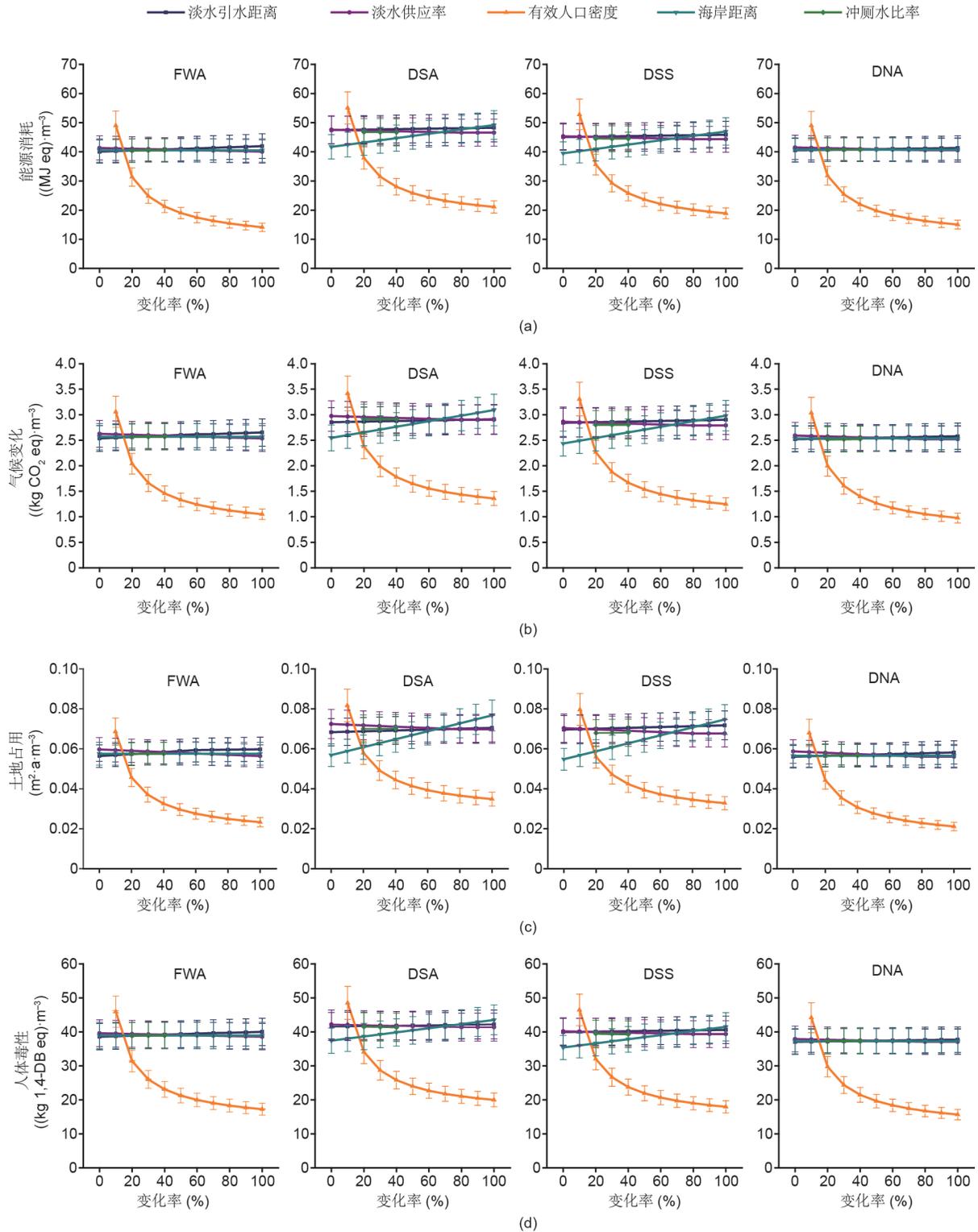


图4. 基于淡水引水距离、淡水供应率、有效人口密度、海岸距离以及冲厕水占城市总用水量比率变化的敏感性分析。城市水系统(见图1中FWA、DSA、DSS和DNA四个方案)的(a)能源消耗、(b)气候变化、(c)土地占用和(d)人类毒性分析。此研究过程中的参数设定取最不利于海水冲厕的条件。

距离达到60 km时, 仍然有较好的环境效应。一般来说, 对于有效人口密度小于 $1100 \text{人} \cdot \text{km}^{-2}$ 的城市, 即使该城市位于海岸线上, 相较其他水资源而言, 海水冲厕不具

有较好的环境效应。然而, 如前所述, 如果有效人口密度在 $1100 \text{人} \cdot \text{km}^{-2}$ 或以下, 本研究考虑的各种城市水系统方案都不是环境可持续的。当城市的人口密度低

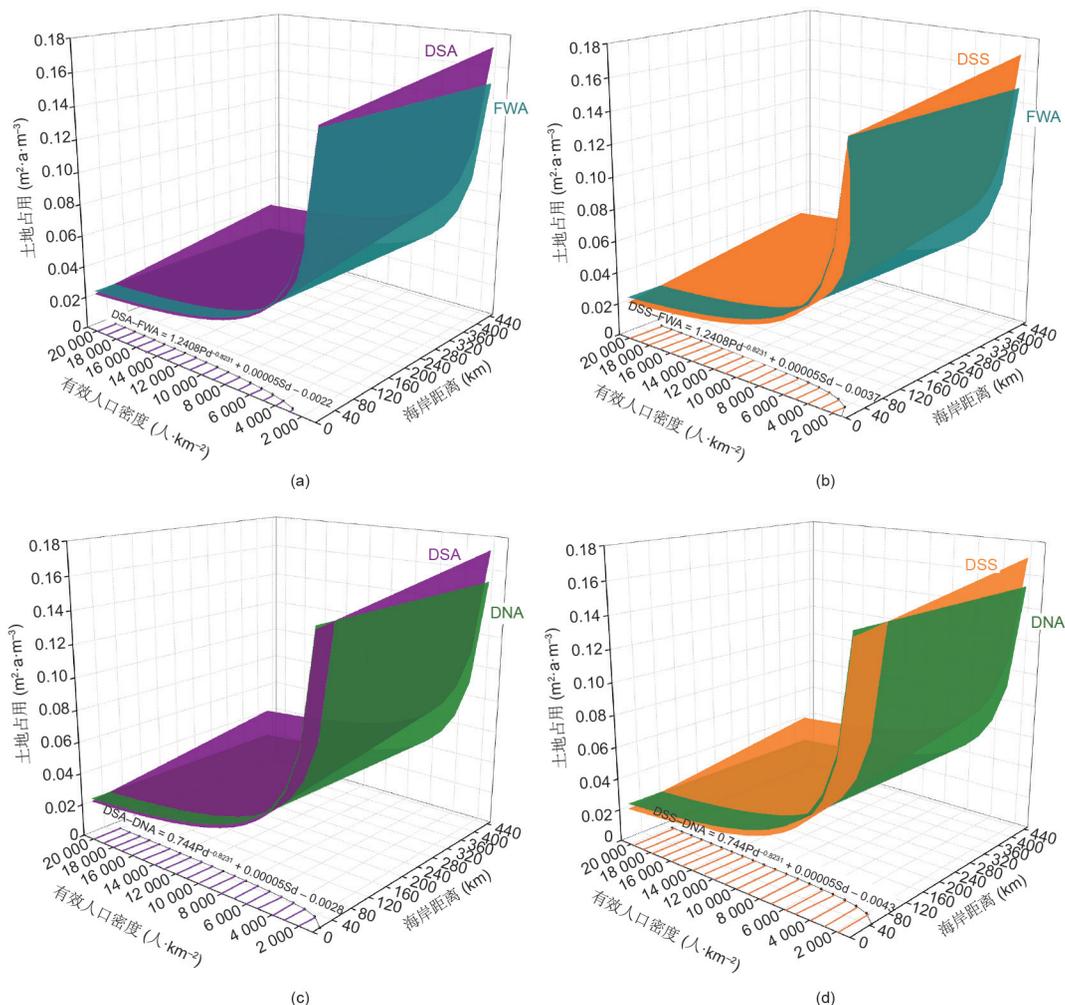


图5. 基于土地占用, 对有海水冲厕的方案(DSA和DSS)、单一淡水资源使用方案(FWA)和回收水使用方案(DNA)进行比较, 评估海水冲厕的潜在应用条件。(a)DSA对FWA; (b)DSS对FWA; (c)DSA对DNA; (d)DSS对DNA。

于 $3000 \text{人} \cdot \text{km}^{-2}$ [图4(c)和图5], 环境因素中的土地占用影响可增加3.5~7倍。进一步说明海水冲厕在人口密度高的沿海大城市的应用可以降低城市水系统对环境的影响, 并保持可持续发展状态。

如图5(c)、(d)所示, 海水冲厕的应用比使用再生水系统更有利于环境, 这是因为再生水的能源消耗要明显高于海水冲厕, 因此再生水系统的环境影响都比较显著。此外, 再生水和淡水系统之间可能发生交叉污染并会导致健康风险[33]。通过使用海水冲厕可以避免交叉污染, 因为居民可以轻易地通过海水的咸味检测到交叉污染。

图6说明不同城市水系统方案对气候变化的影响。海水冲厕对气候变化的影响小于对土地占用的影响。这一发现与敏感性分析的结果一致。换言之, 当使用土地占用作为环境影响评价指标对海水冲厕相关方案进行评估时, 可确保其他环境指标的评估结果都在安全可靠的范围。另外, 考虑到海水冲厕的使用可以有效减少淡

水富营养化问题, 海水冲厕在内陆城市的使用也可以缓解水质型水资源短缺的问题。

综上所述, DSS可以在距离海岸线60 km以内的人口密集的大城市推广。诸如, 在澳门(中国)、东京(日本)、新加坡、纽约(美国)、宁波(中国)、孟买(印度)和罗斯匹塔勒(西班牙)推广使用(详见SI中的表S12)。

5. 结论

本文对可替代水资源和常规水资源的环境影响进行了全面评估, 并分析了不同水资源在人口密集和缺水城市中的应用前景。这些城市水系统方案中的水资源比较包括海水淡化、海水冲厕、再生水冲厕和常规淡水系统。通过具体案例分析, 本文揭示了香港、深圳和青岛使用海水冲厕会比选择其他水资源(海水淡化、淡水引进和回用水)更环保。此外, DSS能进一步减少城市水系统对环境的不利影响。但北京由于距海岸距离远, 海水冲厕的

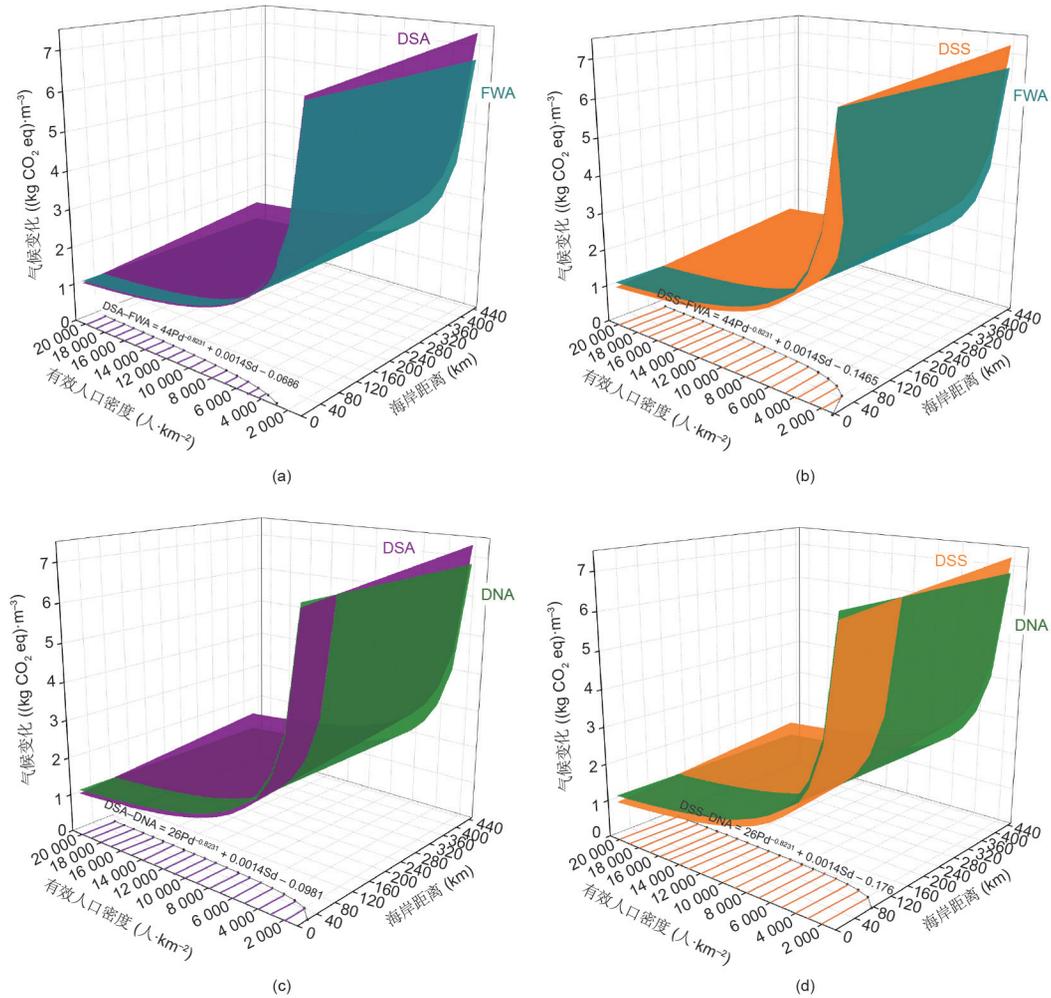


图6. 基于气候变化, 对有海水冲厕的方案(DSA和DSS)、单一淡水资源使用方案(FWA)和回收水使用方案(DNA)进行比较, 评估海水冲厕的潜在应用条件。(a) DSA对FWA; (b) DSS对FWA; (c) DSA对DNA; (d) DSS对DNA。

适用性不如再生水冲厕。

本研究进一步利用敏感性分析讨论了不同影响因素对常规和替代性水资源使用条件的生命周期环境的影响。分析表明, 有效人口密度和海岸距离是应用海水冲厕最敏感的影响因素。与其他因素相比, 有效人口密度引起的环境影响更为突出。当有效人口密度超过12 000 人·km⁻²时, 负面环境影响将不再显著。海岸距离对土地占用的影响超过对其他指标的影响。

因此, 在香港实施已接近60年的海水冲厕系统是现代城市有效的供水替代方案之一, 特别是在那些位于距海岸线30 km以内且有效人口密度高于3000人·km⁻²的地区。除了可靠的环保性能, 海水冲厕还可以减少20%~30%的淡水消耗, 从而大大缓解多数城市的水资源短缺问题。当将SANI工艺与海水冲厕系统相结合时, 有效人口密度可以减少到1100人·km⁻², 并且距海岸的距离可以增加至60 km, 而不会对环境产生负面影响。考虑到世界上快速发展的大城市一般均位于沿海地

区, 并且这些大城市的人口密度相对而言都较高, 因此, DSS的应用和推广将具有极大的潜力。

致谢

作者衷心感谢香港创新与科技基金(Innovation and Technology Fund, ITF)(ITS / 179 / 12FP)、水务署(Water Supplies Department, WSD)、渠务署(Drainage Services Department, DSD)、新纪元有限公司、信华远东有限公司、广州珠江科技新项目(2014J2200048)、广东省科技计划项目(2015A020215029)对该研究的大力支持。

Compliance with ethics guidelines

Xiaoming Liu, Ji Dai, Di Wu, Feng Jiang, Guanghao Chen, Ho-Kwong Chui, and Mark C. M. van Loosdrecht declare that they have no conflict of interest or financial conflicts to disclose.

Supplementary Information

<http://engineering.org.cn/EN/10.1016/J.ENG.2016.04.013>

Table S1–S12

Inventory analysis and method

References

- [1] Postel SL. Entering an era of water scarcity: the challenges ahead. *Ecol Appl* 2000;10(4): 941–8.
- [2] Vörösmarty CJ, McIntyre PB, Gessner MO, Dudgeon D, Prusevich A, Green P, et al. Global threats to human water security and river biodiversity. *Nature* 2010;467(7315):555–61.
- [3] Hoekstra AY, Mekonnen MM, Chapagain AK, Mathews RE, Richter BD. Global monthly water scarcity: blue water footprints versus blue water availability. *PLoS One* 2012;7(2):e32688.
- [4] Grant SB, Saphores JD, Feldman DL, Hamilton AJ, Fletcher TD, Cook PL, et al. Taking the “waste” out of “wastewater” for human water security and ecosystem sustainability. *Science* 2012;337(6095):681–6.
- [5] Shannon MA, Bohn PW, Elimelech M, Georgiadis JG, Mariñas BJ, Mayes AM. Science and technology for water purification in the coming decades. *Nature* 2008;452(7185):301–10.
- [6] Tal A. Seeking sustainability: Israel's evolving water management strategy. *Science* 2006;313(5790):1081–4.
- [7] Hinrichsen D. Coastal waters of the world: trends, threats, and strategies. Washington, DC: Island Press; 1998.
- [8] Chen G, Chui HK, Wong CL, Tang TW, Lu H, Jiang F, et al. An innovative triple water supply system and a novel SANI[®] process to alleviate water shortage and pollution problem for water-scarce coastal areas in China. *J Water Sustain* 2012;2(2):121–9.
- [9] Leung RW, Li DC, Yu WK, Chui HK, Lee TO, van Loosdrecht MC, et al. Integration of seawater and grey water reuse to maximize alternative water resource for coastal areas: the case of the Hong Kong International Airport. *Water Sci Technol* 2012;65(3):410–7.
- [10] Wang J, Shi M, Lu H, Wu D, Shao MF, Zhang T, et al. Microbial community of sulfate-reducing up-flow sludge bed in the SANI[®] process for saline sewage treatment. *Appl Microbiol Biotechnol* 2011;90(6):2015–25.
- [11] Lu H, Ekama GA, Wu D, Feng J, van Loosdrecht MC, Chen GH. SANI[®] process realizes sustainable saline sewage treatment: steady state model-based evaluation of the pilot-scale trial of the process. *Water Res* 2012;46(2):475–90.
- [12] Lu H, Wu D, Jiang F, Ekama GA, van Loosdrecht MC, Chen GH. The demonstration of a novel sulfur cycle-based wastewater treatment process: sulfate reduction, autotrophic denitrification, and nitrification integrated (SANI[®]) biological nitrogen removal process. *Biotechnol Bioeng* 2012;109(11):2778–89.
- [13] Wang J, Lu H, Chen GH, Lau GN, Tsang WL, van Loosdrecht MC. A novel sulfate reduction, autotrophic denitrification, nitrification integrated (SANI) process for saline wastewater treatment. *Water Res* 2009;43(9):2363–72.
- [14] Lu H, Wang J, Li S, Chen GH, van Loosdrecht MC, Ekama GA. Steady-state model-based evaluation of sulfate reduction, autotrophic denitrification and nitrification integrated (SANI) process. *Water Res* 2009;43(14):3613–21.
- [15] Lu H, Wu D, Tang DT, Chen GH, van Loosdrecht MC, Ekama G. Pilot scale evaluation of SANI process for sludge minimization and greenhouse gas reduction in saline sewage treatment. *Water Sci Technol* 2011;63(10):2149–54.
- [16] Wu D, Ekama GA, Chui H-K, Wang B, Cui Y-X, Hao T-W, et al. Large-scale demonstration of the sulfate reduction autotrophic denitrification nitrification integrated (SANI[®]) process in saline sewage treatment. *Water Res* 2016;100:496–507.
- [17] Finnveden G, Hauschild MZ, Ekvall T, Guinée J, Heijungs R, Hellweg S, et al. Recent developments in Life Cycle Assessment. *J Environ Manage* 2009;91(1):1–21.
- [18] International Organization for Standardization. ISO 14040:2006 Environmental management—life cycle assessment—principles and framework. 2nd ed. Geneva: International Standards Organisation; 2006.
- [19] Chanan A, Woods P. Introducing total water cycle management in Sydney: a Kogarah Council initiative. *Desalination* 2006;187(1–3):11–6.
- [20] Renzoni R, Germain A. Life cycle assessment of water: from the pumping station to the wastewater treatment plant. *Int J Life Cycle Assess* 2007;12(2):118–26.
- [21] Amores MJ, Meneses M, Pasqualino J, Antón A, Castells F. Environmental assessment of urban water cycle on Mediterranean conditions by LCA approach. *J Cleaner Prod* 2013;43:84–92.
- [22] Muñoz I, Fernández-Alba AR. Reducing the environmental impacts of reverse osmosis desalination by using brackish groundwater resources. *Water Res* 2008;42(3):801–11.
- [23] Li Y, Xiong W, Zhang W, Wang C, Wang P. Life cycle assessment of water supply alternatives in water-receiving areas of the South-to-North Water Diversion Project in China. *Water Res* 2016;89:9–19.
- [24] Barjoveanu G, Comandaru IM, Rodriguez-Garcia G, Hospido A, Teodosiu C. Evaluation of water services system through LCA. A case study for Iasi City, Romania. *Int J Life Cycle Assess* 2014;19(2):449–62.
- [25] Raluy RG, Serra L, Uche J, Valero A. Life cycle assessment of water production technologies—part 2: reverse osmosis desalination versus the Ebro River water transfer. *Int J Life Cycle Assess* 2005;10(5):346–54.
- [26] Hospido A, Moreira T, Martín M, Rigola M, Feijoo G. Environmental evaluation of different treatment processes for sludge from urban wastewater treatments: anaerobic digestion versus thermal processes. *Int J Life Cycle Assess* 2005;10(5):336–45.
- [27] Lloyd SM, Ries R. Characterizing, propagating, and analyzing uncertainty in life-cycle assessment: a survey of quantitative approaches. *J Ind Ecol* 2007;11(1):161–79.
- [28] Loubet P, Roux P, Loiseau E, Bellon-Maurel V. Life cycle assessments of urban water systems: a comparative analysis of selected peer-reviewed literature. *Water Res* 2014;67:187–202.
- [29] Friedrich E, Pillay S, Buckley CA. Environmental life cycle assessments for water treatment processes—a South African case study of an urban water cycle. *Water SA* 2009;35(1):73–84.
- [30] Seto KC, Güneralp B, Hutyra LR. Global forecasts of urban expansion to 2030 and direct impacts on biodiversity and carbon pools. *Proc Natl Acad Sci USA* 2012;109(40):16083–8.
- [31] Lemos D, Dias AC, Gabarrell X, Arroja L. Environmental assessment of an urban water system. *J Cleaner Prod* 2013;54:157–65.
- [32] Godskesen B, Hauschild M, Rygaard M, Zambrano K, Albrechtsen HJ. Life-cycle and freshwater withdrawal impact assessment of water supply technologies. *Water Res* 2013;47(7):2363–74.
- [33] Schoen ME, Xue X, Hawkins TR, Ashbolt NJ. Comparative human health risk analysis of coastal community water and waste service options. *Environ Sci Technol* 2014;48(16):9728–36.