

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtj.2021.0003

秦长海, 赵勇, 李海红, 等. 区域节水潜力评估[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2021, 19(1): 36-42. QIN C H, ZHAO Y, LI H H, et al. Assessment of regional water saving potential[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2021, 19(1): 36-42. (in Chinese)

## 区域节水潜力评估

秦长海<sup>1</sup>, 赵勇<sup>1,2</sup>, 李海红<sup>1,2</sup>, 曲军霖<sup>1</sup>

(1. 中国水利水电科学研究院水资源所, 北京 100038;

2. 中国水利水电科学研究院流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100038)

**摘要:** 针对我国稳步推进的节水工作需求, 基于自然-社会二元水循环基本规律, 分析京津冀地区各行业用水过程及影响因素, 从取用节水和资源节水两方面计算存量用水的极限节水潜力。结果表明: 京津冀地区取用节水潜力和资源节水潜力分别为 11.44 亿和 6.36 亿  $m^3$ , 分别占区域总用水量的 5.4% 和 3.0%, 节水潜力有限; 由分行业分析可知, 农业取用节水量和资源节水量分别占总节水量的 51.0% 和 59.3%, 农业仍为区域节水重点; 提出的极限节水潜力计算方法能够科学准确地测算区域或流域存量用户节水潜力, 计算明晰节水目标, 为区域水资源管理提供借鉴。

**关键词:** 水资源; 极限节水; 潜力; 开发利用; 生态; 京津冀

中图分类号: TV 213 文献标志码: A 开放科学(资源服务)标志码(OSID):



人多水少、水资源时空分布不均是我国水资源基本特征, 水资源安全是经济社会健康发展的重要保障。在我国统筹推进新时代“五位一体”总体布局下, 生态文明成为新时期核心建设内容之一, 既要保障经济社会发展, 也要重视生态环境保护, 追求区域可持续发展。根据《国家节水行动方案》, 2035 年全国用水总量控制目标为 7000 亿  $m^3$ , 较现状仍有较大的增长需求。在我国供水受到约束而用水又呈增长的态势下, 节水成为缓解水资源供需矛盾的根本路径。

节水不是无限的。首先, 水是山水林田湖草生命共同体的重要组成部分, 在生态文明建设背景下, 必须考虑节水的生态影响; 其次, 随着经济社会发展、生活水平提高, 对水资源的供给保障要求更高, 节水不能制约生产条件、降低生活水平; 最后, 区域节水是系统性工程, 要考虑技术的可行性、投入的经济性。因此, 在现状条件下区域节水具有一定的极值, 极值点的获得将最大程度降低用水需求, 优化水资源配置。因此, 本文针对新时期治水需求, 研究极限节水潜力的思路、方法和路径, 明确区域在

一定约束条件下的节水阈值, 为区域掌握节水极限、构建水资源配置格局提供技术支撑。研究京津冀地区的极限节水潜力, 不仅对促进该区域水资源可持续利用具有重要意义, 而且京津冀地区作为我国核心城市群, 对全国节约用水和水资源合理配置都有示范带动作用。

### 1 研究区概况

京津冀地区绝大部分位于海河流域, 多年年均水资源量为 258 亿  $m^3$ , 人均水资源量 239  $m^3$ , 仅为全国的 1/9, 是我国水资源最为短缺的区域之一, 以全国的 2.3% 国土面积、不足 1% 的水资源, 承载了全国 8.0% 的人口、9.5% 的工业增加值、10.1% 的 GDP、近 30% 的钢铁产量<sup>[1]</sup>。因此, 一方面水资源严重超载, 生态系统处于极其脆弱的状态, 而另一方面水资源又是经济社会发展的制约因素。2014 年底南水北调中线一期工程通水后, 北京、天津、河北的分配水量分别为 12.4 亿、10.2 亿、34.7 亿  $m^3$ 。根据南水北调配置原则, 调水主要用于置换城市挤

收稿日期: 2020-03-20 修回日期: 2020-10-12 网络出版时间: 2020-10-26

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1430.TV.20201026.1458.006.html>

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFC0408105; 2016YFC0401407); 国家自然科学基金项目(71573274)

作者简介: 秦长海(1976—), 男, 河北宣化人, 教授级高级工程师, 主要从事水资源经济与管理研究。E-mail: chhqn@163.com

占的生态环境用水,农业超采的地下水尚无置换水源。另外,河北省经济社会用水尚未到达拐点,生态文明建设框架下生态环境用水也将呈增长趋势,南水北调虽缓解了京津冀地区水资源紧张情势,但扭转不了水资源短缺的基本形势。同时,京津冀地区由于持续推进节水工作,区域用水效率已经达到国际领先水平,节水规模不大,节水潜力非常有限。

## 2 研究方法

本文所研究的极限是生态文明建设框架下的极限值,所提出的极限节水潜力指在维持生活良好、生产稳定和生态健康的前提下,基于近期可预知的技术水平,通过采取一系列的工程和非工程节水技术措施,在预期可达的用水效率目标下同等用户规模年水资源需求比现状用水减少的量。在建设项目水资源论证和节水评价规范下,新增项目均按节水标准设计,故评估范围主要针对现有农业、工业、生活等存量用水户,不包括新增取用水户;节水措施重点考量未来可实现的技术水平,同时兼顾措施的经济性;节水程度不能影响生活、生产和生态正常状态,不能降低生活水平、生产条件和生态功能;节水潜力分取用节水量和资源节水量,重点关注资源节水量<sup>[2-3]</sup>。

水资源开发利用包括取、供、用、耗、排多个环节。取用节水潜力重点关注取、供、用环节,考虑在未来可预知条件下可以实现的各环节取供水节约量。资源节水潜力是从区域水资源系统整体出发,考虑水资源在系统中的消耗规律,通过各种可能的节水措施所能够减少的耗水量。这部分耗水量可以作为区域新增水资源量被其他用水部门利用。分析评价区域资源节水潜力对认识区域所采取节水措施的节水效果、分析区域水资源总体开发潜力有重要作用,也是认识区域水资源承载能力的重要基础<sup>[4]</sup>。

### 2.1 农业节水评价方法

#### 2.1.1 影响因素分析

影响农业节水潜力的主要因素包括种植结构调整、技术措施以及工程措施<sup>[5-7]</sup>。种植结构调整主要体现在降低高耗水作物比重,降低亩均灌溉定额;技术措施主要体现在依靠农业技术进步,采取生物、农艺等先进灌水工艺,培育节水和抗旱品种,推广科学灌溉制度,降低灌溉用水量;工程措施主要体现在通过渠系衬砌提高渠系水利用系数,通过喷灌、微灌、低压管灌等高效节水灌溉措施提高田间水利用系数。农业节水潜力最终体现在通过种植结构调整和技术措施促进综合用水定额降低;通过工程措施提

高渠系水利用系数和田间水利用系数<sup>[8-10]</sup>。

#### 2.1.2 节水评估方法

取用节水潜力。取用节水潜力评估主要结合种植结构调整、技术水平进步、生物和农业措施,分析预期可达的灌溉定额。通过工程节水措施分析预期可达的灌溉水有效利用系数,计算对应现状年实灌面积灌溉用水直接减少量,计算公式<sup>[11-13]</sup>为

$$\Delta W_{\text{农}} = A_0 \cdot \left( \frac{I_{\text{农净}0}}{\eta_b} - \frac{I_{\text{农净}1}}{\eta_l} \right) \quad (1)$$

式中:  $\Delta W_{\text{农}}$  为农业取用节水潜力, 亿  $\text{m}^3$ ;  $I_{\text{农净}0}$  为各分区现状实际净灌溉定额,  $\text{m}^3/\text{hm}^2$ ;  $I_{\text{农净}1}$  为预期可达的灌溉定额,  $\text{m}^3/\text{hm}^2$ ;  $A_0$  为各分区现状实灌面积, 万  $\text{hm}^2$ ;  $\eta_b$ 、 $\eta_l$  为各分区现状、预期可达的灌溉水有效利用系数。

其中,田间节水潜力和渠系节水潜力计算公式分别为

$$\Delta W_{\text{田间}} = A_0 \cdot I_{\text{农净}0} \left( \frac{1}{\eta_{\text{田}0}} - \frac{1}{\eta_{\text{田}1}} \right) \quad (2)$$

$$\Delta W_{\text{渠系}} = \Delta W_{\text{农}} - \Delta W_{\text{田间}} \quad (3)$$

式中:  $\Delta W_{\text{田间}}$  为田间节水潜力, 亿  $\text{m}^3$ ;  $\Delta W_{\text{渠系}}$  为渠系节水潜力, 亿  $\text{m}^3$ ;  $\eta_{\text{田}0}$ 、 $\eta_{\text{田}1}$  为各分区现状、预期可达的田间水利用系数;其他符号同前。

资源节水潜力。农田灌溉兼有维持周边环境的功能,尤其是渠系输水阶段<sup>[14-15]</sup>。渠系输水损失的去向主要分为4类:一是水面蒸发量;二是补充土壤水形成潜水无效蒸发;三是补给地下水被重新利用;四是滋养周边植被起到生态补水作用。第三项是水循环的重要环节,第四项是灌溉绿洲生态健康的重要补给来源。因此从区域宏观角度来讲,渠系漏失水量中第三项和第四项属于有效用水。田间灌溉用水的去向主要分为3类:一是满足作物生长用水需求;二是补给地下水被重新利用;三是通过作物棵间蒸发形成无效蒸发。田间节水重点是减少棵间无效蒸发。

根据资源节水潜力的概念,农业灌溉资源节水潜力分析需在掌握灌区水面蒸发、潜水蒸发和作物蒸散发等各环节耗水机制的基础上计算渠系输水过程中的水面蒸发量、潜水无效蒸发量以及田间无效蒸发量,计算公式为

$$\Delta W_{\text{农净}} = \Delta W_{\text{渠系}} \cdot \alpha_{\text{水面蒸发}} + \Delta W_{\text{渠系}} \cdot \alpha_{\text{潜水蒸发}} + \Delta W_{\text{田间}} \cdot \alpha_{\text{棵间蒸发}} \quad (4)$$

式中:  $\Delta W_{\text{农净}}$  为资源节水潜力, 亿  $\text{m}^3$ ;  $\alpha_{\text{水面蒸发}}$  为渠系输水过程水面蒸发损失系数;  $\alpha_{\text{潜水蒸发}}$  为渠系输水过程潜水无效蒸发系数;  $\alpha_{\text{棵间蒸发}}$  为作物棵间蒸发占田间用水量比重;其他符号同前。

## 2.2 工业节水评价方法

### 2.2.1 影响因素分析

影响工业节水潜力的主要因素包括产业结构调整、技术节水措施、工程节水措施、管理节水措施等<sup>[16-17]</sup>。产业结构调整是工业节水的重点,通过优化产业布局和结构,调整高耗水产业比重,降低用水定额;技术节水措施的核心是推进节水技术开发和节水设备、器具应用,推广先进节水技术和节水工艺,提高工业用水重复利用率、减少工艺用水量,减少新水取用量;工程节水措施主要体现在强化输配水环节改造,提高输水环节效率;管理节水措施体现在加强用水定额管理,逐步建立完善的工业用水定额参照体系,提升企业用水和节水管理水平<sup>[18-19]</sup>。工业节水潜力最终体现在通过产业结构调整促进综合用水定额的降低;通过工程节水措施降低供水管网漏损率;通过技术节水措施提高用水重复利用率。由于产业结构调整涉及地区总体规划,难以量化对综合定额的影响,本研究不考虑该因素。

### 2.2.2 节水评估方法

取用节水潜力。工业取用节水潜力为提高工业用水重复利用率的节水潜力和降低工业供水管网漏失的节水潜力之和,相应工业取用节水潜力计算公式为

$$\Delta W_{\text{工}} = \Delta W_{\text{工1}} + \Delta W_{\text{工2}} \quad (5)$$

$$\Delta W_{\text{工1}} = W_{\text{工0}} \cdot (r_1 - r_0) \quad (6)$$

$$\Delta W_{\text{工2}} = W_{\text{工0}} \cdot \delta \cdot (l_{\text{工1}} - l_{\text{工0}}) \quad (7)$$

式中: $\Delta W_{\text{工}}$ 为工业取用节水量,亿  $\text{m}^3$ ;  $\Delta W_{\text{工1}}$ 为提高工业用水重复利用率节水量,亿  $\text{m}^3$ ;  $\Delta W_{\text{工2}}$ 为降低管网漏失率节水量,亿  $\text{m}^3$ ;  $W_{\text{工0}}$ 为现状年工业用水量;  $r_0$ 、 $r_1$ 为现状、预期可达的工业用水重复利用率,%;  $\delta$ 为工业用水量中公共供水管网供水量比重;  $l_{\text{工0}}$ 、 $l_{\text{工1}}$ 分别为现状、预期可达的工业供水管网漏失率,%。

资源节水潜力。工业资源节水潜力计算公式为

$$\Delta W_{\text{工净}} = \Delta W_{\text{工}} \cdot \beta_{\text{工}} \quad (8)$$

式中: $\Delta W_{\text{工净}}$ 为工业资源节水量,亿  $\text{m}^3$ ;  $\beta_{\text{工}}$ 为工业综合耗水系数;其他符号同前。

## 2.3 生活节水评价方法

### 2.3.1 影响因素分析

影响生活节水潜力的主要因素包括城镇化率变化、工程节水措施、节水器具普及以及管理节水措施<sup>[20-21]</sup>。城镇化率变化主要体现在随着城镇化水平的提升,农村人口向城镇转移,生活水平提升带动人均用水量增加,限制节水潜力提高;工程节水措施主

要体现在通过城市供水管网改造,降低管网漏损率,提高输配水效率和供水效益;节水器具普及的节水效果主要体现在不降低居民用水标准的前提下,实现终端用水的节约;管理节水措施体现在通过管理和技术手段,实行分区管理和压力管理,加强用水量,提高用水效率。生活节水潜力最终体现为:在城镇化率变化、节水器具普及、管理节水措施的综合作用下,居民生活用水定额发生变化;在工程节水措施下供水管网漏损率的下降<sup>[22-23]</sup>。随着城镇化水平的提高,未来居民生活用水定额将呈增长趋势,节水潜力分析不考虑定额变化<sup>[24-26]</sup>。

### 2.3.2 节水评估方法

取用节水潜力。通过提高供水管网漏失率实现城镇生活节水,相应生活取用节水潜力计算公式为

$$\Delta W_{\text{生}} = W_{\text{生}} \cdot (l_{\text{生1}} - l_{\text{生0}}) \quad (9)$$

式中: $\Delta W_{\text{生}}$ 为城镇生活取用节水量,亿  $\text{m}^3$ ;  $W_{\text{生}}$ 为现状城镇生活用水量(包括建筑业和第三产业),亿  $\text{m}^3$ ;  $l_{\text{生0}}$ 、 $l_{\text{生1}}$ 分别为现状、预期可达的城镇生活供水管网漏失率,%。

资源节水潜力。生活资源节水潜力计算公式为

$$\Delta W_{\text{生净}} = \Delta W_{\text{生}} \cdot \beta_{\text{生}} \quad (10)$$

式中: $\Delta W_{\text{生净}}$ 为生活资源节水量,亿  $\text{m}^3$ ;  $\beta_{\text{生}}$ 为生活综合耗水系数。

## 3 京津冀地区极限节水潜力评估

### 3.1 农业节水潜力

京津冀地区 2017 年农业灌溉用水量 141.9 亿  $\text{m}^3$ , 农业灌溉面积 466.5 万  $\text{hm}^2$ , 农田灌溉水有效利用系数 0.676, 亩均(1 亩 = 0.0667  $\text{hm}^2$ ) 灌溉毛水量和净水量分别为 202.8  $\text{m}^3$  和 137.2  $\text{m}^3$ 。考虑到区域亩均灌溉净定额已经较低,部分区域已经实行非充分灌溉,暂不考虑净定额降低对节水的影响。在工程可达、管理可控、经济可行的前提下,最大程度实施渠系衬砌和高效节水灌溉,挖掘渠系和田间输水效率。根据各省市现状种植结构状况,考虑高效节水灌溉措施的适应性,经济作物全部实施高效节水灌溉,大田作物适应性发展高效节水灌溉,全区节水灌溉率达到 100%。在潜在最高节灌率模式下,农田灌溉水有效利用系数可提高到 0.71, 计算得出京津冀地区农业取用节水量为 5.84 亿  $\text{m}^3$ , 其中渠系和田间节水量分别为 2.65 亿  $\text{m}^3$  和 3.19 亿  $\text{m}^3$ 。

根据相关试验成果,在渠系输水过程漏损水中,水面蒸发约占 10%,潜水蒸发约占 12%,补充地下水约占 65%,补给河道周边生态约占 13%。其中水面蒸发节水和潜水蒸发节水为有效节水,田间节水量

都视为有效节水,则京津冀资源节水量为 3.77 亿  $m^3$ ,其中田间无效蒸发节水 3.19 亿  $m^3$ ,渠系水面蒸发

节水 0.26 亿  $m^3$ ,渠系潜水蒸发节水 0.32 亿  $m^3$ 。京津冀地区各省市节水量详见表 1。

表 1 京津冀地区农业节水潜力

Tab. 1 Agricultural water saving potential in Beijing Tianjin Hebei region

省市	农田用水量/ 亿 $m^3$	农田实灌面积/ 万 $hm^2$	灌溉毛定额/ ( $m^3 \cdot hm^{-2}$ )	农田灌溉水有效利用系数		取用节水量/ 亿 $m^3$	资源节水量/ 亿 $m^3$
				现状	预期		
北京	5.1	19.0	2685	0.732	0.75	0.12	0.08
天津	10.7	31.3	3420	0.703	0.75	0.67	0.48
河北	126.1	416.2	3030	0.672	0.70	5.05	3.21
合计	141.9	466.5				5.84	3.77

注:农田用水量、农田灌溉水有效利用系数来源于《中国水资源公报》;农田实灌面积来源于《中国水利统计年鉴》。

### 3.2 工业节水潜力

根据工业各行业协会相关资料,目前钢铁、石化、化工等行业工业用水重复利用率的国际先进值已经达到 93% 以上,纺织、皮革、造纸等行业由于生产工艺及水质要求,重复利用率相对较低,纺织印染仅为 30% 左右。综合京津冀地区产业结构状况以及相关规划,确定工业用水重复利用率可达到的极限水平为 95%。工业供水管网漏损率与管网年限、材质、管理水平有关,综合考虑京津冀现状工业供水

管网漏损状况,在考虑经济合理的状况下,工业供水管网漏损率极限值为 8.8%。在预期的工业用水重复利用率和工业供水管网漏损率条件下,估算京津冀地区工业最大可能取用节水潜力为 2.74 亿  $m^3$ ,其中由于提高工业用水重复利用率而产生的节水潜力为 2.34 亿  $m^3$ ,因管网漏失率降低而产生的节水潜力为 0.40 亿  $m^3$ 。结合工业取用节水量及工业耗水率,计算得出京津冀地区工业资源节水潜力为 1.51 亿  $m^3$ ,详见表 2。

表 2 京津冀地区工业节水潜力

Tab. 2 Industrial water saving potential in Beijing Tianjin Hebei region

区域	工业用水量/ 亿 $m^3$	重复利用率/%		供水管网漏失率/%		取用节水潜力/ 亿 $m^3$	耗水率/ %	资源节水潜力/ 亿 $m^3$
		现状水平	极限水平	现状水平	极限水平			
北京	3.5	17.6	30	16.2	8.5	0.53	34.2	0.18
天津	5.5	94.7	96	13.3	8.5	0.20	38.2	0.08
河北	20.3	87.0	96	16.4	9.0	2.01	62.4	1.25
合计	29.3					2.74		1.51

注:工业用水量来源于《中国水资源公报》;重复利用率、供水管网漏损率通过《城市建设统计年鉴》相关数据计算得出;耗水率通过相关数据计算得出。

### 3.3 生活节水潜力

生活极限节水的核心是分析在城镇供水管网漏损率极限条件下可实现的生活节水量。城镇供水管网漏损率与管网年限、材质、管理水平有关,目前有研究认为,对于中型城市在考虑投资经济性条件下,合理的漏损率水平为 8.5%,若进一步降低漏损率,则投入将显著增加。综合考虑各省市现状供水管

网漏损状况、城镇化水平状况,在经济合理的状况下,京津冀地区各省市供水管网漏损率极限值为 8.5%~9.0%,低于《城镇供水管网漏损控制及评定标准》。估算京津冀地区城镇生活取用节水潜力为 2.87 亿  $m^3$ 。京津冀地区城镇生活综合耗水率为 37.9%,则生活资源节水潜力为 1.08 亿  $m^3$ 。详见表 3。

表 3 京津冀地区生活节水潜力

Tab. 3 Domestic water saving potential in Beijing Tianjin Hebei region

区域	城镇生活用水量/ 亿 $m^3$	城镇供水管网漏失率/%		耗水率/ %	取用节水潜力/ 亿 $m^3$	资源节水潜力/ 亿 $m^3$
		现状水平	极限水平			
北京	17.0	16.2	8.5	28.1	1.31	0.37
天津	5.6	13.3	8.5	37.7	0.27	0.10
河北	17.4	16.4	9.0	47.5	1.29	0.61
合计	40.0				2.87	1.08

注:城镇生活用水量来源于《中国水资源公报》;城镇供水管网漏损率通过《城市建设统计年鉴》相关数据计算得出;耗水率通过相关数据计算得出。

### 3.4 综合节水潜力

京津冀地区取用节水潜力为 11.44 亿  $m^3$ , 其中农业灌溉、工业、生活取用节水潜力分别为 5.84 亿、2.74 亿和 2.87 亿  $m^3$ , 农业、工业和生活占取用节水量的比重分别为 51.0%、23.9% 和 25.1%; 京津

冀地区资源节水潜力为 6.36 亿  $m^3$ , 其中农业灌溉、工业、生活资源节水潜力分别为 3.77 亿、1.51 亿和 1.08 亿  $m^3$ , 农业、工业和生活占资源节水量的比重分别为 59.3%、23.7% 和 17.0%。无论取用节水还是资源节水, 农业占比均比较大。详见图 1。



图 1 京津冀地区综合节水潜力

Fig. 1 Total water saving potential in Beijing-Tianjin-Hebei region

## 4 结论和建议

通过本文的研究分析, 得到以下结论: 京津冀地区尚有一定节水潜力, 但由于区域用水效率已经较为先进, 节水规模已经不大。经过分析, 京津冀地区取用节水潜力和资源节水潜力分别为 11.44 亿  $m^3$  和 6.36 亿  $m^3$ , 分别占区域总用水量的 5.4% 和 3.0%。农业节水占总节水量的主要比重, 区域节水重点行业仍为农业。在取用节水和资源节水量中, 农业节水量均占有较大比重, 分别占 51.0% 和 59.3%, 尤其是对区域水资源配置起到直接作用的资源节水量, 占比更大。因此在未来节水工作中, 要持续将农业节水作为区域节水的重点。但由于农业节水工程后期维护管理难度大, 因此应重视工程的后期管理。

针对以上分析, 提出如下建议:

(1) 水资源开发利用兼具生态功能, 应着重于资源节水量分析。在水资源开发利用过程中, 除满足终端使用外, 输配水过程中漏损的水量还直接参与水循环过程, 尤其是农业灌溉输水环节, 渗漏到地下的水量起到了维持灌区生态的重要功能, 特别是宁蒙、民勤等干旱绿洲区, 农业灌溉水量是保障绿洲生态的关键所在, 这部分水量事实上属于有效用水。在分析节水量过程中, 应重点考量减少输配水过程的无效损失量、终端利用环节节水量等资源性节约量。

(2) 需进一步强化非常规水利用, 从供给端提高保证率。随着区域节水潜力的深入挖掘, 节水对缓解区域水资源供需矛盾的能力将逐步下降。结合国际国内用水变化趋势, 流域内用水量最大的河北省

用水量尚未达到拐点, 在近期开源有限的条件下, 必须强化再生水、淡化海水以及集雨利用, 实施分质供水、优水优用。尤其是再生水利用, 除增加供给端供水能力外, 还具有强化污水处理、降低水污染排放、改善水环境等重要作用, 对提高区域供水保障的安全性和改善生态环境具有积极意义。

(3) 推进南水北调相关论证工作, 促进水资源集约节约利用。促进水资源向效益更高、效率更优的区域流动, 是落实水资源节约集约利用、促进区域高质量发展的重要路径。京津冀地区是我国水资源最为紧缺的地区, 同时也是我国水资源利用效率最高的地区, 万元 GDP 用水量和万元工业增加值用水量分别仅为全国平均水平的 44.0% 和 26.9%, 水资源在京津冀地区可发挥更高的效用。

(4) 进一步开展节水技术和经济性分析, 评估单项技术对综合节水的影响以及节水投入的经济性。随着技术进步, 生产工艺对节水的影响也会越来越突出, 如火电空冷技术、无水印染技术将颠覆传统产业用水过程, 但由于难以量化单个节水技术对区域节水的影响, 且部分技术的普遍推广前景也有待观察, 故本文暂未考虑单个节水技术的影响, 在后续工作中需进一步完善。另外, 节水和节能之间有关联性, 这也是当前的研究热点。随着节水工作的推进, 单位节水的边际投入将越来越高, 与调水以及非常规水利用比较, 节水的经济性也越来越差。在具备数据资料的基础上, 应进一步开展节水与非常规水利用和调水的经济性比较, 为水资源合理配置提供基础支撑。

## 参考文献(References):

- [1] 国家统计局. 中国统计年鉴 2017[M]. 北京: 中国统计出版社, 2018. (National Bureau of statistics. China Statistical Yearbook 2017 [M]. Beijing: Statistics Press, 2018. (in Chinese))
- [2] 向龙, 范云柱, 刘蔚, 等. 基于节水优先的水资源配置模式[J]. 水资源保护, 2016, 32(2): 9-13, 25. (XIANG L, FAN Y Z, LIU W, et al. Water resource allocation mode based on water saving priority [J]. Water Resources Protection, 2016, 32(2): 9-13, 25. (in Chinese)) DOI: 10.3880/j.issn.10046933.2016.02.003.
- [3] 陈莹, 赵勇, 刘昌明. 节水型社会评价研究[J]. 资源科学, 2004(6): 83-89. (CHEN Y, ZHAO Y, LIU C M. Study on the evaluation of water saving society [J]. Resources Science, 2004(6): 83-89(in Chinese))
- [4] 刘秀丽, 张标. 我国水资源利用效率和节水潜力[J]. 水利水电科技进展, 2015, 35(3): 5-10. (LIU X L, ZHANG B. Water resource utilization efficiency and water saving potential in China [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2015, 35(3): 5-10. (in Chinese)) DOI: 10.3880/j.issn.10067647.2015.03.002.
- [5] 山仑, 邓西平, 康绍忠. 我国半干旱地区农业用水现状及发展方向[J]. 水利学报, 2002(9): 27-31. (SHAN L, DENG X P, KANG S Z. Current situation and development direction of agricultural water use in semi arid areas of China [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2002(9): 27-31. (in Chinese)) DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.2002.09.005.
- [6] 康绍忠, 蔡焕杰, 冯绍元. 现代农业与生态节水的技术创新与未来研究重点[J]. 农业工程学报, 2004(1): 1-6. (KANG S Z, CAI H J, FENG S Y. Technological innovation and future research focus of modern agriculture and ecological water saving [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2004(1): 1-6. (in Chinese)) DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.2002.09.005.
- [7] 耿献辉, 张晓恒, 宋玉兰. 农业灌溉用水效率及其影响因素实证分析: 基于随机前沿生产函数和新疆棉农调研数据[J]. 自然资源学报, 2014, 29(6): 934-943. (GENG X H, ZHANG X H, SONG Y L. Empirical analysis of agricultural irrigation water efficiency and its influencing factors based on stochastic frontier production function and survey data of cotton farmers in Xinjiang [J]. Journal of Natural Resources, 2014, 29(6): 934-943. (in Chinese)) DOI: 10.11849/zrzyxb.2014.06.003.
- [8] 崔远来, 熊佳. 灌溉水利用效率指标研究进展[J]. 水科学进展, 2009, 20(4): 590-598. (CUI Y L, XIONG J. Research progress of irrigation water use efficiency index [J]. Advances in Water Science, 2009, 20(4): 590-598. (in Chinese)) DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2009.04.019.
- [9] 崔远来, 董斌, 李远华, 等. 农业灌溉节水评价指标与尺度问题[J]. 农业工程学报, 2007(7): 1-7. (CUI Y L, DONG B, LI Y H, et al. Evaluation index and scale of agricultural irrigation water saving [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2007(7): 1-7. (in Chinese))
- [10] 崔远来, 谭芳, 郑传举. 不同环节灌溉用水效率及节水潜力分析[J]. 水科学进展, 2010, 21(6): 788-794. (CUI Y L, TAN F, ZHENG C J. Analysis of irrigation water efficiency and water saving potential in different links [J]. Advances in Water Science, 2010, 21(6): 788-794. (in Chinese)) DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2010.06.016.
- [11] 裴源生, 张金萍, 赵勇. 宁夏灌区节水潜力的研究[J]. 水利学报, 2007(2): 239-243, 249. (PEI Y S, ZHANG J P, ZHAO Y. Study on water saving potential of irrigation area in Ningxia [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2007(2): 239-243, 249. (in Chinese)) DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.2007.02.018.
- [12] 雷波, 刘钰, 许迪. 灌区农业灌溉节水潜力估算理论与方法[J]. 农业工程学报, 2011, 27(1): 10-14. (LEI B, LIU Y, XU D. Theory and method for estimating water saving potential of agricultural irrigation area [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2011, 27(1): 10-14. (in Chinese))
- [13] 刘路广, 崔远来, 王建鹏. 基于水量平衡的农业节水潜力计算新方法[J]. 水科学进展, 2011, 22(5): 696-702. (LIU L G, CUI Y L, WANG J P. A new calculation method of agricultural water saving potential based on water balance [J]. Advances in Water Science, 2011, 22(5): 696-702. (in Chinese)) DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2011.05.008.
- [14] 吴景社, 康绍忠, 王景雷, 等. 节水灌溉综合效应评价研究进展[J]. 灌溉排水学报, 2003(5): 42-46. (WU J S, KANG S Z, WANG J L, et al. Research progress on comprehensive effect evaluation of water saving irrigation [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2003(5): 42-46. (in Chinese)) DOI: 10.13522/j.cnki.ggps.2003.05.010.
- [15] 傅国斌, 李丽娟, 于静洁, 等. 内蒙古河套灌区节水潜力的估算[J]. 农业工程学报, 2003, 19(1): 54-58. (FU G B, LI L J, YU J J, et al. Estimation of water saving potential of Hetao Irrigation District in Inner Mongolia [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2003, 19(1): 54-58. (in Chinese))
- [16] 王维平. 城市工业节水水平、潜力、投资分析[J]. 水利经济, 1992(1): 16-21. (WANG W P. Analysis of wa

- ter saving level, potential and investment of urban industry[J]. *Journal of Economics of Water Resources*, 1992(1): 16-21. (in Chinese)
- [17] 雷玉桃, 黄丽萍. 中国工业用水效率及其影响因素的区域差异研究: 基于 SFA 的省际面板数据[J]. *中国软科学*, 2015(4): 155-164. (LEI Y T, HUANG L P. Study on regional differences of industrial water use efficiency and its influencing factors in China: provincial panel data based on SFA[J]. *China Soft Science*, 2015(4): 155-164. (in Chinese))
- [18] 李静, 马潇璨. 资源与环境双重约束下的工业用水效率: 基于 SBM-Undesirable 和 Meta-frontier 模型的实证研究[J]. *自然资源学报*, 2014, 29(6): 920-933. (LI J, MA X C. Industrial water use efficiency under the dual constraints of resources and environment: An empirical study based on SBM undesirable and meta-frontier models[J]. *Journal of Natural Resources*, 2014, 29(6): 920-933. (in Chinese)) DOI: 10.11849/zrzyxb.2014.06.002.
- [19] 朱启荣. 中国工业用水效率与节水潜力实证研究[J]. *工业技术经济*, 2007(9): 48-51. (ZHU Q R. Empirical study on water efficiency and water saving potential of China's industry[J]. *Industrial Technology & Economy*, 2007(9): 48-51. (in Chinese))
- [20] 陈建耀, 刘昌明. 城市节水潜力估算与用水管理水平评定[J]. *地理学报*, 1998(2): 47-54. (CHEN J Y, LIU C M. Estimation of urban water saving potential and evaluation of water management level[J]. *Acta Geographica Sinica*, 1998(2): 47-54. (in Chinese))
- [21] 马海良, 徐佳, 王普查. 中国城镇化进程中的水资源利用研究[J]. *资源科学*, 2014, 36(2): 334-341. (MA H L, XU J, WANG P C. Study on the utilization of water resources in the process of urbanization in China[J]. *Resources Science*, 2014, 36(2): 334-341. (in Chinese))
- [22] 范群芳, 董增川, 杜芙蓉. 农业用水和生活用水效率研究与探讨[J]. *水利学报*, 2007(S1): 465-469. (FAN Q F, DONG Z C, DU F R. Study and discussion on the efficiency of agricultural water use and domestic water use[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2007(S1): 465-469. (in Chinese)) DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.2007.s1.054.
- [23] 孙秀敏, 秦长海, 甘泓. 南水北调受水区城镇节水的定量研究[J]. *水利学报*, 2010, 43(2): 205-210. (SUN X M, QIN C H, GAN H. Quantitative study on urban water saving in receiving area of South to North Water Transfer[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2010, 43(2): 205-210. (in Chinese))
- [24] 刘昌明, 左建兵. 南水北调中线主要城市节水潜力分析与对策[J]. *南水北调与水利科技*, 2009, 7(1): 1-7. (LIU C M, ZUO J B. Water saving potential analysis and countermeasures of main cities in the middle route of South to North Water Transfer[J]. *South to North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2009, 7(1): 1-7. (in Chinese)) DOI: 10.13476/j.cnki.nsbddqk.2009.01.005.
- [25] 秦大庸, 罗翔宇, 陈晓军, 等. 西北干旱区水资源开发利用潜力分析[J]. *自然资源学报*, 2004(2): 143-150. (QIN D Y, LUO X Y, CHEN X J, et al. Analysis on the development and utilization potential of water resources in northwest arid area[J]. *Journal of Natural Resources*, 2004(2): 143-150. (in Chinese))
- [26] 徐春晓, 李云玲, 孙素艳. 节水型社会建设与用水效率控制[J]. *中国水利*, 2011(23): 64-72. (XU C X, LI Y L, SUN S Y. Water saving society construction and water efficiency control[J]. *China Water Resources*, 2011(23): 64-72. (in Chinese))

### Assessment of regional water saving potential

QIN Changhai<sup>1</sup>, ZHAO Yong<sup>1,2</sup>, LI Haihong<sup>1,2</sup>, QU Junlin<sup>1</sup>

(1. Department of Water Resources, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China;

2. State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, China Institute of Water Resource and Hydropower Research, Beijing 100038, China)

**Abstract:** Given the steady progress of water saving work in China, and based on the basic law of natural social dual water cycle, the process and influencing factors of water use in various industries in the Beijing-Tianjin-Hebei region are analyzed, and the ultimate water saving potential of stock water is calculated from two aspects such as water saving and resource saving. The results show that: the water saving potential and resource water saving potential of the Beijing-Tianjin-Hebei region are 1.144 billion m<sup>3</sup> and 636 million m<sup>3</sup>, respectively, accounting for 5.4% and 3.0% of the total regional water consumption, with limited water saving potential; according to the analysis of different industries, the water saving amount and resource water saving amount of agriculture accounted for 51.0% and 59.3% of the total water saving amount, respectively, agriculture is still the focus of regional water saving; judging from research results, the calculation method of ultimate water saving potential proposed can scientifically and accurately calculate the water saving potential of regional or basin stock users, calculate and clarify the water saving target, and provide a reference for regional water resources management.

**Key words:** water resource; limitation water saving; potential; development and utilization; ecology; Beijing-Tianjin-Hebei