

DOI: 10.5846/stxb202204010823

耿念姿, 李若男, 郑华. 地表水资源供给服务供需关系对节水政策的响应——以大清河流域为例. 生态学报, 2023, 43(12): 4813-4822.

Geng N Z, Li R N, Zheng H. Response of supply-demand relationship in surface water resource provisioning service to water-saving policy: A case study of Daqing River Basin. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(12): 4813-4822.

地表水资源供给服务供需关系对节水政策的响应 ——以大清河流域为例

耿念姿^{1,2}, 李若男^{1,2}, 郑 华^{1,2,*}

1 中国科学院生态环境研究中心城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085

2 中国科学院大学, 北京 100049

摘要: 水资源是基础性自然资源和战略资源, 科学量化水资源供给服务的供需关系、识别供需矛盾的突出区域是进行流域水资源管理的重要前提。以大清河流域为例, 利用 InVEST 模型, 建立了水资源供给服务空间流动量化方法, 预测了用水效率提升、节水灌溉两种节水政策情景对水资源供给服务供需关系的影响。结果表明: (1) 流域水资源供给服务和水资源需求量均呈现出上游低、下游高的空间分布格局, 农业用水为流域主要用水类型, 2010—2015 年, 流域水资源供给服务增长 0.97%, 水资源需求量出现了 9.6% 的下降; (2) 2010—2015 年, 流域整体水资源供给服务的供需比由 0.78 提升至 0.88, 服务的空间流动使得上游盈余的水量缓解了中下游的用水压力, 但中下游水资源需求大于供给的问题仍普遍存在; (3) 提升用水效率、推行节水灌溉这两种节水政策均能够有效改善大清河流域的水资源供需关系, 分别可将流域水资源供需比提升至 0.97 和 0.96, 基本达到供需平衡。研究可为北方资源型缺水流域水资源供需匹配度的提高、节水政策潜力的评估提供借鉴。

关键词: 水资源供给服务; 生态系统服务流; 节水政策; 大清河流域

Response of supply-demand relationship in surface water resource provisioning service to water-saving policy: A case study of Daqing River Basin

GENG Nianzi^{1,2}, LI Ruonan^{1,2}, ZHENG Hua^{1,2,*}

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

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: As an important ecosystem service, surface water resource provisioning plays a key role in socio-economic development. Quantifying its supply-demand relationship and identifying the critical, imbalance areas can provide specific information for basin water resources management. Here, the Daqing River Basin, an area with severe water resource shortage, was taken as a case study region. The spatial flow of surface water resource provisioning service (SWRPS) and water resource demand were quantified by using InVEST model and statistics data, respectively. Then the supply-demand relationships of surface water resource provisioning service were assessed in terms of two policy scenarios (water resource utilization efficiency improvement and water-saving irrigation implementation). Compared with the upstream areas, the downstream areas of Daqing River Basin presented higher supply and demand of SWRPS. Agriculture was the main industry of water resource utilization. During 2010—2015, SWRPS increased by 0.97% while the water resource demand decreased by 9.6%. Consequently, the supply-demand ratio of SWRPS increased from 0.78 to 0.88. Although the spatial flow of

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41925005, 41871218)

收稿日期: 2022-04-01; 网络出版日期: 2023-02-10

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhenghua@rcees.ac.cn

SWRPS from upstream area mitigated the water resource pressure in the middle and downstream regions, the demand was still larger than the supply in SWRPS in the middle and downstream regions. However, improving water resource utilization efficiency and implementing water-saving irrigation would effectively improve the supply-demand relationships of SWRPS in Daqing River Basin, which could increase the supply-demand ratio to 0.97 and 0.96, respectively. The study provides an approach for quantifying the supply-demand relationship of SWRPS and identifying the potential of water-saving policies in water-shortage basin, which can also provide quantitative information for basin water resource management.

Key Words: water resource provisioning service; ecosystem service flow; water-saving policy; Daqing River Basin

水资源供给服务为人类的生产、生活提供必需的水资源,与经济社会的可持续发展息息相关^[1]。由于人口增长、经济社会发展、城市化进程加快,加之利用效率低下及环境管理不善等原因,水资源紧缺问题日益凸显^[2-3],水资源供给服务供需关系紧张,严重制约社会经济的可持续发展。定量评估水资源供给服务的供需关系,揭示服务供需关系的空间分布及变化规律,有助于缓解水资源供需矛盾。在水资源匮乏、供需关系紧张的流域,量化水资源供给服务的供需特征、识别供需矛盾最为突出的区域,可为节水政策的实施、水资源综合管理提供理论依据。

水资源供给服务是具有流动性的生态系统服务,这一特性造成了水资源的供给和需求在时空上的不匹配^[4-5],而大部分水资源问题也正是由其供需关系不平衡、不匹配所导致^[6]。只有在充分理解水资源供给服务的流动规律、明确流动效应的基础上,才能够准确刻画出水资源供给服务的供需特征与平衡状况,从而为有针对性地采取水资源管理措施、缓解供需矛盾提供科学依据。近年来,国内外学者围绕生态系统服务供给、需求与流动的概念特征^[7-8]、量化方法^[5,9]展开了大量研究,为生态系统服务供需评估提供了理论基础和有力工具。在这些研究中,水资源供给服务的供需量化研究很多,SWAT^[1]、VIC^[10]、HSPF^[11]等水文模型及InVEST^[12]、ARIES^[13]等空间分布式生态模型,被广泛应用于评估水资源供给服务的空间流动并量化其供需关系,其中,InVEST模型具有评估参数相对较少、数据便于获取的优势,在流域尺度上量化水资源供给服务具有较好的适用性,可为水资源供给服务的供需评估提供有效方法。

在人口与经济快速增长的背景下,日益紧张的水资源供需关系亟待政策手段加以干预^[3]。节水政策是以改善或减缓用水短缺和水资源污染为目标制定的用水节约措施,包括法律法规、规范性文件、技术标准、规划等^[14]。实施科学合理的节水政策能够调控水资源的需求与消费,是解决缺水问题、缓解水资源供需矛盾的有效途径。已有研究者探究了节水政策的实施对水资源及用水需求的影响^[15-16],并评估了政策的社会、经济效益^[17-18],但节水政策对于水资源供需矛盾的调节及供需关系改善效果仍需进一步探讨。

大清河流域水资源紧缺问题突出,人水关系紧张,经济发展与居民生活的用水需求超过了流域的水资源供给能力。制定科学、合理的节水政策,对水资源进行综合管理已成为大清河流域发展规划的重点。本研究以大清河流域为例,在子流域尺度上揭示水资源供给服务的空间流动特征,量化了流域水资源供给服务的供需关系及其对节水政策(用水效率提升和节水灌溉)的响应特征,目标是识别水资源供给服务供需空间分布特征及其供需矛盾突出的区域,阐明节水政策对协调水资源供给服务供需关系的潜在效应,以为流域水资源管理及配置优化提供参考。

1 研究区域与研究方法

1.1 研究区域概况

大清河流域(113°40′—117°34′E, 38°23′—40°09′N)属海河流域中部支流(图1),是华北平原的重要流域之一,地跨北京市、天津市、河北省、山西省四个省市。大清河水系全长483km,流域控制面积约4.3万km²。大清河流域属温带大陆季风气候,降水时空分布不均且年际间差异较大。水资源紧缺为大清河流域最为突出的生态问题之一,下游平原区人口、耕地集中,城市化进程和建设用地的扩张进一步加剧了流域的水资源供需矛盾。

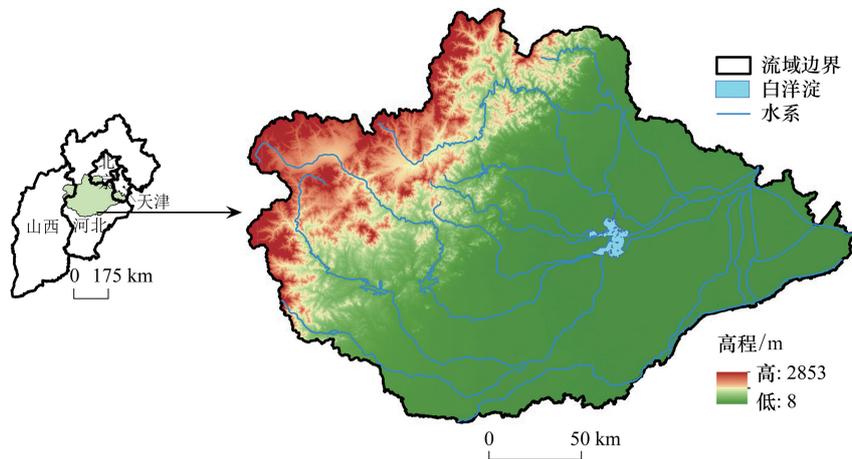


图1 大清河流域位置图

Fig.1 Local map of Daqing River Basin

为应对严峻的资源型缺水问题,大清河流域实施了一系列节水政策,其中,最主要的政策有用水效率提升和节水灌溉。首先,水资源利用与管理的核心是效率问题^[19],提升水资源的利用效率才能从根本上解决水资源供需失衡,改善缺水情况^[20]。自2012年最严格水资源管理制度实施以来,大清河流域所在地区已初步建立了用水控制制度,制定了2015年及未来远景的用水指标控制目标,旨在提升水资源综合利用效率,降低用水总量。其次,大清河流域是华北平原重要的粮食生产区^[21],灌溉是流域的用水大户,农业用水具有最高的节水潜力,加快推进高效节水灌溉也成为大清河流域节水工作的重点。流域各省市探索出了微灌、淋灌、滴灌等多种节水灌溉方式,河北省印发了《关于加快发展节水农业实施方案》,针对流域内的主要作物小麦、玉米,提出推广节水节地、成本较低、适用于机械化作业的浅埋滴灌,并制定了地下水超采区实现高效节水灌溉技术全面覆盖、整县推进浅埋滴灌试点等目标^[22],以进一步实现高效节水农业的推广。

1.2 子流域提取

基于大清河流域 DEM 和水系水文特征,使用 ArcGIS10.2 中的水文模块将大清河流域划分为 81 个子流域。本文在子流域尺度上进行研究,得出水资源供给服务和需求的量化结果后,再利用 ArcGIS10.2 中的空间统计工具将计算结果统计到各子流域中。

1.3 水资源供给服务及用水需求评估方法

本文应用 InVEST(Integrated Valuation of Ecosystem Services and Trade-offs)模型的 water yield 模块评估水资源供给服务,该模块的计算基于一个简化的水平衡过程,模型对地表水、地下水与基流不做区分,忽略地表水与地下水的相互作用,由降水量与实际蒸散量作差得到产水量^[23]。具体计算公式如下:

$$Y_x = \left(1 - \frac{AET_x}{P_x}\right) \times P_x$$

式中, Y_x 为栅格单元 x 的年均产水量, P_x 为栅格单元 x 的年均降水量, AET_x 为栅格单元 x 的年均实际蒸散量。

水资源供给服务的需求关注人类生产、生活对水资源的消费和使用。本研究将水资源供给服务的需求分为农业用水、居民生活用水和工业用水 3 种类型,根据大清河流域内各县市的水资源公报及统计年鉴中的统计数据计算得出用水量,具体公式如下:

$$\begin{aligned} WU_{total} &= WU_{agr} + WU_{ind} + WU_{dom} \\ &= Area_{agr} \times Agr + Vol_{GDP} \times Ind + Num_{pop} \times Dom \end{aligned}$$

式中, WU_{total} 为水供给服务总需求量, WU_{agr} 为农业用水量, WU_{ind} 为工业用水量, WU_{dom} 为城乡居民生活用水; $Area_{agr}$ 为子流域内耕地面积(hm^2), Agr 为每公顷耕地的年均灌溉用水量(m^3/hm^2), Vol_{GDP} 为子流域内工业

GDP(万元), Ind 为生产每万元 GDP 平均消耗的水资源量 (m^3 /万元), Num_{pop} 为子流域内人口总数, Dom 为城乡居民的年平均用水量 (m^3 /人)。

所需数据及来源如下: (1) 气象数据: 来自大清河流域及周边地区的中国气象局站点数据, 使用 ArcGIS10.2 进行空间插值处理。本研究中为了刻画节水政策的效应, 气象因子采用研究时段内的平均值; (2) 数字高程模型 (DEM): 来自地理空间数据云 (<http://www.gcloud.cn>), 分辨率为 30m; (3) 土地利用/覆被数据: 来自中国科学院遥感与数字地球研究所, 分辨率为 30m; (4) 土壤数据: 来自世界土壤数据库 (Harmonized World Soil Database, HWSO) 的中国数据; (5) 社会经济统计数据: 包括人口、GDP、各部门用水量及节水灌溉数据等, 来源于中国科学院资源环境科学数据中心 (<http://www.resdc.cn>) 与海河年鉴^[24]、河北、北京、天津、山西各省市的统计年鉴^[25-28] 及水资源公报^[29-32] 等资料。

1.4 水资源供给服务供需关系量化方法

基于空间流动的水资源供给服务供需关系的量化分为以下三步:

(1) 明确流动主体与单元

水资源供给服务的流动主体为流域中的水, 流动单元为基于 DEM 和水系特征划分的 81 个互不嵌套的子流域。

(2) 量化流动特征

流向与流量是水资源供给服务流的基本量化特征, 也是服务供需及流动定量研究中的重点内容。本文构建水资源供给服务空间流动的框架 (图 2), 在此基础上量化服务流动的方向和流量, 评估水资源供给服务供需关系。

流向: 本文以基于 DEM 生成的水流方向作为水资源供给服务流的流向, 一般情况下, 水资源供给服务遵循由高到低、自上游至下游的原则定向流动。

流量: 将水资源供给服务的盈余量作为流量计算。在水资源供给服务空间流动过程中, 若某一流动单元的水资源供给服务满足当地的生活及生产用水需求后仍有剩余, 这部分盈余水量则沿着流动方向继续传递, 并可以用于满足下一流动单元的用水需求; 当某一流动单元的盈余量 ≤ 0 或到达流域出口时, 水资源供给服务的流动则会终止。

(3) 供需关系评估

在水资源供给服务空间流动的框架下, 以水资源供给服务的供需比作为衡量供需关系的指标, 具体计算公式如下:

$$WI_{flow} = \frac{Flow + WS}{WU}$$

式中, WI_{flow} 为考虑水资源供给服务的空间流动计算所得的水资源供需比值; WS 为子流域水资源供给服务供给量, 即产水量; $Flow$ 为水资源供给服务流量, 即来自上一流动单元的盈余水量; WU 为当前子流域的水资源供给服务需求量。若 $WI_{flow} > 1$, 则说明当前子流域的用水需求得到满足并产生盈余; 若 $WI_{flow} < 1$, 则说明该子流域的用水需求未能得到全部满足, 处于缺水状态。

1.5 节水政策情景设置

为了阐明流域内不同节水政策对水资源供需关系的改善效果, 我们依据以下三个原则来制定节水政策情

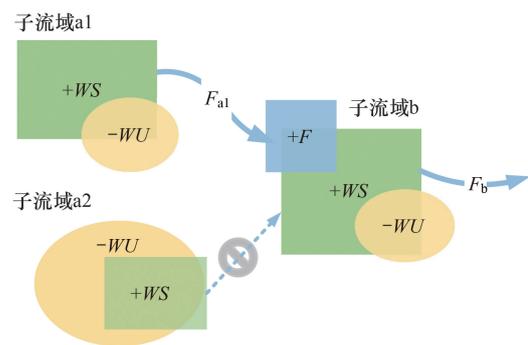


图2 水资源供给服务流动示意图

Fig.2 Schematic diagram of water supply service flow

WS : 表示水资源供给服务量; WU : 水资源供给服务的需求量, 即用水量; F : 水资源供给服务的流量, 即水资源盈余量; 子流域编号英文字母的递增顺序对应其上游至下游的流动顺序

景:(1)符合最严格水资源管理制度及大清河流域所在省市的发展规划;(2)能够降低流域水资源供给服务的需求;(3)已有研究证实是科学有效的方法。

针对大清河流域内最严格水资源管理制度及高效节水灌溉的发展规划,本研究设置了以下两个节水政策情景,来预测水资源供给服务供需关系的变化情况:

(1)用水效率提升情景:水资源利用效率的提升决定了总节水量。实施最严格水资源管理制度以来,大清河流域内各省市的用水效率均有较大提高,坚持严格的水资源管理制度、进一步提升水资源利用效率是未来发展趋势。本研究中用水效率提升情景将大清河流域内各类水资源利用效率指标提高至远景目标^[33-34](表1),探讨用水效率的提高对水资源供给服务供需关系的改善效果。

表1 大清河流域用水效率控制指标现状及目标

Table 1 Current situation and future goal of water use efficiency index in Daqing River Basin

节水指标 Water-saving index	农田灌溉水有效利用系数 Effective utilization coefficient of farmland irrigation water	万元工业 GDP 用水/(m ³ /万元) Water consumption for 10 ⁴ yuan industrial GDP
现状 Current	0.662	17.92
目标 Target	0.676	13.23

(2)节水灌溉情景:为了有效地缩减农业灌溉的水资源需求量,在大清河流域中下游耕地推广高效节水灌溉。大清河流域所在地区推广节水灌溉已取得了一定成效,但仍存在较大发展前景^[24](表2)。目前的节水工程以低压管灌为主,低压管灌虽降低了输配水过程中的渠系损失,但仍然存在一定程度的管道用水损失;而滴灌则是直接将水分传递给农作物,降低了输配水的损耗,因此节水效果更佳^[35]。浅埋滴灌已在大清河流域及周边地区部分试点已有实施,被证实具有较好的节水效果,同时能够实现节水与增收的“双赢”^[22]。该情景将大清河流域中下游未实施节水灌溉及采用低压管灌的耕地转化为浅埋滴灌,明晰节水灌溉政策的作用。

表2 大清河流域节水灌溉实施情况^[24]

Table 2 Water-saving irrigation in Daqing River Basin

省市 Province	节水灌溉比例/% Ratio of water-saving irrigation	各类节水工程占节水灌溉的比例/% Ratio of various projects in water-saving irrigation		
		喷灌 Sprinkling irrigation	微灌 Micro-irrigation	低压管灌 Low pressure pipe irrigation
北京市	83.02	18.77	7.57	67.72
天津市	63.54	2.16	1.31	70.74
河北省	65.55	6.16	3.45	80.20
山西省	58.01	6.88	5.60	58.10

1.6 节水政策情景效果评估

(1)用水效率提升情景。参考水利部节水潜力计算公式^[16],计算提升水资源利用效率后的节水总量,再进一步分析流域的水资源供给服务供需关系。具体公式如下:

$$W = W_1 + W_2$$

$$W_1 = \text{Area}_{\text{Agr}} \times \text{Agr} \times \left(1 - \frac{\eta_0}{\eta_t} \right)$$

$$W_2 = \text{Vol}_{\text{Ind}} \times (\text{Ind}_0 - \text{Ind}_t)$$

式中: W 为提升用水效率可带来的总节水量; W_1 为农业灌溉用水效率提升的节水量; W_2 为工业用水效率提升带来的节水量; Area_{Agr} 为耕地面积; Agr 为单位面积的农业用水; η_0 和 η_t 分别为现状及节水目标下的农田灌溉水有效利用系数; Vol_{Ind} 为工业 GDP(万元); Ind_0 和 Ind_t 为现状及节水目标下的工业用水效率(m³/万元)。

(2) 节水灌溉情景。参考大清河流域及周边地区关于小麦、玉米需水量的研究数据^[36-37],以及不同灌溉方式下作物水分利用及产量的大田实验结果^[38-43],得到各类灌溉方式的相对节水量及相对产量(表3),以此计算该情景的节水总量,并分析水资源供需关系。

表3 各类灌溉方式的相对节水量与产量

Table 3 Relative water saving and yield of various irrigation methods

	无节水措施 No water-saving projects	低压管灌 Low pressure pipe irrigation	喷灌 Sprinkling irrigation	微灌 Micro-irrigation	滴灌 Drip irrigation
相对节水量/% Relative amount of water saving	0	8	16	23	40
相对产量 Relative yield/%	100	105	105	109	110

2 研究结果

2.1 水资源供给服务及用水需求变化特征

大清河流域水资源供给服务大致呈现上游低、下游高的空间分布规律(图3),且年际间无明显变化。2010—2015年,大清河流域总产水量由48.43亿 m^3 增加至48.89亿 m^3 ,仅增加了0.97%。

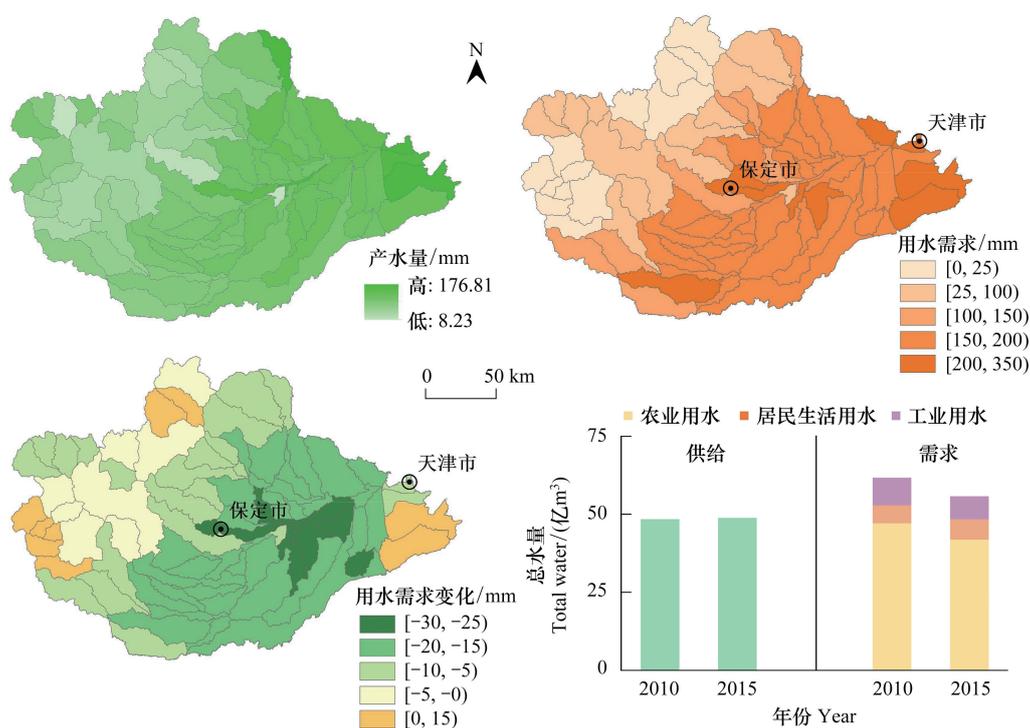


图3 大清河流域水资源供给服务及水资源需求特征

Fig.3 Characteristics of water supply service and water demand in Daqing River Basin

2015年,大清河流域的水资源供给服务需求量为55.82亿 m^3 。其中,农业用水41.90亿 m^3 ,占总用水量的比例超过75%,构成了流域水资源需求的主体;居民生活用水和工业用水量分别为6.51和7.41亿 m^3 。流域水资源供给服务的需求呈现出由上游山区至下游平原逐渐递增的空间分布特征,且高值区集中分布在流域内重要城市(流域下游天津市、流域中部保定市)中心城区及其周边县区(图3)。

2010—2015年,大清河流域的水资源需求总量减少了9.6%。其中,农业用水缩减了5.22亿 m^3 ,对用水

总量减少的贡献程度最大;工业用水量减少 1.46 亿 m^3 ,生活用水则出现小幅上升,增加了 0.70 亿 m^3 。从用水需求变化的空间分布上看,流域内近 90%的地区水资源需求量都有所降低,位于流域中部保定市及周边的子流域用水需求下降得最多。

2.2 水资源供给服务供需变化

2010 年和 2015 年大清河流域水资源供给服务供需关系的空间特征如图 4 所示。流域上游在满足了自身的水资源使用需求的同时,产生了服务盈余,在水资源供给服务空间流动的作用下向中下游子流域提供了水资源补充,缓解了当地的用水压力。2010—2015 年,大清河流域水资源供给服务的供需失衡问题有所缓和,供需比由 0.78 增长至 0.88。供给大于需求的子流域个数超过了需求大于供给的子流域,且供需比在 0.5 以下的子流域由 11 个减少至 3 个。流域中部保定市及周边子流域的水资源供给服务供需比提升明显,水资源供需关系得到了较大的改善。但流域水资源供不应求的局面仍未被打破,中下游的子流域仍然普遍存在着需求大于供给的现象,尤其是流域南部的子流域,且位于流域最东部的两个子流域甚至出现了供需比下降的情况,水资源供给服务供需关系进一步恶化。

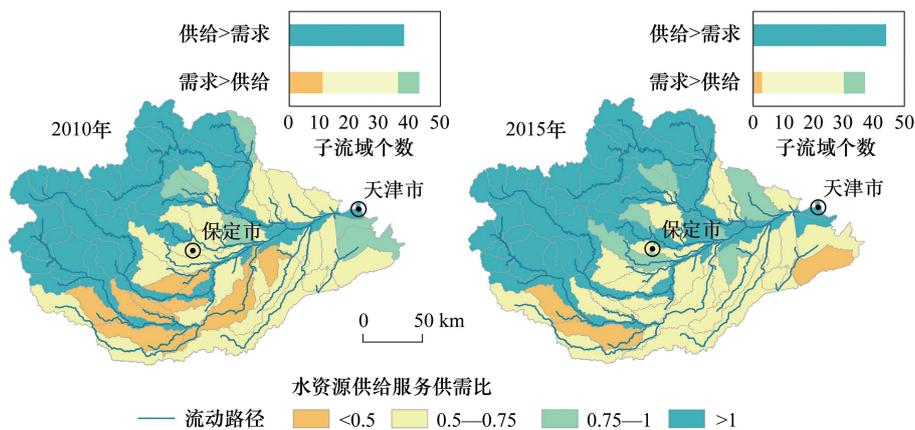


图 4 大清河流域水资源供给服务供需关系空间特征

Fig.4 Spatial characteristics of the supply-demand relationship of water supply service in Daqing River Basin

2.3 不同情景下水资源供给服务供需特征

用水效率提升和节水灌溉这两种政策情景下,大清河流域水资源供给服务的供需矛盾得到改善。从流域整体上看,两种节水政策分别使水资源供给服务供需比提升至 0.97 和 0.96,基本达到了供需平衡。从空间分布上看,提升用水效率对流域下游天津市、沧州市周边的子流域更为有效,节水灌溉则对流域中部保定市周边子流域的水资源供给服务供需关系改善作用更明显(图 5)。节水政策显著缓和了流域中游南部与下游东部子流域的水资源供给服务供需矛盾,但这些子流域的水资源供给服务供需比仍在 1 以下,尚未实现供需匹配。

3 讨论

大清河流域水资源供给服务的供给与需求呈现出明显的空间异质性,形成这些空间差异的原因可能主要来自流域的土地利用变化和经济发展:一方面,流域上游多为林地和草地,蒸散量较高,产水能力较低^[36],导致水资源供给服务较低;另一方面,建设用地集中分布在流域中下游,不透水层易形成径流而增加产水量^[44],进而水资源供给服务较高;此外,城镇多位于中下游,这部分地区具有更高的人口密度和更为发达的经济,对水资源供给服务的需求也相对较高。2010 至 2015 年大清河流域水资源供给服务的需求呈现下降趋势,这与国家和区域尺度的相关研究结果基本一致^[45-46]。人口、经济发展情况、土地利用变化、节水政策及措施等是影响水资源供给服务需求的重要因素^[10,47],在研究时段内,大清河流域土地利用变化不明显,人口数量与 GDP 均呈现出明显的上升趋势,而用水需求却有所减少,也印证了流域节水政策的重要调控作用。

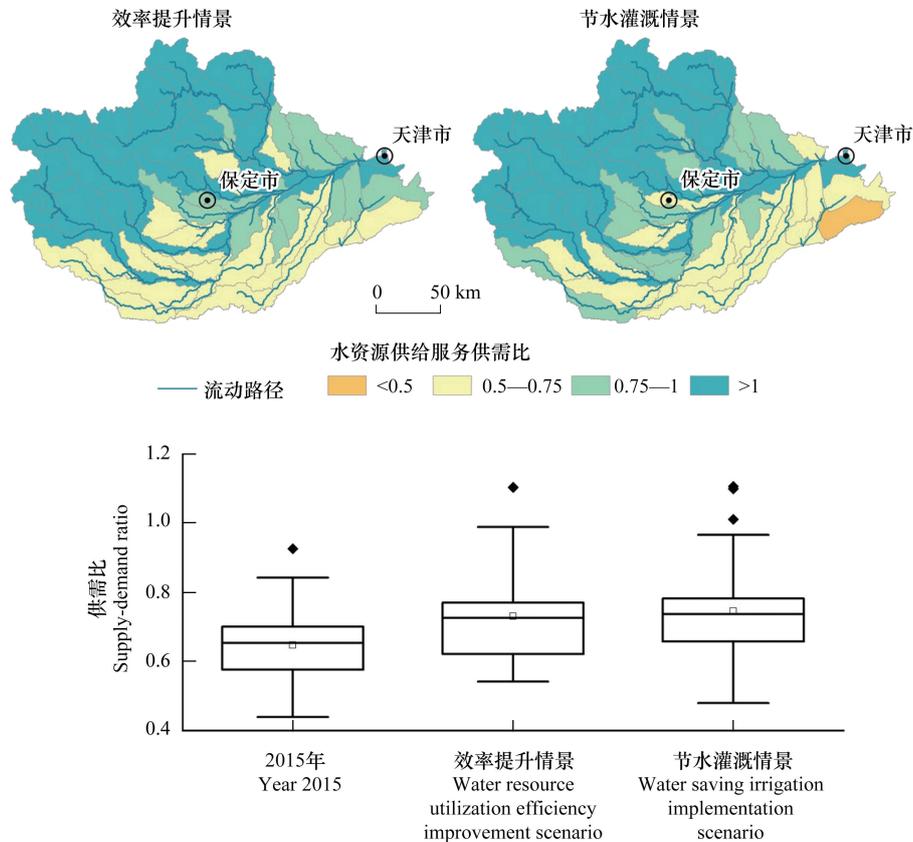


图5 节水政策对大清河流域水资源供给服务供需关系影响预测

Fig.5 Prediction of the impact of water-saving policy on water supply service supply-demand relationship in Daqing River Basin

本研究表明,用水效率的提升对于改善水资源供给服务供需关系紧张具有显著作用。提升用水效率能够降低水资源供给服务的需求,其关键在于节水技术的创新与推广,工艺循环用水、高效节水灌溉及家庭节水器具的普及,最大限度地抵消了由人口增加、经济建设及城市化进程加快导致的用水需求增长^[45]。未来在继续实施严格的用水效率控制制度的同时,采用以下措施,将进一步提升流域水资源供给服务的供需匹配程度:(1)优化产业结构,向水资源利用率高的方向发展^[48];(2)优化流域内的水库、闸坝及绿色基础设施,充分发挥其对水资源供给服务流动、用水配置的调控功能^[49-50],增加水资源供给服务的可达性与可利用性;(3)合理规划南水北调中线工程、引黄入冀补淀等跨流域调水项目^[51-52],因地制宜建设跨流域调水工程,补充流域供水,缓解用水压力^[53]。

本研究表明,推广高效节水灌溉,能够有效缓解水资源供给服务的供需矛盾。在本研究中,实施节水灌溉主要提升了流域中游南部的的水资源供给服务供需比,这些区域耕地的比例超过80%,是大清河流域内主要的产粮区^[21]。大清河流域的主导耗水产业是农业,加快推进高效节水灌溉是未来流域节水工作的重点内容,但由于节水灌溉推广造成的生产设施成本提高^[36],以及部分农民的节水意愿较低、节水意识薄弱^[54],节水灌溉政策的推广可能会受到一定的阻碍,未来采取以下措施,有助于进一步改善流域水资源供给服务的供需关系:(1)继续完善节水灌溉技术推广与服务体系,制定规范化、标准化的应用技术规程,加强宣传教育,提高农户采用节水灌溉的积极性^[55];(2)建立农业节水补偿与激励机制,通过适当的扶持和补贴增强农民采用高效节水灌溉方式的意愿^[56]。

本文的另一个特色是,通过考虑水资源供给服务空间流动,揭示了水资源供给服务供需关系空间格局及其时间动态,发现:流域上游产生了水资源供给服务的盈余,且随水资源供给服务的空间流动补给了下游的用

水需求,节水政策的调控作用有效缓解了流域水资源供给服务的供需矛盾,但流域中游粮食生产区与流域下游东部仍存在需求大于供给的缺水问题。这些信息直观展示了水资源供给服务供需关系的空间特征及其对节水政策的响应规律,为流域水资源供给服务供需关系优化、有针对性的水资源管理政策制定提供了科学依据。

然而,本研究也存在一定的局限性。首先,本文采用 InVEST 模型中 water yield 模块计算水资源供给服务,该模型在计算中未区分地表水、地下水和基流^[23],且本文在量化过程中未考虑地下水与地表水之间的动态交换、补给等过程,可能会导致水资源供给服务评估结果与实际值之间存在偏差。同时,南水北调中线工程与引黄入冀补淀工程等跨流域调水工程也向大清河流域提供了部分水资源供给服务,上述工程分别于 2014 年底和 2017 年底正式通水,由于研究期内跨流域调水占大清河流域水资源供给服务总量的比例较低^[29],因此暂未考虑外部供水的影响。未来研究中应注重综合多源数据及多种方法量化流域生态系统水资源供给服务,使评估结果更为准确。此外,水库、闸坝等基础设施作为服务空间流动中的“汇”区域,影响着水资源供给服务的传递与使用过程^[57],但由于这些基础设施的数据获取与量化难度较大,本研究并未考虑基础设施对水资源供给服务流动与配置的影响,这也是未来研究的难点与重点。

参考文献 (References):

- [1] Chen D S, Li J, Yang X N, Zhou Z X, Pan Y Q, Li M C. Quantifying water provision service supply, demand and spatial flow for land use optimization: a case study in the Yanhe watershed. *Ecosystem Services*, 2020, 43: 101117.
- [2] Huggins X, Gleeson T, Kumm M, Zipper S C, Wada Y, Troy T J, Famiglietti J S. Hotspots for social and ecological impacts from freshwater stress and storage loss. *Nature Communications*, 2022, 13(1): 439.
- [3] Larsen T A, Hoffmann S, Lüthi C, Truffer B, Maurer M. Emerging solutions to the water challenges of an urbanizing world. *Science*, 2016, 352(6288): 928-933.
- [4] Fisher B, Turner R K, Morling P. Defining and classifying ecosystem services for decision making. *Ecological Economics*, 2009, 68(3): 643-653.
- [5] Bagstad K J, Johnson G W, Voigt B, Villa F. Spatial dynamics of ecosystem service flows: a comprehensive approach to quantifying actual services. *Ecosystem Services*, 2013, 4: 117-125.
- [6] 刘婧雅. 青藏高原水供给服务流动: 区域效应与生态补偿研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2020.
- [7] Schröter M, Barton D N, Remme R P, Hein L. Accounting for capacity and flow of ecosystem services: a conceptual model and a case study for Telemark, Norway. *Ecological Indicators*, 2014, 36: 539-551.
- [8] Serna-Chavez H M, Schulp C J E, Van Bodegom P M, Bouten W, Verburg P H, Davidson M D. A quantitative framework for assessing spatial flows of ecosystem services. *Ecological Indicators*, 2014, 39: 24-33.
- [9] Burkhard B, Kandziora M, Hou Y, Müller F. Ecosystem service potentials, flows and demands-concepts for spatial localisation, indication and quantification. *Landscape Online*, 2014, 34: 1-32.
- [10] Zhang C, Li J, Zhou Z X, Sun Y J. Application of ecosystem service flows model in water security assessment: a case study in Weihe River Basin, China. *Ecological Indicators*, 2021, 120: 106974.
- [11] Lin J Y, Huang J L, Prell C, Bryan B A. Changes in supply and demand mediate the effects of land-use change on freshwater ecosystem services flows. *Science of the Total Environment*, 2021, 763: 143012.
- [12] Li D L, Wu S Y, Liu L B, Liang Z, Li S C. Evaluating regional water security through a freshwater ecosystem service flow model: a case study in Beijing-Tianjian-Hebei region, China. *Ecological Indicators*, 2017, 81: 159-170.
- [13] Domisch S, Kakouei K, Martínez-López J, Bagstad K J, Magrach A, Balbi S, Villa F, Funk A, Hein T, Borgwardt F, Hermoso V, Jähnig S C, Langhans S D. Social equity shapes zone-selection: balancing aquatic biodiversity conservation and ecosystem services delivery in the transboundary Danube River Basin. *Science of the Total Environment*, 2019, 656: 797-807.
- [14] 李香云. 基于节水优先的我国地方节水政策现状与分析. *中国水利*, 2017, (11): 5-8.
- [15] Kharrazi A, Akiyama T, Yu Y D, Li J. Evaluating the evolution of the Heihe River basin using the ecological network analysis: efficiency, resilience, and implications for water resource management policy. *Science of the Total Environment*, 2016, 572: 688-696.
- [16] 冯浩源, 石培基, 周文霞, 陈佳银, 张学斌. 水资源管理“三条红线”约束下的城镇化水平阈值分析——以张掖市为例. *自然资源学报*, 2018, 33(2): 287-301.
- [17] Tsur Y. Optimal water pricing: accounting for environmental externalities. *Ecological Economics*, 2020, 170: 106429.
- [18] 李昌彦, 王慧敏, 佟金萍, 刘尚. 基于 CGE 模型的水资源政策模拟分析——以江西省为例. *资源科学*, 2014, 36(1): 84-93.
- [19] 任玉芬, 苏小婉, 贺玉晓, 王效科, 欧阳志云. 中国生态地理区城市水资源利用效率及影响因素. *生态学报*, 2020, 40(18): 6459-6471.
- [20] 海霞, 李伟峰, 王朝, 周伟奇, 韩立建, 钱雨果. 京津冀城市群用水效率及其与城市化水平的关系. *生态学报*, 2018, 38(12): 4245-4256.
- [21] 潘莹, 郑华, 易齐涛, 李若男. 流域生态系统服务簇变化及影响因素——以大清河流域为例. *生态学报*, 2021, 41(13): 5204-5213.
- [22] 河北省农业农村厅. 河北省加快发展节水农业实施方案解读. *河北农业*, 2021, (11): 6-8.

- [23] Sharp R, Tallis H T, Ricketts T, Daily G C, Polasky S. InVEST 3.2.0 User's Guide. Stanford: The Natural Capital Project, 2015.
- [24] 水利部海河水利委员会. 海河年鉴 2016. 天津: 天津科学技术出版社, 2016.
- [25] 河北省人民政府办公厅, 河北省统计局, 河北省社会科学院. 河北经济年鉴 2010-2016. 北京: 中国统计出版社, 2010-2016.
- [26] 北京市统计局, 国家统计局北京调查总队. 北京统计年鉴 2010-2016. 北京: 中国统计出版社, 2010-2016.
- [27] 天津市统计局, 国家统计局天津调查总队. 天津统计年鉴 2010-2016. 北京: 中国统计出版社, 2010-2016.
- [28] 山西省统计局, 国家统计局山西调查总队. 山西统计年鉴 2010-2016. 北京: 中国统计出版社, 2010-2016.
- [29] 河北省水利厅. 河北省水资源公报(2010-2018). (2019-09-16)[2022-03-22]. <http://slt.hebei.gov.cn/dynamic/search.jsp>.
- [30] 天津市水务局. 天津市水资源公报(2010-2015). (2020-08-05)[2022-03-22]. http://swj.tj.gov.cn/zwgk_17147/xzfxgk/fdzdgnr1/tjxx/index_2.html.
- [31] 北京市水务局. 北京市水资源公报(2010-2015). (2016-11-17)[2022-03-22]. <http://swj.beijing.gov.cn/zwgk/szygb/>.
- [32] 山西省水利厅. 山西省水资源公报(2010-2015). (2018-05-17)[2022-03-22]. <http://slt.shanxi.gov.cn/zncs/szyc/szygb/>.
- [33] 国务院办公厅. 实行最严格水资源管理制度考核办法. (2013-01-06)[2022-03-22]. http://www.gov.cn/zwgk/2013-01/06/content_2305762.htm.
- [34] 国家发展改革委. “十四五”节水型社会建设规划. (2021-10-28)[2022-03-22]. <https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/ghwb/202111/P020211108630238124208.pdf>.
- [35] 蔺宝军, 张芮, 高彦婷, 张帅. 西北地区高效节水灌溉技术发展现状及对策. 水利规划与设计, 2019, (3): 29-33.
- [36] 姜鲁光, 杨成, 封志明, 刘晔. 面向多目标情景的大清河流域水资源利用权衡. 资源科学, 2021, 43(8): 1649-1661.
- [37] 王学, 李秀彬, 辛良杰. 河北平原冬小麦播种面积收缩及由此节省的水资源量估算. 地理学报, 2013, 68(5): 694-707.
- [38] 牛彦辉. 河北平原区节水灌溉工程节水效果研究[D]. 保定: 河北农业大学, 2011.
- [39] 李小利, 李昊儒, 郝卫平, 张文英, 王春晖. 滴灌施肥对华北小麦-玉米产量和水分利用效率的影响. 灌溉排水学报, 2018, 37(4): 18-28.
- [40] 张晶, 党建友, 张定一, 张文英, 王春晖. 节水灌溉方式与磷钾肥减施对小麦产量、品质及水肥利用效率的影响. 水土保持学报, 2020, 34(6): 166-171.
- [41] 杨永辉, 武继承, 高翠民, 张洁梅, 潘晓莹, 何方, 王越, 王芸. 灌溉方式、灌水量及施氮量对小麦、玉米周年水分利用的影响. 水土保持研究, 2020, 27(4): 134-141, 148-148.
- [42] 董志强, 张丽华, 李谦, 吕丽华, 申海平, 崔永增, 梁双波, 贾秀领. 微喷灌模式下冬小麦产量和水分利用特性. 作物学报, 2016, 42(5): 725-733.
- [43] 郑孟静, 张丽华, 董志强, 申海平, 姚海坡, 张丽荣, 贾秀领. 微喷灌对夏玉米产量和水分利用效率的影响. 核农学报, 2020, 34(4): 839-848.
- [44] Lang Y Q, Song W, Zhang Y. Responses of the water-yield ecosystem service to climate and land use change in Sancha River Basin, China. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 2017, 101: 102-111.
- [45] Zhou F, Bo Y, Ciaio P, Dumas P, Tang Q H, Wang X H, Liu J G, Zheng C M, Polcher J, Yin Z, Guimberteau M, Peng S S, Otle C, Zhao X N, Zhao J S, Tan Q, Chen L, Shen H Z, Yang H, Piao S, Wang H, Wada Y. Deceleration of China's human water use and its key drivers. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2020, 117(14): 7702-7711.
- [46] 李伟峰, 吕小瑜, 王朝, 韩立建. 京津冀城市群人-地、人-水与人-碳交互胁迫关系及其叠加效应. 生态学报, 2021, 41(11): 4318-4329.
- [47] Gohari A, Eslamian S, Mirchi A, Abedi-Koupaei J, Massah Bavani A, Madani K. Water transfer as a solution to water shortage; a fix that can backfire. *Journal of Hydrology*, 2013, 491: 23-39.
- [48] 吴丹. 京津冀地区产业结构与水资源的关联性分析及双向优化模型构建. 中国人口·资源与环境, 2018, 28(9): 158-166.
- [49] Chung M G, Frank K A, Pokhrel Y, Dietz T, Liu J G. Natural infrastructure in sustaining global urban freshwater ecosystem services. *Nature Sustainability*, 2021, 4(12): 1068-1075.
- [50] Ramyar R, Saeedi S, Bryant M, Davatgar A, Mortaz Hedjri G. Ecosystem services mapping for green infrastructure planning - the case of Tehran. *Science of the Total Environment*, 2020, 703: 135466.
- [51] Zhang C, Duan Q Y, Yeh P J F, Pan Y, Gong H L, Moradkhani H, Gong W, Lei X H, Liao W H, Xu L, Huang Z Y, Zheng L Q, Guo X R. Sub-regional groundwater storage recovery in North China plain after the South-to-North Water Diversion Project. *Journal of Hydrology*, 2021, 597: 126516.
- [52] 刘立华, 耿建康, 宋亚净. 引黄入冀补淀工程河北引水总量控制因子浅析. 水利规划与设计, 2017, (3): 23-24, 85-85.
- [53] Tian J, Liu D D, Guo S L, Pan Z K, Hong X J. Impacts of inter-basin water transfer projects on optimal water resources allocation in the Hanjiang River Basin, China. *Sustainability*, 2019, 11(7): 2044.
- [54] 张哲晰, 穆月英, 侯玲玲, 杨鑫. 环渤海地区滴灌的资源与经济效应——政府与农户目标一致性检验. 资源科学, 2019, 41(8): 1400-1415.
- [55] 陆红娜, 康绍忠, 杜太生, 佟玲, 丁日升, 李思恩. 农业绿色高效节水研究现状与未来发展趋势. 农学学报, 2018, 8(1): 163-170.
- [56] Cremades R, Rothausen S G S A, Conway D, Zou X X, Wang J X, Li Y E. Co-benefits and trade-offs in the water-energy nexus of irrigation modernization in China. *Environmental Research Letters*, 2016, 11(5): 054007.
- [57] 刘慧敏, 刘绿怡, 任嘉衍, 卞子元, 丁圣彦. 生态系统服务流量化研究进展. 应用生态学报, 2017, 28(8): 2723-2730.