

DOI: 10.5846/stxb202012313344

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.

Li W F, Lü X Y, Wang Z, Han L J. Interactions between urbanization, land, water and carbon and their combined effects on Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(11): 4318-4329.

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

李伟峰^{1,*}, 吕小瑜^{1,2}, 王 朝¹, 韩立建¹

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:随着社会、经济效益的不断增加及国际影响力的不断增大, 京津冀正在向世界级城市群迈进。而快速的城市增长与资源环境的交互胁迫效应严重制约了京津冀地区的可持续发展, 因此, 明确城市增长与不同资源环境要素的相互作用机制并采用有效的措施, 是实现京津冀地区发展和保护共生的关键。目前针对城镇化与单一资源环境要素交互作用的研究较多, 但对城镇化与不同资源环境要素相互作用的叠加效应的关注很少。针对土地、水资源与能源这三种明显限制京津冀地区发展的资源要素, 综合考虑了供给侧与需求侧特征, 分析了人-地、人-水与人-碳的相互作用关系, 解析了京津冀地区城镇发展与不同资源环境要素交互胁迫作用及其叠加效应。结果表明: 2002—2017 年, 1、城市群整体水平上, 人-地、人-水和人-碳关系总体上均呈“强协调”或“弱协调”交替变化的状态; 2、城市尺度上, 不同城市的人-地、人-水和人-碳交互关系存在明显时空分异。多数城市都曾面临土地、水资源或能源的胁迫影响, 尤其是河北的一些城市(石家庄、邯郸、承德、衡水、邢台、唐山及保定等)在有些年份面临土地、水资源或能源的“强胁迫”影响; 3、从京津冀地区整体水平上看, 不存在多种资源要素的叠加胁迫影响, 但是, 城市群内部多数城市在有的年份同时面临土地、水资源或能源两种以上资源要素的叠加胁迫影响。因此, 要协同改善京津冀地区资源环境的胁迫, 需要全面考虑不同空间尺度之间, 不同城市之间, 以及不同资源要素之间的叠加影响机制, 有针对性的提出政策与措施。

关键词: 城镇化; 供给; 需求; 交互胁迫; 叠加效应

Interactions between urbanization, land, water and carbon and their combined effects on Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration

LI Weifeng^{1,*}, LÜ Xiaoyu^{1,2}, WANG Zhao¹, HAN Lijian¹

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 one of the most important fast developed regions, the Beijing-Tianjin-Hebei (BTH) urban agglomeration plays an important role in global development due to its great socio-economic benefits. However, the dramatically fast development causes series of resources and environments problems including serious shortage of resources. Despite broad studies exploring the impacts of urbanization on some particular resources, little is known about the simultaneously combined effects of urbanization on different resources. In this paper, we took the BTH urban agglomeration as a pilot study and simultaneously explored the combined impacts of urbanization on land, water and energy. First, we developed a dynamic index to quantify the interaction between urbanization and resource from the view of resource supply and demand.

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(31971482); 国家自然科学基金重大项目(41590841); 国家重点研发计划资助(2016YFC0503004)

收稿日期: 2020-12-31; **修订日期:** 2021-05-13

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

Second, we investigated the combined impacts of urbanization on different resources. We found that (1) on aggregate level, the interactions between urbanization of the whole BTH and land, water and energy were all mainly “strong concordant” and “weak concordant”; (2) on city level, the interactions between urbanization and land, water and energy varied between different cities, and most cities faced the alternation occurrence of “weak stressed”, “strong stressed”, “weak concordant” and “strong concordant”. Particularly in some cities (Shijiazhuang, Handan, Chengde, Hengshui, Xingtai, Tangshan, and Baoding) in Hebei province, they ever faced “strong stressed” interaction in some years; (3) the combined stressed effects by land, water or energy were found at city level, and most cities within the BTH were stressed by more than one resource in some years. Our findings highlight that it is imperative to comprehensively evaluate the interactions between urbanization and resources from different spatial scales and the nexus of different resources for decision-makers.

Key Words: urbanization; supply; demand; interactive relation; combined effect

快速城镇化对资源环境的胁迫压力是全球性挑战^[1-3]。我国作为城镇化进程最快的国家,快速城镇化对资源环境的过度开发和利用导致了一系列生态环境问题,尤其在城市聚集发展的城市群地区,高度集中的发展需求与有限的资源环境容量之间的矛盾尤为突出。例如,京津冀地区占全国2.3%的国土面积和1%的水资源,却承载了全国8%的人口,11%的经济总量及8.77%的能源消耗,不断增加的发展需求与有限的资源环境供给已经严重影响了京津冀地区协同发展目标的实现^[4]。

城镇化与资源环境的交互作用一直是国内外的热点研究领域^[5-7],主要集中在人类社会经济活动对资源环境要素的利用及其负面影响。已有的研究主要是从承载力角度^[8-12],分析资源环境要素的供给(承载体)、需求(承载对象)及其相互关系,揭示资源环境的供给能力与城镇发展需求的匹配程度,进而刻画人类活动需求与有限的资源供给之间的胁迫程度。例如,从供给侧角度,针对水资源供给能力(承载体的能力),评估城市水资源的天然禀赋以及取水、净水和输水等人为工艺对水资源供给能力的影响^[13-16],针对土地资源的供给能力,评估不同土地利用类型能够承载的人口或人类活动强度^[17-19];从需求侧角度,针对人类需求程度(承载对象的负荷),分析人类活动对水资源或土地资源的需求强度^[5,20-21]。关于研究方法,多数研究采用多因子层次分析法,通过建立多因子指标来定量刻画资源环境要素的承载能力与负荷量以确定承载率^[22-25];还有一些研究采用综合分析方法,例如,生态足迹^[20,26-28]、压力—状态—响应模型^[14,29-32]和能值代谢方法等^[33-35],这些方法主要关注人类活动与资源环境交互作用的某个侧面。总体上,综合概括国内外研究进展,多数研究关注的是城镇化与单一资源环境要素的相互作用,且关于人类活动与水资源、土地资源相互作用的研究最多^[15-16,36-37],近些年,人类活动与能源的相互胁迫影响也受到越来越多的关注^[5,9,38],但是,较少研究考虑人类活动与不同资源环境要素交互作用的叠加效应。由于人类生存需求以及生产与生活的方式,其与一种资源要素的相互作用往往会影响到其他资源环境要素,例如,土地资源是开展人类活动的基本载体,土地资源的承载能力与利用效率与很多资源环境问题密切相关,在水资源处理与利用过程中需要消耗能源,在能源的开采加工过程中需要消耗水资源。因此,同时考虑人类活动与不同资源要素交互作用的叠加影响,对协同、高效地解决不同资源环境问题具有非常重要的意义。尤其对于多个城市联合发展的城市群地区,不同资源禀赋、不同功能以及不同发展模式的城市之间具有密切的关联关系,导致城市群地区资源环境问题的累积效应尤为突出^[39],例如,京津冀地区同时面临着土地资源紧张、水资源及能源短缺等问题^[40-42],鉴于此,全面考虑城镇化与不同资源环境要素的交互胁迫作用及协同解决路径,有利于高效地解决城市群地区的资源环境问题。

本研究以资源环境问题严峻的京津冀城市群为例,选择土地、水资源与能源这三个与城镇化交互胁迫作用十分突出的资源要素,建立了基于供给与需求变化的城镇化与不同资源环境要素相互作用关系的评估方法,解析了京津冀地区人-地、人-水和人-碳交互胁迫关系的变化特征,以及人-地、人-水和人-碳交互作用的叠加作用,揭示了京津冀地区整体以及不同城市面临的主要胁迫关系与叠加作用问题。本研究结果可为京津冀地区不同资源环境要素的协同优化与统筹配置提供科学依据。

1 研究区概况与数据来源

京津冀城市群位于华北平原北部,包括北京、天津两大直辖市及河北省的 11 个地级市,总体行政区划面积为 $2.18 \times 10^5 \text{ km}^2$,约占全国的 2.27% (图 1)。该区域整体地势由西北向东南倾斜,包括山区、平原和海域三大地貌,以平原为主要类型,属温带半湿润半干旱季风气候,水热同期、四季分明。自然资源禀赋方面,京津冀地区矿产资源丰富,主要分布在冀东、冀北等地,是我国重要的煤炭资源基地,但同时也是我国典型的缺水地区。截止 2018 年,京津冀地区人口城镇化率为 66.48%,人口占全国的 8.50%,国民生产总值占全国的 8.98%,水资源总量为 217.2 亿 m^3 ,占全国的 0.79%,人均水资源量不足全国平均水平的 1%;能源消费总量占全国的 8.77%,人均能源消耗量为全国平均水平的 31.58%。城镇用地快速扩张、水资源短缺、能源消费结构不合理,以及不同城市的资源供给与需求时空分布不匹配是京津冀地区面临的主要问题。

2 研究方法

2.1 城镇化与资源要素交互胁迫评价指标体系

本文综合供给侧与需求侧特征,分别建立了京津冀地区人-地、人-水和人-碳交互作用的单要素双向评价指标体系(表 1)。其中,关于人-地交互胁迫关系,从供给角度选取人均建设用地来表示城镇用地的承载能力,从需求角度选取单位 GDP 建设用地来表示城镇用地的负荷;关于人-水交互胁迫关系,从供给角度选取人均水资源量来表示水资源的承载能力,从需求角度选取单位 GDP 水耗来表示水资源的负荷;关于人-碳交互胁迫关系,从供给角度选取人均能源生产量来表示能源的承载力,从需求角度选取单位 GDP 能耗来表示能源的负荷。

表 1 京津冀地区城镇化与不同资源要素交互胁迫评价指标体系

Table 1 Evaluation index system of the interactions between urbanization and different resources in Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration

指标类型 Type of indicators	指标意义 Significance of indicators	指标名称 Definition of indicators	指标公式 Formula of indicators
“人-地” “Human-land”	供给(土地的承载能力) 需求(土地的负荷)	人均建设用地 单位 GDP 建设用地	建设用地面积(km^2)/城镇人口数量(万人) 建设用地面积(km^2)/市辖区地区生产总值(万元)
“人-水” “Human-water”	供给(水资源的承载能力) 需求(水资源的负荷)	人均水资源量 单位 GDP 水耗	水资源总量(亿 m^3)/城市总人口(万人) 城市水资源消费量(亿 m^3)/城市地区生产总值(万元)
“人-碳” “Human-carbon”	供给(能源的承载能力) 需求(能源的负荷)	人均能源生产量 单位 GDP 能耗	能源本地生产量(万 t 标准煤)/城市总人口(万人) 城市能源消费量(万 t 标准煤)/城市地区生产总值(万元)

关于数据,本研究主要分析了 2001—2018 年京津冀地区人-地、人-水和人-碳关系。其中,关于“土地资源”供给量,采用的是京津冀地区的城镇用地总量,关于“水资源”供给量,采用的是京津冀地区本地的可用水资源总量;关于“能源”供给量,采用的是京津冀地区本地的能源生产量,主要包括一次能源生产量(原煤、原

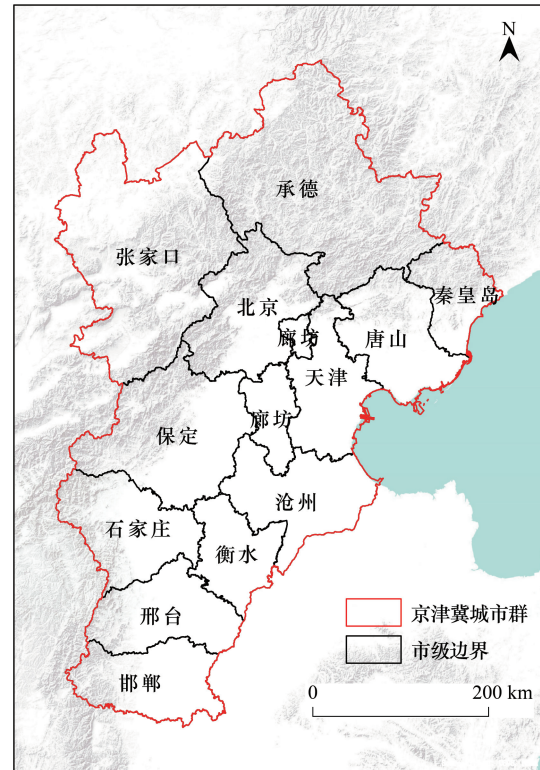


图 1 京津冀城市群地区位置图

Fig.1 Location of Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration

油、天然气及一次电力的生产量)的总和。相关数据来源为《中国城市统计年鉴》、《河北省经济年鉴》、《北京市统计年鉴》、《天津市统计年鉴》、河北省各地级市统计年鉴和河北省水资源公报、北京市水资源公报、天津市水资源公报等。

2.2 城镇化与资源要素交互胁迫程度量化方法

在建立单要素交互胁迫评价指标体系后,综合城镇化与不同资源要素交互作用供给与需求的变化特征,建立了城镇化与不同资源要素交互作用程度的动态评价方法(公式 1—2):

$$Va_{ij} = \frac{X_{i+1j} - X_{ij}}{X_{ij}} \quad Vb_{ij} = \frac{Y_{i+1j} - Y_{ij}}{Y_{ij}} \quad (1)$$

$$T_{ij} = \frac{Va_{ij}}{Vb_{ij}} \quad (2)$$

式(1)中, X_{ij} 、 X_{i+1j} 和 Y_{ij} 、 Y_{i+1j} 分别表示第 j 类资源要素在第 i 年和第 $i+1$ 年的供给量与需求量, Va_{ij} 表示第 j 类资源要素在第 i 年(基于前后三年供给量的滑动平均值)供给量的变化速率, Vb_{ij} 表示第 j 类资源要素在第 i 年(基于前后三年需求量的滑动平均值)需求量的变化速率;式(2)中, T_{ij} 为第 j 类资源环境要素在第 i 年与城镇化的交互胁迫程度,根据 T_{ij} 值可将城镇化与资源环境要素交互胁迫关系分为四种模式:强胁迫、弱胁迫、弱协调和强协调。本研究的数据输入年限为2001—2018年,但考虑到时间边界对计算结果的影响,因此,有效的计算结果选取了2002—2017年。

(1)强胁迫, $Va_{ij}<0$ 、 $Vb_{ij}>0$:该模式表征在资源环境要素供给能力下降的同时,城镇化对资源要素的需求在增加,此时城镇化与资源要素的供需矛盾在不断激化,城镇化与资源要素交互关系处于强胁迫状态。

(2)弱胁迫,该模式包含两种情况:当 $Va_{ij}<Vb_{ij}$ ($Va_{ij}>0$ 、 $Vb_{ij}>0$)时,表明资源环境要素供给能力和城镇化对资源要素的需求同时在增加,但供给上升速率小于需求增加速率;当 $|Va_{ij}|>|Vb_{ij}|$ ($Va_{ij}<0$ 、 $Vb_{ij}<0$)时,表明资源环境要素供给能力和城镇化对资源要素需求同时在降低,但供给下降速率大于需求下降速率。在这两种情况下,城镇化与资源要素间的供需关系开始产生矛盾,城镇化与资源要素交互关系处于弱胁迫状态。

(3)弱协调,该模式包含两种情况:当 $Va_{ij}>Vb_{ij}$ ($Va_{ij}>0$ 、 $Vb_{ij}>0$)时,表明资源环境要素供给能力和城镇化对资源要素需求同时在增加,但供给上升速率大于需求增加速率;当 $|Va_{ij}|<|Vb_{ij}|$ ($Va_{ij}<0$ 、 $Vb_{ij}<0$)时,表明资源环境要素供给能力和城镇化对资源要素需求同时在降低,但供给下降速率小于需求下降速率。在这两种情况下,城镇化对资源要素的需求得到基本满足,城镇化与资源要素交互关系处于弱协调状态。

(4)强协调, $Va_{ij}>0$ 、 $Vb_{ij}<0$:该模式表征在资源环境要素供给能力增加的同时,城镇化对环境要素的需求在降低,此时城镇化对资源要素的需求得到充分满足,城镇化与资源要素交互关系处于强协调状态。

3 结果分析

3.1 人-地交互胁迫关系时空变化特征

从城市群整体状况看,2002—2017年,京津冀地区人-地关系呈“弱协调—强协调”交替变化状态(图2)。其中,2002—2010年,以“弱协调”为主,2010年之后以“强协调”为主,表明从城市群整体水平来看,京津冀地区人-地关系一直在改善,且2011年之后改善强度进一步提升。根据不同阶段人-地关系变化的原因显示,2002—2010年,多数年份的土地资源供给量(人均建设用地)有所减少(图3),但土地资源的需求量减少幅度更大(单位GDP建设用地)(图4)。因此,根据2.2城镇化与单要素交互胁迫动态评估方法,人-地交互作用关系属于“弱协调”;2010—2017年,京津冀地区多数年份的土地资源供给量(人均建设用地)有所增加,而土地资源的需求量(单位GDP建设用地)持续减少,因此,人-地交互作用关系属于“强协调”。

从城市群内部不同城市之间的比较来看,京津冀地区不同城市的人-地关系存在明显的时空差异(图2)。2002—2017年,北京与天津这两个超大城市的人-地关系呈“弱协调—强协调”交替变化的演进状态,主要由于这两个城市土地资源需求量持续降低(单位GDP建设用地)。而河北的11个城市均呈“强胁迫”、“弱胁

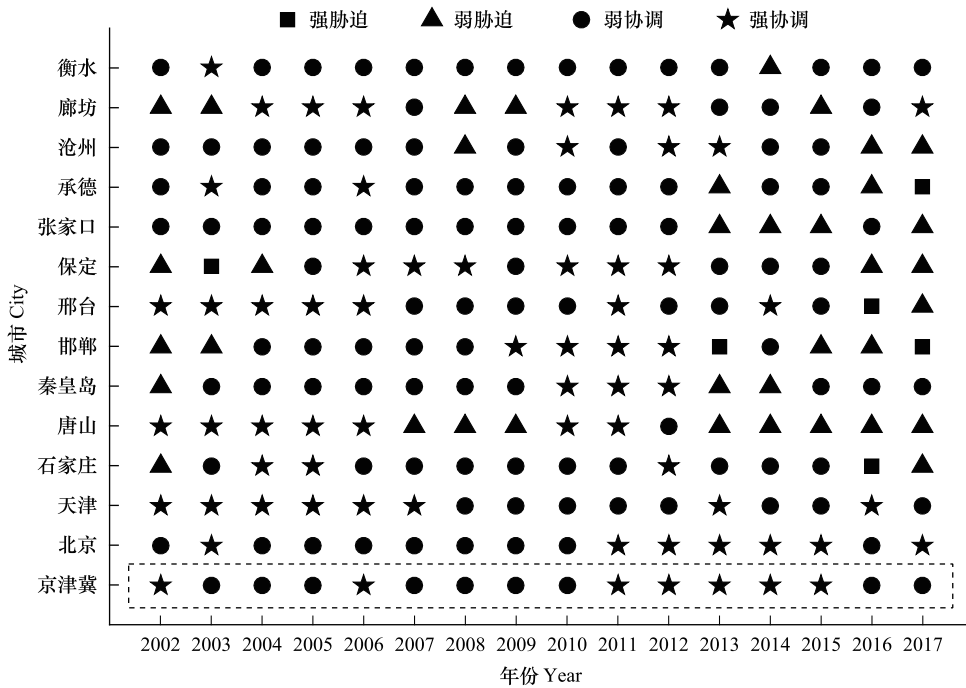


图2 京津冀地区人-地交互胁迫模式时空变化特征

Fig.2 Spatial and temporal characteristics of human-land interaction in Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration



图3 京津冀地区人均建设用地时空变化特征

Fig.3 Spatial and temporal characteristics of construction land area per capita in Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration

迫”、“强协调”或“弱协调”交替变化趋势。2013年以后,唐山、邯郸、张家口与承德等城市人-地关系以“弱胁迫”或“强胁迫”为主,表明这些城市人-地交互胁迫程度有增加趋势,分析其主要原因表明,这些城市土地资

源的供给量与需求量整体均有所下降,但土地资源供给量(人均建设用地)减少的幅度大于土地资源需求量(单位 GDP 建设用地)增加的幅度(图 3、图 4)。此外,2002—2017 年,河北其他城市的人-地关系在多数年份呈“强协调”或“弱协调”状态,表明这些城市的人-地关系总体上呈改善趋势。



图 4 京津冀地区单位 GDP 建设用地时空变化特征

Fig.4 Spatial and temporal characteristics of construction land area per unit GDP in Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration

3.2 人-水交互胁迫关系时空变化特征

从城市群整体状况看,2002—2017 年绝大多数年份,京津冀地区人-水关系呈“强协调—弱协调”交替变化状态(图 5),主要原因是京津冀地区总体水资源供给量(人均水资源量)呈波动变化(图 6),而水资源需求量(单位 GDP 水耗)呈持续减少趋势(图 7),只有个别年份(例如 2014 年)水资源供给量减少的幅度大于水资源需求量减少的幅度,因此导致个别年份人-水关系呈“弱胁迫”状态。

从城市群内部不同城市之间的比较看,京津冀地区不同城市的人-水关系存在明显的时空差异(图 5)。2002—2017 年,北京和廊坊的人-水关系主要呈“强协调”或“弱协调”交替变化状态,表明这两个城市的人-水关系持续在改善,主要原因是这两个城市的水资源需求量持续下降,而其水资源供给量波动增加或减少的幅度均小于需求量持续减少的幅度。而其他城市的人-水关系呈“强协调”、“弱协调”、“强胁迫”或“弱胁迫”交替变化,但在多数年份呈“强协调”或“弱协调”状态,表明这些城市的人-水关系总体也呈改善趋势,主要原因是这些城市的水资源需求量在持续下降。此外,河北有些城市(例如,秦皇岛、邯郸和邢台)在 2013 年左右人-水关系呈“弱胁迫”状态,主要原因是水资源供给量有所减少,且其减少的幅度大于水资源需求量。

3.3 人-碳交互胁迫关系时空变化特征

从城市群整体状况看,2002—2017 年,京津冀地区人-碳交互关系表现为“弱协调—强协调”交替变化状态(图 8),表明京津冀地区的人-碳关系呈不断改善状态,主要原因是京津冀地区整体的能源需求量在持续减少,虽然 2011 年之后京津冀地区整体的能源供给量(人均能源生产量)也有所减少(图 9),但其减少幅度小于能源需求量减少的幅度(图 10)。

从城市群内部不同城市之间的比较看,京津冀地区不同城市的人-碳关系存在明显的时空分异,所有城市

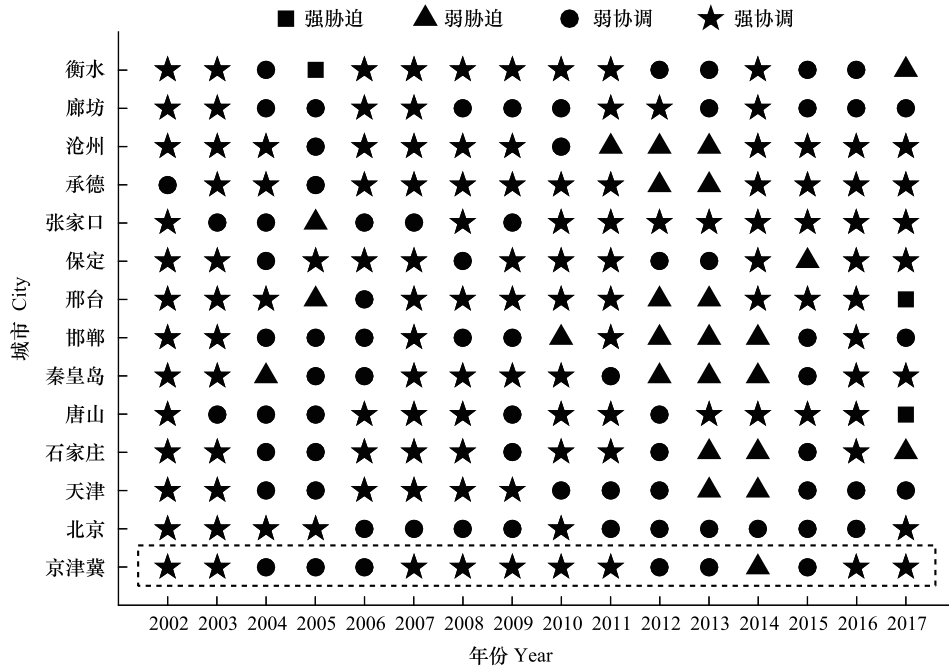


图 5 京津冀地区人-水交互胁迫模式时空变化特征

Fig.5 Spatial and temporal characteristics of human-water interaction in Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration



图 6 京津冀地区人均水资源量时空变化特征

Fig.6 Spatial and temporal characteristics of water resources per capita in Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration

人-碳关系均呈“强协调”、“弱协调”、“强胁迫”或“弱胁迫”交替变化。其中,北京、天津、邯郸、邢台、张家口与沧州等城市多数年份(2002—2017年)的人-碳关系属于“强协调”或“弱协调”状态(图 8),主要原因是这些

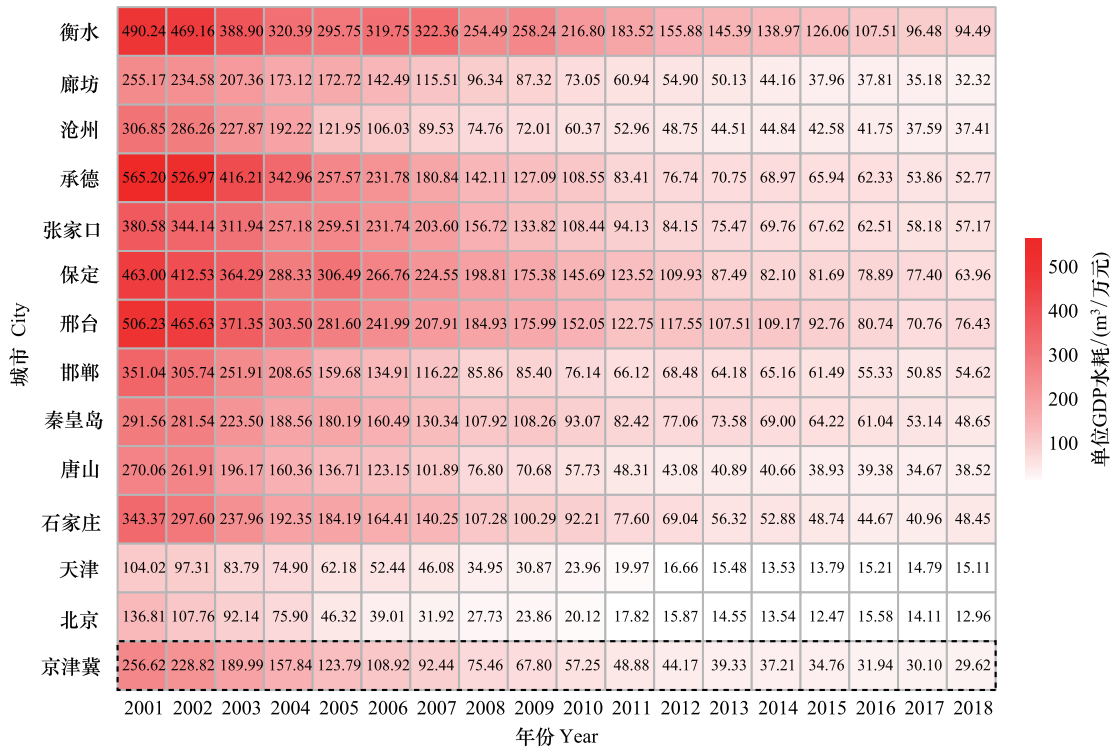


图7 京津冀地区单位 GDP 水耗时空变化特征

Fig.7 Spatial and temporal characteristics of water consumption per unit of GDP in Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration

城市的能源需求量呈持续下降,而能源供给量呈波动变化,而能源供给量减少的年份,其减少幅度也小于能源消耗量的减幅。此外,对于保定、石家庄与唐山等城市,2002—2017年,其人-碳关系仍有较多年份处于“弱胁迫”或“强胁迫”状态,主要原因是这些年份能源供给量有所减少,且其减幅大于能源需求量的减幅。因此,发展清洁能源,增加能源供给量,提高能源利用效率,减少能源需求量,对缓解京津冀人-碳关系具有至关重要的作用。

3.4 人-地、人-水与人-碳交互胁迫作用的叠加效应

叠加人-地、人-水、人-碳交互作用关系的结果表明,从城市群整体状况看,2002—2017年,京津冀地区城镇化与土地、水资源和能源交互作用总体上属于“强协调”或“弱协调”状态(图 11),表明京津冀地区城镇化与土地、水资源和能源的关系均在持续改善。但是,从城市群内部不同城市之间的比较看,除了北京与廊坊主要受单一资源要素胁迫作用外,其他城市在某些年份均同时受两种以上资源要素胁迫的叠加作用,河北多数城市(石家庄、唐山、秦皇岛、邯郸、邢台、保定、沧州与承德等)同时面临土地、水资源与能源三种资源要素胁迫的叠加作用,因此,对于受多种资源要素叠加胁迫作用的城市,城镇发展与资源保护政策的制定要全面考虑不同资源要素利用之间的关联机制,采取有助于解决不同资源要素叠加影响的协同管理措施。

4 结论与讨论

聚集连片的发展模式导致城市群地区资源环境问题的集中与激化,严重阻碍了城市群的可持续发展。本文以发展与保护矛盾突出的京津冀城市群为例,针对人-地、人-水和人-碳的相互作用关系,提出了基于供给、需求变化的城镇化与资源环境要素交互作用的动态评估方法,定量评估了城镇化与不同资源环境要素交互作用的时空变化特征,并综合评估了城镇化与不同资源环境要素交互胁迫的叠加效应,主要结论如下:

(1)城市群整体上,2002—2017年,京津冀地区的人-地、人-水及人-碳关系均以“强协调”或“弱协调”状态为主,表明从城市群整体水平上来看,京津冀地区的城镇发展与资源环境要素的关系在持续改善,改善的主

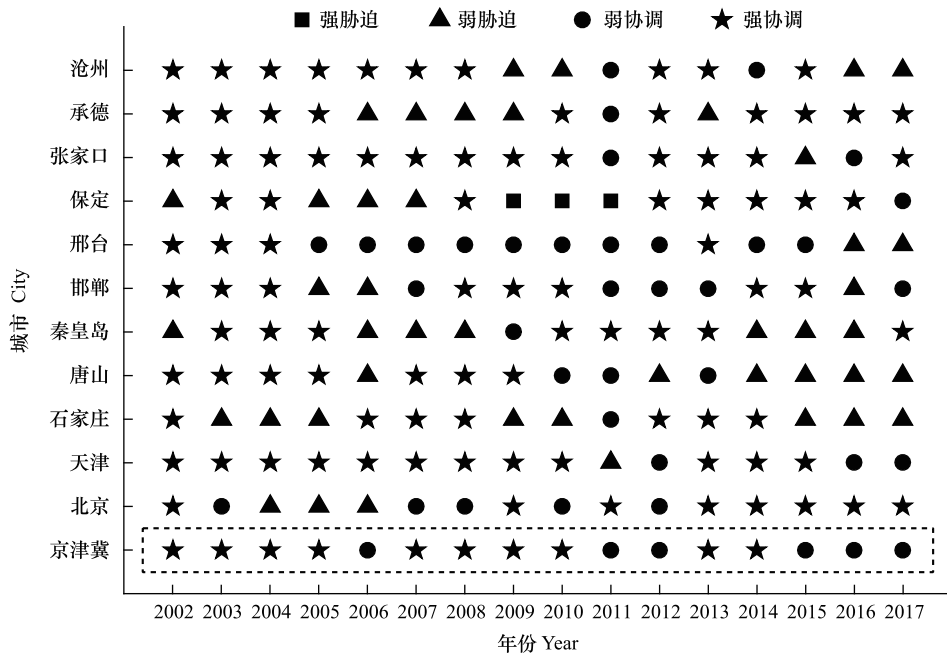


图 8 京津冀地区人-碳交互胁迫模式时空变化特征

Fig.8 Spatial and temporal characteristics of human–energy interaction in Beijing–Tianjin–Hebei megaregion



图 9 京津冀地区人均能源生产量时空变化特征

Fig.9 Spatial and temporal characteristics of energy production per capita in Beijing–Tianjin–Hebei megaregion

要原因均是资源需求量(单位 GDP 资源投入量)的持续降低,而资源供给量受自然资源禀赋的影响呈波动变化,但其变化幅度皆小于资源需求量降少的幅度。因此,提高土地、水资源与能源的利用效率,进一步降低资源的需求量,是继续改善京津冀地区城镇化与资源环境交互胁迫关系的关键所在。

(2)城市群内部,2002—2017年,京津冀地区不同城市的人-地、人-水与人-碳交互胁迫关系均存在明显的时空差异。总体上,除了北京的人-地与人-水关系,以及天津与廊坊的人-水关系一直属于“强协调”或“弱协



图 10 京津冀地区单位 GDP 能耗时空变化特征

Fig.10 Spatial and temporal characteristics of energy consumption per unit of GDP in Beijing-Tianjin-Hebei megaregion

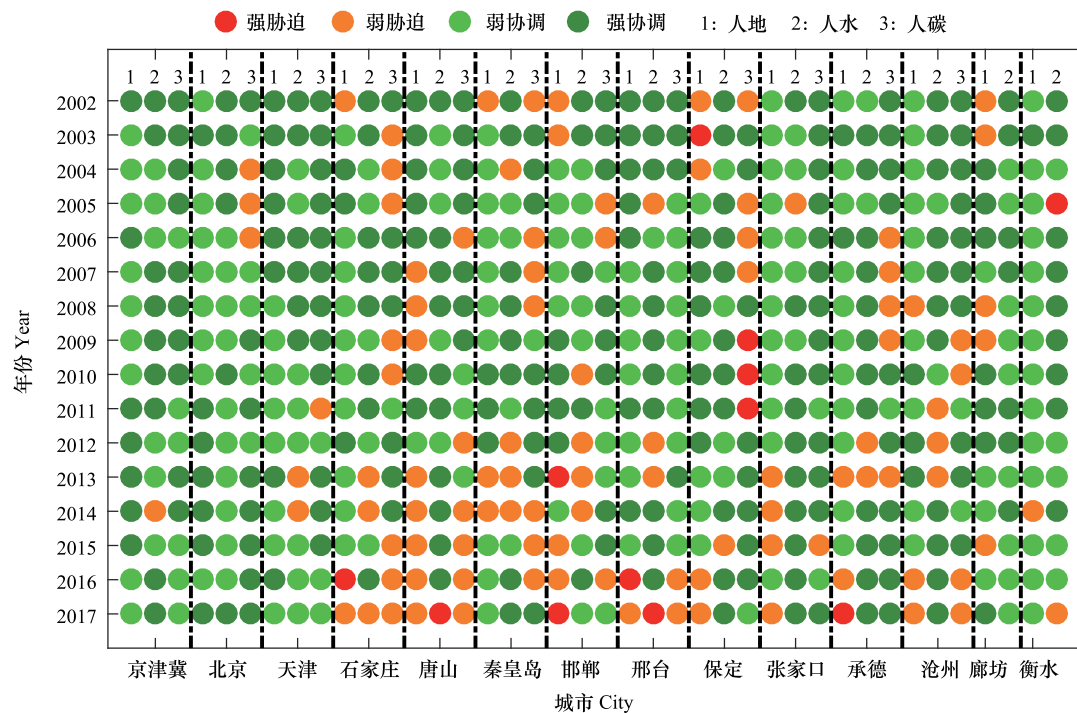


图 11 京津冀地区城镇化与不同资源环境要素交互胁迫的叠加效应

Fig.11 Spatial and temporal characteristics of combined effects of interactions between urbanization and different resources in Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration

调”状态外,其他城市均呈协调与胁迫交替变化,这表明要高效地改善京津冀地区不同城市的资源环境胁迫问题,必须要根据不同城市资源环境胁迫的具体特征和原因采取与之对应的措施。例如,关于人-地关系,对于唐山、邯郸、保定与张家口等人-地胁迫关系较为突出的城市,需要进一步加强土地资源利用效率,降低单位GDP土地用量,进而减少土地资源需求量;关于人-水关系,京津冀地区受水资源时空分布的自然禀赋条件影响,本地水资源供给能力有限,改善人-水胁迫关系的关键在于进一步优化产业结构,改进技术工艺,提高用水效率,进而降低用水需求量;关于人-碳关系,河北的一些城市(保定、石家庄与唐山等)面临着较为突出的人-碳交互胁迫问题,加强发展清洁能源,增加清洁能源供给,调整产业结构,改进生产工艺,提高能源利用效率,进一步降低能源消费量是这类城市要关注的重点。

(3)虽然从京津冀地区整体角度看,人-地、人-水及人-碳关系均以“强协调”或“弱协调”状态为主,但是,城市群内部不同城市之间的差异很大,其中,河北多数城市同时面临不同资源要素的叠加胁迫作用,例如,石家庄、唐山与邢台等城市同时受土地、水资源和能源三种资源的叠加胁迫作用,因此,对于这些受不同资源要素叠加胁迫影响的地区,需要深入了解其土地、水资源与能源利用过程的关联关系,明晰不同资源环境要素的关联机制,进而提出可以协同改善不同资源环境要素胁迫影响的政策或措施,例如,这些城市的水资源利用结构与工艺的改善要同时考虑其对能源利用的影响,进而可以协同改善能源的胁迫影响。

参考文献 (References):

- [1] Zhang K Z, Shen J Q, He R, Fan B H, Han H. Dynamic analysis of the coupling coordination relationship between urbanization and water resource security and its obstacle factor. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2019, 16(23): 4765.
- [2] Rizzo A, Sordi J. Resources and urbanization in the global periphery: perspectives from urban and landscape studies. *Cities*, 2020, 100: 102647.
- [3] Lu Y L, Zhang Y Q, Cao X H, Wang C C, Wang Y C, Zhang M, Ferrier R C, Jenkins A, Yuan J J, Bailey M J, Chen D L, Tian H Q, Li H, von Weizsäcker E U, Zhang Z X. Forty years of reform and opening up: China's progress toward a sustainable path. *Science Advances*, 2019, 5(8): eaau9413.
- [4] 国家统计局. 中华人民共和国 2019 年国民经济和社会发展统计公报. (2020-02-28). http://www.stats.gov.cn/tjsj/zxfb/202002/t20200228_1728913.html.
- [5] Lane M. The carrying capacity imperative: assessing regional carrying capacity methodologies for sustainable land-use planning. *Land Use Policy*, 2010, 27(4): 1038-1045.
- [6] Liao S J, Wu Y, Wong S W, Shen L Y. Provincial perspective analysis on the coordination between urbanization growth and resource environment carrying capacity (RECC) in China. *Science of the Total Environment*, 2020, 730: 138964.
- [7] 方创琳, 周成虎, 顾朝林, 陈利顶, 李双成. 特大城市群地区城镇化与生态环境交互耦合效应解析的理论框架及技术路径. *地理学报*, 2016, 71(4): 531-550.
- [8] Cui Y, Feng P, Jin J L, Liu L. Water resources carrying capacity evaluation and diagnosis based on set pair analysis and improved the entropy weight method. *Entropy*, 2018, 20(5): 359.
- [9] Meng C H, Du X Y, Ren Y T, Shen L Y, Cheng G Y, Wang J H. Sustainable urban development: an examination of literature evolution on urban carrying capacity in the Chinese context. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 277: 122802.
- [10] Wei X X, Shen L Y, Liu Z, Luo L Y, Wang J H, Chen Y. Comparative analysis on the evolution of ecological carrying capacity between provinces during urbanization process in China. *Ecological Indicators*, 2020, 112: 106179.
- [11] 曹智, 闵庆文, 刘某承, 白艳莹. 基于生态系统服务的生态承载力: 概念、内涵与评估模型及应用. *自然资源学报*, 2015, 30(1): 1-11.
- [12] 赵东升, 郭彩霞, 郑度, 刘磊, 吴绍洪. 生态承载力研究进展. *生态学报*, 2019, 39(2): 399-410.
- [13] Liao X, Ren Y T, Shen L Y, Shu T H, He H M, Wang J H. A “carrier-load” perspective method for investigating regional water resource carrying capacity. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 269: 122043.
- [14] Magri A, Berezowska-Azzag E. New tool for assessing urban water carrying capacity (WCC) in the planning of development programs in the region of Oran, Algeria. *Sustainable Cities and Society*, 2019, 48: 101316.
- [15] 张永勇, 夏军, 王中根. 区域水资源承载力理论与方法探讨. *地理科学进展*, 2017, 26(2): 126-132.
- [16] 刘晓, 陈隽, 范琳琳, 崔胜玉. 水资源承载力研究进展与新方法. *北京师范大学学报: 自然科学版*, 2014, 50(3): 312-318.
- [17] Sun M Y, Wang J G, He K Y. Analysis on the urban land resources carrying capacity during urbanization—A case study of Chinese YRD. *Applied Geography*, 2020, 116: 102170.

- [18] Luo W Z, Ren Y T, Shen L Y, Zhu M C, Jiang Y M, Meng C H, Zhang P X. An evolution perspective on the urban land carrying capacity in the urbanization era of China. *Science of the Total Environment*, 2020, 744: 140827.
- [19] 靳相木, 柳乾坤. 基于三维生态足迹模型扩展的土地承载力指数研究——以温州市为例. *生态学报*, 2017, 37(9): 2982-2993.
- [20] Wang S, Yang F L, Xu L, Du J. Multi-scale analysis of the water resources carrying capacity of the Liaohe Basin based on ecological footprints. *Journal of Cleaner Production*, 2013, 53: 158-166.
- [21] 贾克敬, 张辉, 徐小黎, 祁帆. 面向空间开发利用的土地资源承载力评价技术. *地理科学进展*, 2017, 36(3): 335-341.
- [22] Fang H Y, Gan S W, Xue C Y. Evaluation of regional water resources carrying capacity based on binary index method and reduction index method. *Water Science and Engineering*, 2019, 12(4): 263-273.
- [23] Lu L, Xu H W, Wang Y X, Yang Y. Evaluation of water environmental carrying capacity of city in Huaihe River Basin based on the AHP method: a case in Huai'an City. *Water Resources and Industry*, 2017, 18: 71-77.
- [24] Zhang J, Zhang C L, Shi W L, Fu Y C. Quantitative evaluation and optimized utilization of water resources-water environment carrying capacity based on nature-based solutions. *Journal of Hydrology*, 2019, 568: 96-107.
- [25] 王建华, 翟正丽, 桑学锋, 李海红. 水资源承载力指标体系及评判准则研究. *水利学报*, 2017, 48(9): 1023-1029.
- [26] Wang Z H, Yang L, Yin J H, Zhang B. Assessment and prediction of environmental sustainability in China based on a modified ecological footprint model. *Resources, Conservation and Recycling*, 2018, 132: 301-313.
- [27] 陈晓杰, 王静, 孔雪松, 李泽慧. 武汉城市圈生态足迹时空差异及其与经济协同性的协同性. *生态学杂志*, 2020, 39(10): 3452-3462.
- [28] 杨柳, 刘少博, 马年明. 基于生态足迹和生态服务价值的生态承载力贡献率研究. *水电能源科学*, 2020, 38(6): 137-140.
- [29] Wu C G, Zhou L Y, Jin J L, Ning S W, Zhang Z X, Bai L. Regional water resource carrying capacity evaluation based on multi-dimensional precondition cloud and risk matrix coupling model. *Science of the Total Environment*, 2020, 710: 136324.
- [30] Tehrani N A, Makhdoum M F. Implementing a spatial model of Urban Carrying Capacity Load Number (UCCLN) to monitor the environmental loads of urban ecosystems. Case study: Tehran metropolis. *Ecological Indicators*, 2013, 32: 197-211.
- [31] Peng T, Deng H W. Comprehensive evaluation on water resource carrying capacity based on DPESBR framework: a case study in Guiyang, Southwest China. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 268: 122235.
- [32] 郭倩, 汪嘉杨, 张碧. 基于 DPSIRM 框架的区域水资源承载力综合评价. *自然资源学报*, 2017, 32(3): 484-493.
- [33] 方创琳, 任宇飞. 京津冀城市群地区城镇化与生态环境近远程耦合能值代谢效率及环境压力分析. *中国科学: 地球科学*, 2017, 47(7): 833-846.
- [34] Kennedy CA, Stewart I, Facchini A, Cersosimo I, Mele R, Chen B, Uda M, Kansal A, Chiu A, Kim K G, Dubeux C, La Rovere E L, Cunha B, Pincetl S, Keirstead J, Barles S, Pusaka S, Gunawan J, Adegbile M, Nazariha M, Hoque S, Marcotullio P J, Otharón F G, Genena T, Ibrahim N, Farooqui R, Cervantes G, Sahin A D. Energy and material flows of megacities. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2015, 112(19): 5985-5990.
- [35] Franzese P P, Rydberg T, Russo G F, Ulgiati S. Sustainable biomass production: a comparison between gross energy requirement and emergy synthesis methods. *Ecological Indicators*, 2009, 9(5): 959-970.
- [36] Zhang M, Liu Y M, Wu J, Wang T T. Index system of urban resource and environment carrying capacity based on ecological civilization. *Environmental Impact Assessment Review*, 2018, 68: 90-97.
- [37] 封志明, 杨艳昭, 闫慧敏, 潘韬, 李鹏. 百年来的资源环境承载力研究: 从理论到实践. *资源科学*, 2017, 39(3): 379-395.
- [38] Zhang L H, Nie Q Y, Chen B Y, Chai J X, Zhao Z Y. Multi-scale evaluation and multi-scenario simulation analysis of regional energy carrying capacity—Case study: China. *Science of the Total Environment*, 2020, 734: 139440.
- [39] 任宇飞, 方创琳, 李广东, 孙思奥, 鲍超, 刘若文. 城镇化与生态环境近远程耦合关系研究进展. *地理学报*, 2020, 75(3): 589-606.
- [40] Yang Z S, Yang H, Wang H. Evaluating urban sustainability under different development pathways: a case study of the Beijing-Tianjin-Hebei region. *Sustainable Cities and Society*, 2020, 61: 102226.
- [41] 梁龙武, 王振波, 方创琳, 孙湛. 京津冀城市群城市化与生态环境时空分异及协同发展格局. *生态学报*, 2019, 39(4): 1212-1225.
- [42] 余灏哲, 李丽娟, 李九一. 基于量-质-域-流的京津冀水资源承载力综合评价. *资源科学*, 2020, 42(2): 358-371.