

DOI:10.19322/j.cnki.issn.1006-4710.2022.04.006

基于脱钩分析的 2004—2017 年京津冀城市群 水足迹与经济协调关系研究

沈瑞华, 姚 磊

(山东师范大学 地理与环境学院, 山东 济南 250358)

摘要: 京津冀地区是我国的政治文化中心, 经济发达且人口密集, 但目前面临着严重的水资源危机。分析水资源消耗、水资源污染与经济发展之间的脱钩关系, 有利于促进水资源利用与经济协调发展。本文利用水足迹模型与方法计算京津冀城市群 2004—2017 年的水量足迹与水质足迹, 分析其 14 年来的水资源利用情况。同时利用 Tapio 脱钩模型对水资源消耗(水量足迹)、水资源污染(水质足迹)与经济发展的协调关系进行分析与评价。结果表明: ①2004—2017 年, 研究区水量足迹呈波动上升趋势, 而人均水量足迹缓慢减少, 水资源利用效率不断提高, 但水资源利用结构不合理, 农业生产用水占比过大; ②水质足迹呈现明显的下降趋势, 总体水环境得到明显改善, 政府出台的水环境治理政策取得了显著成效; ③水量足迹与经济发展的脱钩状态以弱脱钩为主, 水资源消耗与经济发展处于初级协调状态; ④水质足迹与经济发展的脱钩由弱脱钩向强脱钩状态发展, 以强脱钩状态为主, 逐步实现了水环境污染与经济发展的理想脱钩状态。

关键词: 京津冀; 水量足迹; 水质足迹; 经济发展; 脱钩分析

中图分类号: TV213.4

文献标志码: A

文章编号: 1006-4710(2022)04-0507-12

Decoupling analysis of water footprint and economic development in Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration from 2004 to 2017

SHEN Ruihua, YAO Lei

(College of Geography and Environment, Shandong Normal University, Jinan 250358, China)

Abstract: The Beijing-Tianjin-Hebei region is the political and economic center of China, which is economically developed and densely populated but is currently facing a serious water crisis. An analysis of the decoupling relationship between water consumption, water pollution and economic development is conducive to the promotion of coordination of water use and economic development. This paper uses the water footprint model and method to calculate the water quantity footprint and water quality footprint of the Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration from 2004 to 2017, with the water use over the 14 years analyzed. At the same time, the Tapio decoupling model is used to analyze and evaluate the coordination between water resources consumption (water quantity footprint) and economic growth, water resources pollution (water quality footprint) and economic growth. The results showed that: ①The water quantity footprint of the study area indicates a fluctuating upward trend from 2004 to 2017, while the per capita water quantity footprint decreased slowly, and the utilization efficiency of water resources kept improving; however,

收稿日期: 2021-12-19; 网络出版日期: 2022-04-16

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1294.N.20220414.1816.004.html>

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(42171094); 教育部人文社会科学项目(20YJCZH198); 中国博士后科学基金资助项目(2017M622256); 山东省自然科学基金资助项目(ZR2021MD095, ZR2021QD093)

第一作者: 沈瑞华, 女, 硕士生, 研究方向为城市水资源风险。E-mail: srh2455089583@163.com

通信作者: 姚磊, 男, 博士, 副教授, 研究方向为城市化及其生态环境效应。E-mail: alex_yaolei@126.com

the utilization structure of water resources was unreasonable, and the proportion of water used in agricultural production was too large. ②The water quality footprint has shown an obvious downward trend, the overall water environment has been significantly improved, and the water environment governance policies issued by the government have achieved remarkable results. ③The decoupling state of water quantity footprint and economic development was mainly weak decoupling, and the consumption of water resources and economic development was in the primary coordination state. ④The decoupling of water quality footprint from economic development developed from weak decoupling to strong decoupling, with the ideal decoupling state of water environment pollution and economic development gradually realized.

Key words: Beijing-Tianjin-Hebei; water quantity footprint; water quality footprint; economic development; decoupling analysis

水资源是一个国家社会经济健康持续发展的最基础资源。中国是世界上13个贫水国之一^[1],其淡水资源总量约占全世界水资源量的6%,居世界第四位,但人均水资源量仅为 $2\ 060\text{m}^3$,排世界121位。根据《中国统计年鉴(2005—2018)》,中国人口从13.0亿人增加到14.0亿人,国内生产总值从16.1万亿元增加到83.1万亿元^[2]。经济和人口的快速增长带来了对水资源的巨大需求,同时,工业废水、生活废水和农业废水的排放更加剧了我国水资源的短缺,我国正面临着严重的水资源危机。因此,如何有效地开发和利用水资源,降低单位经济发展对水资源的消耗,已经成为我国面临的重大问题。为了从根本上促进经济良性发展,应打破原有的资源利用模式,即控制水资源利用和废水排放的过度增长,以减少经济发展对水资源的消耗和废水排放的影响^[3]。因此,科学分析水资源利用状况,合理评价水资源利用、废水排放和经济发展之间的关系,对解决我国水资源问题意义重大^[3]。

目前,缓解水资源短缺主要有两种途径:一是将实体水(直接消耗的水资源)从一个地区转移到另一个地区,例如中国的南水北调工程;二是通过产品和服务贸易“引入”虚拟水^[4]。虚拟水是指在产品和服务生产过程中所使用的水量,它既不考虑某个时期,也不考虑某个地区。它以不可见的形式蕴藏在这些产品和服务中,当人们消费这些产品和服务时,实际上就是以虚拟水的形式消耗了水资源^[5,6]。基于虚拟水的概念,Hoekstra^[7]提出了水足迹理论,水足迹是指在一定的物质条件生活标准下,生产一个国家、一个城市或者一个人消费的产品和服务所需要的水资源数量^[1,6]。它描述了维持某一群体正常生活所需的商品和服务所消耗的实际水量,不仅将直接消耗的水资源包含在内,而且还将虚拟水涵盖在内。

因此,基于水足迹理论来评价水资源的利用状况,不仅可以反映出实体水的利用状况,还可以反映虚拟水及其贸易状况,从而使水资源利用评价更为全面客观^[8]。基于这一理论,大量学者开始利用水足迹模型进行水资源消耗和水污染研究。例如Yu等^[4]基于多区域投入产出模型进行北京市水足迹的定量核算,并定义了多个指标来评价北京市水足迹网络的脆弱性。An等^[1]从水足迹的角度分析了淮河流域2001—2016年的水资源供需情况,同时对水需求驱动因素进行了分析,结果表明,经济发展是最主要的因素。Feng等^[9]基于化学需氧量、氨氮、总氮、总磷四种污染物,定量分析了中国2003—2018年的灰水足迹和地表水污染水平,结果表明,研究期间灰水足迹和地表水污染水平均不断降低。Dong等^[10]以常州经济技术开发区为例,从企业、污水处理厂、居民生活和农业四方面对工业园区进行灰水足迹评价,结果发现,非关联企业是废水排放的主要来源,其中总磷和氨氮的污染最严重。这些研究都利用水足迹理论定量分析了研究区的水资源利用情况,但仅进行水资源利用评价是远远不够的,因为区域水资源利用情况与社会经济发展是密不可分的。因此,有必要就水资源的利用情况与社会经济发展之间的关系进行探究。

在衡量环境压力与经济的关系方面,脱钩理论及其方法得到了广泛利用,这也促使很多学者从新的角度探索水资源利用情况和经济发展之间的关系。李宁等^[11]将长江中游城市群整体作为研究对象,利用水足迹理论与方法,对长江中游城市群近16年来水资源利用与经济协调发展的脱钩情况进行分析,结果表明,水资源利用与经济发展基本处于相对脱钩的初级协调状态。Kong等^[12]以京津冀城市群为例,利用Tapio脱钩模型从水量足迹的角度

探索了2004—2017年水资源利用情况与经济协调发展的脱钩关系,发现水足迹与经济发展在多数年份呈现弱脱钩状态。Liu等^[13]利用脱钩模型分析了中国2010—2017年受废水排放破坏的生态环境与经济发展之间的脱钩关系,结果表明,二者的脱钩已经出现,主要驱动力是中国环境政策的严格实施和产业结构的绿色升级。然而,这些研究大多只关注水量或水质单方面与经济发展的关系,很少将两者结合起来共同考虑。实际上,对于一个地区来说,应将水资源的消耗、水资源的污染以及经济发展看作一个整体,只考虑水资源的消耗与经济发展的脱钩情况或只考虑水资源污染与经济发展的脱钩情况,其结果都是不全面的,忽视了资源、环境和经济的系统完整性^[14,15]。因此,有必要从水量、水质两个角度,探讨水资源利用与经济发展之间的脱钩状态,评估水资源消耗、水资源污染和经济发展的潜在协调关系。

京津冀城市群是我国的政治、文化中心,也是中国北方经济的核心地区。该地区包括北京市、天津市和河北省的11个地级市,各市地理位置紧密相连,不仅资源禀赋相同,气候特征相似,而且水资源系统一体化^[14]。然而,随着京津冀城市群经济的快速发展和人民生活水平的不断提高,水资源短缺和水资源污染已经成为突出问题^[16]。一方面,该地区降水量偏少,地下水过量开采,而以大水漫灌为主的农业灌溉方式导致农业生产过程中消耗、污染了大量水资源^[17];另一方面,生产、生活废水没能得到全面而有效的处理,废水排放量逐渐超出了水体的自净能力,水资源短缺和水资源污染已经成为京津冀城市群的突出问题^[18,19]。因此,本文选择京津冀城市群作为研究区,利用用水数据(生活用水、工业用水、农业用水、生态用水)、进出口数据和废水排放数据(农业废水、生活废水、工业废水),通过水足迹理论和方法,对京津冀城市群的水资源状况进行分析。同时,利用Tapio脱钩模型评价水资源消耗与经济协调发展的协调关系以及水资源污染与经济协调发展的协调关系,以期为该区域的可持续发展决策提供参考依据。

1 研究区和数据源

1.1 研究区概况

京津冀城市群包括北京市、天津市和河北省的保定、廊坊、唐山、石家庄、邯郸、秦皇岛、张家口、承德、沧州、邢台、衡水11个地级市^[20]。该区位于 $36^{\circ}03'N \sim 42^{\circ}40'N$, $113^{\circ}27'E \sim 119^{\circ}50'E$,紧靠渤海,大

部分地区处于海河流域,部分地区处于滦河流域^[21]。京津冀城市群总面积约为 21.8万 km^2 ,占国土区域面积的2.3%。京津冀城市群的地理位置如图1所示。《中国水资源公报(2017)》显示,2017年京津冀城市群的水资源总量为 $181.1 \times 10^8 \text{ m}^3$,约占全国水资源总量的0.6%,而年末常住人口却占到全国的7.9%,地区生产总值占到国内生产总值的8.8%,水资源紧张程度高。京津冀各地区在区域水资源利用中都发挥着不同的作用^[18]。随着京津冀区域一体化的推进,实现水资源协同发展、水资源公平利用和水污染的联防联控至关重要^[22]。



图1 京津冀城市群地理位置图

Fig. 1 Geographical location of Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration in China

注:该图基于自然资源部标准地图服务系统的审图号为GS(2016)1610的标准地图制作,底图无修改。

1.2 数据源

本文将京津冀城市群作为研究对象,受数据限制,选择2004—2017年为研究期,汇总并计算2004—2017年各类研究数据。所涉及的数据主要包括水资源数据、农业数据、进出口数据和经济数据等。

工业水量足迹、生态水量足迹和生活水量足迹分别用工业用水量、生态用水量和生活用水量表示,这些数据来源于《中国统计年鉴(2005—2018)》^[2]和《中国水资源公报(2004—2017)》^[23]。工业废水排放量、生活废水排放量、化学需氧量(COD)排放数据、氨氮(AN)排放数据、作物生长氮肥施用量数据来源于历年的《中国环境统计年鉴》^[24]、《中国水资源公报》^[23]以及各省(市)统计年鉴^[25-27]。

农业数据包括农作物生产数据和家畜养殖数据。农业生产用水量采用“自下而上”的方法,通过

每年单位农产品的虚拟水含量乘以农业产品产量来计算^[28,29]。由于本文对水量足迹的计算是一个大致估算,因此研究期内每年单位农产品的虚拟水含量均用相同的值表示。选取粮食、棉花、油料、水果、蔬菜、猪肉、牛肉、羊肉、禽肉、禽蛋等主要农产品,其虚拟水含量见表1^[6,11,22,30]。农业生产数据主要包括京津冀各省市所选作物的每公顷土地产量、一年的总产量、动物产品的年产量等数据。数据来源于各省市历年统计年鉴和《中国区域经济统计年鉴》^[31]。

进出口、GDP等经济指标数据可以从《中国统计年鉴(2005—2018)》^[2]中获得。进出口虚拟水量的计算方法是将各地区进出口总额乘以各地区平均万元GDP用水量,由于其他经济指标均以人民币表示,因此各地区进出口贸易总额通过中国历年人民币市场汇率由美元折合成人民币进行计算^[12]。同时,考虑到有些进出口数据难以获取,所以本文忽略了进口再出口的虚拟水含量计算^[11,12]。

表1 农作物产品和动物产品的单位虚拟水含量

Tab.1 Virtual water content per unit of crop products and livestock products

产品	单位虚拟水含量/($\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$)
粮食	1.130
棉花	4.4
油料	3.967
水果	0.82
蔬菜	0.1
猪肉	2.21
牛肉	12.56
羊肉	5.202
禽肉	3.652
禽蛋	3.55
牛奶	1.9

2 研究方法

2.1 水量足迹计算模型

根据水足迹理论,水足迹描述的是在生产维持某一群体正常生活所需的产品和服务时所消耗的实际水资源的数量^[32,33]。由此可知,水足迹的来源有两个:①在人类社会生产生活中所消耗的实体水资源量;②用于生产产品和服务的虚拟水量^[33]。其公式为:

$$WFP = IWFP + EWFP \quad (1)$$

式中: WFP 为总体水量足迹,表示研究区一年内消耗的水资源总量(m^3); $IWFP$ 为内部水足迹(m^3),是指研究区内当地居民每年生产商品和服务所消耗的水量; $EWFP$ 为外部水足迹(m^3),是指研究区内当地居民每年消费的进口虚拟水数量。

$$IWFP = WFP_a + WFP_i + WFP_d + WFP_e - FW_e \quad (2)$$

式中: WFP_a 为农业水量足迹,以研究区一年内的农业生产耗水量(m^3)来表示,包括农作物产品生产用水量和动物产品生产用水量; WFP_i 为工业水量足迹,表示研究区一年内的工业生产用水量(m^3); WFP_d 为生活水量足迹,表示研究区一年内的居民生活用水量(m^3); WFP_e 为生态水量足迹,表示研究区一年内的生态环境用水量(m^3); FW_e 表示研究区一年内出口的虚拟水量(m^3)。

$$EWFP = FW_i - FW_{\text{re-export}} \quad (3)$$

式中: FW_i 为研究区一年内从其他区域进口的虚拟水量(m^3); $FW_{\text{re-export}}$ 为研究区从其他区域进口再出口的虚拟水量(m^3),受数据限制,本文忽略了进口再出口的虚拟水含量。

2.2 水质足迹计算模型

Hoekstra等^[34]在2002年提出了灰水足迹的概念,并将其定义为在水环境质量标准的基础上,将污染物负荷同化到高于特定环境水质标准所需的淡水数量^[35,36]。它是定量评价人类活动对淡水系统影响的有效指标。为了与水量足迹进行比较,本文利用水质足迹表示灰水足迹,同时以灰水足迹的计算方法计算水质足迹。农业生产、工业生产和居民生活被认为是水体中污染物的三个主要来源^[9,34-36]。因此,研究区域的水质足迹为吸收农业、工业和生活部门污染所需的总水量^[9,34,35]。

2.2.1 农业水质足迹

农业水质足迹是指吸收农业生产活动(如禽畜粪便、牲畜房清洗、肥料和农药的使用)造成的水污染物所需的淡水量^[35]。根据Hoekstra提出的灰水足迹计算模型,水质足迹由最关键的污染物决定,根据现有的研究,与COD和磷等污染物来源相比,农业水资源污染主要由氮(N)引起,包括氮肥的使用、农药的喷洒等等^[10]。同时,由于水体稀释氮肥,所以假设施氮量中的氮以一定的比例进入水体,那么农业水质足迹的估算模型为:

$$GFP_a = \frac{\alpha N}{C_{\max} - C_{\text{nat}}} \quad (4)$$

式中: GFP_a 为一年的农业水质足迹(m^3); α 为氮肥

入水率(%),根据前人的研究,选用全国平均氮肥入水率7%进行计算^[3, 35]; N 为一年的农作物生产的施氮量(kg); C_{\max} 为污染物水质标准浓度(kg/m³),《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)^[37]有五个等级,本文采用第三等级作为废水污染控制的最低要求^[11, 22, 34],所以氮的最大允许浓度为1mg/L; C_{nat} 为水的自然浓度(kg/m³),是指在自然条件下,不受人为影响的水体污染浓度,通常假定为0^[3, 22, 34]。

2.2.2 工业水质足迹

工业水质足迹被定义为吸收工业生产活动造成的水环境污染所需的淡水量^[35]。工业部门产生的工业废水直接排放到水体中,因此工业废水中的主要污染物也可以直接计算。根据《中国环境统计年鉴》,COD和AN是工业废水排放的主要污染物,所以本文采用COD和AN作为指标来计算工业水质足迹^[3, 6, 11, 22, 30],计算模型如下:

$$GFP_i = \max(GFP_{i(\text{COD})}, GFP_{i(\text{AN})}) \quad (5)$$

$$GFP_{i(j)} = \frac{L_{i(j)}}{C_{\max} - C_{\text{nat}}} - IWD \quad (6)$$

式中: GFP_i 为研究区一年内的工业水质足迹(m³); $GFP_{i(j)}$ 为基于 j 类污染物的工业水质足迹(m³), j 的取值为COD和AN; $L_{i(j)}$ 表示工业生产中 j 类污染一年内的排放量(kg); IWD 为研究区一年内工业废水排放总量(m³); C_{\max} 为污染物水质标准浓度(kg/m³),参照前述标准,COD和AN的水质标准浓度分别为20mg/L和1.0 mg/L^[22, 34]; C_{nat} 为水的自然浓度(kg/m³),参考文献^[36],COD和AN的水的自然浓度分别为0mg/L和0.015mg/L。

2.2.3 生活水质足迹

与农业水质足迹和工业水质足迹相似,生活水质足迹是指吸收居民日常生活排放的废水中所含污染物所需的淡水量^[35]。生活废水排放和工业废水排放都属于点源污染,且生活废水中的主要污染物也是COD和AN^[3],因此,生活灰水足迹的计算方法与工业灰水足迹的计算方法相同。

$$GFP_d = \max(GFP_{d(\text{COD})}, GFP_{d(\text{AN})}) \quad (7)$$

$$GFP_{d(j)} = \frac{L_{d(j)}}{C_{\max} - C_{\text{nat}}} - DWD \quad (8)$$

式中: GFP_d 为研究区一年内的生活水质足迹(m³); $GFP_{d(j)}$ 为基于 j 类污染物的生活水质足迹(m³), j 的取值为COD和AN; $L_{d(j)}$ 为居民日常生活中 j 类污染物一年内的排放量(kg); DWD 是指研究区一年内生活废水排放总量; C_{\max} 和 C_{nat} 的取值与工业水质足迹中的取值相同^[3, 22, 34]。

2.2.4 总体水质足迹

研究区的总体水质足迹可以通过农业水质足迹、工业水质足迹和生活水质足迹相加得到:

$$GFP = GFP_a + GFP_i + GFP_d \quad (9)$$

式中: GFP 表示研究区的总体水质足迹。

2.3 水资源利用与经济协调发展脱钩评价模型

脱钩(decoupling)是指在经济发展过程中,物质能源消耗总量不随着经济的增长而增加,反而减少的情况。到目前为止,有两种脱钩模型被广泛应用,即OECD模型和Tapio模型^[38]。相比OECD模型,Tapio模型提供了更精细的脱钩状态区分,综合考虑了总量变化和相对量变化,在判定脱钩状态的演替过程方面有一定的优势^[38]。所以本文选择Tapio模型来检验水资源利用与经济发展之间的脱钩状态。

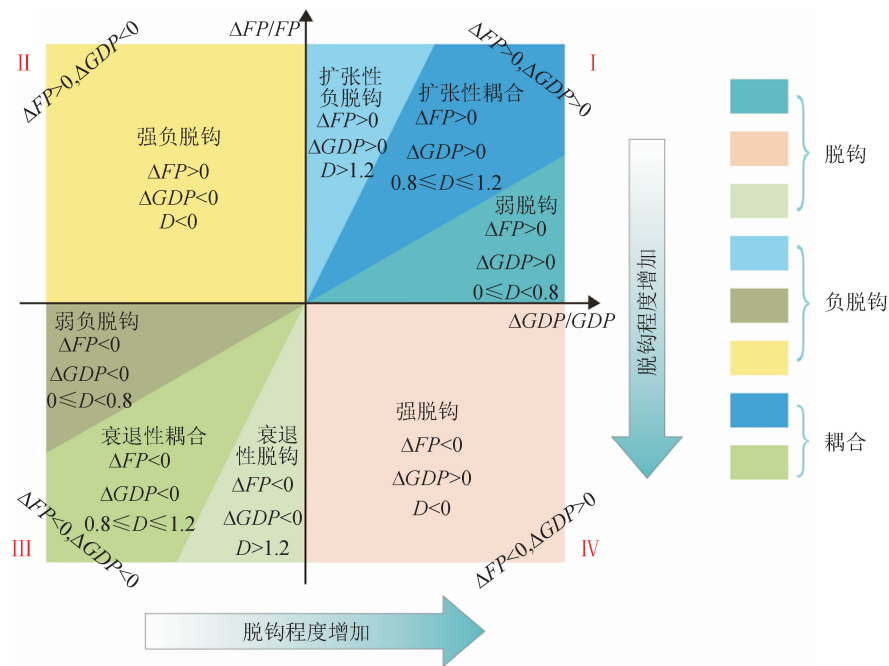
根据脱钩模型理论,脱钩状态可以分为两种类型,即相对脱钩和绝对脱钩^[3, 12]。相对脱钩是指在经济发展过程中,水资源消耗以一种相对较低的速度增长,绝对脱钩是指在经济发展过程中,水资源消耗的速度减少^[39]。因此,水资源利用和经济发展协调发展的理想状态是绝对脱钩状态。在这种状态下,以最小的水资源消耗量实现了最大化的经济增长。本文利用脱钩评价模型,分析了水量足迹与经济协调发展的协调关系以及水质足迹与经济协调发展的协调关系。Tapio脱钩模型的表达式为:

$$D_{\text{WFP}} = \frac{\Delta \text{WFP}}{\Delta \text{GDP}} = \frac{(\text{WFP}_t - \text{WFP}_{t-1}) / \text{WFP}_{t-1}}{(\text{GDP}_t - \text{GDP}_{t-1}) / \text{GDP}_{t-1}} \quad (10)$$

$$D_{\text{GFP}} = \frac{\Delta \text{GFP}}{\Delta \text{GDP}} = \frac{(\text{GFP}_t - \text{GFP}_{t-1}) / \text{GFP}_{t-1}}{(\text{GDP}_t - \text{GDP}_{t-1}) / \text{GDP}_{t-1}} \quad (11)$$

式中: D_{WFP} 和 D_{GFP} 是水资源利用的相关指数,分别用于描述水资源消耗与经济协调发展的协调情况、水资源污染与经济协调发展的协调情况; ΔGDP 是指国内生产总值的年增长率; ΔWFP 和 ΔGFP 分别表示水量足迹的年增长率和水质足迹的年增长率; GDP_t 和 GDP_{t-1} 分别表示第 t 期、第 $t-1$ 期期末的国民生产总值(亿元); WFP_t 和 WFP_{t-1} 分别表示第 t 期、第 $t-1$ 期期末的水量足迹总量(亿 m³); GFP_t 和 GFP_{t-1} 分别表示第 t 期、第 $t-1$ 期期末的水质足迹总量(亿 m³)。

根据Tapio模型和研究数据的动态特性,本文将脱钩状态划分为8种^[12, 38-40],具体脱钩程度判断标准如图2所示。



注: ΔFP 为水资源消耗(水资源污染)增长速度; ΔGDP 为经济增长速度; D 为脱钩指数。

图2 基于 Tapio 模型的脱钩状态分类

Fig. 2 Classification of decoupling states in the Tapio model

由图2可知,当经济增长的速度(ΔGDP)比水资源消耗(水资源污染)的速度(ΔFP)快时,此时即为脱钩状态。这种状态分为三种类型:强脱钩、弱脱钩和衰退性脱钩,其分别位于第一象限、第二象限和第四象限。位于第四象限的强脱钩状态是最理想的状态,在这种情况下, $\Delta GDP > 0, \Delta FP < 0$,即随着经济的增长,水资源消耗(水资源污染)的速度非但没有增加,反而有所下降。

当经济增长的速度与水资源消耗(水资源污染)的速度一致时,此时二者的关系为耦合状态。这种状态分为两种类型:扩张性耦合和衰退性耦合,其分别位于第一象限和第三象限,所代表的含义分别为随着经济的增长或衰退,水资源消耗(水资源污染)的程度也同步增长或衰退。

当水资源消耗(水资源污染)的速度超过经济增长的速度时,此时二者表现为负脱钩状态,在这种状态下,地区经济的发展严重依赖于水资源消耗(水资源污染)。

该状态可以细分为三种类型:强负脱钩、弱负脱钩和扩张性负脱钩,其分别位于第二象限、第三象限和第一象限。位于第二象限的强负脱钩是最糟糕的状态,此时, $\Delta GDP < 0, \Delta FP > 0$,即在地区经济衰退的情况下,水资源消耗(水资源污染)的速度还在增加。

3 结果分析

3.1 水量足迹和水质足迹

3.1.1 水量足迹

京津冀城市群2004—2017年的水量足迹计算结果以及水量足迹各组成部分占总体水量足迹的比例,如表2所示。

从表2可知,京津冀城市群总体水量足迹大致呈上升趋势,由2004年的1396.5亿 m^3 逐渐增加到2017年的1439.9亿 m^3 ,而人均水量足迹总体呈小幅波动状态,与2004年相比,2017年人均水量足迹略有下降,反映出用水效率有所提高,居民的节水意识有所增强。

从表2还可看出,京津冀城市群水量足迹占比最大的为农业水量足迹,其多年平均占比超过90%,说明农业生产过程中水量消耗巨大,从2004年至2017年,农业水量足迹呈缓慢减少趋势。同时,京津冀城市群的工业水量足迹大体呈逐年下降的趋势,且占比稳定在2%左右,说明京津冀城市群工业生产过程中的用水效率较高。生活水量足迹在2004年至2017年间总体呈缓慢增长的趋势,年度占比保持在2%~3%的水平,是除了农业生产部门外的第二大用水部门。说明随着京津冀城市群的快速发展,当地居民增加了对淡水资源的需求。

对于生态水量足迹,2004年至2017年的变化幅度最为明显,其占比从2004年的最小值0.25%增加到2017年的最大值1.81%,虽然其占比仍保持在一个相对较低的水平,但14年间增加为原来的7.24倍。说明京津冀城市群生态环境用水量逐年

增加,人们对生态环境的保护意识在逐渐强化。从贸易虚拟水的角度看,2004—2017年间,京津冀城市群的虚拟水进口量和虚拟水出口量都呈现出下降趋势,但是虚拟水的进口量一直大于虚拟水的出口量,这与水密集型产品的进口有关。

表2 京津冀城市群2004—2017年水量足迹构成

Tab. 2 Water quantity footprint composition in Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration from 2004 to 2017

年份	$WFP_a/$ (亿 m^3)	$WFP_i/$ (亿 m^3)	$WFP_d/$ (亿 m^3)	$WFP_e/$ (亿 m^3)	$FW_i/$ (亿 m^3)	$FW_e/$ (亿 m^3)	$IWFP/$ (亿 m^3)	$EWFP/$ (亿 m^3)	$WFP/$ (亿 m^3)	人均水量足迹/ ($m^3 \cdot 人^{-1}$)
2004	1 297.35 (92.90%)	38.00 (2.72%)	39.00 (2.79%)	3.50 (0.25%)	73.67 (5.28%)	54.98 (3.94%)	1 322.87	73.67	1 396.54	1 497.47
2005	1 361.03 (93.21%)	37.00 (2.53%)	42.10 (2.88%)	3.80 (0.26%)	79.05 (5.41%)	62.88 (4.31%)	1 381.05	79.05	1 460.10	1 548.02
2006	1 207.80 (92.50%)	36.80 (2.82%)	43.10 (3.30%)	3.30 (0.25%)	83.82 (6.42%)	69.05 (5.29%)	1 221.95	83.82	1 305.77	1 363.88
2007	1 227.77 (93.03%)	34.90 (2.64%)	43.30 (3.28%)	5.20 (0.39%)	75.53 (5.72%)	66.88 (5.07%)	1 244.29	75.53	1 319.82	1 355.88
2008	1 266.57 (92.86%)	34.20 (2.51%)	43.60 (3.20%)	7.10 (0.52%)	71.63 (5.25%)	59.20 (4.34%)	1 292.27	71.63	1 363.90	1 372.69
2009	1 230.45 (92.08%)	33.30 (2.49%)	43.80 (3.28%)	7.40 (0.55%)	61.39 (4.59%)	40.05 (3.00%)	1 274.90	61.39	1 336.29	1 320.19
2010	1 215.91 (91.26%)	33.00 (2.48%)	44.80 (3.36%)	8.10 (0.61%)	71.80 (5.39%)	41.25 (3.10%)	1 260.56	71.80	1 332.36	1 274.37
2011	1 247.66 (90.69%)	35.70 (2.60%)	47.80 (3.47%)	9.20 (0.67%)	75.03 (5.45%)	39.72 (2.89%)	1 300.64	75.03	1 375.67	1 298.17
2012	1 277.80 (91.32%)	35.20 (2.52%)	44.40 (3.17%)	10.90 (0.78%)	67.86 (4.85%)	36.90 (2.64%)	1 331.40	67.86	1 399.26	1 305.52
2013	1 291.82 (91.28%)	35.70 (2.52%)	45.20 (3.19%)	11.50 (0.81%)	65.69 (4.64%)	34.62 (2.45%)	1 349.60	65.69	1 415.29	1 307.67
2014	1 312.45 (91.22%)	35.00 (2.43%)	46.10 (3.20%)	14.40 (1.00%)	66.20 (4.60%)	35.31 (2.45%)	1 372.64	66.20	1 438.84	1 317.26
2015	1 308.02 (91.80%)	31.60 (2.22%)	46.80 (3.28%)	18.30 (1.28%)	51.66 (3.63%)	31.51 (2.21%)	1 373.21	51.66	1 424.87	1 298.64
2016	1 312.93 (91.46%)	31.20 (2.17%)	49.30 (3.43%)	21.90 (1.53%)	47.62 (3.32%)	27.39 (1.91%)	1 387.94	47.62	1 435.56	1 303.51
2017	1 310.32 (91.00%)	29.30 (2.03%)	51.40 (3.57%)	26.10 (1.81%)	48.76 (3.39%)	25.96 (1.80%)	1 391.16	48.76	1 439.92	1 307.48

注:括号内数值表示水量足迹各组成部分占总体水量足迹的比例。

3.1.2 水质足迹

京津冀城市群2004—2017年的水质足迹计算

结果以及水质足迹各组成部分占总体水质足迹的比例,如表3所示。

表3 京津冀城市群2004—2017年水质足迹构成
Tab.3 Water quality footprint composition in Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration from 2004 to 2017

年份	$GFP_a/$ (亿 m^3)	$GFP_i/$ (亿 m^3)	$GFP_d/$ (亿 m^3)	$GFP/$ (亿 m^3)	人均水质足迹/ ($m^3 \cdot 人^{-1}$)
2004	1 179.85 (56%)	332.23 (16%)	599.75 (28%)	2 111.83	2 264.46
2005	1 221.57 (55%)	424.79 (19%)	574.68 (26%)	2 221.04	2 354.79
2006	1 224.93 (57%)	353.44 (16%)	581.80 (27%)	2 160.17	2 256.28
2007	1 231.93 (59%)	273.34 (13%)	579.69 (28%)	2 084.96	2 141.93
2008	1 207.71 (60%)	201.08 (10%)	591.34 (30%)	2 000.13	2 013.01
2009	1 206.80 (61%)	195.43 (10%)	574.35 (29%)	1 976.58	1 952.76
2010	1 202.39 (59%)	207.25 (10%)	623.31 (31%)	2 032.95	1 944.48
2011	1 193.99 (54%)	213.98 (10%)	805.80 (36%)	2 213.77	2 089.05
2012	1 185.03 (55%)	182.60 (8%)	782.35 (36%)	2 149.98	2 005.95
2013	1 174.46 (56%)	168.33 (8%)	762.26 (36%)	2 105.05	1 944.98
2014	1 166.41 (57%)	155.24 (8%)	738.88 (36%)	2 060.53	1 886.41
2015	1 139.74 (58%)	116.33 (6%)	724.02 (37%)	1 980.09	1 804.67
2016	1 108.31 (84%)	19.93 (1%)	213.21 (15%)	1 341.45	1 218.05
2017	1 054.90 (79%)	7.87 (1%)	268.00 (20%)	1 330.77	1 208.36

注:括号内数值表示水质足迹各组成部分占总体水质足迹的比例。

从表3中可以看出,京津冀城市群的水质足迹总体上呈现出减少(2005—2009年)、增加(2010—2011年)、再减少(2012—2017年)的波动下降趋势。水质足迹由2004年的2 111.8亿 m^3 减少至2017年的1 330.8亿 m^3 ,缩减为原来的63%。同时,人均水质足迹呈现出与总体水质足迹完全相同的变化趋势。2015年是总体水质足迹和人均水质足迹的拐

点,其变化趋势由之前的缓慢减少转变为急剧下降。这是由于2015年是国家“十二五”规划的收官之年,且在2015年4月,国务院印发了《水污染防治行动计划》(“水十条”)。这标志着我国政府出台的环境治理政策对水环境的治理成效显著。

从表3中可以看出,京津冀城市群农业水质足迹占比最大,多年平均占比约为60%,超过了总体水质足迹的一半。这说明农业生产是废水排放的主要来源,从2004年至2017年,农业水质足迹占比呈现出先增加、再减少、之后再增加的趋势,特别是在2015年之后,占比达到80%以上,这主要是因为2015年之后,工业水质足迹和生活水质足迹急剧减少,而农业水质足迹减少缓慢。生活水质足迹在研究期间占比第二,约为30%,在2011年之前呈缓慢增加趋势,2011年至2015年(“十二五”规划期间)占比基本不变,2015年后占比迅速下降。由此可见,政府实施的水环境保护政策成效显著。工业水质足迹在总体水质足迹中占比最低,多年平均占比约为10%,虽然其占比最低,但在研究期间的变化幅度却最明显。在2004—2015年间,工业水质足迹占比稳步减少,而2015年之后占比迅速减少,达到了研究期间的最小值1%。这说明工业部门对水环境造成的污染逐渐降低,同时也展现出中国政府在治理工业废水排放方面的决心。

3.2 脱钩分析

3.2.1 水量足迹与经济脱钩分析

图3为京津冀城市群2004—2017年水量足迹与实际GDP的变化趋势。从图中可以看出,GDP呈现出稳步增长的趋势,而水量足迹却存在明显的波动。此外,GDP的增长速度也在大部分年份大于水量足迹增长速度,说明在一定的水资源消耗情况下,经济发展态势良好。

由表4可以看出,2004—2017年间,京津冀城市群水量足迹和经济发展的协调状态均为脱钩状态。水量足迹与GDP增长的脱钩状态在大多数年份表现为弱脱钩,这表明在这些年份中,水量足迹的增长速率低于GDP的增长速率,使得水资源利用效率在此期间有所提高。在水资源消耗与经济发展表现为强脱钩状态的年份,GDP的年增长速率为正值,表明研究区经济进一步发展,而水量足迹年增长率为负值,表示水资源消耗量较上一年减少。这种状态是水资源利用和经济发展协调发展的最理想状态,在这种状态下,以最小的水资源消耗量实现了最大化的经济发展。

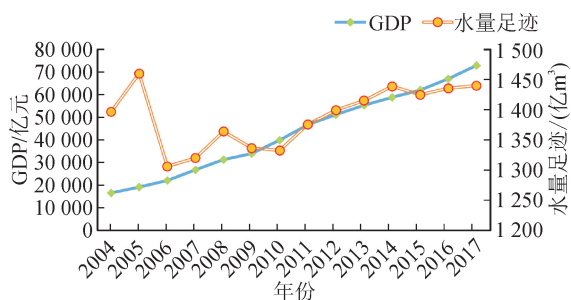


图3 京津冀城市群 2004—2017 年水量足迹与实际 GDP 变化趋势

Fig. 3 Change trend of water quantity footprint and real gross domestic product in Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration from 2004 to 2017

表4 京津冀城市群 2004—2017 年水资源消耗与经济发展的脱钩分析

Tab. 4 Decoupling analysis between water use and the economic development in Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration from 2004 to 2017

年份	$\Delta WFP/\%$	$\Delta GDP/\%$	脱钩指数	脱钩状态
2004	4.55	15.91	0.29	弱脱钩
2005	-10.57	15.13	-0.70	强脱钩
2006	1.07	21.71	0.05	弱脱钩
2007	3.34	16.68	0.20	弱脱钩
2008	-2.02	8.72	-0.23	强脱钩
2009	-0.29	17.34	-0.02	强脱钩
2010	3.25	17.31	0.19	弱脱钩
2011	1.72	9.55	0.18	弱脱钩
2012	1.15	8.20	0.14	弱脱钩
2013	1.66	6.21	0.27	弱脱钩
2014	-0.97	5.58	-0.17	强脱钩
2015	0.75	7.95	0.094 2	弱脱钩
2016	0.30	8.93	0.034 1	弱脱钩

注:脱钩分析以相临年份做差求得,所得结果表示前一年的脱钩状态,下同。

3.2.2 水质足迹与经济协调的脱钩分析

图4为京津冀城市群 2004—2017 年水质足迹与实际 GDP 的变化趋势。从图中可以看出,GDP 呈现出稳步增长的趋势,而水质足迹在 2015 年之前呈现波动下降趋势。对于水质足迹来说,2015 年是一个拐点,2015 年之后,京津冀城市群的经济持续高速增长,而水质足迹在下降后保持稳定。毫无疑问,这得益于中国政府颁布的各项水环境治理措施,其在促进经济发展的同时,严格控制废水及污染物的排放,有效遏制了水环境的污染,使得水污染程度

逐渐降低。

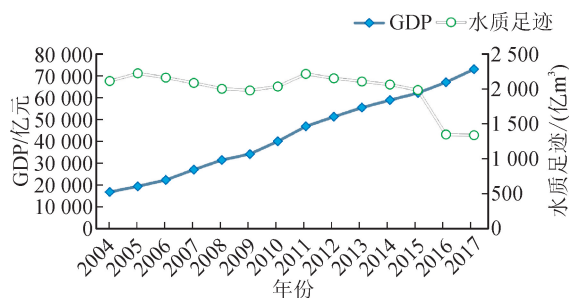


图4 京津冀城市群 2004—2017 年水质足迹与实际 GDP 变化趋势

Fig. 4 Change trend of water quality footprint and real gross domestic product in Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration from 2004 to 2017

由表5可以看出,2004—2017 年间,京津冀城市群水质足迹和经济发展的协调状态均处于弱脱钩状态和强脱钩状态。

表5 京津冀城市群 2004—2017 年水资源污染与经济发展的脱钩分析

Tab. 5 Decoupling analysis between water pollution and the economic development in Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration from 2004 to 2017

年份	$\Delta GFP/\%$	$\Delta GDP/\%$	脱钩指数	脱钩状态
2004	5.17	15.91	0.32	弱脱钩
2005	-2.74	15.13	-0.18	强脱钩
2006	-3.48	21.71	-0.16	强脱钩
2007	-4.07	16.68	-0.24	强脱钩
2008	-1.18	8.72	-0.13	强脱钩
2009	2.85	17.34	0.16	弱脱钩
2010	8.89	17.31	0.51	弱脱钩
2011	-2.88	9.55	-0.30	强脱钩
2012	-2.09	8.20	-0.25	强脱钩
2013	-2.12	6.21	-0.34	强脱钩
2014	-3.90	5.58	-0.70	强脱钩
2015	-32.25	7.95	-4.06	强脱钩
2016	-0.80	8.93	-0.09	强脱钩

2004 年、2009 年和 2010 年为弱脱钩状态,在这些年份中,废水排放量增加的速度低于经济增长的速度,说明经济的发展已经不强烈依赖于水资源的污染。而在强脱钩状态的年份中,随着京津冀城市群经济的高速发展,水质足迹呈现出负增长的趋势,水环境的污染程度较上一年有所减轻。这说明经济发展已不再是京津冀城市群污水排放量增加的原

因。但总体来看,近60%的废水为农业废水,农业废水的排放成为了水质足迹增长的主要原因。因此,严格控制农业生产中废水的排放对降低京津冀城市群水质足迹至关重要。同时,在保证京津冀城市群经济良性发展的前提下,还应降低废水排放量、提高废水排放效率。

4 讨论

本文利用水足迹的理论和计算方法计算出京津冀城市群2004—2017年水量足迹和水质足迹,并根据Tapio脱钩模型探讨了水量足迹、水质足迹与经济关系的脱钩关系。

京津冀城市群多年平均水量足迹约为1388.9亿 m^3 ,这一发现与Kong等^[12]的研究结论相似。水量足迹在研究期间逐渐增加,这种增加主要是由于经济发展、人口数量增加所致,可通过南水北调工程得到一定程度的缓解^[12]。相比而言,水质足迹多年平均值达到1983.5亿 m^3 ,远大于水量足迹,Zhao等^[22]的研究也得出了相似的结论,这说明稀释废水污染物所需的水量甚至超过人们生活消耗的水资源量。但在研究期间,水质足迹有明显的减少(特别是在2015年“水十条”之后),这说明环境保护政策在该地区取得了显著成效,相关废水排放标准得到了有效实施^[41]。无论是水质足迹还是水量足迹,农业生产部门占比最大,这说明农业生产部门在水资源消耗与水资源污染方面都起到了决定性作用。因此,要实现水量足迹、水质足迹与经济关系的逐步脱钩,重点应关注农业生产部门,大力发展节水灌溉技术^[42]。

从水量足迹、水质足迹与经济关系的脱钩状态来看,京津冀城市群的经济关系与水资源利用状况已经基本不相关。由Kong等^[12]的研究结果可知,用水效率是水足迹减少的决定性因素。与此同时,研究期间的人均水量足迹与人均水质足迹都有所减少,这也体现出水资源利用效率与居民节水意识的不断提高有关。但是,该地区存在用水结构不合理的问题,工业部门对经济发展的贡献最大,但其水资源利用量与废水排放量都在逐渐下降,这也说明经济发展对水资源的依赖程度不断降低^[3]。居民生活用水量和废水排放量虽然占比不大,但在研究期间呈逐渐上升趋势。因此,提高居民节约水资源、保护水资源的意识是实现居民用水与经济发展进一步脱钩的重要措施。

针对本文研究结果和发现的问题,提出相应的政策建议,以促进水资源利用与经济的协调发展。

首先,应大力发展农业节水灌溉技术,特别是农业机械化灌溉,以提高水资源利用效率。同时,提倡发展特色农业,在缺水地区可以减少水密集型农作物的种植,例如大豆、棉花。第二,在保证地区产品进出口平衡的条件下,在某些缺水年份,可以适当增加水密集型产品的进口,以缓解当地的水资源压力。第三,对于逐年增长的居民生活用水量,可在充分考虑当地水资源总量与经济发展水平的前提下,采用分级定价标准,提高居民节水意识。同时,以生活污水处理为重点,加大对生活污水处理设备的财政投入^[43]。

5 结论

本文基于水足迹的模型和方法,将京津冀城市群整体作为研究对象,计算其2004—2017年的水量足迹和水质足迹,并对水资源的利用情况进行了评价。同时,利用Tapio脱钩模型分析了水资源消耗(水量足迹)与经济关系的脱钩状态以及水资源污染(水质足迹)与经济关系的脱钩状态。

1) 2004—2017年,京津冀城市群的水量足迹呈现出缓慢波动上升的趋势。水资源利用结构不合理,农业生产用水在水量足迹中占比最大,农业用水效率仍处于一个较低水平。同时,人均水量足迹呈现出缓慢减少的趋势,水资源利用效率不断提高。

2) 2004—2017年,京津冀城市群的水质足迹呈现出明显的下降趋势,由2004年的2111.8亿 m^3 减少至2017年1330.8亿 m^3 ,减少为原来的63%。尤其是2015年、2016年,由于相关政策的出台,使得这两年的水质足迹呈现出显著的下降趋势。这标志着京津冀城市群的水环境得到明显改善,政府出台的水环境治理政策成效显著。

3) 水量足迹与经济关系的脱钩状态以弱脱钩为主,虽未达到完全强脱钩的理想状态,但也说明京津冀城市群的水资源利用与经济发展处于初级协调状态。

4) 总体来看,水质足迹与经济关系的脱钩由弱脱钩状态向强脱钩状态发展,以强脱钩状态为主,逐步实现了经济发展与水环境污染的理想脱钩状态。毫无疑问,这得益于政府颁布的各项水环境治理措施,其在促进经济发展的同时,严格控制废水及污染物的排放,有效遏制了水环境的污染,使得水污染程度逐渐降低。

参考文献:

- [1] AN Min, FAN Lijuan, HUANG Jin, et al. The gap of water supply—demand and its driving factors: from wa-

- ter footprint view in Huaihe River Basin [J]. *PLoS ONE*, 2021, 16(3):e0247604.
- [2] 国家统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京:中国统计出版社,2005-2018.
- [3] ZHANG Yao, LIU Wenxin, CAI Yu, et al. Decoupling analysis of water use and economic development in arid region of China - based on quantity and quality of water use [J]. *Science of The Total Environment*, 2020, 761: 143275.
- [4] YU Deyong, DING Tiancong. Assessment on the flow and vulnerability of water footprint network of Beijing city, China [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 293:126126.
- [5] 龙爱华,徐中民,张志强. 西北四省(区)2000年的水资源足迹 [J]. *冰川冻土*,2003(3):692-700.
LONG Aihua, XU Zhongmin, ZHANG Zhiqiang. Water resource footprint of four provinces (regions) in northwest China in 2000 [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2003(3): 692-700.
- [6] 马静,汪党献,来海亮,等. 中国区域水足迹的估算[J]. *资源科学*,2005 (5):96-100.
MA Jing, WANG Dangxian, LAI Hailiang, et al. Estimation of regional water footprint in China [J]. *Resources Science*, 2005(5):96-100.
- [7] HOEKSTRA A Y. Virtual Water Trade: Proceedings of the International Expert Meeting on Virtual Water Trade[C]. 2003.
- [8] MA W J, CHRISTIAN O, YANG D W. Past, present, and future of virtual water and water footprint[J]. *Water*, 2020, 12 (11): 3068.
- [9] FENG H, SUN F, LIU Y, et al. Mapping multiple water pollutants across China using the grey water footprint[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 785: 147255.
- [10] DONG Huijuan, ZHANG Lei, ZHENG Yong, et al. New insights from grey water footprint assessment: an industrial park level[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 285:124915.
- [11] 李宁,张建清,王磊. 基于水足迹法的长江中游城市群水资源利用与经济协调发展脱钩分析[J]. *中国人口·资源与环境*,2017,27 (11):202-208.
LI Ning, ZHANG Jianqing, WANG Lei. Decoupling analysis of water resources utilization and coordinated economic development in the middle reaches of Yangtze River agglomeration based on water footprint method [J]. *China Population, Resources and Environment*, 2017, 27 (11):202-208.
- [12] KONG Yang, HE Weijun, YUAN Liang, et al. Decoupling analysis of water footprint and economic growth: a case study of Beijing-Tianjin-Hebei Region from 2004 to 2017 [J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2019, 16(23): 4873.
- [13] LIU Conghu, CAI Wei, ZHAI Mengyu, et al. Decoupling of wastewater eco-environmental damage and China's economic development [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 789:147980.
- [14] LI Yi, WANG Yi. Double decoupling effectiveness of water consumption and wastewater discharge in China's textile industry based on water footprint theory [J]. *PeerJ*, 2019, 7: e6937.
- [15] LI Yi, LIU Linyi, TAN Yingxi, et al. Decoupling water consumption and environmental impact on textile industry by using water footprint method: a case study in China [J]. *Water*, 2017, 9 (2):124.
- [16] YI Rong, DU Pengfei, SUN Fu, et al. Quantitative analysis of economic and environmental benefits for land following policy in the Beijing-Tianjin-Hebei region [J]. *Journal of Environmental Management*, 2021, 286: 112234.
- [17] 刘宁. 基于水足迹的京津冀水资源合理配置研究[D]. 北京:中国地质大学(北京),2016.
LIU Ning. Research on water resources optimal allocation in Beijing-Tianjin-Hebei Region based on water footprint [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2016.
- [18] 杨志,牛桂敏. 流域视角下京津冀水污染协同治理路径探析[J]. *人民长江*,2019,50 (9):6-12.
YANG Zhi, NIU Guimin. Research on coordinated water pollution control in Beijing-Tianjin-Hebei Region from the perspective of river basin [J]. *Yangtze River*, 2019, 50 (9):6-12.
- [19] 王婧,李裕瑞. 京津冀地区主要污染物排放变化趋势及启示 [J]. *地域研究与开发*, 2017, 36 (4): 136-140,170.
WANG Jing, LI Yurui. The change trend of main pollutant emission in Beijing-Tianjin-Hebei region and its enlightenment [J]. *Regional Research and Development*, 2017, 36(4):136-140, 170.
- [20] LI Binglun, HU Yuanman, CHANG Yu, et al. Analysis of the factors affecting the long-term distribution changes of wetlands in the Jing-Jin-Ji region, China [J]. *Ecological Indicators*, 2021, 124:107413.
- [21] 王勤勤,刘俊国,赵丹丹. 京津冀地区主要农作物生产水足迹研究[J]. *水资源保护*,2018,34 (2):22-27,33.
WANG Qinqin, LIU Junguo, ZHAO Dandan. Water footprint of major crops in Beijing-Tianjin-Hebei Region [J]. *Water Resources Protection*, 2018, 34 (2):

- 22-27, 33.
- [22] ZHAO Dandan, TANG Yu, LIU Junguo, et al. Water footprint of Jing-Jin-Ji urban agglomeration in China[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 167: 919-928.
- [23] 中华人民共和国水利部. 中国水资源公报[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2004-2017.
- [24] 国家统计局. 中国环境统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2005-2018.
- [25] 北京市统计局. 北京统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2005-2018.
- [26] 天津市统计局. 天津统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2005-2018.
- [27] 河北省人民政府. 河北经济年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2005-2018.
- [28] SHI Changfeng, YUAN Hang, PANG Qinghua, et al. Research on the decoupling of water resources utilization and agricultural economic development in Gansu Province from the perspective of water footprint[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2020, 17(16): 5758.
- [29] HOSSAIN I, IMTEAZ M A, KHASTAGIR A. Water footprint: applying the water footprint assessment method to Australian agriculture [J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2021, 101(10): 4090-4098.
- [30] 王新华, 徐中民, 龙爱华. 中国 2000 年水足迹的初步计算分析[J]. *冰川冻土*, 2005(5): 774-780.
WANG Xinhua, XU Zhongmin, LONG Aihua. Preliminary calculation and analysis of water footprint in China in 2000[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2005(5): 774-780.
- [31] 国家统计局. 中国区域统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2005-2018.
- [32] HOEKSTRA A Y, MEKONNEN M M. The water footprint of humanity [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2012, 109(9): 3232-7.
- [33] ZHUO La, FENG Bianbian, WU Pute. Water footprint study review for understanding and resolving water issues in China [J]. *Water*, 2020, 12(11): 2988.
- [34] HOEKSTRA A Y, CHAPAGAIN A K, ALDAYA M M, et al. The water footprint assessment manual: setting the global standard[M]. London: Earthscan, 2012.
- [35] CHEN Jie, GAO Yanyan, QIAN Hui, et al. Insights into water sustainability from a grey water footprint perspective in an irrigated region of the Yellow River Basin [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 316: 128329.
- [36] LI Hui, LIANG Sai, LIANG Yuhan, et al. Multi-pollutant based grey water footprint of Chinese regions [J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2021, 164: 105202.
- [37] 国家环境保护总局、国家质量监督检验检疫总局. 地表水环境质量标准: GB 3838—2002[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [38] ZHANG Xi, GENG Yong, SHAO Shuai, et al. Decoupling PM_{2.5} emissions and economic growth in China over 1998-2016: a regional investment perspective [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 714: 136841.
- [39] LUO Hui, LI Li, LEI Yalin, et al. Decoupling analysis between economic growth and resources environment in central plains urban agglomeration [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 752: 142284.
- [40] 周银香. 交通碳排放与行业经济增长脱钩及耦合关系研究—基于 Tapio 脱钩模型和协整理论[J]. *经济问题探索*, 2016(6): 41-48.
ZHOU Yinxiang. Research on the decoupling and coupling relationship between transportation carbon emissions and industrial economic growth: based on Tapio decoupling model and co-integration theory[J]. *Exploration of Economic Problems*, 2016(6): 41-48.
- [41] 王菲菲, 伍海闻, 雷坤, 等. 京津冀地区流域水质目标管理技术集成研究[J/OL]. *环境工程技术学报*, [2021-09-22]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.5972.x.20210917.2208.014.html>.
- WANG Feifei, WU Haiwen, LEI Kun, et al. Integration of the basin water-quality target management technology in Beijing-Tianjin-Hebei Region [J/OL]. *环境工程技术学报*, [2021-09-22]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.5972.x.20210917.2208.014.html>.
- [42] 牛桂敏, 郭珉媛, 杨志. 建立水污染联防联控机制促进京津冀水环境协同治理[J]. *环境保护*, 2019, 47(2): 64-67.
NIU Guimin, GUO Min'ai, YANG Zhi. We will establish a joint prevention and control mechanism for water pollution to promote coordinated treatment of water environment in the Beijing-Tianjin-Hebei region [J]. *Environmental Protection*, 2019, 47(2): 64-67.
- [43] WANG D, HUBACEK K, SHAN Y, et al. A review of water stress and water footprint accounting [J]. *Water*, 2021, 13(2): 201

(责任编辑 周 蓓)