

近15年来中国北方水资源-社会经济-生态环境耦合协调发展评价

杜新强^{1,2},何立滢¹,姚泓钰¹,任思睿¹,乔琪庭¹

(1. 吉林大学新能源与环境学院, 长春 130021; 2. 吉林大学地下水资源与环境教育部重点实验室, 长春 130021)

摘要:为探究中国北方地区水资源开发利用与社会经济及生态环境可持续发展之间的耦合程度、协调发展水平及其主要制约因素,构建了“水资源-社会经济-生态环境”耦合协调评价模型,从片区(东北、华北、西北)、行政单元(省、直辖市)的尺度上量化分析了2005-2019年水资源、社会经济和生态环境等各子系统及其耦合系统的发展状态。研究结果表明:近15年来,北方地区水资源、社会经济与生态环境各子系统发展水平均不断提高,社会经济子系统发展最快,而水资源子系统则发展缓慢;水资源、社会经济和生态环境子系统的耦合度始终处于优质耦合水平,表明水资源、社会经济和生态环境的发展之间存在显著的影响;“水资源-社会经济-生态环境”整体系统的耦合协调发展水平持续提高,但仍处于协调发展的初级阶段,表明水资源、社会经济和生态环境三个系统的协同发展作用不断加强,但尚存在不平衡、不和谐的因素。相对而言,华北地区通过加强区域水资源管理,优化水资源利用效率和用水结构,弥补了水资源自然禀赋不足问题,区域耦合协调程度在北方三个片区中处于最好水平,而东北和西北地区的耦合协调程度相对略差,需进一步改善水资源利用结构和提高水资源利用效率。

关键词:中国北方;水资源;生态环境;耦合协调;耦合度

中图分类号:TV213.4

文献标识码:A

杜新强,何立滢,姚泓钰,等. 近15年来中国北方水资源-社会经济-生态环境耦合协调发展评价[J]. 中国农村水利水电, 2022(6):66-75.

DU X Q, HE L Y, YAO H Y, et al. Evaluation of the coupling coordination development of water resources, socio-economy and eco-environment in Northern China in recent 15 years[J]. China Rural Water and Hydropower, 2022(6):66-75.

Evaluation of the Coupling Coordination Development of Water Resources, Socio-economy and Eco-environment in Northern China in Recent 15 Years

DU Xin-qiang^{1,2}, HE Li-ying¹, YAO Hong-yu¹, REN Si-rui¹, QIAO Qi-ting¹

(1. College of New Energy and Environment, Jilin University, Changchun 130021, China;

2. Key Laboratory of Groundwater Resources and Environment, Ministry of Education, Jilin University, Changchun 130021, China)

Abstract: In order to investigate the degree of coupling, the level of coordinated development and its main constraints between the development and utilization of water resources and the sustainable development of socio-economy and eco-environment in northern China, this paper builds a coupling coordination evaluation model and quantitatively analyzed the development of water resources, socio-economy, eco-environment subsystems and the coupled systems from 2005 to 2019 on the scale of areas (Northeast, Northwest and North China) and administrative units (provinces and municipalities). As shown by results, in the past 15 years, the development level of the three subsystems has all

收稿日期:2021-09-18

基金项目:国家自然科学基金项目(41972247);国家重点研发计划项目(2017YFC0406002);国家级大学生创新创业训练计划项目(202010183490);吉林省高等教育教学改革研究(重点)课题项目(JLDQ774720190722201753)。

作者简介:杜新强(1977-),男,教授,博士,主要从事地下水资源评价与管理研究。E-mail:duxq@jlu.edu.cn。

通讯作者:何立滢(2000-),女,主要从事水资源管理与评价研究。E-mail:helying00@163.com。

been continuously improved. Among them, the socio-economy subsystem has developed fastest, while the water resources subsystem has developed slowly. In addition, the coupling degree of the three subsystems has always been at a high-quality coupling level, indicating that these subsystems have a significant impact on each other. Although, the coupling coordinated development level of this composite system consists of water resources, socio-economy, and eco-environment has been continuously improved, it remains in the primary stage. That is to say, the coordinated development among the three subsystems is strengthening, while the unbalanced and discordant factors still exist. Relatively speaking, North China has been making up for the shortage of natural endowment of water resources by strengthening regional water resources management and optimizing water resource utilization efficiency and water use structure. Hence, the degree of coupling and coordination in North China is at the best level among the three northern regions, but seems to be relatively poor in Northeast and Northwest, where improving the structure and efficiency of water resources utilization further is needed.

Key words: Northern China; water resources; eco-environment; coupling coordination; coupling degree

0 引言

水资源是一个国家重要的基础性、战略性资源与能源^[1],具有自然属性、社会属性、经济属性、生态属性和环境属性,水资源系统与社会经济、生态环境系统之间存在极其复杂的交互耦合关系^[2]。中国北方地区长期承受着严重的水资源供给压力^[3],其多数行政区内人均水资源量远低于国际公认的极度缺水标准(500 m³/人),水资源压力指数显著大于中国南方地区^[4,5],成为制约中国北方社会经济与生态环境可持续发展的重要因素。

针对水资源及其相关系统间耦合协调关系的研究,从研究对象上,主要集中在水资源与社会经济^[6-10]、城镇化^[11]、生态环境^[12]、能源^[13,14]、粮食^[13,14]等之间的两两组合;从研究尺度上,主要集中在省域^[6,7,13]、市域^[10-12,15,16]、流域^[9,14,17,18]上;从研究方法上,一是基于协调发展理论构建综合评价模型,分析系统协调关系在时间上的演变特征,或进行空间上的对比分析,具体方法包括多变量综合评价方法^[6,11-15,19]、模糊及灰色理论法^[10,20]等;二是基于数据流探究子系统间的关系,具体方法有系统动力学模型^[9]、多目标优化模型^[16,17]、水资源整体模型^[18]等。

本文以中国北方为研究区,量化分析近15年(2005年-2019年)来水资源、社会经济、生态环境子系统的发展水平;在此基础上,构建耦合协调评价体系,分析“水资源-社会经济-生态环境”耦合度和耦合协调度的时空特征及演变规律,探究影响综合系统协调发展的因素,为推动水资源开发利用与社会经济以及生态环境的可持续发展提供科学依据。

1 研究区与数据来源

中国北方地区,地处31°23'~53°31'N,73°40'~135°5'E之间,总面积为564万km²,约占中国国土面积的58.6%。一般划分为东北、西北和华北三个片区,东北地区包括黑龙江、吉林和辽宁,西北地区包括新疆、青海、宁夏、甘肃、陕西、内蒙古,华北地区包括北京、天津、山东、山西、河南、河北。区域气候包括温带季风气候、温带大陆性气候和高原山地气候,年降水量自东向西从1000 mm逐渐减小到100 mm以下,平均气温在-5~20℃之间^[21]。2019年,中国北方地区总人口为5.84亿,生产总值(GDP)达到34.92万亿元。

本研究中所选指标数据来源于《中国统计年鉴》《中国水资源公报》《中国城市建设统计年鉴》以及各省水资源公报和统计年鉴等。

2 研究方法

构建水资源-社会经济-生态环境耦合协调评价体系,在各子系统和整个系统的发展水平评价基础上,量化子系统间的耦合度和耦合协调度。

2.1 水资源-社会经济-生态环境耦合协调评价指标体系

为准确评价水资源、社会经济与生态环境系统间相互约束、相互促进的复杂关系,结合已有关于水资源、社会经济、生态环境耦合协调评价的研究成果^[7,10-12],遵循科学性、可比性、整体性、层次性、可操作性和完备性原则,建立水资源-社会经济-生态环境系统耦合协调评价的指标体系;对指标层中的原始数据采用极差标准化法进行无量纲正向化处理^[8],并采用熵权法^[19]来计算各个指标的权重(表1)。其中,水资源子系统发展水平由水资源条件、水资源利用效率和水资源利用结构3个一级指标、10个二级指标(a1-1~a3-2)进行反映;社会经济子系统发展水平由经济实力、产业结构、社会结构和社会建设4个一级指标、8个二级指标(b1~b4-3)进行反映;生态环境子系统发展水平则由生态治理、环境压力和城市环境3个一级指标、7个二级指标(c1-1~c3)进行反映。

2.2 子系统发展水平综合评价模型

$$\begin{cases} U_w(w) = \sum_{j=1}^n \alpha_j \times W_j \\ U_s(s) = \sum_{j=1}^n \beta_j \times S_j \\ U_e(e) = \sum_{j=1}^n \gamma_j \times E_j \end{cases} \quad (1)$$

式中: n 表示各个系统中包含的指标数; $U_w(w)$ 、 $U_s(s)$ 、 $U_e(e)$ 分别表示水资源、社会经济、生态环境子系统的综合评分,即表示各子系统的综合发展水平; α_j 、 β_j 、 γ_j 分别表示各项指标在子系统内的权重; W_j 、 S_j 、 E_j 分别表示对应标准化矩阵中的标准值。

$$T = \alpha U_w + \beta U_s + \gamma U_e \quad (2)$$

式中: T 表示系统综合评分,反映整个系统的发展水平和整体间的协同效应; α 、 β 、 γ 分别为水资源子系统、社会经济子系统和生态环境子系统的权重,当认为三个系统重要性相当时, α 、 β 、 γ 分别取值均取1/3; U_w 、 U_s 、 U_e 分别表示水资源、社会经济、生态环境

表 1 中国北方地区耦合协调度评价指标体系
Tab.1 Evaluation index system of coupling coordination degree in northern China

目标层	准则层	指标层	序号	评价取向	权重
水资源-社会经济-生态环境耦合协调发展	水资源子系统发展水平	单位行政区面积上水资源量/(亿 m ³ ·km ⁻²)	a1-1	正	0.097
		人均水资源量/(m ³ ·人 ⁻¹)	a1-2	正	0.113
		全省供水量/亿 m ³	a1-3	正	0.130
		人均用水量/(m ³ ·人 ⁻¹)	a1-4	正	0.140
		地表水源供水和其他水源供水比例/%	a1-5	正	0.096
		万元 GDP 用水量/(m ³ ·万元 ⁻¹)	a2-1	逆	0.025
		水资源利用效率			
		用水重复利用量/万 m ³	a2-2	正	0.169
		污水再生利用量/万 m ³	a2-3	正	0.086
		水资源利用结构			
		用水结构均衡度*	a3-1	正	0.084
		生态用水占比/%	a3-2	正	0.059
	社会经济子系统发展水平	经济实力			
		人均地区生产总值/元	b1	正	0.116
		产业结构			
		第一产业生产总值占比/%	b2-1	逆	0.129
		第三产业生产总值占比/%	b2-2	正	0.126
		社会结构			
		总人口/万人	b3-1	正	0.128
		城镇化率/%	b3-2	正	0.121
	生态环境子系统发展水平	单位有效灌溉面积上农业机械总动力/(万 kW·hm ⁻²)	b4-1	正	0.131
		社会建设			
		城市年末供水管道长度/km	b4-2	正	0.125
		供水管网漏损率/%	b4-3	逆	0.122
		生态治理			
		造林总面积/hm ²	c1-1	正	0.144
		工业废水治理投资额/万元	c1-2	正	0.149
		水土流失治理面积/千 hm ²	c1-3	正	0.148
		城市环境			
		城市日污水处理能力/万 m ³	c2-1	正	0.138
		人均公园绿地面积/(m ² ·人 ⁻¹)	c2-2	正	0.121
		城市园林绿地面积/hm ²	c2-3	正	0.140
		环境压力			
		单位有效灌溉面积上施用化肥量/(万 t·hm ⁻²)	c3	逆	0.159

注:*表示用水结构均衡度,计算公式为 $J = -(\sum_{i=1}^N \frac{P_i \ln P_i}{\ln N})$,式中: J 为均衡度, P_i 为第 i 种利用类型水资源占总用水资源比例, N 为水资源利用类型总数^[22]。

子系统的综合评分。

2.3 系统耦合度与耦合协调度评价模型

2.3.1 耦合度

耦合是指两个(或两个以上的)系统或运动形式通过各种相互作用而彼此影响的现象;耦合度描述要素发展的整体水平及之间的协同效应,体现彼此相互作用影响的程度。通过求解任意 n 个系统间的耦合度 C_n ,来表示各子系统之间相互作用的强弱, C_n 取值介于(0,1)之间,公式如下^[19]:

$$C_n = \left\{ \frac{U_1 \times U_2 \times \cdots \times U_n}{\left(\frac{U_1 + U_2 + \cdots + U_n}{n} \right)^n} \right\}^{\frac{1}{n}} \quad (3)$$

若判断水资源、社会经济、生态环境 3 个子系统间的耦合度,则 n 取 3(式 3),若判断 3 个子系统间任意 2 个系统的耦合度,则 n 取 2。

2.3.2 耦合协调度

耦合度虽能反映水资源、社会经济和生态环境三者间相互

作用的程度,但不能表征各系统间是在高水平上相互促进还是低水平上相互限制^[23],因此,引入复合系统的耦合协调度[式(4)]反映系统间相互作用的类型。

$$D = \sqrt{C \times T} \quad (4)$$

式中: D 表示耦合协调度, C 表示耦合度, T 表示系统综合评分。

借鉴文献^[6,7]中判断标准,依据耦合度(C)和耦合协调度(D)对耦合协调等级进行划分,标准见表 2。

3 结果与分析

3.1 子系统发展水平

通过对比近 15 年研究区水资源、社会经济和生态环境子系统发展水平得分的平均值及增长值(表 3)可知,各片区、各行政区(辽宁省除外)在各子系统发展水平上,均呈增长状态,其中,社会经济子系统发展水平增长最快,而水资源子系统发展水平增长值相对偏低。在各片区水资源系统发展水平得分上,东北地区各省平均分为 0.31,高于华北(0.28)和西北地区(0.26);在社会经济子系统上,华北地区(0.50)高于东北(0.34)和西北地

表 2 耦合协调等级的划分

Tab.2 Classification standard of coupling coordination model

C 值	耦合阶段	D 值	耦合协调类型
0~0.09	极度失调	0~0.09	极度失调衰退
0.10~0.19	严重失调	0.10~0.19	严重失调衰退
0.20~0.29	中度失调	0.20~0.29	中度失调衰退
0.30~0.39	轻度失调	0.30~0.39	轻度失调衰退
0.40~0.49	濒临失调	0.40~0.49	濒临失调衰退
0.50~0.59	勉强耦合	0.50~0.59	勉强耦合协调发展
0.60~0.69	初级耦合	0.60~0.69	初级耦合协调发展
0.70~0.79	中级耦合	0.70~0.79	中级耦合协调发展
0.80~0.89	良好耦合	0.80~0.89	良好耦合协调发展
0.90~1.00	优质耦合	0.90~1.00	优质耦合协调发展

区(0.32);各片区的生态环境系统平均发展水平则无明显优劣之分。

为进一步反映片区各子系统发展水平差异,讨论相关影响因素,对近年来各子系统准则层及指标层得分求取平均值,见图1~图6,结果表明:

3.1.1 水资源子系统发展水平

西北地区水资源条件好(图1)、人口基数小,区域人均水资源量和人均用水量[图2(a)],地表水资源较地下水资源丰富,地下水的供水压力小;区域水资源利用效率发展水平低,用水重复利用量和污水再生利用量少,近15年共计82.48亿m³,仅相当于华北地区的16.3%。用水结构均衡度不高(0.48),农业用水占比是生态用水占比的25倍。

东北地区降水量较西北地区充沛,但人口密度相比西北要

表3 近15年来北方地区水资源子系统(Uw)、社会经济子系统(Us)、生态环境子系统(Ue)平均发展水平及变化幅度

Tab.3 The average development level and variation range of the water resources subsystem (Uw), socio-economy subsystem (Us), and eco-environment subsystem (Ue) in the northern region in the past 15 years

地区	行政单元	Uw		Us		Ue	
		平均值	增长值	平均值	增长值	平均值	增长值
西北地区	宁夏	0.21	0.02	0.34	0.19	0.26	0.14
	新疆	0.40	0.02	0.23	0.25	0.28	0.12
	陕西	0.22	0.04	0.37	0.28	0.27	0.07
	甘肃	0.22	0.02	0.32	0.23	0.33	0.12
	内蒙古	0.23	0.07	0.34	0.23	0.53	0.23
	青海	0.28	0.01	0.32	0.23	0.22	0.10
东北地区	黑龙江	0.29	0.03	0.30	0.05	0.34	0.10
	吉林	0.26	0.00	0.29	0.19	0.23	0.08
	辽宁	0.37	-0.02	0.42	0.16	0.40	0.08
华北地区	北京	0.26	0.08	0.62	0.17	0.29	0.13
	天津	0.26	0.15	0.51	0.19	0.20	0.05
	河北	0.24	0.01	0.44	0.23	0.44	0.16
	河南	0.30	0.10	0.44	0.31	0.33	0.18
	山东	0.38	0.15	0.59	0.31	0.48	0.24
	山西	0.22	0.04	0.43	0.15	0.30	0.15

大[图2(b)],人均水资源量和人均用水量不高,拉低区域水资源条件得分(图1),尽管水资源利用效率优于西北地区,但也存在着生态用水量占比低、污水再生利用量少和万元GDP用水量高的问题。

华北地区人均水资源仅为235m³,不到西北地区人均水资源拥有量的10%,全区总供水量和人均用水量小,水资源禀赋先天不足,但水资源利用效率具有明显优势(图1),用水结构均衡度达0.75,污水再生利用量和用水重复利用量最高[图2(c)],万元GDP用水量为分区最低,仅为东北地区万元GDP用水量的35.2%,由此弥补了水资源条件的不足。

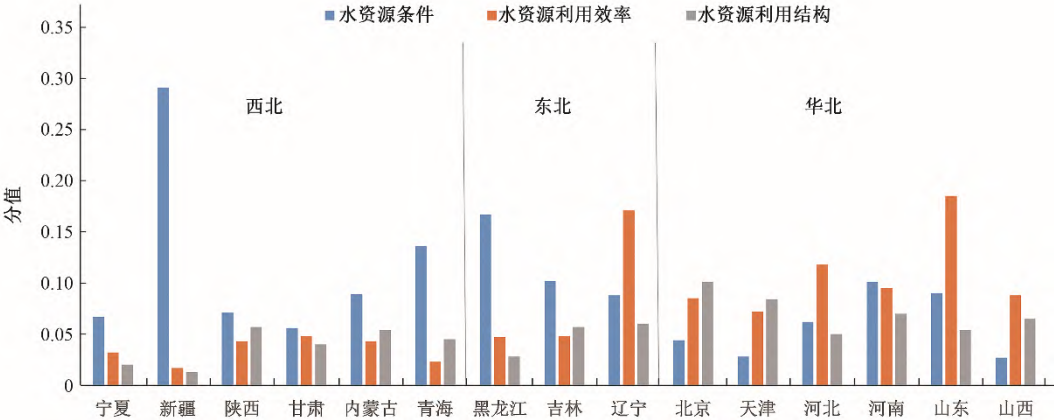


图1 2005-2019年水资源子系统发展水平平均得分

Fig.1 Average scores of development level of water resources subsystem from 2005 to 2019

3.1.2 社会经济子系统发展水平

西北地区在经济实力、社会结构、产业结构方面均落后,但社会建设情况良好[图3和图4(a)],人均生产总值不高。在产业结构上,第三产业的发展水平相对落后,生产总值占比为49%,低于其余分区,人口数量少和城镇率低造成了西北地区“地多、人少”的现象。近些年来随着农业的大力发展,有效灌溉面积上升,农业机械化耕作水平也得到显著提高,社会建设良好,供水管网漏损率较低(9.8%)。

东北地区的社会经济建设水平一般,社会建设相对落后

(图3)。其中供水管网漏损率高[图4(b)],漏损率在20%左右,单位面积平均有效灌溉面积上的机械动力低,第一产业生产总值占比为14.4%,远高于其他地区,间接拉低了东北地区社会经济系统水平。

华北地区在经济实力、产业结构、社会结构和社会建设方面总体上优于其他分区(图3),虽然华北地区的6个行政区各项指标得分不一致,城镇化水平参差不齐,但单位灌溉面积上农业机械总动力大、人均地区生产总值高、供水管道建设好、常住人口多是普遍的优势因素,供水管网漏损率略优于西北地区[图4(c)]。

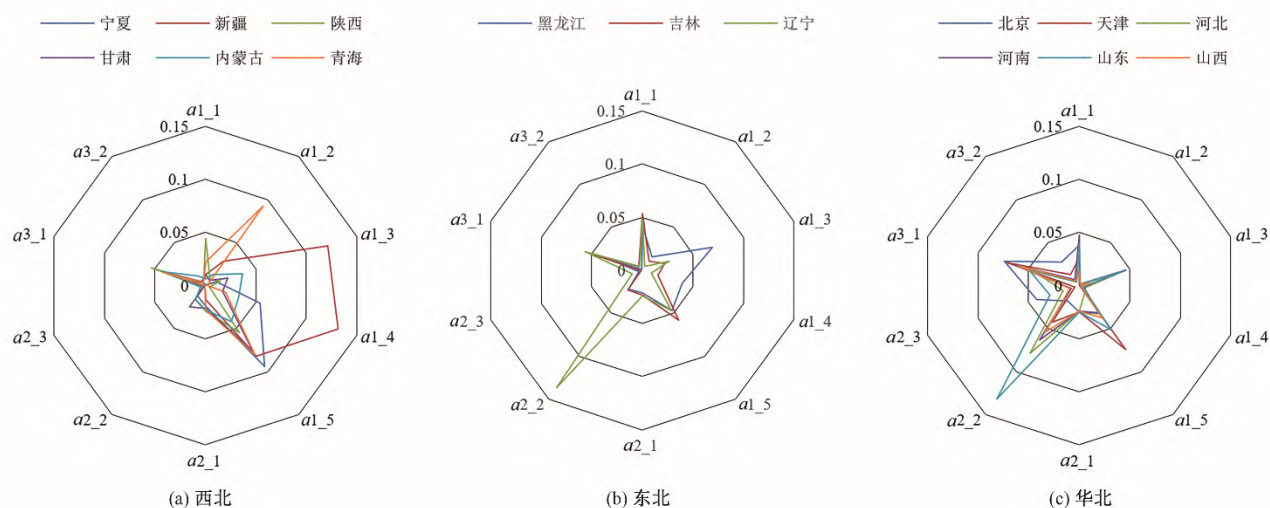


图2 2005-2019年北方地区水资源子系统各指标层得分情况

Fig.2 Evaluation scores of each indicator layer of the water resources subsystem in the northern regions from 2005 to 2019

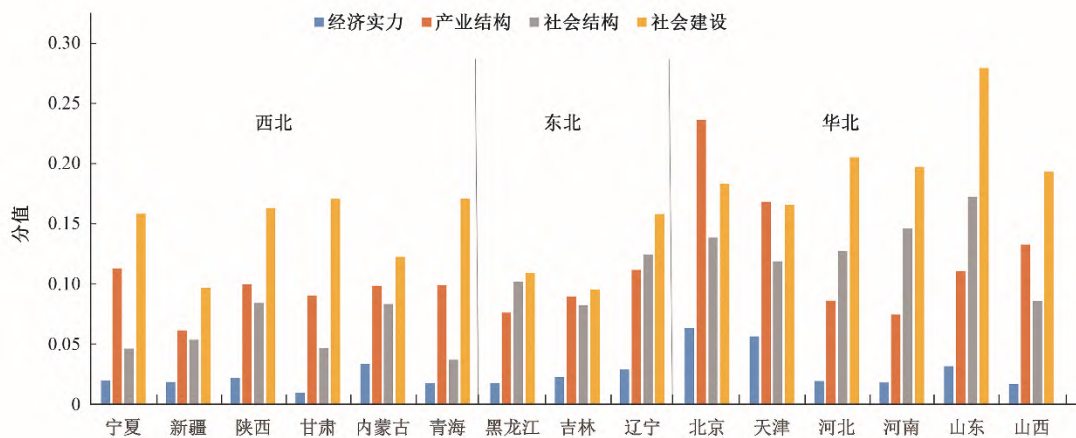


图3 2005-2019年社会经济子系统发展水平平均得分

Fig.3 Average scores of development level of socio-economy subsystem from 2005 to 2019

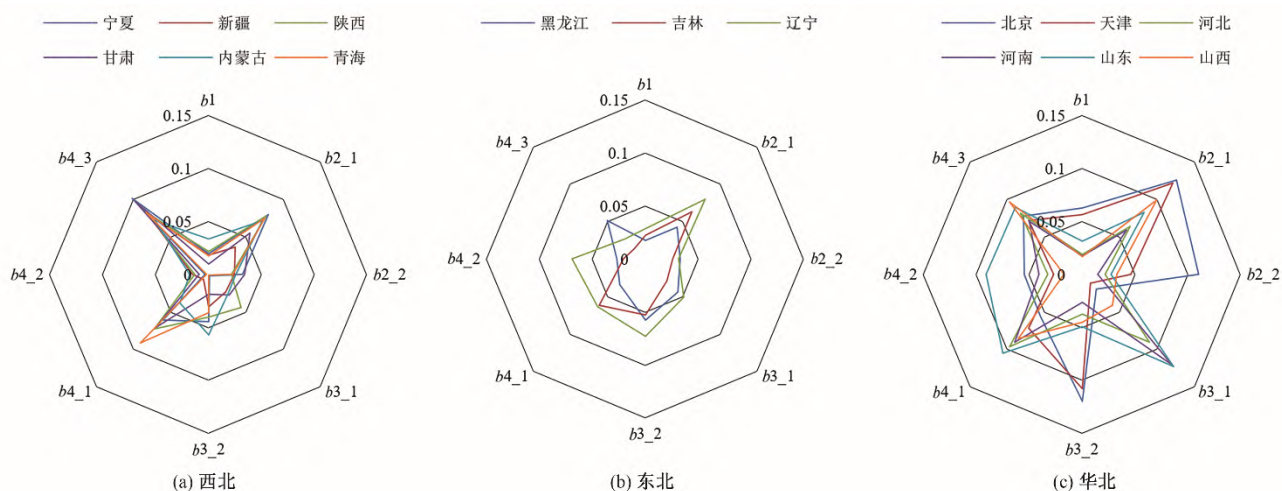


图4 2005-2019年北方地区社会经济子系统各指标层得分情况

Fig.4 Evaluation scores of each indicator layer of the socio-economy subsystem in the northern regions from 2005 to 2019

3.1.3 生态环境子系统发展水平

西北地区在环境治理和环境压力方面优于其他分区(图5),而城市治理得分较低,城市园林绿地面积、城市日污水处理

量和工业废水投资额是地区短板[图6(a)]。

东北地区的环境治理和环境压力得分在三大片区中处于中等偏下位置,而城市环境得分则属于中等偏上(图5)。省际

发展水平差异大,辽宁省发展水平得分最高,吉林省在城市绿化和废污水处理方面弱,子系统发展水平最低,相较于华北地区,东北的环境压力得分略有优势[图6(b)]。

华北地区,总体上城市环境得分较高(图5),环境压力和环境治理得分良好,建成区绿化覆盖率高,部分省份(如山西)在城市日污水和工业废水处理方面投入力度较低[图6(c)]。

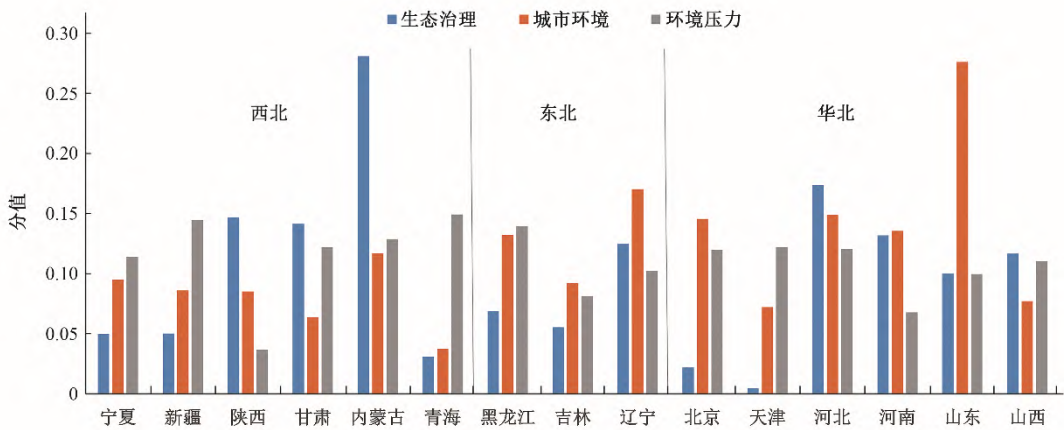


图5 2005-2019年生态环境子系统发展水平平均得分

Fig.5 Average scores of development level of eco-environment subsystem from 2005 to 2019

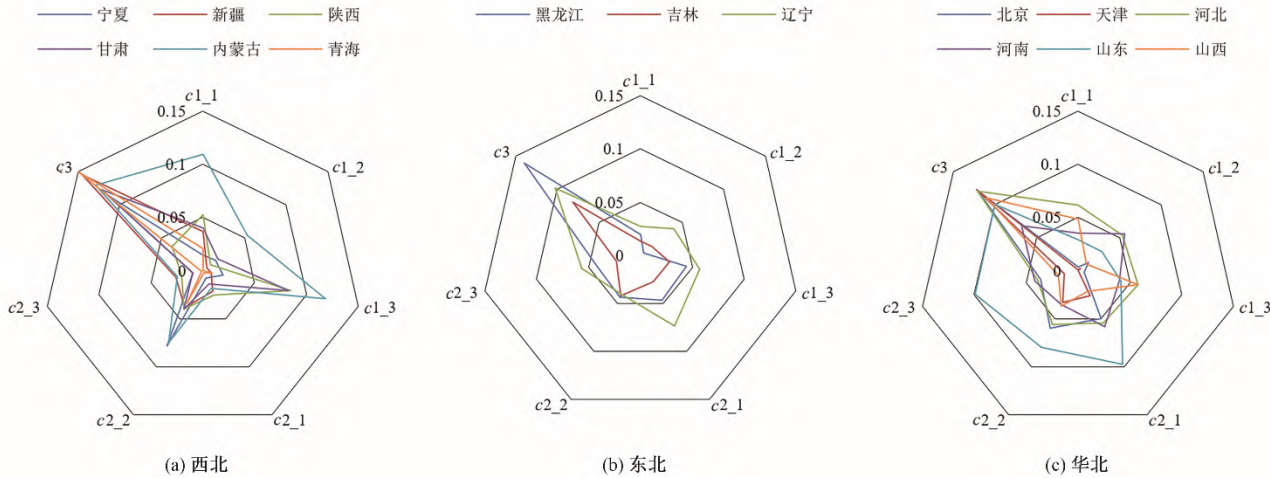


图6 2005-2019年北方地区生态环境子系统各指标层得分情况

Fig.6 Evaluation scores of each indicator layer of the eco-environment subsystem in the northern regions from 2005 to 2019

3.2 耦合协调发展水平

依据建立的耦合协调度模型,计算2005-2019年北方15个省级行政区的平均耦合度 C 、系统综合发展水平 T 和耦合协调度 D ,并按照等级划分标准进行分类,见表4和图7。

由表4可知,北方地区水资源系统与其他系统的耦合水平处于最高等级,表明水资源与社会经济和生态环境之间具有显著的相互影响和相互制约关系。但由于水资源-社会经济-生态环境综合系统发展水平得分(T)远小于耦合水平得分(C),因此耦合协调发展水平得分(D)始终低于耦合度(C),表示3个子系统之间并未达到理想的协调发展状态。经过15年的发展,多数地区水资源与社会经济和生态环境系统,由濒临失调衰退向勉强耦合协调或初级耦合协调发展转变,未来还有很大的上升空间,但水资源子系统的发展水平仍是限制整体耦合协调发展的主要因素。

在时间序列上,2005-2019年中国北方地区15个省级行政区的系统耦合协调度呈现缓慢增高趋势(图7)。

东北是一个以煤炭、钢铁、建材、石化等资源性产品供应和

以初级农产品加工为主的老工业基地^[24],发展传统农业种植和加工,消耗当地资源和能源^[25],在工业生产过程中对水资源的需求量大,万元工业增加值用水量三个分区分中最高(图8)。虽然有吉林引松供水工程、河湖联通工程以及黑龙江三江平原灌区田间配套工程等水利建设,但是地区水资源压力仍旧较大,水资源系统发展水平增幅缓慢。在中国迈入新产业体系构建阶段时,东北地区单一的产业结构造成了产品的有限性和附加值的局限性^[25,26],“产业缺位”,因此地区经济在三个分区分中发展最慢(表3),这也抑制了区域耦合协调发展水平的提高。

西北地区水少地多,水土资源不相匹配,生态系统脆弱^[27]。在评价时段初期,西北地区水资源-社会经济-生态环境系统耦合协调水平处于三大片区的最底层,近15年来区域经济发展水平迅猛提高、地区人口迅速增加,进一步加剧了水资源系统压力,水资源利用效率低下与水资源过度利用问题并存,部分地区生态环境受到破坏(如水土流失、地下水水位下降、水污染等)^[27-29];另一方面,随着近15年来生态环境修复投入增加,水土流失治理面积加大,西北地区粗放式取水用水的现象有所改

表 4 2005-2019 年北方地区耦合协调变化情况
Tab.4 Coupling coordination degree changes in the northern regions from 2005-2019

地区	行政单元	耦合水平			发展水平			耦合协调水平		
		耦合度(C)		耦合水平	系统综合评分(T)		发展水平	耦合协调度(D)		耦合协调等级
		2005 年	2019 年		2005 年	2019 年		2005 年	2019 年	
西北地区	宁夏	0.980	0.979	优质耦合	0.269	0.303	水平提高	0.428	0.545	濒临失调衰退向勉强耦合协调发展
	新疆	0.963	0.994	优质耦合	0.304	0.369	水平提高	0.443	0.606	濒临失调衰退向中级耦合协调发展
	陕西	0.977	0.963	优质耦合	0.287	0.339	水平提高	0.458	0.572	濒临失调衰退向勉强耦合协调发展
	甘肃	0.982	0.971	优质耦合	0.288	0.340	水平提高	0.460	0.575	濒临失调衰退向勉强耦合协调发展
	内蒙古	0.943	0.947	优质耦合	0.364	0.423	水平提高	0.480	0.633	濒临失调衰退向中级耦合协调发展
	青海	0.982	0.983	优质耦合	0.275	0.335	水平提高	0.464	0.574	濒临失调衰退向勉强耦合协调发展
东北地区	黑龙江	0.995	0.994	优质耦合	0.311	0.321	水平提高	0.507	0.564	勉强耦合协调发展
	吉林	0.992	0.991	优质耦合	0.261	0.311	水平提高	0.464	0.555	濒临失调衰退向勉强耦合协调发展
	辽宁	0.996	0.988	优质耦合	0.395	0.410	水平提高	0.581	0.636	勉强耦合协调向初级耦合协调发展
华北地区	北京	0.920	0.946	优质耦合	0.390	0.448	水平提高	0.549	0.651	勉强耦合协调向初级耦合协调发展
	天津	0.919	0.937	优质耦合	0.322	0.371	水平提高	0.477	0.589	濒临失调衰退向勉强耦合协调发展
	河北	0.961	0.950	优质耦合	0.373	0.428	水平提高	0.540	0.637	勉强耦合协调向初级耦合协调发展
	河南	0.985	0.988	优质耦合	0.356	0.460	水平提高	0.516	0.674	勉强耦合协调向初级耦合协调发展
	山东	0.983	0.984	优质耦合	0.483	0.573	水平提高	0.584	0.751	初级耦合协调向中级耦合协调发展
	山西	0.959	0.971	优质耦合	0.316	0.353	水平提高	0.487	0.585	濒临失调衰退向勉强耦合协调发展

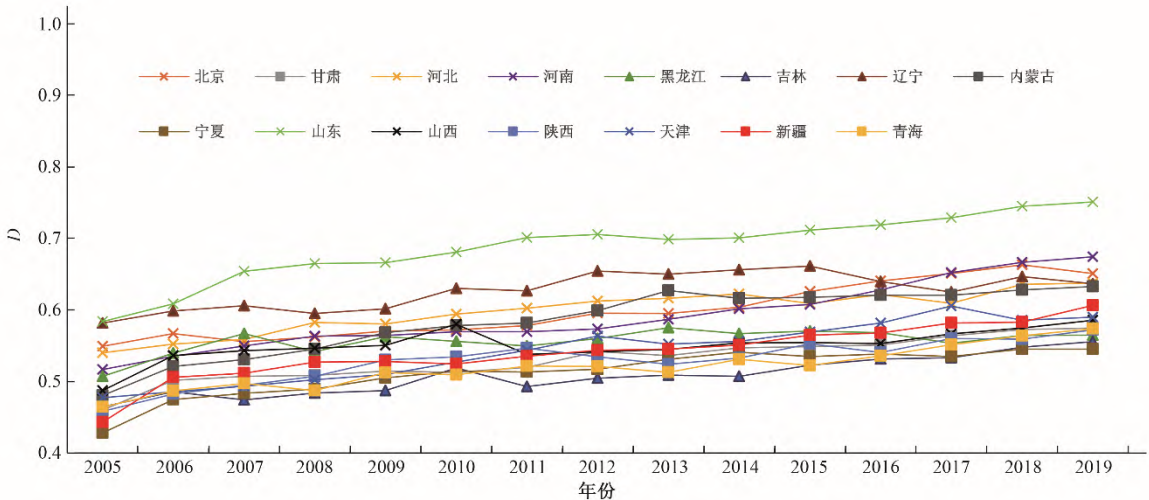


图 7 2005-2019 年北方地区水资源-社会经济-生态环境耦合协调度变化
Fig.7 The dynamic changes of the coupling coordination degree about water resources, socioeconomy, and eco-environment in the northern regions from 2005 to 2019

善,生态环境子系统发展水平得到一定提高^[30,31](表 3)。虽然在研究期内,西北地区水资源系统发展水平仅提高了 0.02 左右,发展缓慢,但由于社会经济和生态环境系统发展水平较大幅度的提升,社会经济系统得分增加 0.20 左右,生态环境系统得分增加超过 0.10,西北地区耦合协调水平仍得以不断提升,逐渐超过东北地区(表 4 和图 7)。

华北地区一直是我国经济发达、人口密集的地方,气候适宜、利于耕作,煤矿石油资源丰富、工业和服务业发达,城镇化程度高,但区域水资源条件存在劣势,人均水资源、全区总供水量和人均用水量存在矛盾,年均工业用水总量约是西北地区的 2 倍。然而,华北地区经过近 15 年社会经济的快速发展,人口数量增加了 3 353.6 万,用水矛盾并未愈发尖锐,且水资源子系

统得分和耦合协调度较其他分区有更加明显的上升趋势(表 3 和图 7),这与华北地区优化用水结构、增强用水效率有很大关系。华北地区工业废水治理投资列各片区之首(图 9),社会供水系统建设力度强,城市建设趋于绿色化发展^[32]。同时,南水北调、引黄入冀、引滦入津等一系列引水工程的建设缓解了地区用水压力^[33],保障区域经济社会和生态环境的发展,因此华北地区的耦合发展水平较高且不断提升,水资源系统也朝着更好的方向发展。水资源具有自然和社会属性,在人类活动干预下,水文循环模式呈现“自然-社会”二元结构特征^[34],因此通过管理区域水资源、优化产业结构、提高用水效率等举措的实施,可以帮助地区水资源系统维持在相对均衡状态,保障区域经济稳定发展。

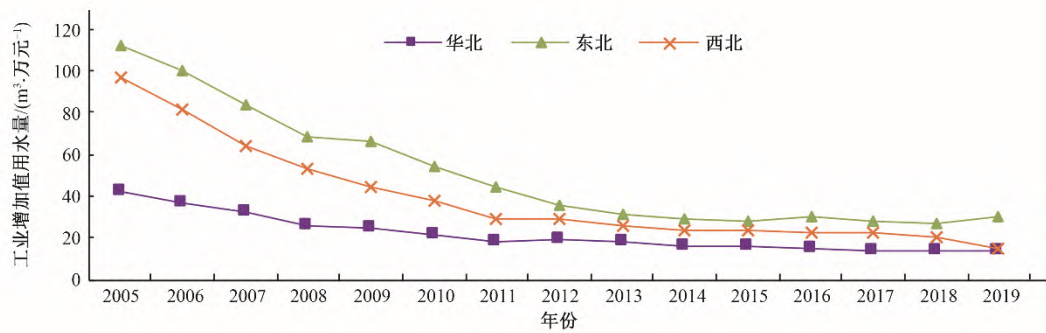


图8 2005–2019年北方地区万元工业增加值用水量

Fig.8 Average amount of water consumption of ten thousand yuan industrial added value in the northern regions from 2005 to 2019

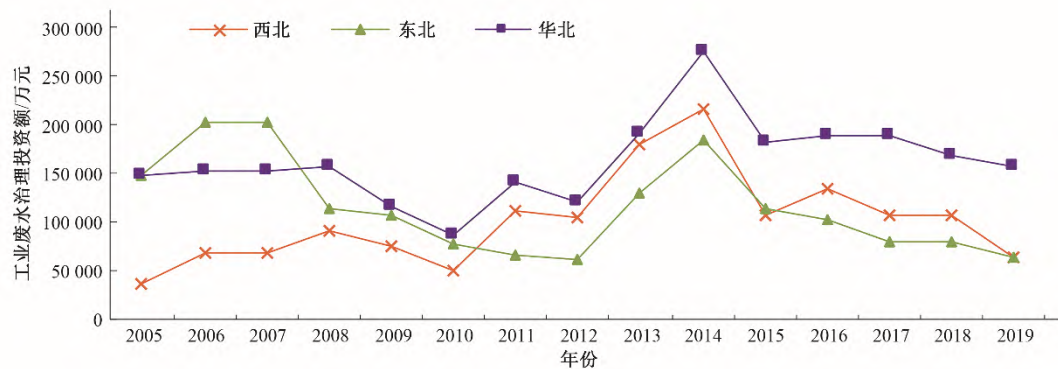


图9 2005–2019年北方地区各省工业废水治理投资额平均值

Fig.9 Average value of investment in industrial wastewater treatment in the northern regions from 2005 to 2019

3.3 系统耦合协调问题水平

对水资源、社会经济和生态环境之间双系统的耦合协调度进行对比,得到耦合协调问题分类,见表5。

由表5可知,多数行政单元社会经济和生态环境耦合协调度大,社会经济和生态环境发展领先,而水资源-生态环境则相反,一直处于耦合落后发展状态,可见北方水资源与社会经济、生态环境间的协调性弱。主要原因在于地区的水资源系统发展水平普遍较低且发展速度明显低于其他系统,是限制耦合协调水平提高的决定性因素。

华北地区水资源发展水平较其他地区表现良好,发展水平有所提升,但发展速度缓慢,而东北地区 and 西北地区,除辽宁省外,水资源发展水平则近15年来基本没有变化(表3),这与农业用水占比加大,用水结构过于单一,区域水资源利用效率不高有关^[35]。2005–2019年,西北地区年均农业用水占比84.7%,居高难下,东北地区农业用水占比不断升高,由68.7%上涨至78.4%,有效灌溉面积扩大75.5%,而华北地区农业用水占比则由66.3%下降至55.5%,耕地面积逐年下降,有效灌溉面积缩减32.03%。华北地区第三产业迅猛发展,近年来随着商品贸易和电力运输,区域虚拟水流入大幅度增加,地区或在转移水资源密集型产业(如农产品的加工跨区贸易、工业)的同时将水资源压力向外输出^[36,37]。西北地区和东北地区近15年来粮食总产量分别增加67.3%和86.2%,大量的虚拟水嵌于作物中输出到其他地区^[38,39],水资源压力转移模式使得西北和东北地区用水结构持续处于单一状态,用水结构均衡度提高速度慢。

4 结 论

在构建水资源-社会经济-生态环境耦合协调评价体系的基础上,建立耦合协调评价模型,对2005–2019年中国北方15个省级行政区进行分析,得到结论如下。

(1)水资源、社会经济与生态环境各子系统发展水平和速度具有区域性特点。我国北方地区各系统发展水平总体上呈现上升趋势,水资源子系统发展缓慢,生态环境次之,社会经济发展最快。对于水资源子系统而言,区域用水效率低和用水结构单一是限制西北和东北水资源系统发展的共同原因,而华北则主要受到地区水资源条件的限制。对于社会经济子系统而言,西北受到区域经济实力低、总人口少和城镇化水平低的约束,东北则受到区域经济实力低和供水管网建设落后的制约,华北地区则整体良好。对于生态环境子系统而言,城市绿化程度低和废水治理投资力度低阻碍了西北和东北生态环境的发展,而华北整体较好,部分省份工业和城市废污水治理建设力度不足。

(2)水资源-社会经济-生态环境的整体系统耦合协调度不断提升,但仍处于初级阶段。3个子系统始终处于优质耦合水平,相互支撑和影响,但耦合协调等级多处于勉强耦合或初级耦合协调发展状态。华北地区在产业结构、用水效率、供水结构等方面进行调整优化,从而提高水资源发展水平,使其耦合协调程度相对最好;西北地区在经济社会和生态环境建设水平明显提高的背景下,耦合协调程度提高明显,并超过了东北地区。

(3)水资源发展水平低导致基于水资源的双系统耦合协调

表5 2005–2019年中国北方耦合协调问题分类

Tab.5 Classification of coupling and coordination issues in northern China from 2005 to 2019

分区	省份	项目	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	
西北地区	宁夏	$D_{ws}/D_{es}/D_{we}$																
		优先发展																
		落后发展																
	新疆	$D_{ws}/D_{es}/D_{we}$																
		优先发展																
		落后发展																
	陕西	$D_{ws}/D_{es}/D_{we}$																
		优先发展																
		落后发展																
	甘肃	$D_{ws}/D_{es}/D_{we}$																
		优先发展																
		落后发展																
内蒙古	$D_{ws}/D_{es}/D_{we}$																	
	优先发展																	
	落后发展																	
青海	$D_{ws}/D_{es}/D_{we}$																	
	优先发展																	
	落后发展																	
东北地区	黑龙江	$D_{ws}/D_{es}/D_{we}$																
		优先发展																
		落后发展																
	吉林	$D_{ws}/D_{es}/D_{we}$																
		优先发展																
	落后发展																	
辽宁	$D_{ws}/D_{es}/D_{we}$																	
	优先发展																	
华北地区	北京	$D_{ws}/D_{es}/D_{we}$																
		优先发展																
		落后发展																
	天津	$D_{ws}/D_{es}/D_{we}$																
		优先发展																
	落后发展																	
	河北	$D_{ws}/D_{es}/D_{we}$																
		优先发展																
	落后发展																	
	河南	$D_{ws}/D_{es}/D_{we}$																
		优先发展																
	落后发展																	
山东	$D_{ws}/D_{es}/D_{we}$																	
	优先发展																	
落后发展																		
山西	$D_{ws}/D_{es}/D_{we}$																	
	优先发展																	
落后发展																		
耦合双系统		水资源-社会经济:		生态环境-社会经济:					水资源-生态环境:									
说明: D_{ws} 表示水资源-社会经济的耦合协调度, D_{es} 表示生态环境-社会经济的耦合协调度, D_{we} 表示水资源-生态环境的耦合协调度在3个双系统中, 某双系统的耦合协调度最大, 则说明该双系统优先发展, 反之, 耦合协调度最小, 则表示该双系统落后发展																		

度低。北方地区普遍存在社会经济-生态环境发展领先,而水资源与其他子系统耦合发展落后的现象,主要受限于水资源发展水平低且发展速度缓慢,揭示出水资源仍是系统发展的主要制约因素。其中,西北地区和东北地区农业用水占比过大,用水结构单一,用水效率低,导致地区水资源系统发展停滞不前,而华北地区或通过转移耗水产业,从而提高水资源系统发展水平。

由以上研究结果可见,目前中国北方水资源-社会经济-生态环境的耦合协调发展水平主要受制于水资源子系统。因此,需要持续优化产业结构、进一步合理配置水资源、不断提高水资源利用率和用水结构均衡水平,倡导多措并举节约用水来促进区域水资源系统的发展。

参考文献:

[1] 畅明琦. 水资源安全理论与方法研究[D]. 西安:西安理工大学,

2006.

- [2] THALER T. Social justice in socio-hydrology—how we can integrate the two different perspectives [J]. Hydrological Sciences Journal, 2021, 66(10): 1 503–1 512.
- [3] WANG X, XIAO X, ZOU Z, et al. Gainers and losers of surface and terrestrial water resources in China during 1989 – 2016 [J]. Nature Communications, 2020, 11(1): 3 471.
- [4] 刘 静,余钟波. 基于水足迹理论的中国水资源压力评价[J]. 水资源保护, 2019, 35(5): 35–39.
- [5] 郑德凤,王佳媛,李 钰,等. 基于节水视角的中国水资源压力时空演变及影响因素分析[J]. 地理科学, 2021, 41(1): 157–166.
- [6] 张嗣颢,唐 莲,姬小敏,等. 宁夏水资源脆弱性与社会适应能力耦合关系研究[J]. 中国农村水利水电, 2021(3): 69–73.
- [7] 闻 豪,文 凤. “一带一路”重点省份水资源-经济-生态环境耦合协调分析[J]. 武汉大学学报(工学版), 2019, 52(10): 870

- 877.
- [8] CUI D, CHEN X, YINGLAN X, et al. An integrated approach to investigate the relationship of coupling coordination between social economy and water environment on urban scale - A case study of Kunming [J]. *Journal of Environmental Management*, 2019, 234: 189-199.
- [9] 杜湘红. 水资源环境与社会经济系统耦合建模和仿真测度: 基于洞庭湖流域的研究[J]. *经济地理*, 2014, 34(8): 151-155.
- [10] 史树洁, 左其亨, 王亚迪. 襄阳市河湖水系—经济社会发展和谐量化分析[J]. *水电能源科学*, 2017, 35(3): 35-39.
- [11] ZHANG K, SHEN J, HE R, et al. Dynamic Analysis of the Coupling Coordination Relationship between Urbanization and Water Resource Security and Its Obstacle Factor [J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2019, 16 (23): 4765.
- [12] 陈晓, 李景保, 王飞, 等. 近10年间南京市生态环境与水源的耦合关系[J]. *水电能源科学*, 2017, 35(7): 65-68.
- [13] SHASHA X, HE W, SHEN J, et al. Coupling and Coordination Degrees of the Core Water - Energy - Food Nexus in China [J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2019, 16(9): 1648.
- [14] 赵良仕, 刘思佳, 孙才志. 黄河流域水-能源-粮食安全系统的耦合协调发展研究[J]. *水资源保护*, 2021, 37(1): 69-78.
- [15] 马力阳, 罗其友, 李同昇, 等. 半干旱区水资源—乡村发展耦合协调评价与实证研究: 以通辽市为例[J]. *经济地理*, 2017, 37(9): 152-159.
- [16] 熊雪珍, 何新玥, 陈星, 等. 基于改进TOPSIS法的水资源配置方案评价[J]. *水资源保护*, 2016, 32(2): 14-20.
- [17] 刘丙军, 陈晓宏. 基于协同学原理的流域水资源合理配置模型和方法[J]. *水利学报*, 2009, 40(1): 60-66.
- [18] 赵建世, 王忠静, 翁文斌. 水资源系统整体模型研究[J]. *中国科学E辑: 技术科学*, 2004(增刊1): 60-73.
- [19] 郭佳丽, 余敬, 何玉杰, 等. 长江中游城市水资源耦合协调时空分析及障碍诊断[J]. *湖北农业科学*, 2020, 59(7): 92-98.
- [20] 于磊, 郭佳航, 王慧丽. 区域水资源-能源-粮食耦合系统和谐评价[J]. *南水北调与水利科技(中英文)*, 2021, 19(3): 437-445.
- [21] 郭泽呈. 中国北方地区环境干扰度时空演变特征分析[D]. 兰州: 西北师范大学, 2020.
- [22] 易晶晶, 陈志和, 杨创鹏, 等. 基于信息熵原理的区域用水结构时空演变特征研究[J]. *水文*, 2019, 39(4): 12-17.
- [23] 王成, 唐宁. 重庆市乡村三生空间功能耦合协调的时空特征与格局演化[J]. *地理研究*, 2018, 37(6): 1100-1114.
- [24] 史英杰. 东北地区资源型城市产业转型问题研究[D]. 天津: 天津大学, 2008.
- [25] 刘柏. 对东北经济衰退的深度解读[J]. *人民论坛*, 2015(24): 26-27.
- [26] 赵儒煜, 陈强, 王媛玉. 从产业发展看东北经济复兴的历史必然性与路径选择[J]. *商业研究*, 2018(5): 1-11.
- [27] 毛德华, 夏军, 黄友波. 西北地区水资源与生态环境问题及其形成机制分析[J]. *自然灾害学报*, 2004(4): 55-61.
- [28] 王伟军, 赵雪雁, 张明军, 等. 西北干旱区内陆河流域公众的水资源感知及节水意向: 以甘肃省河西走廊地区为例[J]. *中国人口·资源与环境*, 2019, 29(11): 148-157.
- [29] 文彦君. 西北地区水资源生态安全保障研究进展[J]. *陕西农业科学*, 2012, 58(5): 105-108.
- [30] 子融融媒体中心. 陕西省“十三五”生态环境保护工作成效明显 [EB/OL]. (2021-04-18) [2021-10-28]. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1697310494701560326&wfr=spider&for=pc>.
- [31] 央视网. 刘东生: 中国已实现荒漠化土地零增长 愿将“中国经验”与世界分享 [EB/OL]. (2017-9-14) [2021-10-28]. <http://sannong.cctv.com/2017/09/14/ARTI4CB4xQMayrZA5EzkaQ-Pl170914.shtml>.
- [32] 央广网. 我国首批46个水生态文明城市试点完成建设 [EB/OL]. (2017-9-14) [2021-10-28]. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1586602434935199510&wfr=spider&for=pc>.
- [33] 李嘉, 唐河, 饶维龙, 等. 南水北调工程对华北平原水储量变化的影响[J]. *中国科学院大学学报*, 2020, 37(6): 775-783.
- [34] 王浩, 贾仰文. 变化中的流域“自然-社会”二元水循环理论与研究方法[J]. *水利学报*, 2016, 47(10): 1219-1226.
- [35] 周露明, 谢兴华, 朱珍德, 等. 基于水-能源-粮食纽带关系的农业资源投入产出效率研究[J]. *农业资源与环境学报*, 2020, 37(6): 875-881.
- [36] 赵新刚, 路凡, 余新旋, 等. 产业转移视角下中国能源强度的空间分布特征和收敛性研究[J]. *工业技术经济*, 2019, 38(1): 100-108.
- [37] 田欣, 熊翌灵, 刘尚炜, 等. 中国省际水资源压力的转移模式[J]. *中国人口·资源与环境*, 2020, 30(12): 75-83.
- [38] 王勇. 全行业口径下中国区域间贸易隐含虚拟水的转移测算[J]. *中国人口·资源与环境*, 2016, 26(4): 107-115.
- [39] ZHANG Y, HOU S, LIU J, et al. Evolution of virtual water transfers in China's Provincial Grids and its driving analysis [J]. *Energies*, 2020, 13(2): 328.
- (上接第65页)
- [11] 何用, 黄伟, 李荣, 等. 河口节制闸下淤积及冲淤效果耦合模型计算[J]. *武汉大学学报(工学版)*, 2004(4): 16-20, 35.
- [12] U JI, P Y JULIEN, S K PARK. Sediment Flushing at the Nakdong River Estuary Barrage [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2011, 137(11).
- [13] 梁慧迪, 匡翠萍, 顾杰, 等. 双龙河挡潮闸调度方案与闸下河道冲刷效果[J]. *天津大学学报(自然科学与工程技术版)*, 2016, 49(12): 1282-1289.
- [14] 沈志刚, 刘桦, 何友声. 苏州河挡潮闸冲淤试验研究[C]//中国力学学会、上海交通大学. 自然、工业与流动——第六届全国流体力学学术会议论文集. 中国力学学会、上海交通大学: 中国力学学会, 2001.
- [15] 田治宗, 梁跃平, 解吉祥, 等. 堤防溃口口门区水力及冲淤特性模型试验研究[J]. *人民黄河*, 2003(3): 32-33.
- [16] 赵振兴, 陈立德. 乌江闸闸下优化冲淤研究[J]. *河海科技进展*, 1992, 12(1): 99-101.
- [17] 舒荣龙, 李廷富. 放水冲淤与整治相结合治理綦江河口浅滩的试验研究[J]. *水运工程*, 1994(4): 24-28.
- [18] 韩晓维, 包中进, 徐岗. 正交试验法在感潮河口水闸闸下冲淤试验中的应用[J]. *浙江水利科技*, 2012(5): 15-17.
- [19] 张文传, 王均星, 刘永斌, 等. 低水头多孔闸调度水力冲淤模型试验研究[J]. *水电能源科学*, 2017, 35(1): 69-72.