

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2022.01.007

中国与“一带一路”沿线国家能源贸易隐含水足迹分形特征分析

孙才志^{1,2},高春阳³

(1. 辽宁师范大学海洋经济与可持续发展研究中心,辽宁 大连 116029; 2. 辽宁省“海洋经济高质量发展”高校协同创新中心; 3. 辽宁师范大学地理科学学院,辽宁 大连 116029)

摘要:采用自下而上的能源水足迹评价模型,对中国与“一带一路”沿线国家能源贸易隐含水足迹进行测算,解析其贸易结构及类型,并利用分形方法深入探究其位序-规模分布规律。结果表明:2001—2019年,中国能源水足迹出口规模较小且呈下降趋势,进口规模大且增长迅速;贸易结构以煤炭和石油水足迹为主,天然气水足迹占比小并持续提升;能源贸易隐含灰水足迹高于蓝水足迹。从贸易规模首位度来看,中国能源水足迹出口规模首位分布从不明显逐渐趋于明显,进口首位分布不明显且呈分散化趋势。中国与“一带一路”沿线国家能源贸易隐含水足迹位序-规模空间分布呈现多分形结构。出口中,高位序级别从集聚态演变为均衡态,中低位序空间分布较分散,东南亚是中国主要出口地区;进口中,高位序趋于均衡化,中低位序分裂化程度减轻,进口地区集中在中东少数国家,其次为俄罗斯和东南亚。

关键词:“一带一路”;能源水足迹;生命周期评价;分形特征;对外贸易

中图分类号:TV213.4;F426.2 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2022)01-0052-10

Analysis on fractal characteristics of implied water footprint of energy trade between China and countries along “the Belt and Road” // SUN Caizhi^{1,2}, GAO Chunyang³ (1. Institute of Marine Sustainable Development, Liaoning Normal University, Dalian 116029, China; 2. University Collaborative Innovation Center of Marine Economy High-Quality Development of Liaoning Province, Dalian 116029, China; 3. School of Geography, Liaoning Normal University, Dalian 116029, China)

Abstract: The bottom-up evaluation model was adopted to measure the implied water footprint of energy trade between China and countries along “the Belt and Road”. The trade structure and types were analyzed, and the fractal method was used to deeply explore its rank-size rule. The results show that from 2001 to 2019, the export scale of China’s water footprint of energy trade is small and shows a downward trend, and the import scale is large and growing rapidly. The trade structure is dominated by coal and oil water footprint, and the proportion of natural gas water footprint is small and continues to increase. The implied grey water footprint of energy trade is higher than that of blue water. From the perspective of the primacy index of trade scale, the primacy distribution of export scale of China’s water footprint of energy trade is not obvious, and gradually tends to be obvious, while the primacy distribution of import is not obvious and shows a decentralized trend. The spatial distribution of rank-size of implied water footprint of energy trade between China and countries along “the Belt and Road” presents multi-fractal structure. In the export, the high order level evolves from agglomeration to equilibrium, and the spatial distribution of medium and low rank is relatively scattered. Southeast Asia is main export region of China. In the import, the high-rank tends to be balanced, the medium-and low-rank tend to be weak, and the import areas are concentrated in a few countries in the Middle East, followed by Russia and Southeast Asia.

Key words: “the Belt and Road”; water footprint of energy; life cycle evaluation; fractal characteristics; external trade

随着中国人口规模的增加和社会工业化进程的推进,资源安全问题日渐突出。中国面临着日益严

峻的能源形势,主要体现在能源需求迅速增大、能源效率偏低、能源结构不合理和能源供给严重依赖进

基金项目:国家社会科学重点基金(19AJY010)

作者简介:孙才志(1970—),男,教授,博士,主要从事水资源经济与海洋经济研究。E-mail: suncaizhi@lnnu.edu.cn

口等方面。中国已成为世界上第一大能源生产国和消费国,对能源的需求仍处于上升趋势,据《2050年世界与中国能源展望》估计,中国一次能源需求将于2035年前后进入峰值,届时中国一次能源需求将达到56亿t标准煤,增长大约35.6%^[1]。水是工业的“血液”,是维系能源生产与供应的基础物质条件,理解水资源和能源之间的相互作用关系对于开发管理水资源尤为重要。能源水足迹作为表征能源生产、消费过程中的水资源占用及污染情况的重要指标,是研究水资源利用的空间转移情况的有效手段,能够较好地反映水-能纽带关系问题^[2-3]。

能源水足迹的相关研究主要围绕其资源效率和时空演变展开,较少涉及贸易中的能源水足迹转移。能源水足迹的测算分为自上而下和自下而上两种方法,前者受限于国家投入产出表的编制年限,不能较好地反映水-能关系现状,后者受客观条件限制少,实际应用较广。如Ding等^[4]开发了能源水足迹评价模型,对中国主要化石能源和可再生能源的水足迹进行核算;陈倩云^[5]利用生命周期评价方法,测算伴随着煤炭、火电以及石油天然气贸易的能源产品水足迹流动格局;关伟等^[2]在测算中国30个省市化石能源和电力生产生命周期水足迹的基础上,研究中国能源水足迹时空格局的演化特征。“一带一路”沿线国家拥有丰富的能源资源,能源投资是推进“一带一路”建设的重要方面,因此关于能源的合作也是诸多学者研究的方向。如韩梦瑶等^[6]利用多区域投入产出方法,从直接能源贸易和隐含能源流动的双重角度刻画中国与“一带一路”沿线能源关联并对比研究;谢忠俩^[7]对2007—2017年中国与“一带一路”沿线国家能源生产消费和双边贸易情况进行分析,发现中国存在较大的能源缺口。由于横跨经纬度范围广,“一带一路”沿线国家也存在较大的水资源禀赋空间差异,因此水安全问题也是“一带一路”研究的重要课题^[8]。本文以对外能源贸易中的水足迹转移为视角,基于生命周期的能源水足迹评价模型,对中国与“一带一路”沿线国家的化石能源水足迹贸易规模进行测算,研究中国跨国能源流动中的水资源消耗规律。

对外贸易作为一种经济地理活动表现,其结构组织上满足一定的层级分布形态^[9],一国的对外贸易兼具空间形态的层级性和外贸发展的动态性,这为利用分形的方法研究中国对外贸易的空间分布特征和演化轨迹提供了一定的理论支撑^[10]。“一带一路”沿线国家成为中国重要能源合作伙伴的同时,也会带来一系列资源环境的影响^[11]。尽管“一带一路”的能源合作已经得到了广泛研究,但“一带一

路”能源贸易下的水资源流动问题尚未得到足够关注。进行贸易中的能源与水资源间的量化关联研究,对跨境水-能安全问题具有重要意义。鉴于此,本文在测算中国与“一带一路”沿线化石能源水足迹流动的基础上,分析其贸易结构和类型的时空演变特征,并深入分析中国化石能源水足迹的外贸分布格局和演化规律,以期为中国在国际贸易下有效化解能源危机和水危机提供科学依据和理论指导。

1 研究方法与数据来源

1.1 研究区域

“一带一路”是开放包容的经济合作体,不限国别,不限实体。为了研究方便,本文选取“一带一路”倡议之初所包含的65个沿线国家作为研究区域,包括蒙俄2国:蒙古、俄罗斯;东南亚10国:文莱、柬埔寨、印度尼西亚、老挝、马来西亚、缅甸、菲律宾、新加坡、泰国、越南;南亚7国:孟加拉国、不丹、印度、马尔代夫、尼泊尔、巴基斯坦、斯里兰卡;中亚5国:哈萨克斯坦、土库曼斯坦、塔吉克斯坦、乌兹别克斯坦、吉尔吉斯斯坦;西亚和中东18国:伊朗、阿富汗、伊拉克、土耳其、叙利亚、约旦、以色列、巴勒斯坦、沙特阿拉伯、巴林、卡塔尔、也门、阿曼、阿拉伯联合酋长国、科威特、黎巴嫩、塞浦路斯、埃及;东欧23国:阿塞拜疆、格鲁吉亚、亚美尼亚、白俄罗斯、保加利亚、捷克、匈牙利、摩尔多瓦、波兰、罗马尼亚、斯洛伐克、乌克兰、爱沙尼亚、拉脱维亚、立陶宛、阿尔巴尼亚、波黑、克罗地亚、马其顿、黑山、希腊、塞尔维亚、斯洛文尼亚。

1.2 能源水足迹评价模型

能源水足迹评价模型基于ISO标准方法^[12]建立,从能源生产生命周期出发,包括采掘、处理、加工转化、使用、废弃等过程。能源水足迹包括生产生命周期过程中的直接水足迹和间接水足迹,由于能源生产周期的间接水消耗计算较复杂,本文仅计算化石能源(煤炭、石油、天然气)直接水足迹。能源生产周期中造成的水污染数据借鉴灰水足迹的概念来表示^[13]。能源水足迹分为能源蓝水足迹和能源灰水足迹,能源蓝水足迹指能源生产过程中所消耗的地表水和地下水的总和,能源灰水足迹指以自然本底浓度和现有环境水质标准为基准,将一定的污染物负荷吸收同化所需的淡水体积^[14]。能源水足迹评价模型为

$$E_{WF} = E_{WF_b} + E_{WF_g} \quad (1)$$

式中: E_{WF} 为能源单位产量水足迹; E_{WF_b} 为能源生产过程的单位产量蓝水足迹; E_{WF_g} 为能源生产过程的单位产量灰水足迹。考虑到生命周期的所有过程,

能源水足迹应为各个生命周期阶段水足迹的总和,公式为

$$E_{WF_n} = \sum_{m=1}^M (E_{WF_{bm}} + E_{WF_{gm}}) \quad (2)$$

式中: E_{WF_n} 为第n类能源产品单位产量水足迹; M 为第n类能源产品包括的生产过程数量; m 表示第m个生产过程。各能源单位产量灰水足迹的计算公式为

$$E_{WF_g} = \frac{G}{\rho_{max} - \rho_{nat}} \quad (3)$$

其中

$$G = LV$$

式中: L 为单位能源生产的废水排放量, m^3/t ; V 为废水中污染物的量, mg/m^3 ; G 为单位能源生产的污染物排放量, mg/t ; ρ_{max} 为受纳水体可接受的污染物最大容许质量浓度, mg/L ; ρ_{nat} 为受纳水体的自然本底质量浓度, mg/L 。能源水足迹贸易计算公式为

$$T_i = \sum_{n=1}^N E_{WF_n} T_{in} \quad (4)$$

式中: T_i 为中国对*i*国的能源水足迹贸易量; T_{in} 为中国对*i*国第*n*类能源贸易量;*N*为能源贸易种类的数量。

1.3 位序-规模法则及分形理论

基于分形的空间结构拟合是研究城市等级规模分布的经典方法^[15-17],能够对“流量”、“规模量”等空间要素的集聚与分散态进行清晰的呈现,将隐含在内的地域层次分布模式具现化,为空间分布识别提供模型支撑^[10]。国内外诸多学者将分形理论应用于资源流动、产业贸易、收入分配等方面的研究^[18-21],利用其可直观地反映大数据样本的分布特性,阐述水足迹流动的相关问题,展现能源贸易隐含水足迹的空间结构状态。分形理论以分形维数(即Hausdorff维数)作为特征参数,位序-规模法则(rank-size rule)研究一个地区的规模与该地区在国家内规模排序关系的规律,公式为

$$V_i = V_1 r_i^{-q} \quad (5)$$

$$N_T = A V_G^{-D} \quad (D > 0) \quad (6)$$

式中: r_i 为中国对*i*国能源水足迹贸易额降序排列的位序; V_i 为位序是*r_i*的国家能源水足迹贸易规模; V_1 为理论的首位国家能源水足迹贸易规模;*q*为Zipf维数。*N_T*为大于等于门槛能源水足迹贸易规模的国家数量;*D*为分形维数;*A*为系数; V_G 为中国与*i*国能源水足迹贸易规模。

谈明洪等^[22]对*D*与*q*的关系进行了实证分析,结果表明,*D*与*q*之积为确定系数*R²*。*D*与*q*的大小直接反映空间分布等级结构。当*q=D=1*时,最大规模与最小规模之比恰好为整个贸易体系数目,

系统形态达到最优;当*q>1*且*D<1*时,表示能源水足迹贸易规模空间分布呈集聚态,各国间差异显著,顶端国家垄断性较强;当*q<1*且*D>1*时,贸易规模空间分布较均匀,等级结构趋于分散,顶端规模不突出,中间位序数目较多;当*q→0*且*D→∞*时,各国贸易规模一样大;当*q→∞*且*D→0*时,只存在一个贸易伙伴。

1.4 首位度指数

为探讨中国与“一带一路”沿线各国能源水足迹贸易的首位分布情况,引用城市首位度进行分析。首位度指数包括2城市指数*S₂*、4城市指数*S₄*和11城市指数*S₁₁*。按照奥尔巴赫位序-规模法则,*S₂=2*、*S₄=S₁₁=1*是规模结构的理想状态,小于这个标准,则表明城市首位分布不明显。首位度指数公式为

$$S_2 = V_1/V_2 \quad (7)$$

$$S_4 = V_1/(V_2 + V_3 + V_4) \quad (8)$$

$$S_{11} = 2V_1/(V_2 + V_3 + \dots + V_{11}) \quad (9)$$

1.5 数据来源

能源贸易数据来源于国际贸易中心(ITC),选取2001、2007、2013、2019年中国与“一带一路”沿线国家在《商品名称及编码协调制度》(HS编码)6位编码下的煤炭、石油、天然气贸易数据。各类化石能源生产生命周期的单位产量水足迹值与数据来源见表1。灰水足迹评价采用废水排放中的主要污染物COD为标准。受纳水体自然本底浓度参照GB 3838—2001《地表水环境质量标准》IV类水。原煤开采和洗选中的蓝水消耗定义为0.3 m³/t和0.15 m³/t^[23]。原煤开采和洗选中的废水COD排放量分别为300 g/t和40 g/t,COD最大容许质量浓度分别为70 mg/L和100 mg/L^[24]。原油开采中蓝水消耗定义为7 m³/t^[25]。石油炼制过程蓝水消耗和

表1 中国化石能源生产生命周期单位产量水足迹值

Table 1 Water footprint per unit output in life cycle of China's fossil energy production

化石能源类型	生产加工过程	水足迹分类	单位产量水足迹值/(m ³ ·t ⁻¹)	文献
煤	原煤开采	蓝水足迹	0.300	[23]
		灰水足迹	7.500	[24]
	洗选	蓝水足迹	0.150	[25]
		灰水足迹	0.571	[26]
石油	原油开采	蓝水足迹	7.000	[27]
		灰水足迹	0.910	[27-28]
	加工炼制	蓝水足迹	2.000	[26]
		灰水足迹	10.000	[26-28]
天然气	开采	蓝水足迹	4.182	[29]
		灰水足迹	0.910	[27-28]
	加工净化	蓝水足迹	2.509	[30]
		灰水足迹		

废水 COD 排放量为 $2 \text{ m}^3/\text{t}$ 和 900 g/t ^[26]。《中国环境统计年鉴》^[27] 规定原油和天然气开采业废水 COD 排放量为 109.282 g/t 。原油和天然气开采业废水 COD 最大排放质量浓度为 150 mg/L , 石油炼制工业废水 COD 最大质量浓度为 120 mg/L ^[28]。由于天然气行业没有明确的行业标准, 采用四川省用水定额^[29]中的规定(四川省天然气产量位居中国四大天然气主产区第一), 天然气开采过程中钻井泥浆用水定额为 $30 \text{ m}^3/\text{万 m}^3$, 天然气加工净化过程的用水定额为 $18 \text{ m}^3/\text{万 m}^3$ ^[30]。

2 结果与分析

2.1 能源水足迹贸易结构

基于能源水足迹评价模型, 计算 2001、2007、2013、2019 年中国与“一带一路”沿线国家煤炭、石油、天然气 3 类化石能源水足迹贸易结构(图 1)。总体来看, 中国能源水足迹出口规模较进口少且呈下降趋势, 从 2001 年的 $101.2 \times 10^6 \text{ m}^3$ 降至 2019 年的 $26.5 \times 10^6 \text{ m}^3$; 中国能源水足迹进口规模大且增长迅速, 从 2001 年的 $9.2 \times 10^8 \text{ m}^3$ 增至 2019 年的 $88.5 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。2001—2019 年, 中国对外能源战略从“走出去”的多元化能源外交逐步调整为适应“一带一路”倡议下的全球布局, 其间中国建设了中俄、中国-中亚、中缅多条陆上油气输送管线, 随着中国实行能源“十二五”战略规划, 能源产业结构不断优化升级, 化石能源总产量降低, 加之受金融危机的影响, 化石能源对外出口大幅下降, 能源水足迹出口随之减少, 为了满足国内巨大的能源需求, 转向大量进口能源, 导致中国进口化石能源水足迹逐年攀升。

从能源水足迹的结构来看, 中国能源产品水足

迹出口存在阶段性变化, 2001 和 2007 年煤炭和石油水足迹出口占比 80% 以上, 天然气水足迹出口占比较小; 2013 年由于能源“十二五”规划的影响, 国家积极开发天然气等清洁能源, 煤炭和石油水足迹出口迅速减少, 天然气水足迹出口相应增加, 占比从 2007 年的 17% 迅速增至 2019 年的 61%。中国能源产品水足迹进口中石油水足迹占比最大并呈持续降低趋势, 从 2001 年的 96% 降至 2019 年的 72%, 煤炭和天然气水足迹占比持续提升, 其中煤炭水足迹占比提升了近 20%。中国对于石油的需求较大, 国内原油产量增长远远低于石油消费增长, 造成中国石油过度依赖进口。同时, 由于中国具有煤炭资源禀赋特点, 煤炭在中国有应用的普遍性, 在某些关键领域难以替代, 随着国内“煤改气”工程进行不顺, 煤炭消费重新迎来增长, 促使近年来煤炭水足迹进口量持续走高。

从能源水足迹的类型来看, 中国与“一带一路”沿线国家能源水足迹贸易中灰水足迹占比高于蓝水足迹, 其中煤炭灰水足迹贡献了灰水足迹总出口量的 2/3, 在灰水足迹进口中也占有相当大的比例。中国是煤炭消费和出口大国, 中国生产的煤炭产品具有较高的灰水足迹, 生产单位质量煤炭的灰水足迹是蓝水足迹的 17.9 倍, 导致能源贸易隐含水足迹类型上的比例失衡。随着国家能源政策的调整转型, 2013 年中国原煤和原油出口较 2007 年分别减少了 85.9% 和 58.4%, 天然气出口增加了 3.8%, 使煤炭和石油灰水足迹出口显著下降, 而天然气蓝水足迹出口小幅提升。从进口来看, 由于中国石油对外依存度较高, 各年度能源蓝水足迹进口中石油蓝水足迹占比均超过 80%, 能源灰水足迹进口中石油

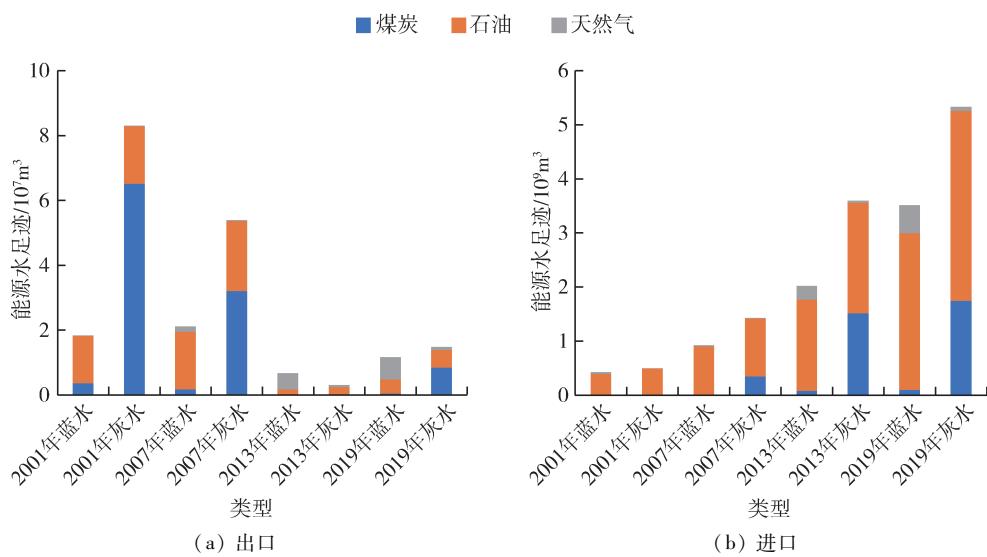


图 1 中国与“一带一路”沿线国家能源水足迹贸易结构

Fig. 1 Trade structure of water footprint of energy trade between China and countries along “the Belt and Road”

灰水足迹占比有所下降但仍超过 50%。天然气水足迹进口显著增加,2007—2019 年进口量增长了 25.5 倍,其中蓝水足迹和灰水足迹进口均有增加。

2.2 首位度

为探讨中国对外能源贸易隐含水足迹位序-规模的变化规律,利用城市首位度计算中国与“一带一路”沿线国家能源水足迹贸易的首位分布情况(表 2)。从出口来看,2001—2019 年,中国能源水足迹出口规模的首位分布存在波动式变化,3 种首位度指数均经历了先降再升再降的过程。2001—2007 年首位分布不明显,且有弱化趋势;2013 年呈现明显的首位分布,2 城市指数为 4.40,4 城市和 11 城市指数分别为 1.94 和 3.59,均远超首位分布的标准,首位贸易对象规模顶端优势明显;至 2019 年,2 城市指数降至 2.95,集聚化表现有所弱化,但仍呈首位分布格局。从进口来看,中国能源水足迹进口规模的首位分布不明显,3 个指数 2001—2019 年均低于理想值且持续下降,2 城市指数低于 1.2,4 城市和 11 城市指数低于 0.7,说明中国进口“一带一

表 2 中国与“一带一路”沿线国家能源贸易隐含水足迹
规模首位度指数

Table 2 Primacy index of water footprint scale of energy trade between China and countries along “the Belt and Road”

贸易类型	年份	2 城市指数	4 城市指数	11 城市指数
出口	2001	1.41	0.52	0.91
	2007	1.06	0.45	0.64
	2013	4.40	1.94	3.59
	2019	2.95	1.35	1.55
进口	2001	1.19	0.52	0.66
	2007	1.28	0.54	0.61
	2013	1.02	0.48	0.53
	2019	1.10	0.47	0.56

路”沿线国家能源水足迹的空间分布结构呈现分散化,规模顶端的集聚和辐射功能较弱,首位贸易对象不具备垄断功能。为了进一步探究中国与“一带一路”沿线国家能源水足迹贸易规模空间分布的合理性,引入分形的研究方法进行位序-规模分布特征的深入分析。

2.3 位序-规模分布特征

以中国与“一带一路”沿线国家能源贸易隐含水足迹规模为纵坐标,位序为横坐标,作位序-规模曲线(图 2)。发现中国能源水足迹进出口位序-规模曲线均呈现幂律分布,即少数节点具有很高的贸易规模,多数节点的贸易规模低且彼此间差异性不明显,规模等级体系失衡,具有明显的无标度性。对比中国能源水足迹进出口位序-规模发现,出口较进口的等级差异性更强,进口位序较多,进口的空间分布更加多元化。

为了进一步揭示中国能源水足迹对外贸易的空间分布等级结构特征,引入位序-规模双对数回归方程进行结构上的解析。根据 2001、2007、2013 和 2019 年中国与“一带一路”沿线能源水足迹贸易规模和位序,计算双对数回归方程,得出各相关系数(表 3)。结果显示,若用一条斜率来拟合研究时段内的贸易额散点图,则得到的判定系数 R^2 极低,连续散点图出现了显著分段,必须用分解的两段或者三段斜率才能出现高度拟合。这表明中国与“一带一路”沿线国家能源水足迹贸易规模空间分布出现多个无标度区的状态,即多分形结构。总体来看,中国对“一带一路”沿线国家能源水足迹贸易的位序不断增加,即与中国进行能源水足迹贸易的国家越来越多。

由表 3 可见,从出口来看,2001 年、2007 年、2013 年中国能源水足迹出口贸易空间分布均可划

—●— 2001 年 —●— 2007 年 —●— 2013 年 —●— 2019 年

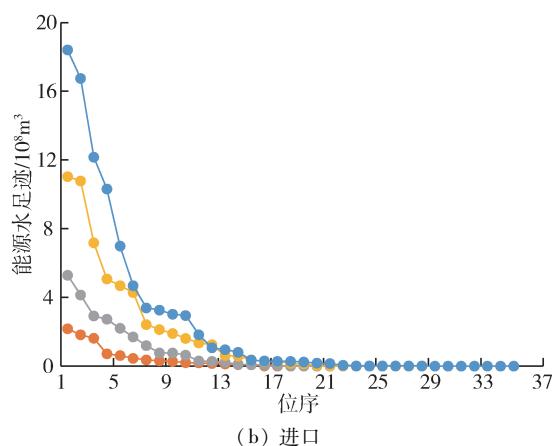
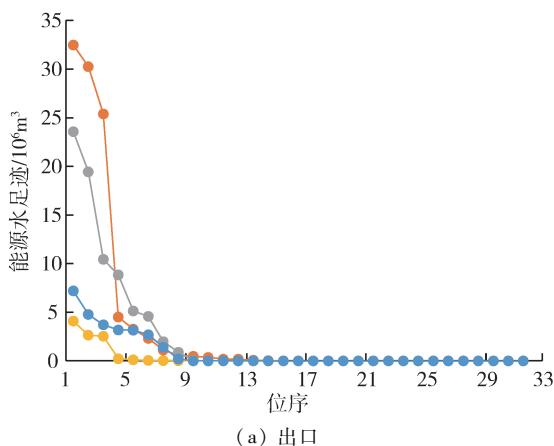


图 2 中国与“一带一路”沿线国家能源贸易隐含水足迹位序-规模分布

Fig. 2 Distribution of rank-size of implied water footprint of energy trade between China and countries along “the Belt and Road”

表 3 中国与“一带一路”沿线国家能源贸易隐含水足迹位序-规模无标度区参数

Table 3 Parameters of non-scale area of rank-size of implied water footprint of energy trade between China and countries along “the Belt and Road”

贸易类型	年份	无标度区一				无标度区二				无标度区三			
		位序	q	D	R^2	位序	q	D	R^2	位序	q	D	R^2
出口	2001	1~14	2.711	0.329	0.892	15~20	8.936	0.109	0.970				
	2007	1~8	1.427	0.574	0.819	9~29	6.982	0.141	0.984				
	2013	1~9	2.681	0.330	0.884	10~27	7.169	0.135	0.966				
	2019	1~6	0.535	1.841	0.985	7~9	16.585	0.06	0.991	9~31	6.516	0.149	0.969
进口	2001	1~15	1.318	0.703	0.927	15~22	25.057	0.035	0.886				
	2007	1~7	0.707	1.285	0.909	8~18	4.669	0.198	0.924	19~26	17.301	0.046	0.796
	2013	1~12	0.983	0.925	0.909	13~19	4.361	0.222	0.970	20~33	18.959	0.041	0.770
	2019	1~10	0.946	0.951	0.900	11~21	3.776	0.252	0.951	21~35	15.123	0.048	0.729

分为 2 个无标度区, 2019 年出现 3 个无标度区。2001—2013 年, 无标度区一 $q > 1, D < 1$, 无标度区二 $q > 6, D < 0.2$, 说明此阶段中国对“一带一路”沿线国家能源水足迹出口规模空间分布差异较大, 呈集聚形态; 无标度区二的 q 值大于无标度区一, 说明低位序级别贸易的分裂化表现较高位序更强。高位序级别国家数量呈减少趋势, 低位序级别国家数量则显著增加, 集聚形态呈现先降低后增强的趋势。在内部次序层面上, 高位序级别以新加坡、马来西亚、印度尼西亚、泰国、越南等东南亚国家为主, 南亚的印度、中东的土耳其和阿联酋、东欧的克罗地亚和保加利亚退出无标度区一, 进入无标度区二; 低位序级别以中东国家为主, 中亚和南亚国家逐步进入无标度区二。到了 2019 年, 位序-规模分布存在大规模层次的断层现象, 高位序级别 $q < 1, D > 1$, 贸易规模空间分布演变为均衡态, 贸易规模差距缩减, 贸易对象皆为东南亚国家, 依次为新加坡、越南、印度尼西亚、缅甸、马来西亚和菲律宾, 高位序级别贸易额占比由先前的 99% 降至 93.5%; 中位序级别的 q 值陡增至 16.585, 将高位序与低位序的规模差距拉开, 贸易对象包含印度、孟加拉国和巴基斯坦 3 个国家, 贸易额差距悬殊; 低位序 q 值为 6.516, 空间分布仍呈集聚态, 贸易对象包含 23 个国家, 贸易范围向中亚、中东和东欧地区扩展。

2001—2019 年, 中国化石能源产品中煤炭和石油出口经历了大规模的萎缩, 天然气出口小幅度提升。一方面, 由于国内实施的能源“十二五”、“十三五”战略规划以及国际上受 2008 年金融危机的影响, 中国传统型能源出口大幅削减, 此阶段国家大力开发天然气和水电等清洁能源; 随着中缅油气管道建设使用, 东南亚因其地理位置优势和与中国相似的能源消费结构成为中国一次能源出口密集地, 东南亚在中国能源水足迹出口地区结构中占据首要位置。另一方面, 自中国加入世贸组织后, 开始积极参

与多边能源合作, 开拓了与多个国家的能源贸易渠道, 使中国能源水足迹中小规模出口贸易迅速发育。总体来看, 在中国能源结构性短缺的背景下, 传统化石能源出口的萎缩有助于催生能源消费结构的加速调整, 促进能源产业布局的优化升级, 减少虚拟形态的水资源流出, 保障国内经济高速发展下的能源与水资源安全。

从进口来看, 2001 年中国能源水足迹进口贸易的空间分布分为 2 个无标度区, 2007、2013 和 2019 年可划分为 3 个无标度区。2001—2007 年, 无标度区一的 q 值由 1.318 降至 0.707, D 值由 0.703 升至 1.285, 说明中国进口高位序级别能源水足迹的空间分布由集聚态演变为均衡态, 规模等级差异性缩小; 中低位序的 q 值显著降低, 但仍存在分裂化现象。在内部次序层面上, 高位序级别国家除俄罗斯和哈萨克斯坦外, 皆为中东和东南亚国家, 中东的阿联酋、科威特、也门、卡塔尔、伊拉克和东南亚的马来西亚、文莱、泰国退出了无标度区一, 进入无标度区二; 中低位序级别国家数量增加, 以中东和东南亚地区为主, 能源水足迹贸易占比由 2001 年的不足 0.2% 增至 14%。2007—2019 年, 无标度区一的 q 值略有提升, D 值略为降低, 均接近于 1, 说明高位序的空间分布结构趋于合理, 系统形态较优; 无标度区二的 q 值小于无标度区三, 均表现为降低趋势, 说明中低位序的集聚和分裂化表现稍弱。从内部次序的变化来看, 高位序级别中东地区始终占据优势, 印度尼西亚和俄罗斯相继成为中国能源水足迹进口的首位国家, 对外贸易的前三名稳定为俄罗斯、沙特阿拉伯和印度尼西亚; 中位序级别构成由东南亚和中东主导转变为中亚、东南亚、中东三分鼎立, 低位序级别东欧国家在数量上逐渐占据优势, 此外, 文莱、新加坡、老挝、印度等国稳定在低位序行列。

2001—2007 年, 中国是煤炭净出口大国, 煤炭基本供给自足, 而原油对外依存度逐年提升, 2007

年已超过 40%，能源水足迹进口主要来源于较高的石油水足迹进口量。此阶段中国的石油进口主要来源于俄罗斯和中东地区，从俄罗斯和中东地区进口石油水足迹占石油水足迹进口总量的 80% 以上。随着中哈原油管线一期工程于 2006 年开始运营，中亚地区在中国能源水足迹进口地区结构中的地位逐渐抬升，自此，中国通过布设与周边国家的陆上油气输送管线逐步减轻对“中国海上生命线”马六甲海运的需求。2013—2019 年，中国能源水足迹进口以煤炭和石油水足迹为主，东南亚、中亚在进口地区中所占份额越来越大。中哈、中俄和中缅油气输送管线的并行运营为中国带来大量油气资源，使中东作为中国传统石油进口地区的地位受到小幅冲击。目前，中国石油年消费量达到 6.6 亿 t，其中 5 亿 t 依赖进口，4 条陆上输油管线合计每年进口石油 8 700 万 t，这意味着在建成 4 条陆上能源通道后，马六甲海峡依然承担着中国 80% 左右的石油进口。也就是说，中国对中东的石油依赖未得到根本性的缓解，

中国石油进口不仅过度依赖海运，还过度依赖中东石油，造成极大的脆弱性风险。在欧洲版块上，中国与格鲁吉亚的石油外交取得新进展，跨里海大通道这条捷径的打通大大增强了中国与东欧地区联系的便捷性，有利于中国能源水足迹进口多元化发展。

2.4 分区位序-规模特征变化

为了探究中国对外能源贸易隐含水足迹的时空演变情况，分析 2001 年和 2019 年中国与“一带一路”沿线国家能源贸易隐含水足迹位序-规模分布（图 3），发现在出口方面，东南亚一直是中国能源水足迹出口的高位序-规模地区，西亚基本保持在低位序-规模，而俄罗斯、哈萨克斯坦、印度等能源资源相对优势国由高位序-规模区降为中、低位序-规模区。在进口方面，中国从俄罗斯、西亚进口的能源水足迹最多且贸易规模持续提升，中亚和东欧地区位序数量显著增加但规模不大，东南亚地区除马来西亚和印度尼西亚这两个高位序-规模区维持不变外，基本表现为规模提升但位序下降。从“一带一路”沿线

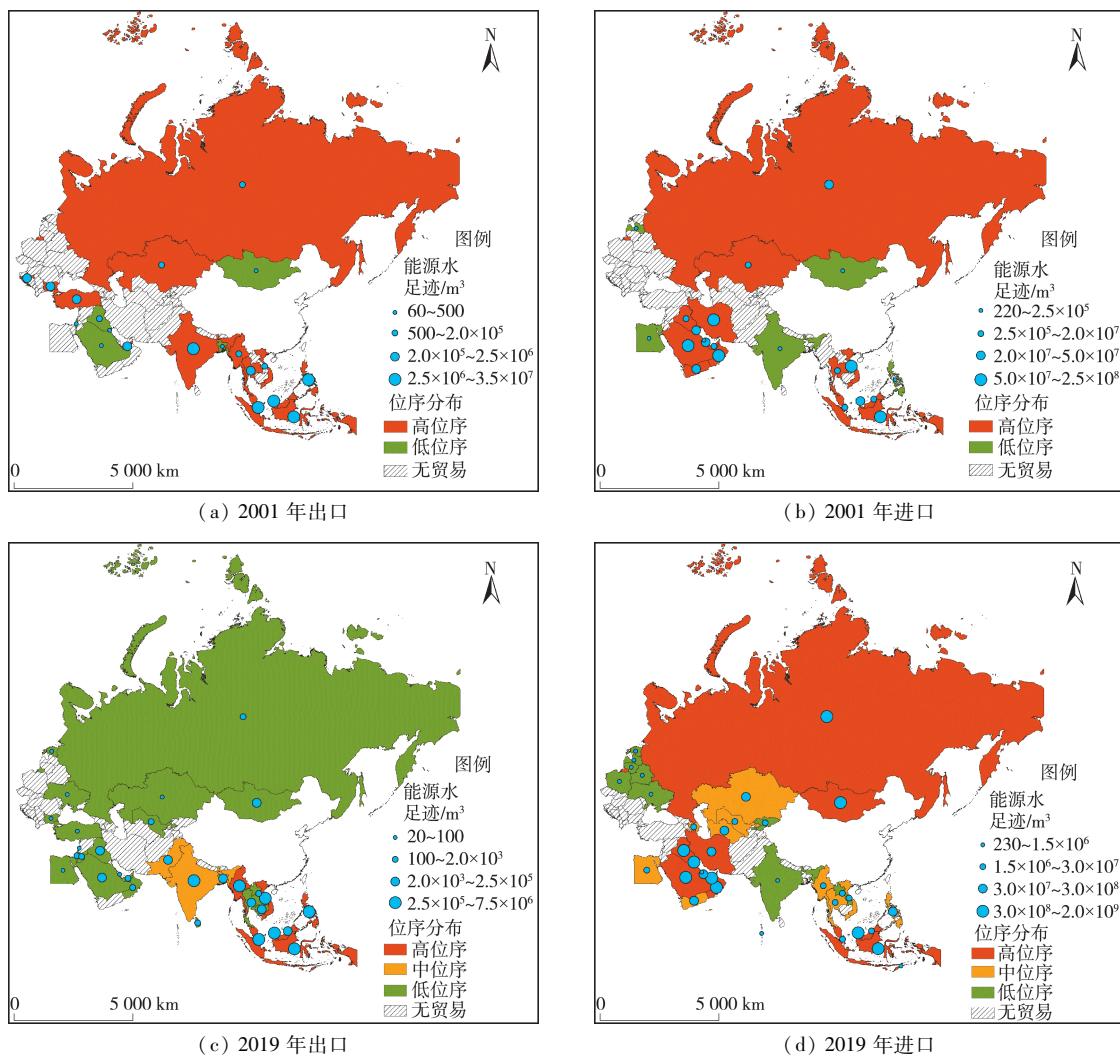


图 3 中国与“一带一路”沿线国家能源贸易隐含水足迹位序-规模分布演变

Fig. 3 Distribution evolution of rank-size of implied water footprint of energy trade between China and countries along “the Belt and Road”

各分区的位序-规模特征变化上可以窥见中国新时期能源战略的转型,对于具有资源优势的国家和地区,中国减少了能源出口,加大了能源进口合作,同时在沿线西侧不断开拓新的贸易渠道,增加外贸发展的可持续性。

3 讨 论

水足迹的流动通过商品贸易实现了空间上资源的互补,并且避免了跨地区长距离运输实体水资源。水资源匮乏地区通过进口水资源密集型产品,可以达到使用其他地区水资源的目的。中国提出的“一带一路”倡议,既能通过资源互补性合作促成与沿线国家的互利共赢,又能解决自身经济面临的产能过剩、能源安全脆弱性等问题。从商品结构看,中国的一次能源水足迹出口集中为煤炭,而煤炭的主产地集中在中国北方晋陕蒙等水资源紧缺省份,这进一步加剧了北方地区的资源性缺水程度,恶化了其水-能关系。煤炭水足迹的出口以灰水足迹为主,灰水足迹是将生产过程中产生的污染物稀释至环境标准所需的淡水水量,是量化环境负面效应的工具,这意味着中国出口煤炭的同时承载着相应的环境容量,中国煤炭行业的生产加工亟须技术升级,降低灰水足迹,以减少对生态造成的负面影响。中国一次能源水足迹进口集中为石油且具有高度依赖性,石油的生产生命周期耗水量分别是煤炭和天然气的2.3和2.6倍,进口石油可以节省国内大量水资源,在国内石油资源几近枯竭的背景下为宏观经济发展提供水资源保障,在一定程度上缓解了中国的用水紧张程度。从地区结构看,中国一次能源水足迹出口结构总体表现为由集中化演变为分散化,出口辐射范围提升,由东南亚向南亚、中亚和东欧地区转移,这有利于分散中国对东南亚的能源出口依赖,提升中国在全球能源市场的影响力。从全球水资源节约的角度看,水足迹流入地由富水的东南亚分散向沿线西侧,能够惠及沿线更多国家,体现“一带一路”倡议的优越性和可行性。而中国石油水足迹进口主要集中在中东地区少数国家,这间接造成中国每年从中东进口大量水资源,对于水资源相对匮乏的中东而言,伴随着能源外贸的水资源流出加剧了其他部门的供用水矛盾,如果中国将石油安全寄托于中东地区,进口渠道脆弱性风险将居高不下,进而威胁到中国石油和水资源供应的稳定性。

对于中国来说,打破这种局面的有效手段就是控制能源来源地和能源运输路径的稳定,降低对海上能源通道的依赖度。同时,大力发展能源科技,提高能源资源利用效率,优化能源消费结构,降低能源

用水需求。从以上的分析可以看出,俄罗斯、中亚和东南亚尽管能源资源丰富,但总体位序不高,还存在较大的合作提升空间。中国拥有俄罗斯需要的出口市场,俄罗斯则拥有中国缺乏的油气资源,双方能够在战略上互补短板。中亚是全世界最集中的能源密集地,中亚与中国的地理距离带来了得天独厚的地缘战略优势。其次,提高新能源在能源消费中的比例,大力发展战略特别是可再生能源,是弥补化石能源固有缺陷弊端的关键。天然气在化石能源中拥有较低的水足迹,在中国的能源消费结构中远低于世界平均水平,提高天然气使用量对于节约水资源意义重大。在“双碳”计划背景下,电力能源尤其是水电的重要性不言而喻,水力发电虽然有着超过化石能源总和的单位水足迹,但胜在水资源可循环利用、发电效率高、成本低、对生态冲击较小,中国西南水力资源充沛地区发展水电行业尚存发掘空间。

本文的研究处于探索阶段,存有一些不足之处:
①由于中国对于部分能源行业标准的制定存在滞后和未统一的现象,文中计算结果可能会产生一定偏差;②由于数据获取复杂性问题,本文对于中国能源水足迹进口的测算以国内能源生产生命周期水足迹为依据,从中国视角出发来测算在“一带一路”能源贸易下的水资源转移量。由于沿线各国生产技术水平和资源利用效率的不均衡性,可能会导致中国进口一次能源水足迹总量上产生偏差,具体表现为:经济发展水平较高的国家和地区能源单位产量水足迹值偏小,经济发展水平较低的国家和地区能源单位产量水足迹值偏大。但由沿线各国资源禀赋差异带来的能源贸易量的巨大差距可以在一定程度上弥补单位水足迹导致的偏差,因此对于中国能源水足迹进口空间分布结构的影响不大。未来在掌握沿线各国能源水消耗的基础上,在全球水资源转移的视角下开展对外贸易空间分布结构的研究更具指导意义。

4 结 论

a. 2001—2019年,中国能源水足迹出口规模较小且持续下降,中国能源水足迹进口规模大且增长迅速。从能源水足迹的结构来看,3种化石能源水足迹出口存在波动变化,其中煤炭和石油水足迹出口占比大但呈下降趋势,天然气水足迹出口占比小但持续提升;能源水足迹进口中石油水足迹占比最高,煤炭和天然气水足迹占比持续提升。从能源水足迹的类型来看,灰水足迹贸易占比高于蓝水足迹,煤炭和石油灰水足迹出口显著下降,天然气蓝水足

迹出口有所提升；能源蓝水足迹进口中石油蓝水足迹占比高达 80% 以上，能源灰水足迹进口以煤炭和石油为主，近年来天然气水足迹进口量呈增加趋势。

b. 从能源水足迹贸易规模首位度来看，2001—2019 年，中国能源水足迹出口规模的首位分布存在波动变化，3 种首位度指数均经历了先降再升再降的过程，首位分布从不明显逐渐趋于明显；中国能源水足迹进口规模的首位分布始终不明显，空间结构趋于分散化，首位贸易对象不具备垄断功能。

c. 中国与“一带一路”沿线国家能源水足迹贸易规模空间分布呈现多分形结构，出现了多个无标度区，中国能源水足迹贸易伙伴国数量不断增加。在中国能源水足迹出口的位序-规模分布结构中，高位序级别从集聚态演变为均衡态，中低位序级别的空间分布较为分散，东南亚是中国能源水足迹出口主要地区；在中国能源水足迹进口的结构中，高位序级别趋于均衡化，中低位序级别的分裂化程度减轻，能源水足迹主要进口地区集中在中东地区少数国家，其次为俄罗斯和东南亚，总体的等级体系差异性呈现萎缩。

参考文献：

- [1] 中国石油经济技术研究院. 2050 年世界与中国能源展望 [R]. 北京：中国石油经济技术研究院, 2020.
- [2] 关伟, 赵湘宁, 许淑婷. 中国能源水足迹时空特征及其与水资源匹配关系 [J]. 资源科学, 2019, 41(11):2008-2019. (GUAN Wei, ZHAO Xiangning, XU Shuteng. Spatiotemporal feature of the water footprint of energy and its relationship with water resources in China [J]. Resources Science, 2019, 41 (11) : 2008-2019. (in Chinese))
- [3] 孙才志, 郑靖伟. 基于 MRIO 与 SNA 的中国水资源空间转移网络分析 [J]. 水资源保护, 2020, 36(1):9-17. (SUN Caizhi, ZHENG Jingwei. Analysis of China's water resources spatial transfer network based on MRIO and SNA [J]. Water Resources Protection, 2020,36(1):9-17. (in Chinese))
- [4] DING Ning, LIU Jingru, YANG Jianxin, et al. Water footprints of energy sources in China: exploring options to improve water efficiency [J]. Journal of Cleaner Production, 2018,174:1021-1031.
- [5] 陈倩云. 中国主要能源产品水足迹量化与虚拟水流格局研究 [D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2019.
- [6] 韩梦瑶, 熊焦, 刘卫东. 中国跨境能源贸易及隐含能源流动对比:以“一带一路”能源合作为例 [J]. 自然资源学报, 2020,35(11):2674-2686. (HAN Mengyao, XIONG Jiao, LIU Weidong. China's cross-border energy relations between direct trade and embodied transfers:based on“the Belt and Road”energy cooperation [J]. Journal of Natural Resources, 2020,35 (11) :2674-2686. (in Chinese))
- [7] 谢忠炳. 中国与“一带一路”沿线国家能源双边贸易概况分析 [J]. 中国集体经济, 2021 (15) :11-14. (XIE Zhongliang. Overview of energy bilateral trade between China and “ the Belt and Road ” [J]. China Collective Economy, 2021(15) :11-14. (in Chinese))
- [8] 左其亭, 郝林钢, 刘建华, 等. “一带一路”分区水资源特征及水安全保障体系框架 [J]. 水资源保护, 2018,34 (4) :16-21. (ZUO Qiting, HAO Lingang, LIU Jianhua, et al. Characteristics of water resources in “Belt and Road” district and its framework of water security system [J]. Water Resources Protection, 2018 , 34 (4) : 16-21. (in Chinese))
- [9] 郭建科, 陈园月, 于旭会, 等. 1985 年来环渤海地区港口体系位序-规模分布及作用机制 [J]. 地理学报, 2017, 72 (10) : 1812-1826. (GUO Jianke, CHEN Yuanyue, YU Xuhui, et al. Rank-size distribution and mechanism of port system in the Bohai Rim during the past thirty years [J]. Acta Geographica Sinica, 2017, 72 (10) :1812-1826. (in Chinese))
- [10] 杨鑫, 彭飞, 张琦琦, 等. 2000 年来中国边境城市对外贸易位序-规模分布及其影响因素 [J]. 世界地理研究, 2020, 29 (6) : 1102-1112. (YANG Xin, PENG Fei, ZHANG Qiqi, et al. The rank-size distribution and influencing factors of foreign trade in China's border from 2000 to 2017 [J]. World Regional Studies, 2020,29(6) : 1102-1112. (in Chinese))
- [11] HAN Mengyao, LAO Junming, YAO Qihui, et al. Carbon inequality and economic development across the Belt and Road regions [J]. Journal of Environmental Management, 2020,262:110250.
- [12] ISO. Environmental management water-footprint principles, requirements and guidelines [R]. Switzerland: ISO, 2014.
- [13] 孙才志, 白天骄, 吴永杰, 等. 要素与效率耦合视角下中国人均灰水足迹驱动效应研究 [J]. 自然资源学报, 2018,33(9):1490-1502. (SUN Caizhi, BAI Tianjiao, WU Yongjie, et al. Driving effect of per capita grey water footprint in China from the perspective of factor and efficiency coupling [J]. Journal of Natural Resources, 2018,33(9):1490-1502. (in Chinese))
- [14] ALDAYA M M, CHAPAGAIN A K, HOEKSTRA A Y, et al. The water footprint assessment manual: setting the global standard [M]. Abingdon:Taylor and Francis, 2012.
- [15] BATTY M. The size, scale, and shape of cities [J]. Science, 2008,319(5864) :769-771.

- [16] 包富华,何粉鸽.“一带一路”重点省区五星级酒店位序规模差异化研究[J].世界地理研究,2017,26(4):107-116. (BAO Fuhua, HE Fenge. The study on rank size disparity of five star hotels in the Belt and Road key provinces[J]. World Regional Studies, 2017, 26(4): 107-116. (in Chinese))
- [17] 许伟攀,李郇,陈浩辉.基于城市夜间灯光数据的中美两国城市位序规模分布对比[J].地理科学进展,2018,37(3):385-396. (XU Weipan, LI Yun, CHEN Haohui. A comparative research on the rank-size distribution of cities in China and the United States based on urban nighttime light data[J]. Progress in Geography, 2018, 37(3): 385-396. (in Chinese))
- [18] 蒋依依,温晓金,刘焱序.2001—2015年中国出境旅游流位序规模演化特征[J].地理学报,2018,73(12):2468-2480. (JIANG Yiyi, WEN Xiaojin, LIU Yanxu. Evolutionary characteristics of China's outbound tourism flow in rank-size distribution from 2001 to 2015[J]. Acta Geographica Sinica, 2018, 73(12): 2468-2480. (in Chinese))
- [19] REED W J. The Pareto, Zipf and other power laws[J]. Economics Letters, 2001, 74(1): 15-19.
- [20] GEORGE K. Human behavior and the principle of least effort: an introduction to human ecology[M]. Hoboken: Addison-Wesley Press, 1949.
- [21] FUJIWARA Y, GUILMI C D, AOYAMA H, et al. Do Pareto-Zipf and Gibrat laws hold true? an analysis with European firms[J]. Physica A Statistical Mechanics & Its Applications, 2004, 335(1/2): 197-216.
- [22] 谈明洪,范存会. Zipf 维数和城市规模分布的分维值关系探讨[J]. 地理研究, 2004, 23 (2): 243-248. (TAN Minghong, FAN Cunhui. Relationship between Zipf dimension and fractal dimension of city-size distribution [J]. Geographical Research, 2004, 23 (2): 243-248. (in Chinese))
- [23] 国家环境保护总局. 清洁生产标准:煤炭采选业(HJ 446—2008)[S]. 北京:中国环境科学出版社,2008.
- [24] 国家环境保护总局. 煤炭工业污染物排放标准(GB 20426—2006)[S]. 北京:中国环境科学出版社,2006.
- [25] 李何.石油天然气开采业(稠油)清洁生产指标体系的研究[J].油气田环境保护,2003,13(1):16-18. (LI He. The study on cleaner production index system for oil & natural gas exploitation(thick oil)[J]. Oil and Gas Field Environmental Protection, 2003, 13 (1): 16-18. (in Chinese))
- [26] 国家环境保护总局. 清洁生产标准:石油炼制业(HJ/T 125—2003)[S]. 北京:中国环境科学出版社,2003.
- [27] 中华人民共和国国家统计局. 中国环境统计年鉴[M]. 北京:中国统计出版社,2016.
- [28] 国家环境保护总局. 污水综合排放标准(GB 8978—1996)[S]. 北京:中国环境科学出版社,1996.
- [29] 四川省水利科学研究院. 四川省用水定额(修订稿)[R]. 成都:四川省水利科学研究院,2010.
- [30] 四川省水利科学研究院. 四川省用水定额(DB51/T 2138-2016)[R]. 成都:四川省水利科学研究院,2016.

(收稿日期:2021-08-10 编辑:王芳)

(上接第 33 页)

- [23] 张丽洁,康艳,粟晓玲. 基于正态云模型的黄河流域水资源承载力评价[J]. 节水灌溉, 2019 (1): 76-83. (ZHANG Lijie, KANG Yan, SU Xiaoling. Water resources carrying capacity evaluation of Yellow River basin based on normal cloud model[J]. Water Saving Irrigation, 2019 (1): 76-83. (in Chinese))
- [24] 周雪,左忠义,程伟. 基于组合赋权云模型的铁路旅客运输安全评价[J]. 中国安全科学学报, 2020, 30(增刊1): 158-164. (ZHOU Xue, ZUO Zhongyi, CHENG Wei. Safety evaluation of railway passenger transportation based on combined weighting cloud model [J]. China Safety Science Journal, 2020, 30(Sup1): 158-164. (in Chinese))
- [25] 崔玉海,吴泽宁,吴丽. 基于云模型的安阳市洪水灾害风险评价[J]. 人民长江, 2020, 51 (7): 7-12. (CUI Yuhai, WU Zening, WU Li. Flood disaster risk assessment of Anyang City based on cloud model[J]. Yangtze River, 2020, 51(7): 7-12. (in Chinese))
- [26] 程正飞. 碾压混凝土坝渗流性态分析与渗控结构优化研究[D]. 天津:天津大学, 2018.
- [27] 李显良,张贵,李建军. 基于熵权-云模型的环洞庭湖森林健康评价[J]. 中南林业科技大学学报, 2020, 40 (11): 119-128. (LI Xianliang, ZHANG Gui, LI Jianjun. Assessment of forest health around Dongting Lake based on entropy weight-cloud model [J]. Journal of Central South University of Forestry and Technology, 2020, 40 (11): 119-128. (in Chinese))
- [28] DE LUCA A, TERMINI S. A definition of a nonprobabilistic entropy in the setting of fuzzy sets theory [J]. Information and Control, 1972, 20(4): 301-312.
- [29] 许开立,王永久,陈宝智. 多目标模糊评价模型与评价等级计算方法[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2001 (5): 568-571. (XU Kaili, WANG Yongjiu, CHEN Baozhi. Multi-objective fuzzy assessment models and calculate method of assessment grade [J]. Journal of Northeastern University(Natural Science Edition), 2001 (5): 568-571. (in Chinese))

(收稿日期:2021-05-18 编辑:王芳)