

DOI: 10.5846/stxb202010152633

杨屹, 张柯. 足迹家族视角下关中城市群实现可持续发展目标的公平性评价. 生态学报, 2021, 41(16): 6339-6350.

Yang Y, Zhang K. The fairness evaluation of the Guanzhong urban agglomeration to achieve sustainable development goals from the perspective of footprint family. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(16): 6339-6350.

足迹家族视角下关中城市群实现可持续发展目标的公平性评价

杨 屹*, 张 柯

西安理工大学经济与管理学院, 西安 710054

摘要:西部城市群快速发展加剧了城市之间的竞争, 自然资源消耗过快导致各市改善生态环境努力的差异加大, 生态占用不公平对生态系统的影响给城市群实现联合国 17 个可持续发展目标 (17 SDGs) 带来了困难。在描述 2007—2018 年关中城市群人均生态足迹 (ef)、人均碳足迹 (cf)、人均水足迹 (wf) 和城市发展指数 (CDI) 时空演变特征的基础上, 采用基尼系数评价了生态占用公平性对城市群实现 17 SDGs 的影响。结果显示, ①关中城市群各市 CDI 年均增长率低于 ef 、 cf 、 wf , 城市发展滞后于资源消耗, 不利于实现 17 SDGs。②碳压力与碳承载的匹配度趋于优化, 生态压力同生态承载、水资源压力同水承载的匹配度下降。③生态压力同 CDI 的空间均衡程度相对公平且稳定, 碳压力、水资源压力同 CDI 的空间均衡程度下降, 城市发展同承载力贡献差异性显著。建立监测城市群社会经济活动同生态占用公平程度的分析框架, 揭示了生态占用公平在实现 SDGs 情境中有利于保护森林与耕地、提高城市群内城市改善生态环境的努力水平和平衡好各市在发展与保护之间的取舍的影响。为此, 提出改善城市群生态环境治理框架、加强城市大气污染治理和城乡废物管理、建立跨域生态环境共保联治机制等建议。

关键词: 足迹家族; 城市发展指数; 基尼系数; 关中城市群

The fairness evaluation of the Guanzhong urban agglomeration to achieve sustainable development goals from the perspective of footprint family

YANG Yi *, ZHANG Ke

School of Economics and Management, Xi'an University of Technology, Xi'an 710054, China

Abstract: The rapid development of urban agglomerations has intensified competition between cities. Excessive consumption of natural resources has led to greater differences in the efforts of cities to improve the ecological environment. The impact of unfair ecological occupancy on the ecosystem has caused difficulties for urban agglomerations to achieve the 17 sustainable development goals (SDGs) of the United Nations. Using the temporal and spatial evolution of the Guanzhong urban agglomeration (GUA)'s per capita ecological footprint (ef), per capita carbon footprint (cf), per capita water footprint (wf), and city development index (CDI) from 2007 to 2018, the Gini coefficient (GC) was used to reveal the impact of unfair ecological occupancy on the 17 SDGs in urban agglomerations. The results show that ① the average annual growth of the CDI for each city in the GUA is in the range of 1.66% and 2.52%, but the average annual growth rates of ef , cf , and wf are in the range of [1.46%, 5.53%], [-3.70%, 7.30%] and [-3.62%, 4.41%], respectively. This shows that urban development lags behind resource consumption, which is not conducive to the realization of 17 SDGs. ② The degree to which carbon pressure and carbon capacity are matched tended to be optimized; the degree to which ecological pressure is

基金项目: 国家社会科学基金西部项目 (15XJL009); 陕西省自然科学基金基础研究计划项目 (2020JM-467); 陕西省软科学研究计划-联合项目 (2018KRLY07)

收稿日期: 2020-10-15; 网络出版日期: 2021-05-21

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: yangyi_nwpu@xaut.edu.cn

matched with ecological capacity and water pressure with water capacity decreased. ③ The urban development GC for the ecological footprint and ecological capacity GC were both below the warning line of 0.4, which shows that the degree to which ecological pressure and the CDI match was relatively fair and stable. The urban development GC for the carbon footprint and carbon capacity GC, and urban development GC for the water footprint and water capacity GC all exceeded 0.4 in 2018; the spatial equality in carbon pressure, water resource pressure and the CDI decreased. The contribution of urban development and capacity is significantly different. The establishment of an analytical framework for monitoring the social and economic activities within and the ecological occupancy fairness of urban agglomerations reveals that ecological occupancy fairness is conducive to protecting forests and cultivated land in the context of achieving the 17 SDGs, increasing efforts to improve the ecological environment within cities in urban agglomerations and balancing the trade-offs between development and conservation in each city. The footprint family of indicators have complementary characteristics when evaluating the temporal and spatial evolution of urban agglomeration ecosystems. The main contribution of this paper is to use the CDI and footprint family to establish an analytical framework for monitoring the development and ecological occupancy of urban agglomerations. Finally, on the basis of the result that unfairness between ecological occupation and urban development affects the ability of urban agglomerations to achieve the 17 SDGs, improvements in the ecological environment governance framework for urban agglomerations, the strengthening of air pollution control and waste management in urban agglomerations, and the establishment of an urban agglomeration-ecological environment joint protection mechanism are proposed.

Key Words: footprint family; city development index; Gini coefficient; Guanzhong urban agglomeration

21 世纪以来,全球城市化加快,提高了生产和生活活动对自然资源的占用水平。2007 年以来,全球已有超过一半的人口生活在城市中,到 2030 年预计将升至 60%^[1]。人口、资本和产业在城市的高度集聚带来了基础设施、教育、医疗等方面的规模效应,贡献了 60% 的全球生产总值,但碳排放量和资源使用量也分别占到全球的 70% 和 60% 以上^[1],成为影响气候变化的主要诱因。关中城市群(Guanzhong urban agglomeration, GUA)快速的空间扩张导致人地矛盾愈加突出,以煤炭为主的能源结构使 GUA 成为全国大气污染严重区域之一,城市雨污排放设施系统不完善,水源地保护难度大。更为严重的是,各市社会经济条件和自然禀赋差异造成的生态环境治理水平和努力程度的不同。如,西安是西部唯一的国家中心城市,2019 年拥有 1020.35 万人,GDP 为 9321.19 亿元,但 GDP 最低的铜川只有 354.72 亿元,人口也只有 80.37 万人。这种不平衡表现出城市发展和自然资源利用水平之间的非均衡性在西部具有典型意义。城市群的发展是否掩盖了生态占用不公平的事实?为此,需从生态公平性的视角扩展城市群非均衡发展的认识。

城市群可持续发展不单单针对某座城市,而是城市之间在实现 17 个可持续发展目标(17 sustainable development goals, 17 SDGs)的协调问题^[2]。自然资源配置不公平会导致生态环境治理失灵,出现“污染天堂”。2015 年联合国制定了包括 17 个总目标和 169 个子目标的 SDGs^[1]。其中,与 SDG15 陆地生物有关的土地利用、与 SDG13 气候行动有关的碳排放量、与 SDG6 清洁饮水和卫生设施有关的水资源利用是城市群实现 17 SDGs 的关键。作为普适性框架,一些 SDGs 指标难以统计或测度。为此,在测算城市发展指数(city development index, CDI)和足迹家族指标的基础上,采用基尼系数(Gini coefficient, GC)评价城市群生态公平性对实现 SDGs 的影响(图 1),这不仅能够弥补 CDI 忽视生态系统对城市发展支撑作用的不足,而且通过对比 17 SDGs 有利于描述土地利用、碳排放水平、水资源利用的变化特点,拓宽城市群公平性对实现 SDGs 影响的研究领域。

1 文献综述

早期相关成果是针对上下游城市之间补偿问题的^[3]。如,黄河流域上中游城市用水多而导致下游城市

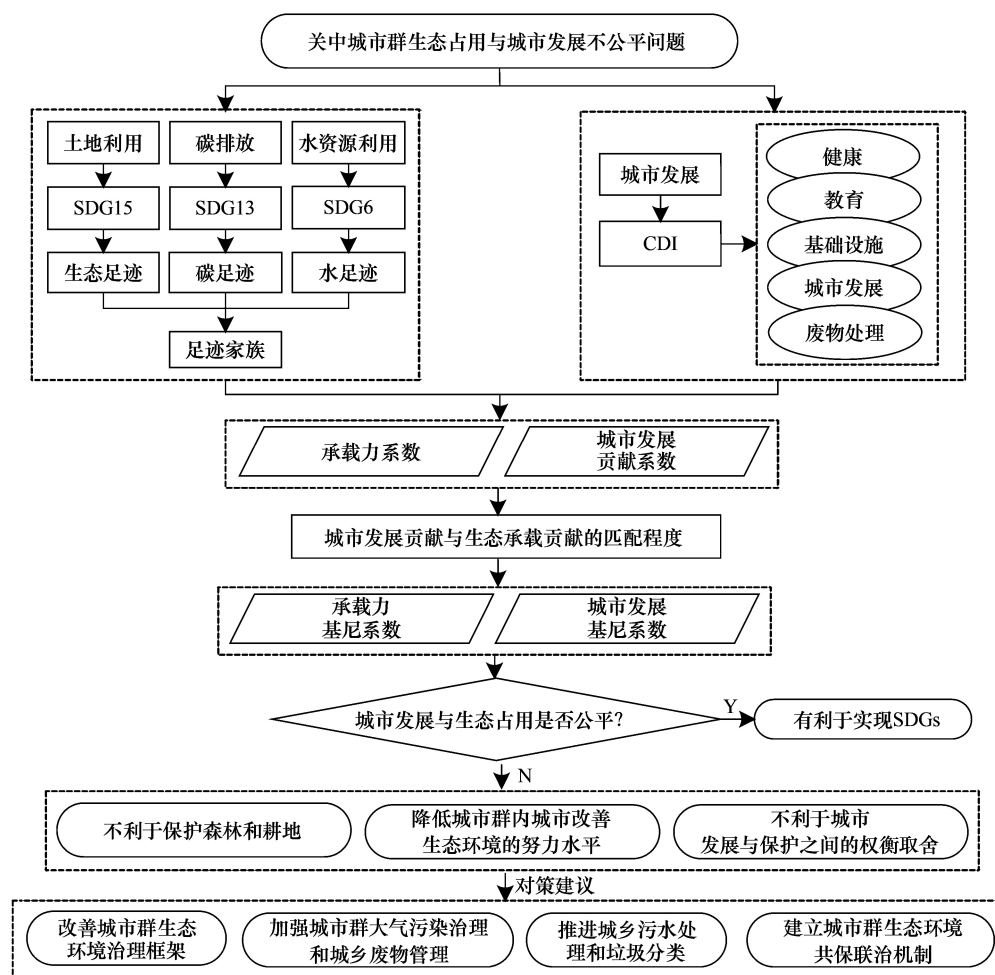


图1 研究框架

Fig.1 Research framework

SDG15:可持续发展目标 15 Sustainable development goal 15;SDG13:可持续发展目标 13 Sustainable development goal 13;SDG6:可持续发展目标 6 Sustainable development goal 6;CDI:城市发展指数 City development index;SDGs:可持续发展目标 Sustainable development goals

缺水^[4]。进入 21 世纪,区域性雾霾天气和水污染事件频发,人们意识到不同的生态建设水平和努力程度会影响城市可持续发展^[5],因此,应以 SDGs 为目标,从公平性角度平衡社会经济-生态系统之间的关系^[6],这项准则作为有效应对气候变化的制度新支柱已形成共识^[7],并认识到收入不公平将降低公众参与环境保护的积极性,阻碍对生态资源的投资^[8-9],获取生态系统服务价值的不公平将增加社会经济-生态系统的脆弱性^[10]。城市群中每座城市都是围绕自身利益来发展的,但人口和生产要素的流动使城市之间更加紧密,资源利用的差异性决定了维护城市群生态系统的关键是公平分配生态资源^[11],增强应对气候变化的意识^[12]。在这一领域中,Teixidó-Figueras 等测算了富裕度、人口等对生态足迹 (ecological footprint, EF) 不公平的贡献率,指出环境政策应在推动世界经济持续发展的基础上促进资源利用的公平性^[13]。Tomás 等从碳消费视角测度了碳足迹 (carbon footprint, CF) 公平性^[14]。Semieniuk 等在描述全球 CF 公平性的基础上,提出以化石能源为主的能源结构决定了 CF 的 GC 处于相对稳定的水平而且难以降低^[15]。Wahba 对埃及家庭水足迹 (water footprint, WF) 公平程度的测算结果显示,收入不公平加剧了 WF 的差距^[16]。与此同时,公平性同 SDGs 的相关研究刚刚兴起,如,Hiratsuka 等以森林养护效果证实了利益相关者之间的团体活动和合作对实现 SDGs 的作用^[17],Zimm 通过估算 SDGs 技术和基础设施服务水平实证分析了公平性对实现 SDGs 的影响^[18],Zhou 等

提出程序公平和分配公平有助于实现 SDGs^[19]。这些成果为开展本研究提供了借鉴,但难点在于,SDGs 不仅仅是个体目标的简单组合,更是目标之间的协调^[20]。由于城市群生态占用公平对 17 SDGs 的影响并未引起足够的重视,而如何将足迹家族指标同 SDGs 子目标有机结合起来仍需探索^[21]。为此,对照 SDGs 子目标下设科目,在描述 CDI 与 EF、CF、WF 等^[22]足迹家族指标动态变化特点的基础上,引入 GC 从生态占用公平性视角评价城市群实现 17 SDGs 的进程,这将有利于增强对维护城市群生态系统的理解。

2 方法与数据

2.1 研究区域

GUA 在西部有着重要的战略地位和影响力,是 12 座国家级城市群中在西北综合实力最强的城市群,涵盖西安市、铜川市、宝鸡市、咸阳市、渭南市及杨凌示范区(简称杨凌),具有森林、草原、湿地等地貌特征,拥有得天独厚的区位优势(图 2),是西部重要的交通枢纽,航天航空、军工、科教、旅游等产业实力雄厚,产业体系完整。境内有 2 项 6 处遗产被列入《世界遗产名录》。GUA 中的西安不但是国家中心城市,而且是享誉世界的历史文化名城,自然和人文资源富饶。2019 年,GUA 国土面积为 5.55 万 km²,仅占陕西省 20.56 万 km² 的 27%,但 GUA 2440.25 万人口却占陕西省 3876.21 万人的 62.95%,城镇化率高达 61.66%。2019 年,GUA 的 GDP 为 16090.27 亿元,占陕西省的 61.75%,城镇居民

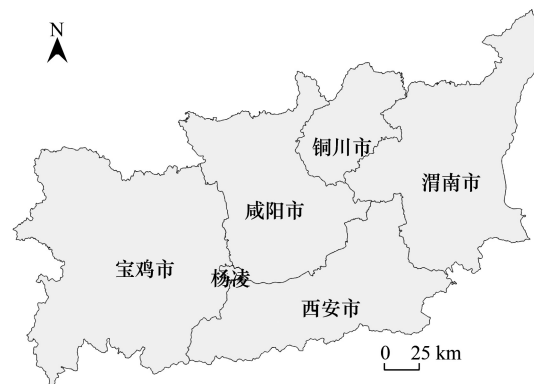


图 2 关中城市群的行政区域划分

Fig.2 The administrative division of GUA

审图号:GS(2019)1822 号 自然资源部监制

可支配收入为 34787 元,达到“中等收入”的世界银行标准。GUA 实现 17 SDGs 的难点是,第一,用地矛盾凸显。GUA 是人口净流入的区域,城市建设、基础设施等用地需求增长迅速,生产生活与生态用地的比例已接近 1:1。由于城市开发建设早,旧城区多,保护好历史文化风貌的占地需求大。第二,水资源利用率有待提高,水环境整体质量较差。GUA 万元 GDP 用水量 38.31m³,万元工业增加值用水量 115.24m³,低于全国平均水平。2020 年各市《环境质量年报》显示,水污染物浓度较高,如,2019 年西安市河流氨氮、总磷和高锰酸盐指数超标,铜川市三里洞监测断面水质轻度污染,岔口监测断面水质中度污染。第三,化石能源为主的能源结构导致控制碳排放难度大。GUA 煤炭占能源消耗的 70%以上,产业具有“高碳”特性,清洁能源比重低,主动提高能源利用率的压力大。《陕西省 2018 年重点排污单位名录》中有 336 家水环境重点排污单位,288 家大气环境重点排污单位,273 家土壤环境重点排污单位,GUA 就分别有 221 家、134 家和 119 家,占到 65.77%、46.53%和 43.59%。综上所述,生态系统支撑 GUA 发展的能力较弱,正在成为实现 17 SDGs 的主要障碍。

2.2 研究方法

2.2.1 足迹家族

足迹家族是指人类在自然资源消费和废弃物排放过程中占用的地球生态系统的再生和消纳能力^[23],包括 EF、CF 和 WF 等^[24-25],旨在从生物圈、大气圈和水圈等关键生态系统追踪人类活动产生的自然资源占用、温室气体排放及淡水资源的消费和污染^[26-27]。EF 的覆盖面较 CF 和 WF 要广泛,三者之间有一定的互补性,往往比单一足迹能够更好反映资源利用的可持续性、效率及公平性的变化^[28-29]。足迹家族指标测算方法参考了 Rees、李宁等的成果^[30-31]、IPCC 排放清单^[32]及《省级温室气体编制指南》^[33]。

2.2.2 城市发展指数

CDI 是 1996 年由联合国人居署 (UN-Habitat) 提出并用于评估城市可持续性的指标体系^[34],反映了城市发展的综合水平^[35],取值为[0, 100],每个指标权重为 20%。其中,基础设施、废物处理和城市产值表征基

础管理水平,健康和教育指标表征基本公共服务水平,城市产值衡量经济水平(表1)。

表 1 CDI 指标体系
Table 1 The indications of CDI

指标 Index	联合国人居署 UN-Habitat	关中城市群 GUA
基础设施 Infrastructure	城市用水普及率/%	城市用水普及率/%
	污水管网覆盖率/%	建成区排水管道密度/%
	户通电率/%	城市用气覆盖率/%
	移动电话普及率/%	移动电话普及率/%
废物处理 Waste	污水处理率/%	污水处理率/%
	固体废物处理率/%	工业固体废物综合利用率/%
健康 Health	人均预期寿命/岁	人均预期寿命/岁
	儿童死亡率/%	死亡率/%
教育 Education	成人识字率/%	15 岁以上人口非文盲率/%
	综合入学率/%	综合入学率/%
城市产值 City product	生产总值/美元	人均生产总值/元

GUA:关中城市群 Guanzhong urban agglomeration;CDI:城市发展指数 City development index

CDI 测算方法源于 UN-Habitat 发布的 Global Urban Indicators Database Version 2^[34]。本研究结合 GUA 实际定义了计算公式(表2)。

表 2 CDI 计算公式
Table 2 The formulas of CDI

指标 Index	公式 Formula
基础设施 Infrastructure	城市用水普及率×25+建成区排水管道密度×25+城市用气覆盖率×25+移动电话普及率×25
废物处理 Waste	污水处理率×50+工业固体废物综合利用率×50
健康 Health	(人口平均预期寿命-25)×50/60+(32-死亡率)×50/31.92
教育 Education	15 岁以上人口非文盲率×25+综合入学率×25
城市产值 City product	(log(人均生产总值)-4.61)×100/5.99
城市发展指数 CDI	(基础设施指标+废物处理指标+健康指标+教育指标+城市产值指标)/5

2.2.3 公平性分析

城市发展贡献系数(city development contributive coefficient, CDCC)是足迹家族指标贡献率与 CDI 贡献率的比率。以 EF 为例,计算公式如下:

$$CDCC_{EF} = \frac{EF_i}{EF} \div \frac{CDI_i}{CDI} \quad (1)$$

式中, EF_i 与 EF 和 CDI_i 与 CDI 分别为各市和城市群的生态足迹和城市发展指数。若 $CDCC_{EF}<1$,则表明该城市在城市群中生态占用水平低却具有较高的发展贡献。反之,则表明该市具有较低的发展贡献和较高的生态占用水平。

生态承载系数(ecological capacity coefficient, ECC)是 EF 贡献率与 EC 贡献率的比率。计算公式如下:

$$ECC = \frac{EF_i}{EF} \div \frac{EC_i}{EC} \quad (2)$$

式中, EC_i 与 EC 分别为各市和城市群的生态承载力。若 $ECC>1$,说明 EF 的贡献率大于 EC 的贡献率,表现为“低生态承载贡献”,处于生态超载状态;反之,表现为“高生态承载贡献”,处于生态盈余状态。

将 GC^[36]引入足迹家族,采用几何方法求解洛伦兹曲线图的梯形面积以确定足迹家族指标的 GC。计算公式如下:

$$GC = 1 - \sum_{i=1}^n (X_i - X_{i-1})(Y_i + Y_{i-1}) \tag{3}$$

式中, X_i 表示*i*市排名后的权益评估指标的累计百分比, Y_i 表示*i*市的足迹家族指标累计百分比。当*i*=1时, $(X_{i-1}, Y_{i-1}) = (0, 0)$ 。GC的取值在[0, 1], GC值越小表示越公平。以0.4作为公平与不公平状态的临界点^[37-38]。

2.3 数据来源

第一, 足迹家族指标和CDI的数据来源见表3。

表3 数据来源
Table 3 Data Source

指标 Index	数据名称 Data name	来源 Source
土地利用 Land use	耕地、林地、草地、水域、建设用地	中国科学院资源环境数据中心 2010 年、2015 年、2018 年 3 期栅格数据, 该数据以 Landsat TM/ETM 遥感影像为主要数据源, 数据精度为 1km。
生态足迹 EF	农产品、林产品、草产品和水产品产量, 环境污染排放量、能源消耗量	2008—2019 年《陕西统计年鉴》及 GUA 各市的统计年鉴
	均衡因子、产量因子	全球足迹网 (Global Footprint Network) 2018 年发布的 Working Guidebook to the National Footprint Accounts
碳足迹 CF	能源消耗量、工业生产、污染排放、牲畜数量	2008—2019 年《陕西统计年鉴》、GUA 各市的统计年鉴及 2007—2018 年各市《国民经济与社会发展统计公报》
水足迹 WF	农作物产量、动物产量、进出口总值、GUA 常住人口	2008—2019 年《陕西省统计年鉴》
	工业、生活和生态用水	2007—2018 年《陕西省水资源公报》
城市发展指数 CDI	基础设施、废物处理、城市产值	2008—2019 年《陕西统计年鉴》及 GUA 各市的统计年鉴
	健康	2008—2019 年《陕西统计年鉴》、GUA 各市的统计年鉴和 2007—2018 年各市《国民经济与社会发展统计公报》及政府网站
	教育	2008—2019 年 GUA 各市的统计年鉴和 2007—2018 年各市《国民经济与社会发展统计公报》及第六次人口普查公报

EF:生态足迹 Ecological footprint;CF:碳足迹 Carbon footprint;WF:水足迹 Water footprint

第二, 均衡因子和产量因子(表4)源于全球足迹网 (Global Footprint Network) 2018 年发布的 Working Guidebook to the National Footprint Accounts。

表4 各类土地的均衡因子和产量因子
Table 4 Equilibrium and yield factors for all types of land

土地类型 Land type	耕地 Cultivated land	林地 Forest land	草地 Grassland	水域 Water	污染吸纳地 Pollution absorption land	建筑用地 Building land	化石能源地 Fossil energy land
均衡因子 Equilibrium factor	2.52	1.29	0.46	0.37	1.00	2.52	1.29
产量因子 Yield factor	1.28	2.55	1.93	1.00	0.00	1.28	0.00

3 结果

3.1 足迹家族指标的动态变化

2007—2018 年, GUA 各市的人均生态足迹 (per capita ecological footprint, *ef*) 年均增长率分别为 1.46%、3.49%、2.91%、2.94%、5.53%、4.30%。其中, 能源消耗 *ef* 占据首位。GUA 工业化进程加快, 对煤炭资源依赖较大, 能源结构短期内难以发生根本性的改变。同生态承载力比较, 各市一直处于生态赤字状态, 人均生态赤字 (per capita ecological deficit, *ed*) 呈上升态势。各市的人均碳足迹 (per capita carbon footprint, *cf*) 年均增长率分别为 3.68%、7.30%、5.62%、4.45%、0.84%、-3.70%。从 *cf* 的构成账户来看, 仅能源消耗就远超当地的

人均碳承载力 (per capita carbon capacity, cc)。其次是污染排放账户和工业生产账户。2018 年 GUA 平均单位能耗降低 4.57%, 比 2010 年提高了 43.26%。近年来的水电、风电等发电量虽有提高, 但占 2018 年总发电量比率仍不到 10%。各市的人均水足迹 (per capita water footprint, wf) 年均增长率分别为 -3.62%、2.61%、4.41%、1.73%、3.72%、-1.77%。咸阳、渭南、宝鸡、铜川的人均水赤字 (per capita water deficit, wd) 年均增长率分别为 4.95%、10.61%、6.98%、10.13%。西安和杨凌分别在 2017 年和 2018 年由水赤字转为水盈余, 显现出水污染的治理成效。

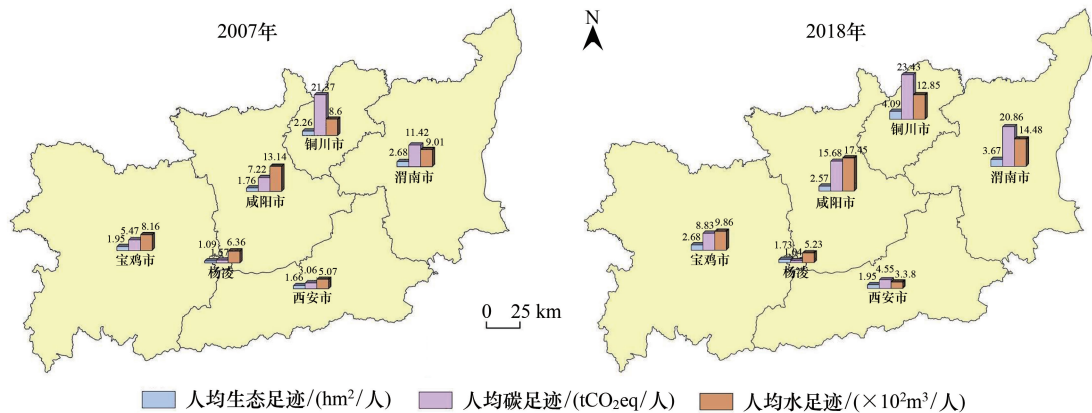


图 3 2007 年和 2018 年关中城市群 ef 、 cf 和 wf 的结果

Fig.3 The results of the GUA's ef , cf and wf in 2007 and 2018

ef : 人均生态足迹 Per capita ecological footprint; cf : 人均碳足迹 Per capita carbon footprint; wf : 人均水足迹 Per capita water footprint

3.2 城市发展指数的动态变化

GUA 各市的 CDI 年均增长率分别为 1.74%、1.70%、1.66%、1.96%、2.52%、2.28% (图 4)。从一级指标来看, 西安、咸阳、宝鸡的产值年均增长率分别为 3.34%、4.42%、3.75%, 但上升态势逐年放缓。渭南、铜川、杨凌的废物处理年均增长率分别为 4.99%、5.41%、5.49%, 表明水污染和工业固体废弃物的治理有一定成效。除城市产值和废物处理外, 对各市 CDI 贡献最大的是基础设施, 呈上升态势。各市的健康和教育指标都处于稳定状态, 9 年义务教育的普及使得小学与初中的入学率逐渐接近饱和, 但城市群人均预期寿命 75.42 岁低于 77 岁的国内平均水平。

3.3 公平性评价结果的动态变化

以 ECC、碳承载系数 (carbon capacity coefficient, CCC)、水承载系数 (water capacity coefficient, WCC) 为横轴, 以 $CDCC_{EF}$ 、 $CDCC_{CF}$ 、 $CDCC_{WF}$ 为纵轴, 将坐标轴划分为 4 个象限 (图 5 至图 7)。结果显示:

第一, 西安和渭南 $CDCC_{EF}$ 和 ECC 均大于 1, 属于“低城市发展贡献、低生态承载贡献”。宝鸡和铜川 $CDCC_{EF}$ 和 ECC 基本小于 1, 属于“高城市发展贡献、高生态承载贡献”。咸阳 $CDCC_{EF}$ 大于 1 而 ECC 小于 1, 属于“低城市发展贡献、高生态承载贡献”, 杨凌属于“高城市发展贡献、低生态承载贡献”。

第二, 咸阳和渭南 $CDCC_{CF}$ 和 CCC 均大于 1, 属于“低城市发展贡献、低碳承载贡献”。西安和宝鸡

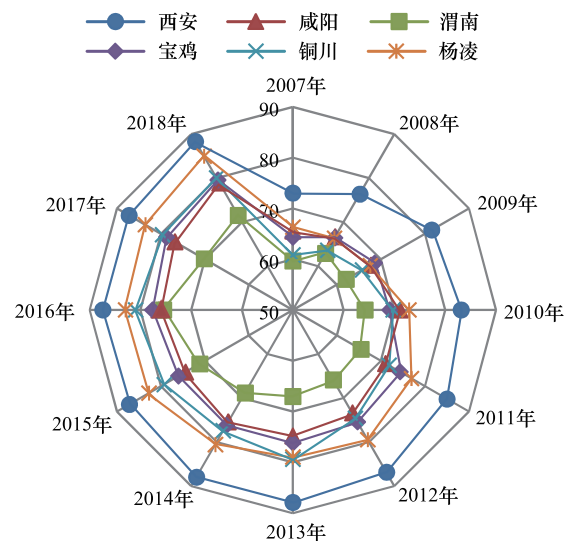


图 4 2007—2018 年关中城市群 CDI 的动态变化

Fig.4 The dynamic changes of the GUA's CDI from 2007 to 2018

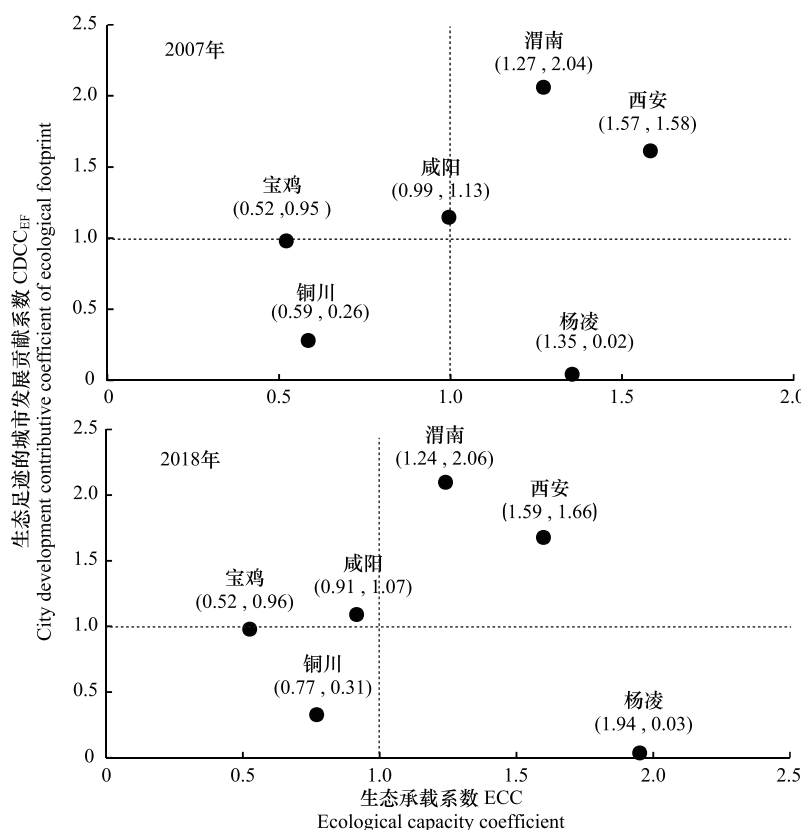


图 5 2007 和 2018 年关中城市群 $CDCC_{EF}$ 、 ECC 的评价结果

Fig.5 $CDCC_{EF}$ and ECC 's evaluation results of GUA in 2007 and 2018

$CDCC_{EF}$:生态足迹的城市发展贡献系数 City development contributive coefficient of ecological footprint; ECC :生态承载系数 Ecological capacity coefficient

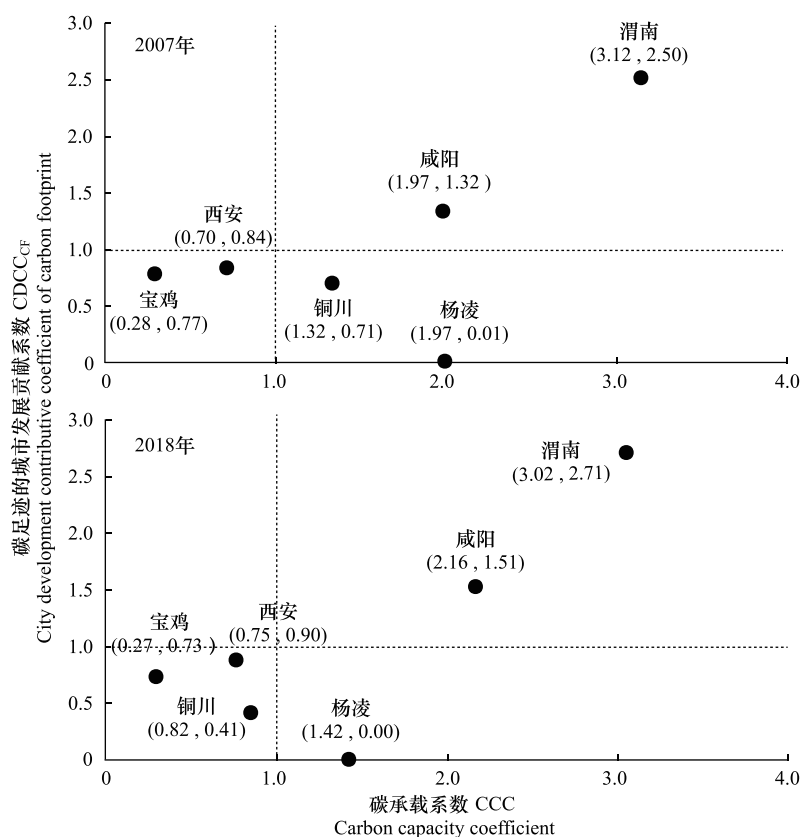
$CDCC_{CF}$ 和 CCC 均小于1,属于“高城市发展贡献、高碳承载贡献”。铜川和杨凌除个别年份外, $CDCC_{CF}$ 小于1而 CCC 大于1,属于“高城市发展贡献、低碳承载贡献”。

第三,咸阳和渭南 $CDCC_{WF}$ 和 WCC 均大于1,属于“低城市发展贡献、低水承载贡献”。西安、宝鸡和杨凌除个别年份外, $CDCC_{WF}$ 和 WCC 均小于1,属于“高城市发展贡献、高水承载贡献”。铜川 $CDCC_{WF}$ 小于1而 WCC 大于1,属于“高城市发展贡献、低水承载贡献”。

GUA的 EF 、 CF 、 WF 的城市发展 GC 分别居于 $[0.37, 0.40]$ 、 $[0.35, 0.46]$ 、 $[0.39, 0.45]$ 的区间(图8),分别增长了1.34%、17.45%、13.77%。 EF 的城市发展 GC 增幅不大,在临界点0.4以下,生态压力与城市发展的匹配度相对公平且稳定。 CF 和 WF 的城市发展 GC 增幅较大,分别在2011年和2008年超过0.4,表明碳压力、水资源压力与城市发展的空间均衡程度下降。GUA的生态承载 GC 、碳承载 GC 、水承载 GC 分别居于 $[0.20, 0.40]$ 、 $[0.42, 0.52]$ 、 $[0.19, 0.45]$ 的区间。碳承载 GC 降低了5.45%,生态承载 GC 和水承载 GC 分别提高了77.69%和130.43%,表明碳压力与碳承载趋于匹配,生态压力与生态承载、水资源压力与水承载的匹配度趋于不公平。值得关注的是,生态承载 GC 始终在0.4以下,而碳承载 GC 则一直在0.4以上,表明各市碳承载的显著不公平,增加了碳减排协调行动的难度。水承载 GC 从2018年开始超过0.4,水资源利用不公平特点明显。

4 讨论

城市发展同生态环境不协调是客观事实^[39-40]。认识足迹变化带来的溢出和反馈效应^[41]并验证结果^[42]为研究视角转向生态占用公平性评价奠定了实证基础。城市群生态占用不公平势必因加剧城市之间的竞争

图6 2007和2018年关中城市群CDCC_{CF}、CCC的评价结果Fig.6 CDCC_{CF} and CCC's evaluation results of GUA in 2007 and 2018

CDCC_{CF}:碳足迹的城市发展贡献系数 City development contributive coefficient of carbon footprint; CCC:碳承载系数 Carbon capacity coefficient

而导致各市改善生态环境努力的差异加大。本研究结果证实了这一点,即,各市生态压力与其自身发展水平匹配度相对较好,但碳压力、水资源压力同城市发展水平的匹配度较差。由于城市群碳排放与水污染都具有跨域特点,因此,相对生态承载 GC 和水承载 GC 而言,碳承载的 GC 一直在 0.4 以上,显示出碳压力和碳排放的不公平特点更为明显^[43],表明城市群如果不采取协同行动将难以实现 17 SDGs。GUA 内城市人口密度、经济发展和收入水平等差距大,不可避免地将由发展不公平进一步演变为生态占用不公平,评估生态占用的空间公平性对城市群实现 17 SDGs 的影响是科学定位城市群发展战略的重要组成部分。这些影响主要表现在:第一,土地利用的公平程度影响城市群森林与耕地的保护,对实现 SDG15 产生影响。第二,碳排放和水资源利用的公平程度将形成跨地域的环境影响,降低城市改善生态环境的努力水平,影响实现 SDG13 和 SDG6 的路径。第三,城市发展同承载贡献类型的差异性意味着要关注城市群利益相关者的关系,平衡好每座城市在发展与保护之间的关系,这将有助于在跨域生态管理中实现“双赢”。

从实践上看,2018 年国家制止西安秦岭北麓违建别墅以来,GUA 建设秦岭自然保护区,开展“绿盾”专项行动,修复了 GUA 最大的“合阳湿地”及城市周边湿地,并在推进城市人工造林、绿地建设等修复生态行动中取得了成效,如,城市绿化覆盖面积 69561 hm²,占陕西省的 84.54%。这同 SDG15 倡导的理念是一致的。对照 SDG13,GUA“高碳”能源结构同“低碳”发展是背道而驰的,迫切需要通过优化生产力布局、发展绿色产业来提高承载能力,以确保公众获得“负担得起的、可靠和可持续的能源”。对照 SDG6,2018 年 GUA 饮用水安全服务的人口达到全覆盖,水资源利用率、污水处理率分别从 2007 年的 64.54%、52.98% 提高到 2017 年的 73.26%、95.89%,城市集中式饮用水源达标率 100%。但人均水量只有 304.59m³/人,仍处于水资源匮乏状态。对照 17 SDGs,GUA 正在实施的全民医疗保险将使得公众享有的医疗健康服务成为现实。但也应看到,城乡

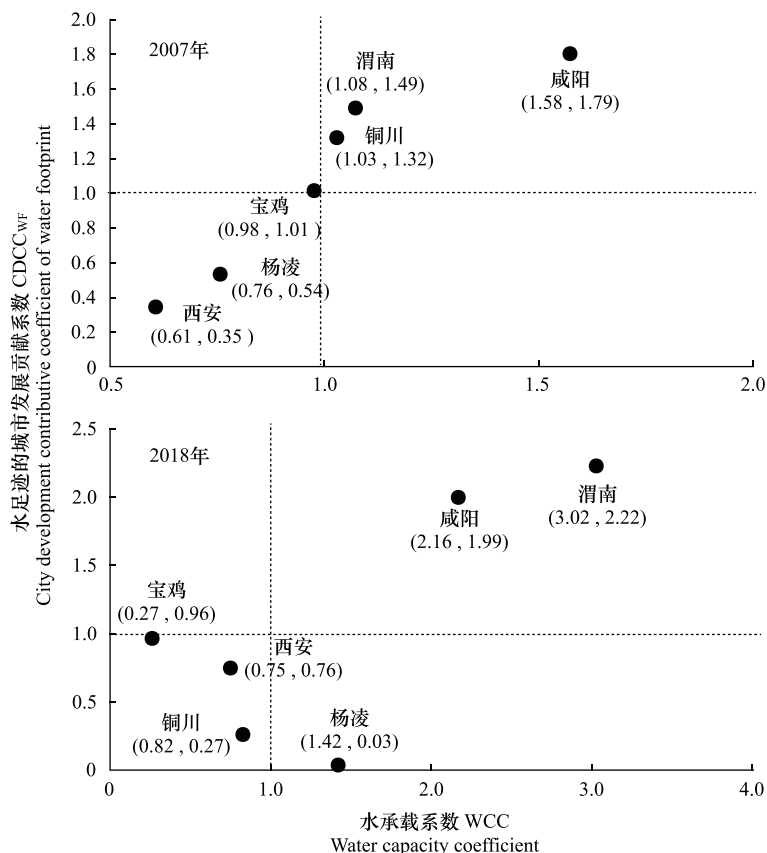


图 7 2007 和 2018 年关中城市群 $CDCC_{WF}$ 与 WCC 的评价结果

Fig.7 $CDCC_{WF}$ and WCC 's evaluation results of GUA in 2007 and 2018

$CDCC_{WF}$: 水足迹的城市发展贡献系数 City development contributive coefficient of water footprint; WCC : 水承载力系数 Water capacity coefficient

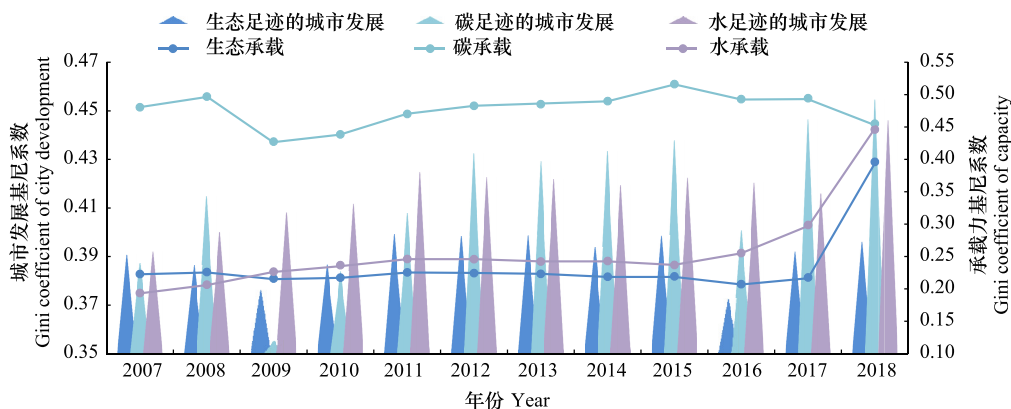


图 8 2007—2018 年关中城市群城市发展 GC 和承载力 GC 的动态变化

Fig.8 The dynamic changes of city development's GC and carrying capacity's GC of GUA from 2007 to 2018

GC: 基尼系数 Gini coefficient

教育水平在师资队伍、硬件设施等方面还存在差距,不仅要提高乡村办学质量,还要实现 12 年义务教育的全覆盖。为此,提出建议:第一,改善城市群生态环境治理框架。制定同生态资源初次分配与再分配调节相关的政策,建立有利于城市群绿色发展的创新性融资机制和合作机制,把跨域生态系统保护和生物服务价值核算

纳入当地规划,将生态补偿纳入城市群发展规划。第二,以建立“碳平衡社会”为目标,加强城市群大气污染治理和城乡废物管理,推广新能源汽车,发展农村沼气、清洁炉灶及秸秆能源、太阳能等技术,推广煤炭高效清洁利用、先进节能环保技术装备等。第三,推进城乡污水处理和生活垃圾分类、建筑垃圾回收和再利用,建设城市群取用水户、水功能区、市界断面监测点和监控管理信息平台。第四,以防范城市跨域污染转移为目标强化法治,建立城市群生态环境共保联治机制,促进公共服务便利共享,落实“同城待遇”。地方政府应对改善生态环境的任务做出承诺,向公众开放同 SDGs 相关的监测指标及结果,积极鼓励企业、第三方组织、志愿者参与监督,就生态环境行动同利益相关方开展广泛沟通,并作为制定行动计划的基础。

5 结论

采用足迹家族指标、CDI 和 GC 建立了评价城市群发展水平同生态占用公平性的分析框架,不仅有利于推进城市碳减排、提高水资源利用率,更重要的是,将有助于在维护城市群利益相关者权益的基础上减少跨地域的环境影响,有利于推进以实现 17 SDGs 为目标的城市群协同行动,主要结论有:

第一,2007—2018 年,城市群各市 CDI 年均增长率在[1.66%, 2.52%]区间,显示出城市发展水平整体提高的特点。各市的 ed 呈上升态势,能源消耗是引起城市群 cf 增长的主要原因。除西安和杨凌外,GUA 其他城市均处于水赤字状态,水资源消耗压力大。

第二,城市群各市的城市发展贡献与生态承载贡献的匹配度较差,尤以碳承载最为突出。生态承载 GC 在 2018 年增幅较大,接近 0.4,生态压力与生态承载匹配度趋于不公平。表明碳压力、水资源压力与城市发展的空间均衡程度下降。对比 SDGs,能源结构的不合理导致城市群大气质量下降。土地、能源、水资源的高效利用对城市群实现 17 SDGs 至关重要。

研究也存在着局限性与不足。第一,未论证各市的生态溢出效应。第二,未讨论实现不同 SDGs 情境中生态环境治理政策的有效性。第三,未探讨政府、企业、公众等利益相关者对待生态占用公平性的态度及生态补偿问题。因此,围绕 17 SDGs 探索城市群发展中生态治理对公平占用自然资源的影响是未来研究方向之一。

参考文献 (References):

- [1] 联合国. 可持续发展目标. (2015). [2020-06-30]. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/zh/>.
- [2] 吕永龙, 曹祥会, 王尘辰. 实现城市可持续发展的系统转型. 生态学报, 2019, 39(4): 1125-1134.
- [3] 石广明, 王金南, 毕军. 基于水质协议的跨界流域生态补偿标准研究. 环境科学学报, 2012, 32(8): 1973-1983.
- [4] 陈霖巍, 穆兴民. 黄河断流的态势、成因与科学对策. 自然资源学报, 2000, 15(1): 31-35.
- [5] 曹莉萍, 周冯琦, 吴蒙. 基于城市群的流域生态补偿机制研究——以长江流域为例. 生态学报, 2019, 39(1): 85-96.
- [6] Scherer L, Behrens P, de Koning A, Heijungs R, Sprecher B, Tukker A. Trade-offs between social and environmental Sustainable Development Goals. Environmental Science & Policy, 2018, 90: 65-72.
- [7] Underdal A, Wei T Y. Distributive fairness: a mutual recognition approach. Environmental Science & Policy, 2015, 51: 35-44.
- [8] Ridzuan S. Inequality and the environmental Kuznets curve. Journal of Cleaner Production, 2019, 228: 1472-1481.
- [9] 曹高航, 冯连勇, Boyle G, 苏锐. 基于 Agent 模型的生态公平指数构建与模拟. 生态学报, 2019, 39(22): 8416-8424.
- [10] Laterra P, Nahuelhual L, Vallejos M, Berrouet L, Arroyo Pérez E, Enrico L, Jiménez-Sierra C, Mejía K, Meli P, Rincón-Ruiz A, Salas D, Špirić J, Villegas J C, Villegas-Palacio C. Linking inequalities and ecosystem services in Latin America. Ecosystem Services, 2019, 36: 100875.
- [11] Lan X, Tang H P, Liang H G. A theoretical framework for researching cultural ecosystem service flows in urban agglomerations. Ecosystem Services, 2017, 28: 95-104.
- [12] Iturriza M, Labaka L, Hernantes J, Abdelgawad A. Shifting to climate change aware cities to facilitate the city resilience implementation. Cities, 2020, 101: 102688.
- [13] Teixidó-Figueras J, Duro J A. The building blocks of international Ecological Footprint inequality: a regression-based decomposition. Ecological Economics, 2015, 118: 30-39.
- [14] Tomás M, López L A, Monsalve F. Carbon footprint, municipality size and rurality in Spain: inequality and carbon taxation. Journal of Cleaner Production, 2020, 266: 121798.
- [15] Semieniuk G, Yakovenko V M. Historical evolution of global inequality in carbon emissions and footprints versus redistributive scenarios. Journal of

- Cleaner Production, 2020, 264: 121420.
- [16] Wahba S M. Understanding internal water footprint inequality of the Egyptian households based on different income and lifestyles. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 288: 125112.
- [17] Hiratsuka M, Nakama E, Satriadi T, Fauzi H, Aryadi M, Morikawa Y. An approach to achieve sustainable development goals through participatory land and forest conservation: a case study in South Kalimantan Province, Indonesia. *Journal of Sustainable Forestry*, 2019, 38(6): 558-571.
- [18] Zimm C. Methodological issues in measuring international inequality in technology ownership and infrastructure service use. *Development Studies Research*, 2019, 6(1): 92-105.
- [19] Zhou M, Govindan K, Xie X B. How fairness perceptions, embeddedness, and knowledge sharing drive green innovation in sustainable supply chains: an equity theory and network perspective to achieve sustainable development goals. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 260: 120950.
- [20] 张军泽, 王帅, 赵文武, 刘焱序, 傅伯杰. 可持续发展目标关系研究进展. *生态学报*, 2019, 39(22): 8327-8337.
- [21] Vanham D, Leip A, Galli A, Kastner T, Bruckner M, Uwizeye A, van Dijk K, Ercin E, Dalin C, Brandão M, Bastianoni S, Fang K, Leach A, Chapagain A, Van der Velde M, Sala S, Pant R, Mancini L, Monforti-Ferrario F, Carmona-Garcia G, Marques A, Weiss F, Hoekstra A Y. Environmental footprint family to address local to planetary sustainability and deliver on the SDGs. *Science of the Total Environment*, 2019, 693: 133642.
- [22] Fang K, Zhang Q F, Yu H J, Wang Y T, Dong L, Shi L. Sustainability of the use of natural capital in a city: Measuring the size and depth of urban ecological and water footprints. *Science of the Total Environment*, 2018, 631-632: 476-484.
- [23] 方恺. 基于足迹家族和行星边界的主要国家环境可持续性多维评价. *生态环境学报*, 2014, 23(11): 1868-1875.
- [24] 赵先贵, 赵晶, 马彩虹, 肖玲, 马彩芳, 王晓宇. 基于足迹家族的云南省资源与环境压力评价. *生态学报*, 2016, 36(12): 3714-3722.
- [25] 方恺. 足迹家族研究综述. *生态学报*, 2015, 35(24): 7974-7986.
- [26] 樊胜岳, 麻亮亮. 中国大陆足迹家族的环境库兹涅茨曲线分析. *自然资源学报*, 2016, 31(9): 1452-1462.
- [27] Galli A, Weinzzettel J, Cranston G, Ercin E. A footprint family extended MRIO model to support Europe's transition to a One Planet Economy. *Science of the Total Environment*, 2013, 461-462: 813-818.
- [28] 方恺. 足迹家族: 概念、类型、理论框架与整合模式. *生态学报*, 2015, 35(6): 1647-1659.
- [29] Hoekstra A Y, Wiedmann T O. Humanity's unsustainable environmental footprint. *Science*, 2014, 344(6188): 1114-1117.
- [30] Rees W E. Ecological Footprints and appropriated carrying capacity: what urban economics leaves out. *Environment and Urbanization*, 1992, 4(2): 121-130.
- [31] 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. *中国人口·资源与环境*, 2017, 27(11): 202-208.
- [32] Intergovernmental Panel on Climate Change. 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories. [2020-07-22]. <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/chinese/index.html>.
- [33] 国家生态环境部应对气候变化司. 省级温室气体清单编制指南(试行). [2020-07-22]. <http://www.cbcsd.org.cn/sjk/nengyuan/standard/home/20140113/download/shengjiwenshiqiti.pdf>.
- [34] UN-Habitat. Global urban indicators database (Version 2). [2020-04-30]. <https://unhabitat.org/sites/default/files/download-manager-files/Global%20Urban%20Indicators%20Database.pdf>.
- [35] Kalimeris P, Bithas K, Richardson C, Nijkamp P. Hidden linkages between resources and economy: a "Beyond-GDP" approach using alternative welfare indicators. *Ecological Economics*, 2020, 169: 106508.
- [36] Shu H, Xiong P P. The Gini coefficient structure and its application for the evaluation of regional balance development in China. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 199: 668-686.
- [37] 王金南, 逮元堂, 周劲松, 李勇, 曹东. 基于 GDP 的中国资源环境基尼系数分析. *中国环境科学*, 2006, 26(1): 111-115.
- [38] Kong Y C, Zhao T, Yuan R, Chen C. Allocation of carbon emission quotas in Chinese provinces based on equality and efficiency principles. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 211: 222-232.
- [39] Li W W, Yi P T. Assessment of city sustainability—Coupling coordinated development among economy, society and environment. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 256: 120453.
- [40] Pan A, Wang Q, Yang Q. Assessment on the coordinated development oriented to Green City in China. *Ecological Indicators*, 2020, 116: 106486.
- [41] Hu J R, Huang K, Ridoutt B G, Yu Y J, Xu M. Measuring integrated environmental footprint transfers in China: a new perspective on spillover-feedback effects. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 241: 118375.
- [42] Hu J R, Huang K, Ridoutt B G, Yu Y J, Wei J. Rethinking environmental stress from the perspective of an integrated environmental footprint: Application in the Beijing industry sector. *Science of the Total Environment*, 2018, 637-638: 1051-1060.
- [43] 马彩虹, 赵晶, 赵先贵. 基于足迹家族的宁夏资源环境压力评估及时空差异分析. *环境科学学报*, 2016, 36(8): 3049-3058.