

DOI: 10.20103/j.stxb.202210283068

陈先鹏, 方恺. 中国省域环境可持续性时空格局及其影响因素. 生态学报, 2024, 44(2): 511-522.

Chen X P, Fang K. The spatio-temporal patterns and the influencing factors of provincial environmental sustainability in China. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(2): 511-522.

中国省域环境可持续性时空格局及其影响因素

陈先鹏¹, 方 恺^{2,3,4,*}

1 浙大城市学院法学院, 杭州 310015

2 浙江大学公共管理学院, 杭州 310058

3 浙江大学民生保障与公共治理研究中心, 杭州 310058

4 浙江大学长三角智慧绿洲创新中心, 嘉兴 314100

摘要: 人类活动已成为人类世背景下全球环境变化的主要驱动力, 因此将其合理调控在地球环境边界之内是实现可持续发展的前提条件。作为全球尺度的环境边界, 行星边界秉持“地球系统观”, 为统筹不同区域的环境可持续性评估提供了新视角。以行星边界为切入点, 评估中国省域主要人类活动的环境可持续性状况, 揭示其时空格局演变及社会经济影响因素。结果表明: (1) 中国省域碳、氮、磷排放的不可持续性北部整体高于南部, 分异程度随时间逐步拉大, 不可持续省份数量的占比均已超出 2/3; 省域水、土地利用的可持续性南部整体高于北部, 保持相对稳定, 可持续省份数量的占比均已超出 3/4。 (2) 中国省域环境可持续性大体受人口、经济、技术等因素的综合影响, 且各类环境要素的可持续性之间存在一定的协同效应。其中, 各类环境可持续性均受人口规模的正向驱动, 同时氮、磷、水和土地的可持续性均受农业活动的负向驱动。 (3) 碳排放可持续性主要受能源消费强度的负向驱动, 而磷排放可持续性同时受人口城镇化率的负向驱动, 水可持续性受二产占比的负向驱动。基于行星边界的环境可持续性研究, 可为区域合理界定和有效承担全球环境可持续性责任提供科学参考。

关键词: 环境可持续性; 行星边界; 时空格局; 影响因素; 空间计量

The spatio-temporal patterns and the influencing factors of provincial environmental sustainability in China

CHEN Xianpeng¹, FANG Kai^{2,3,4,*}

1 School of Law, Hangzhou City University, Hangzhou 310015, China

2 School of Public Affairs, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China

3 Center of Social Welfare and Governance, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China

4 Innovation Center of Yangtze River Delta, Zhejiang University, Jiaxing 314100, China

Abstract: Human activities have become the major driver of global environmental change in the context of the Anthropocene, thus reasonably maintaining human socio-economic activities within the Earth's environmental boundaries is a prerequisite for achieving sustainable development. As global environmental boundaries, the planetary boundaries adhere to the Earth-system view and provide a new perspective for coordinating environmental sustainability assessments in different regions. In accordance with the planetary boundaries, this paper assesses the spatio-temporal patterns of provincial environmental sustainability in China, and discusses the socio-economic influencing factors of environmental sustainability based on the spatial econometric models. The results show that: (1) The unsustainability of carbon, nitrogen, and

基金项目: 国家社会科学基金重大项目(22&ZD108); 国家自然科学基金项目(72074193); 教育部重大攻关项目(2022JZDZ009); 宁波大学浙江省陆海国土空间利用与治理协同创新中心开放课题项目(LHGTX-2023-006)

收稿日期: 2022-10-28; **网络出版日期:** 2023-10-18

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: fangk@zju.edu.cn

限于数据的可获得性, 本研究尚未统计到中国港澳台地区数据。

phosphorus emissions in Chinese provinces are generally higher in the north than that in the south, and the degrees of differentiation gradually increase over time. The proportions of unsustainable provinces for those environmental elements have exceeded 2/3. In the meantime, the overall sustainability of both water and land use in the southern region are higher than that in the northern region, and remain relatively stable. The proportions of sustainable provinces for both water and land have exceeded 3/4. (2) The spatio-temporal patterns of provincial environmental sustainability in China are jointly affected by factors including population, economy and technology, and there are certain synergistic effects between various types of environmental sustainability. Among them, all types of environmental sustainability are positively driven by the population size, while the sustainability of nitrogen, phosphorus, water, and land are negatively driven by agricultural activities. (3) The sustainability of carbon emission is mainly negatively driven by energy consumption intensity; the sustainability of phosphorus emission is negatively driven by the urbanization rate of the population; the sustainability of water is negatively driven by the proportion of secondary production. The study of environmental sustainability in accordance with the planetary boundaries can provide scientific references for the regions to rationally define and effectively implement global environmental sustainability responsibilities.

Key Words: environmental sustainability; planetary boundaries; spatio-temporal pattern; influencing factor; spatial econometrics

自工业革命以来,人类的资源攫取、废弃物排放等活动对地球生态系统产生巨大压力,业已成为全球环境变化的主要驱动因子^[1]。其中,全球升温已引发包括生物多样性下降在内的环境问题,进而对地球生态安全和社会经济可持续发展均产生诸多不利影响^[2];研究表明,全球大概有三分之二的人口每年至少有一个月受严重水稀缺的威胁,同时有五亿人口全年面临严重水稀缺问题^[3];人类的土地利用活动已对全球 71.4%的人口所居住的 58.1%的陆地的生物多样性造成影响^[4];活性氮的过度使用可能引发水体富营养化、土壤酸化、空气污染等环境问题^[5];农用磷肥的大量投入,也可能带来水体富营养化、土壤退化等环境问题^[6]。总而言之,人类活动正在影响地球生态系统的稳定性和生态系统服务的可持续供给^[7]。因此,将人类社会经济活动有效管控在地球环境边界之内,是实现可持续发展的关键^[8-10]。

其中,科学评估各尺度的环境可持续性是可可持续发展的基础性工作^[11]。纵观已有研究,中国学界在环境可持续性评估方面已积累了丰富成果,且以限制因子、指标综合、生态足迹等方法为主要研究方法,重点关注本地的资源禀赋、环境容量和生态再生能力^[12-13]。作为国际可持续发展领域的热点之一,行星边界是基于历史经验和科学研究设定的全球环境边界,为统筹各尺度的环境可持续性评估提供了新视角^[14-15]。其中,将行星边界本地化是“全球化思维,地方化行动”(Think globally, act locally)的重要体现,能为区域有效履行全球环境可持续性责任提供路径参考^[16]。为此,学者们对行星边界本地化的可能路径进行了积极探索^[17-18]。Cole 等主要基于本地视角界定了南非社会经济活动的安全操作空间^[19]。O'Neill 等将全球人均行星边界作为衡量基准,评估了主要国家的环境可持续性^[20]。

行星边界也引起了中国学术界的积极关注。其中,方恺等基于环境足迹和行星边界的整合框架评估了全球主要国家碳、水、土地的可持续性^[21-22]。张军泽等阐述了行星边界框架的概念内涵和研究进展,分析了该框架对中国可持续发展的启示意义^[23]。陈先鹏等梳理了行星边界在区域各尺度的本地化应用^[24]。苏彦瑜等基于行星边界的拓展框架——甜甜圈框架评估了湖北梁子湖流域的环境和社会经济可持续性^[25]。邵庆龙等基于甜甜圈框架对中国及其省域的社会经济可持续发展状态进行了评估^[26]。这些研究对推进国内环境可持续性研究全球思维的形成具有一定的积极作用。然而,基于行星边界的区域环境可持续性的影响机制的研究较为缺乏,在一定程度上阻碍了全球环境可持续性责任的有效履行。因此,本文基于行星边界对中国省域环境可持续性时空格局进行评估,并基于空间计量模型对其社会经济影响因素进行分析,以期为中国省域履行环境可持续性责任提供科学参考。

1 研究方法

1.1 区域边界的厘定

区域边界的内涵因研究视角的不同而有所不同。从本地视角出发,区域边界是指域内资源禀赋、环境容量或生态再生能力;而从全球视角出发,区域边界可指本地化的行星边界配额。为体现地球生态系统的整体性特征,本文选择基于行星边界自上而下分配来厘定区域边界。其中,分配原则的确定至关重要^[27]。为体现人类个体平等享有发展空间的价值取向,本文基于在已有研究中使用频次较多的人均配额原则确定区域边界,计算公式如下:

$$EB_{i,j,t} = \frac{PB_i}{P_{g,t}} \times P_{j,t} = pcPB_{i,j,t} \times P_{j,t} \quad (1)$$

$$P_{j,t} = \frac{(P'_{j,t-1} + P'_{j,t})}{2} \quad (2)$$

式中, $EB_{i,j,t}$ 、 $pcPB_{i,j,t}$ 分别为 t 年第 j 个地区第 i 类区域边界、第 i 类人均行星边界, PB_i 为第 i 类行星边界, $P_{g,t}$ 为 t 年全球人口数量, $P_{j,t}$ 为第 j 个地区的常住人口数量, $P'_{j,t-1}$ 、 $P'_{j,t}$ 分别为第 j 个地区 $t-1$ 、 t 年的年末常住人口数量。地区常住人口数量为该地区上一年与本年年末常住人口数量的算术平均值。

1.2 环境不可持续性指数的构建

本文参考环境足迹和行星边界的整合框架构建环境不可持续性指数^[28-30],以表征区域环境可持续性,计算公式如下:

$$RECI_{i,j,t} = \frac{EP_{i,j,t}}{EB_{i,j,t}} \quad (3)$$

式中, $RECI_{i,j,t}$ 为 t 年第 j 个地区第 i 类环境不可持续性指数, $EP_{i,j,t}$ 为 t 年第 j 个地区第 i 类环境压力状况。具体而言,碳排放压力指标为碳排放量,氮、磷压力指标分别为农业氮肥、磷肥中的氮、磷含量,水压力指标为水资源消耗量,土地压力指标为耕地面积。

值得注意的是,环境不可持续性指数在本文中用于界定全球环境可持续性责任。当 $RECI_{i,j,t} \leq 1$ 时,表示可持续状态;当 $RECI_{i,j,t} > 1$ 时,表示不可持续状态。

1.3 空间自相关分析

基于 Moran 指数的空间自相关分析是在社会经济和资源环境等空间特征研究中广泛应用的方法之一^[31-33]。本文将运用 Moran 指数,对中国省域环境可持续性的全局和局部空间相关性进行分析。其中,全局 Moran's I 指数的计算公式如下:

$$I = \frac{n \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij} (x_i - \bar{x}) (x_j - \bar{x})}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (4)$$

式中, n 为省份数量; W_{ij} 为空间权重矩阵; x_i 、 x_j 分别为省份 i 、 j 的环境不可持续性指数; \bar{x} 为环境不可持续性指数的平均值。当 $I < 0$ 时,表明环境不可持续性呈现空间负自相关关系;当 $I = 0$ 时,表明不存在空间自相关关系;当 $I > 0$ 时,表明呈现空间正自相关关系。

局部 Moran's I_i 指数的计算公式如下:

$$I_i = \frac{n(x_i - \bar{x}) \sum_{j=1}^n W_{ij} (x_j - \bar{x})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (5)$$

式中,当 $I_i < 0$ 时,表明环境不可持续性为高低(HL)或低高(LH)集聚;当 $I_i = 0$ 时,表明不存在集聚现象;当 $I_i > 0$ 时,表明环境不可持续性为高高(HH)或低低(LL)集聚。

1.4 空间计量分析

在空间自相关分析之后,由于空间计量模型能有效体现空间依赖性^[34-36],本文将基于空间计量模型来识别环境可持续性的社会经济影响因素。具体而言,本文通过构建空间误差模型(SEM)和空间滞后模型(SLM),并选择拟合效果较优的模型来讨论社会经济影响因素对环境可持续性的贡献程度。其中,SEM 分析误差项的空间自相关性,而 SLM 探讨因变量之间的空间溢出效应^[37-38],计算公式分别如下:

$$Y = X\beta + \lambda Wu + \varepsilon \quad (6)$$

$$Y = \rho WY + X\beta + \varepsilon \quad (7)$$

式中, Y 为由空间单元因变量组成的 $n \times 1$ 向量; X 为 $n \times k$ 矩阵; β 为由相关系数组成的 $k \times 1$ 向量; λ 为空间自相关系数; W 为 $n \times n$ 空间权重矩阵; u 为由空间自相关误差项组成的 $n \times 1$ 向量; ε 为由服从 $N(0, \delta^2)$ 的随机误差项组成的 $n \times 1$ 向量; ρ 为空间自回归系数。

2 指标选取与数据来源

2.1 指标选取

本文主要基于行星边界框架和数据的可获得性选择环境要素。其中,为了地球生态安全和生态系统服务的可持续供给,行星边界框架主要关注气候变化等九大关键生物物理过程。其中,大气气溶胶负载和化学污染为待定状态;生物多样性损失、平流层臭氧消耗和海洋酸化的数据获取困难。因此,本文选取的环境要素主要为碳、氮、磷、水和土地。再者,本文在分析环境可持续性影响因素的过程中,社会经济指标主要综合 IPAT 模型、环境要素可能涉及的社会经济过程 and 数据的可获得性选取而定^[39]。其中,IPAT 模型的计算公式如下:

$$I = P \times A \times T \quad (8)$$

式中, I 为人类社会经济活动的环境影响, P 为人口数量, A 为人均国内生产总值(GDP), T 为单位 GDP 的环境影响。

具体而言,本文选择人口规模、城市人口密度、人口城镇化率等指标表征人口类因素,选择人均国内生产总值、居民人均可支配收入、二产占比、能源工业投资、农业总产值等指标表征经济类因素,选择能源消费强度、有效灌溉面积、农作物播种面积、农业种植结构等指标表征技术类因素,据此构建省域环境可持续性影响因素的空间计量模型。

2.2 数据来源

为实现全球 2°C 温控目标,联合国环境规划署认为本世纪的二氧化碳排放量应限定在 1456 Gt 以内^[40],因此可将碳边界设置为 14.56 Gt;参考 Steffen 等^[15]的设置,氮边界和磷边界分别为 62 Tg、6.2 Tg;参考 Rockström 等^[14]的设置,水边界为 4000 km³,土地边界基于耕地面积占比 15% 计算而得。全球人口数据来自世界银行数据库。结合全球人口数据,可获得各类行星边界的全球人均值(表 1)。

省域数据主要包括环境压力数据和社会经济数据(表 2)。其中,氮、磷排放压力、水压力分别通过氮、磷肥折纯量、用水量来表征,且数据来自国家统计局网站。能源消费总量数据来自《中国能源统计年鉴》。省域年度碳排放量数据来自于中国碳核算数据库(CEADs)。省域耕地面积数据来源于土地调查成果共享应用服务平台。人口规模数据等社会经济数据来自国家统计局网站。

3 结果分析

3.1 中国省域环境可持续性时空格局

3.1.1 碳排放可持续性时空格局

大体而言,中国省域碳排放不可持续程度逐年加剧,且碳排放不可持续性指数(以下简称“碳指数”)逐步

表 1 各类行星边界的全球人均值

Table 1 Global per capita values for various planetary boundaries

年份 Year	人均碳边界 Per capita carbon boundary/ (t/人)	人均氮边界 Per capita nitrogen boundary/ (kg/人)	人均磷边界 Per capita phosphorus boundary/(kg/人)	人均水边界 Per capita water boundary/ (m ³ /人)	人均土地边界 Per capita land boundary/ (hm ² /人)
2001	2.35	10.01	1.00	645.82	0.32
2002	2.32	9.88	0.99	637.68	0.32
2003	2.29	9.76	0.98	629.73	0.31
2004	2.26	9.64	0.96	621.93	0.31
2005	2.24	9.52	0.95	614.27	0.30
2006	2.21	9.40	0.94	606.73	0.30
2007	2.18	9.29	0.93	599.32	0.30
2008	2.15	9.18	0.92	591.99	0.29
2009	2.13	9.06	0.91	584.83	0.29
2010	2.10	8.96	0.90	577.88	0.29
2011	2.08	8.85	0.89	571.20	0.28
2012	2.05	8.75	0.87	564.51	0.28
2013	2.03	8.65	0.86	557.91	0.28
2014	2.01	8.55	0.85	551.40	0.27
2015	1.98	8.45	0.84	545.04	0.27
2016	1.96	8.35	0.84	538.77	0.27
2017	1.94	8.26	0.83	532.69	0.26
2018	1.92	8.17	0.82	526.87	0.26
2019	1.90	8.08	0.81	521.27	0.26

表 2 省域数据来源

Table 2 Provincial data sources

指标名称 Name of indicator	计量单位 Unit of measurement	时间范围 Time scale	数据来源 Data source
碳排放量 Amount of carbon emissions	M t	2001—2019 年	CEADs 数据库
能源消费总量 Total energy consumption	10 ⁴ 吨标准煤	2001—2019 年	中国能源统计年鉴
耕地面积 Area of cultivated land	10 ⁴ hm ²	2009—2016 年	土地调查成果共享应用服务平台
氮排放量 Amount of nitrogen emissions	10 ⁴ t	2001—2019 年	
磷排放量 Amount of phosphorus emissions	10 ⁴ t	2001—2019 年	
用水量 Water consumption	10 ⁸ m ³	2004—2019 年	
人口规模 Population size	万人	2001—2019 年	
城市人口密度 Urban population density	人/km ²	2004—2019 年	
人口城镇化率 Population urbanization rate	无量纲	2005—2019 年	
人均国内生产总值 Per capita gross domestic product	元/人	2001—2019 年	
居民人均可支配收入 Per capita disposable personal income	元/人	2005—2019 年	国家统计局网站
二产占比 Proportion of secondary production	无量纲	2001—2019 年	
能源工业投资 Investment in energy industry	亿元	2001—2017 年	
农业总产值 Total agricultural output value	亿元	2001—2019 年	
有效灌溉面积 Effective irrigation area	10 ³ hm ²	2001—2019 年	
农作物播种面积 Crop sown area	10 ³ hm ²	2001—2019 年	
农业种植结构 Agricultural planting structure	无量纲	2001—2019 年	

CEADs: 中国碳核算数据库, Carbon Emission Accounts & Datasets for emerging economies

演化成北部高于南部的空间格局(图 1)。至 2019 年,所有省份的碳排放均为不可持续,其中碳指数最高值为山西的 25.60,约为最低值北京 1.70 的 15 倍。再者,省域碳指数的分异程度随时间推移逐步增加。其中,以南部省份为主的 15 省份碳排放从 2001 年的可持续转变为 2010 年的不可持续,尤其以贵州、陕西和宁夏为碳指数升幅的显著代表。与此同时,以北部省份为主的 15 省份碳排放均为不可持续,且以山西、内蒙古和新疆为碳指数升幅的显著代表。

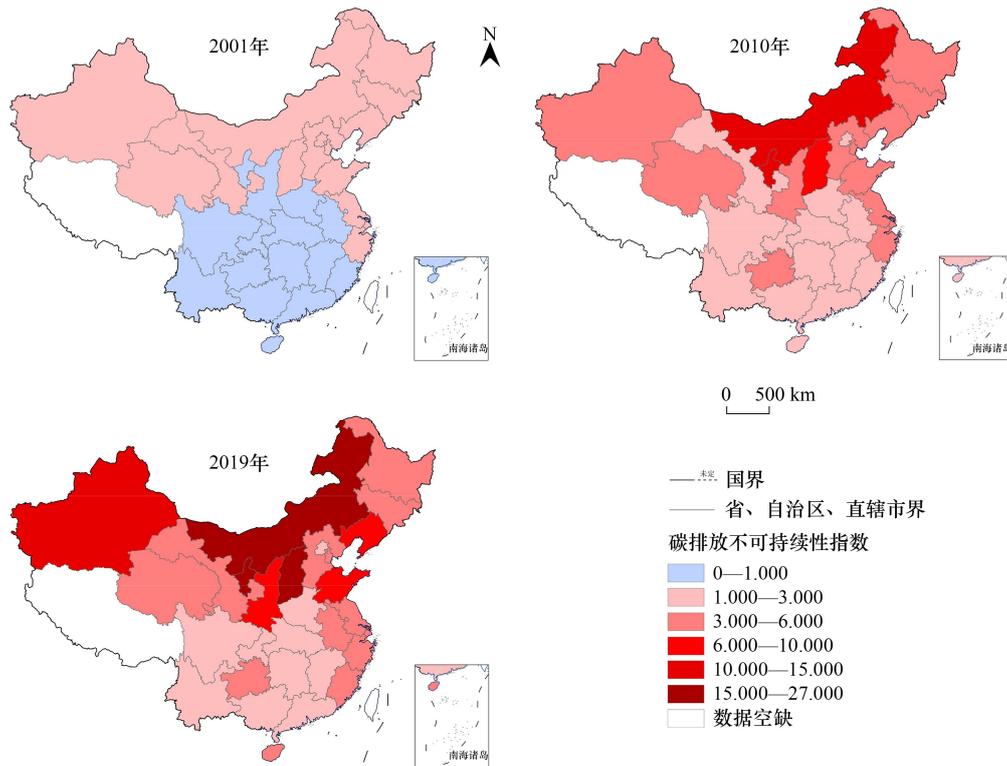


图 1 中国省域碳排放可持续性时空格局

Fig.1 The spatio-temporal patterns of provincial sustainability of carbon emissions in China

3.1.2 氮排放可持续性时空格局

大体而言,中国绝大多数省份的氮排放均为不可持续,且氮排放不可持续性指数(以下简称“氮指数”)逐步演化成北部高于南部的空间格局(图 2)。至 2019 年,氮指数最高值为新疆的 5.34,约为最低值北京 0.13 的 41 倍。由图 2 可见,省域氮指数的分异程度随时间推移逐步增加。其中,北京、上海、西藏和青海的氮排放均为可持续;河北等 22 个省份的氮排放均为不可持续,且以内蒙古、黑龙江、新疆为氮指数升幅的显著代表。

3.1.3 磷排放可持续性时空格局

大体而言,中国绝大多数省份的磷排放均为不可持续,且磷排放不可持续性指数(以下简称“磷指数”)逐步演化成北部高于南部的空间格局(图 3)。至 2019 年,省域磷指数最高值为新疆的 13.72,约为最低值北京 0.08 的 171.5 倍。由图 3 可见,磷指数的分异程度随时间推移逐步增加。其中,北京和上海的磷排放均为可持续;河北等 24 个省份的磷排放均为不可持续,且以内蒙古、黑龙江、新疆为磷指数升幅的显著代表。

3.1.4 水可持续性时空格局

大体而言,中国绝大多数省份的水资源均为可持续,水不可持续性指数(以下简称“水指数”)逐步形成北部整体高于南部的空间格局(图 4)。至 2019 年,水指数最高值为新疆的 4.44,约为最低值北京 0.37 的 12 倍。由图 4 可见,省域水指数分异程度保持相对稳定。其中,内蒙古、黑龙江、江苏、西藏、新疆的水均为不可持续;

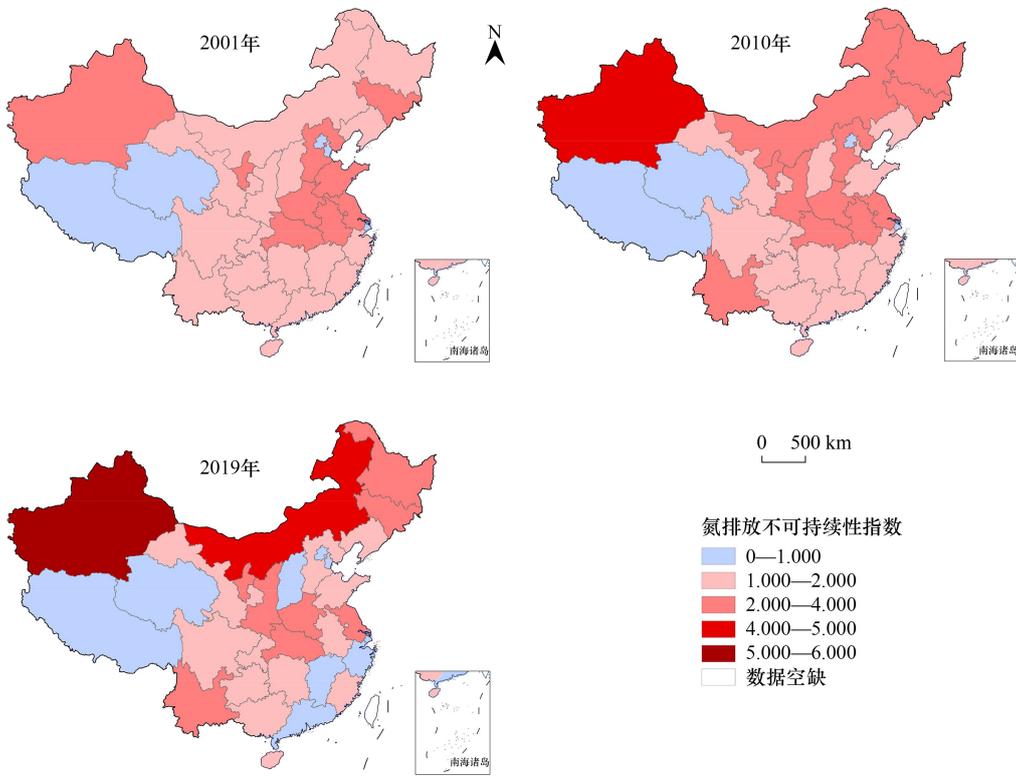


图2 中国省域氮排放可持续性时空格局

Fig.2 The spatio-temporal patterns of provincial sustainability of nitrogen emissions in China

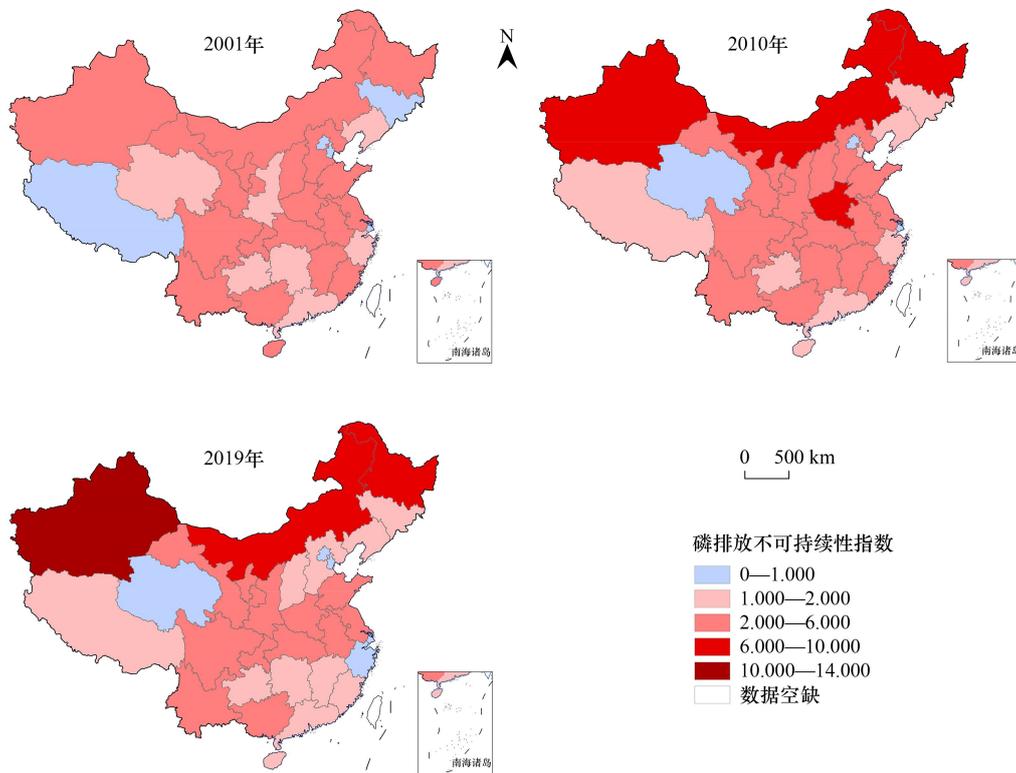


图3 中国省域磷排放可持续性时空格局

Fig.3 The spatio-temporal patterns of provincial sustainability of phosphorus emissions in China

北京等 23 个省级区域的水均为可持续。需要说明的是,山西等省份水可持续程度较高与其水资源匮乏的事实形成冲突,是由于其人均水资源消耗量较少形成的。

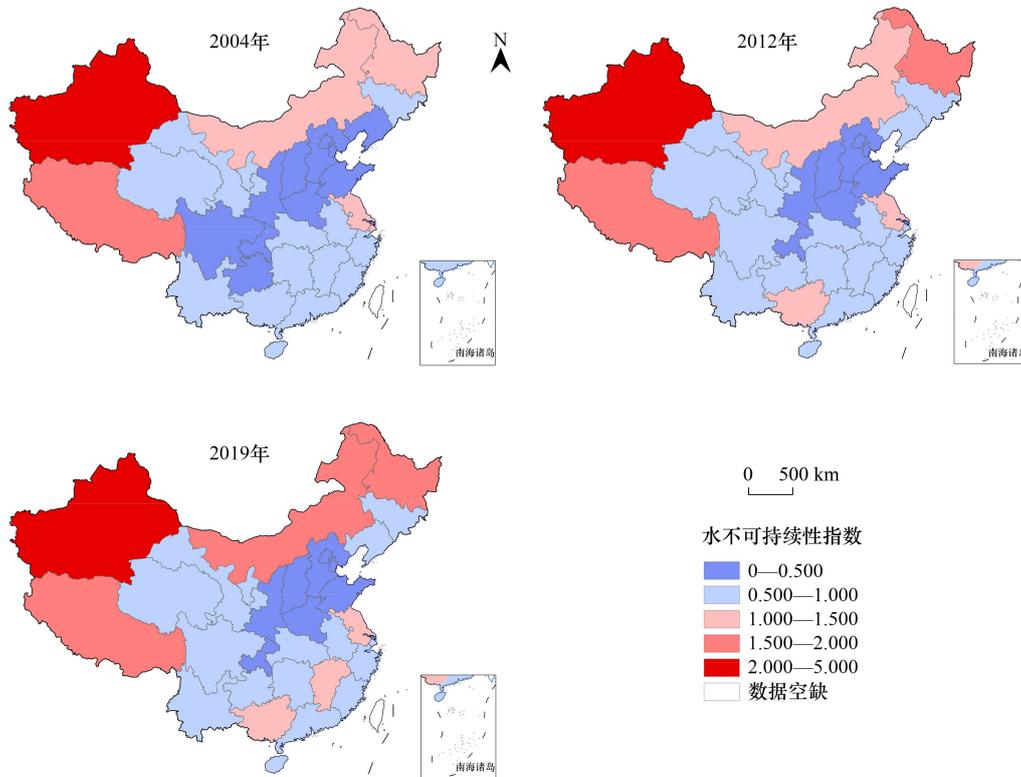


图 4 中国省域水可持续性时空格局

Fig.4 The spatio-temporal patterns of provincial sustainability of water in China

3.1.5 土地可持续性时空格局

大体而言,中国绝大多数省份的土地资源为可持续,且土地不可持续性指数(以下简称“土地指数”)逐步演化成北部高于南部的空间格局(图 5)。至 2016 年,只有内蒙古、吉林和黑龙江 3 个省份的土地为不可持

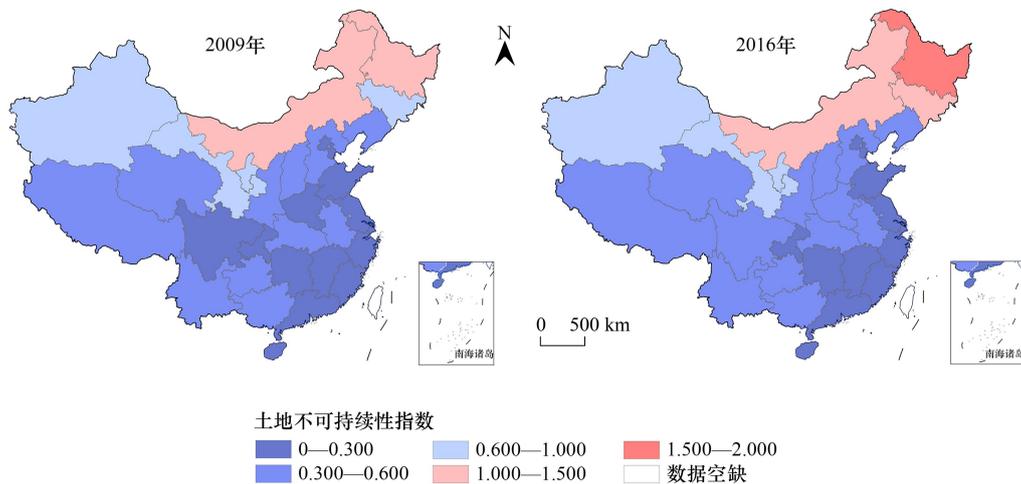


图 5 中国省域土地可持续性时空格局

Fig.5 The spatio-temporal patterns of provincial sustainability of land in China

续,其余省份土地均为可持续,其中,土地指数最高值为黑龙江的 1.70,约为最低值上海 0.03 的 57 倍。由图 5 可见,省域土地可持续性的空间格局保持相对稳定。

3.2 中国省域环境可持续性影响因素

3.2.1 碳排放可持续性影响因素

由于 SLM 拟合效果略优于 SEM(表 3),本文选择 SLM 来分析省域碳排放可持续性的社会经济影响因素。其中,人口规模对碳指数产生显著的负向影响,即人口规模越多,碳指数越小;能源工业投资、能源消费强度均对碳指数产生显著的正向影响。比较而言,能源消费强度对碳指数的贡献程度远高于其他社会经济因素。

表 3 中国省域碳排放可持续性影响因素的空间计量结果

Table 3 The spatial econometric result of influencing factors of sustainability of provincial carbon emissions in China

变量 Variables	SLM	SEM	变量 Variables	SLM	SEM
lnrkgm	-0.0007 **	-0.0006 **	lneczb	7.9059	4.8698
lnrgdp	2.0286×10^{-5}	1.6363×10^{-5}	lnrzs	1.5039×10^{-5}	7.0967×10^{-6}
lnxfqd	5.1495 ***	6.0467 ***	lnngtz	0.0025 **	0.0024 **
lnrczh	-3.2559	-1.0419	R ²	0.6720	0.6695
lnesrm	-0.0000	-0.0002	Log likelihood	-83.1026	-83.3236

SLM:空间滞后模型 Spatial Lag Model;SEM:空间误差模型 Spatial Error Model;rkgm:人口规模;rgdp:人均国内生产总值;xfqd:能源消费强度;rczh:人口城镇化率;esrm:城市人口密度;eczb:二产占比;rzs:居民人均可支配收入;ngtz:能源工业投资;Log likelihood:对数似然估计;***:1%的显著性水平;** :5%的显著性水平

3.2.2 氮排放可持续性影响因素

由于 SEM 拟合效果优于 SLM(表 4),本文选择 SEM 来分析省域氮排放可持续性的社会经济影响因素。其中,人口规模对氮指数产生显著的负向影响,即人口规模越多,氮指数越小;表征农业活动经济产出的农业总产值、体现农业活动规模的有效灌溉面积均对氮指数产生显著的正向影响。

表 4 中国省域氮排放可持续性影响因素的空间计量结果

Table 4 The spatial econometric result of influencing factors of sustainability of provincial nitrogen emissions in China

变量 Variables	SLM	SEM	变量 Variables	SLM	SEM
lnrkgm	-0.0003 ***	-0.0004 ***	lnnbmj	-8.4114×10^{-5}	-8.5256×10^{-5}
lnrgdp	-5.8245×10^{-6}	-8.8508×10^{-6}	lnnzjg	-0.6065	-0.0506
lnrczh	2.5016	2.1482	R ²	0.5582	0.6086
lnnzcz	0.0007 *	0.0008 ***	Log likelihood	-39.7366	-38.5962
lnggmj	0.0004 **	0.0003 **			

ncz:农业总产值;gmmj:有效灌溉面积;nbmj:农作物播种面积;nzjg:农业种植结构;* :10%的显著性水平

3.2.3 磷排放可持续性影响因素

由于 SEM 拟合效果优于 SLM(表 5),本文选择 SEM 来分析省域磷排放可持续性的社会经济影响因素。其中,人口规模、人均 GDP 均对磷指数产生显著的负向影响,即人口规模越多、人均 GDP 越高,磷指数越小;人口城镇化率、有效灌溉面积、农作物播种面积均对磷指数产生显著的正向影响,且人口城镇化率的贡献程度远大于后两者。

表 5 中国省域磷排放可持续性影响因素的空间计量结果

Table 5 The spatial econometric result of influencing factors of sustainability of provincial phosphorus emissions in China

变量 Variables	SLM	SEM	变量 Variables	SLM	SEM
lnrkgm	-0.0002	-0.0004 **	lnnbmj	8.5190×10^{-5}	0.0002 *
lnrgdp	-0.0001 *	-0.0001 **	lnnzjg	-0.1452	-0.1974
lnrczh	4.3007 *	5.7278 ***	R ²	0.5921	0.6494
lnnzcz	-0.0005	0.0004	Log likelihood	-41.1439	-39.7517
lnggmj	0.0007 **	0.0006 **			

3.2.4 水可持续性影响因素

由于 SEM 拟合效果优于 SLM (表 6), 本文选择 SEM 来分析省域水可持续性的社会经济影响因素。其中, 人口规模对水指数产生显著的负向影响, 即人口规模越多, 水指数越小; 二产占比、有效灌溉面积均对水指数产生显著的正向影响, 且二产占比的贡献程度远高于其他因素。

表 6 中国省域水可持续性影响因素的空间计量结果

Table 6 The spatial econometric result of influencing factors of sustainability of provincial water in China

变量 Variables	SLM	SEM	变量 Variables	SLM	SEM
lnrkgm	-0.0002 ***	-0.0002 ***	lnrzs	9.8824×10^{-7}	-2.1746×10^{-5}
lnrgdp	1.1045×10^{-5}	6.7211×10^{-6}	lנגmj	0.0004 ***	0.0005 ***
lnrczh	-1.8370	-1.2060	R ²	0.5546	0.7230
lnsrn	7.9977×10^{-5}	4.6210×10^{-6}	Log likelihood	-25.5132	-21.2566
lnecz	1.8256	3.0769 **			

3.2.5 土地可持续性影响因素

由于 SEM 拟合效果略优于 SLM (表 7), 本文选择 SEM 来分析省域土地可持续性的社会经济影响因素。其中, 人口规模对土地指数产生显著的负向影响, 即人口规模越大, 土地指数越小; 有效灌溉面积、农作物播种面积、农业种植结构对土地指数均产生显著的正向影响, 且农业种植结构的贡献程度远高于其他因素。

表 7 中国省域土地可持续性影响因素的空间计量结果

Table 7 The spatial econometric result of influencing factors of sustainability of provincial land in China

变量 Variables	SLM	SEM	变量 Variables	SLM	SEM
lnrkgm	-5.4606×10^{-5} ***	-3.4132×10^{-5} **	lnbmj	5.6342×10^{-5} ***	4.8078×10^{-5} **
lnrgdp	4.9916×10^{-7}	2.8211×10^{-6}	lnzjg	-0.0566	0.3999 *
lnrczh	0.1158	-0.0699	R ²	0.8503	0.8667
lnnzc	-5.8407×10^{-5}	-0.0001	Log likelihood	15.2821	14.8556
lנגmj	4.2268×10^{-5}	8.3772×10^{-5} ***			

4 讨论与结论

4.1 讨论

本文基于秉持“地球系统观”的行星边界, 自上而下地讨论省域环境可持续性时空格局, 体现的是对全球环境可持续责任的分摊, 可为不同区域合理履行环境可持续性责任提供基础参考, 同时也是对传统自下而上的环境可持续性研究的重要补充^[41]。诚然, 基于行星边界值来确定省域边界值, 存在一定的不确定性, 即忽略了异质性和贸易的影响, 因此如何兼顾全球相关性和本地相关性, 是环境可持续性研究今后应重点讨论的方向之一。由省域环境可持续性的影响因素可知, 通过技术进步、制度优化、管理革新等途径降低能源消费强度, 是确保碳排放可持续的关键; 降低对农业经济产出的预期目标、管控农业有效灌溉面积, 均是增强氮排放可持续性的可能路径; 人口城镇化进程应考虑对磷排放可持续性可能的影响; 通过调整产业结构来适当降低二产占比, 是增强水可持续性的关键路径; 合理调整农业种植结构是增强土地可持续性的关键路径。为了全面掌握区域可持续发展状况, 须进一步探究环境可持续性与社会经济发展目标之间的协调或权衡关系^[11], 寻求在行星边界内的社会经济繁荣发展。

4.2 结论

本文的研究结论主要如下:

(1) 以行星边界为新视角, 中国绝大多数省份的碳、氮、磷排放均为不可持续, 省域不可持续性北部整体高于南部, 分异程度随时间逐步拉大, 且各环境要素不可持续省份数量的占比均已超出 2/3; 绝大多数省份的

水、土地利用均未超出对应环境边界,可持续性保持相对稳定,且水、土地可持续省份数量的占比均已超出 3/4。

(2) 中国省域环境可持续性受人口、经济、技术等社会经济因素的综合影响,且各类环境可持续性之间存在一定的协同效应。其中,各环境要素的可持续性均受人口规模的正向驱动,同时大多数环境要素的可持续性均受农业活动的负向驱动。具体而言,氮、磷、水、土地的可持续性均受有效灌溉面积的影响,同时磷和土地的可持续性均受农作物播种面积的影响。

(3) 碳排放可持续性主要受能源消费强度的负向驱动;氮排放可持续性主要受农业总产值的负向驱动;磷排放可持续性主要受人口城镇化率的负向驱动;水可持续性主要受二产占比的负向驱动;土地可持续性主要受农业种植结构的负向驱动。

参考文献 (References):

- [1] Crutzen P J. Geology of mankind. *Nature*, 2002, 415(6867): 23.
- [2] Lenton T M, Rockström J, Gaffney O, Rahmstorf S, Richardson K, Steffen W, Schellnhuber H J. Climate tipping points—too risky to bet against. *Nature*, 2019, 575(7784): 592-595.
- [3] Mekonnen M M, Hoekstra A Y. Four billion people facing severe water scarcity. *Science Advances*, 2016, 2(2): e1500323.
- [4] Newbold T, Hudson L N, Arnell A P, Contu S, De Palma A, Ferrier S, Hill S L L, Hoskins A J, Lysenko I, Phillips H R P, Burton V J, Chng C W T, Emerson S, Gao D, Pask-Hale G, Hutton J, Jung M, Sanchez-Ortiz K, Simmons B I, Whitmee S, Zhang H B, Scharlemann J P W, Purvis A. Has land use pushed terrestrial biodiversity beyond the planetary boundary? A global assessment. *Science*, 2016, 353(6296): 288-291.
- [5] Galloway J N, Cowling E B. Reactive nitrogen and the world: 200 years of change. *Ambio*, 2002, 31(2): 64-71.
- [6] MacDonald G K, Bennett E M, Potter P A, Ramankutty N. Agronomic phosphorus imbalances across the world's croplands. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2011, 108(7): 3086-3091.
- [7] 陈绍晴, 池韵雯, 陈彬. 城市资源可持续管理的联合网络分析: 综述与展望. *中国人口·资源与环境*, 2021, 31(11): 20-33.
- [8] Costanza R, Daly H E. Natural capital and sustainable development. *Conservation Biology*, 1992, 6(1): 37-46.
- [9] Costanza R, Daly L, Fioramonti L, Giovannini E, Kubiszewski I, Mortensen L F, Pickett K E, Ragnarsdottir K V, De Vogli R, Wilkinson R. Modelling and measuring sustainable wellbeing in connection with the UN Sustainable Development Goals. *Ecological Economics*, 2016, 130: 350-355.
- [10] Pelenc J, Ballet J. Strong sustainability, critical natural capital and the capability approach. *Ecological Economics*, 2015, 112: 36-44.
- [11] 方恺, 许安琪, 何坚坚, 方创琳, 刘庆燕. “一带一路”沿线国家可持续发展综合评估及分区管控. *科学通报*, 2021, 66(19): 2441-2454.
- [12] 封志明, 李鹏. 承载力概念的源起与发展: 基于资源环境视角的讨论. *自然资源学报*, 2018, 33(9): 1475-1489.
- [13] 陈先鹏, 吴次芳, 方恺. 资源环境承载力研究范式的分化与比较. *中国土地科学*, 2020, 34(12): 17-24.
- [14] Rockström J, Steffen W, Noone K, Persson Å, Chapin F S III, Lambin E F, Lenton T M, Scheffer M, Folke C, Schellnhuber H J, Nykvist B, de Wit C A, Hughes T, van der Leeuw S, Rodhe H, Sörlin S, Snyder P K, Costanza R, Svedin U, Falkenmark M, Karlberg L, Corell R W, Fabry V J, Hansen J, Walker B, Liverman D, Richardson K, Crutzen P, Foley J A. A safe operating space for humanity. *Nature*, 2009, 461(7263): 472-475.
- [15] Steffen W, Richardson K, Rockström J, Cornell S E, Fetzer I, Bennett E M, Biggs R, Carpenter S R, de Vries W, de Wit C A, Folke C, Gerten D, Heinke J, Mace G M, Persson L M, Ramanathan V, Reyers B, Sörlin S. Planetary boundaries: guiding human development on a changing planet. *Science*, 2015, 347(6223): 1259855.
- [16] Häyhä T, Lucas P L, van Vuuren D P, Cornell S E, Hoff H. From planetary boundaries to national fair shares of the global safe operating space—how can the scales be bridged? *Global Environmental Change*, 2016, 40: 60-72.
- [17] Hoornweg D, Hosseini M, Kennedy C, Behdadi A. An urban approach to planetary boundaries. *Ambio*, 2016, 45(5): 567-580.
- [18] Lucas P L, Wilting H C, Hof A F, van Vuuren D P. Allocating planetary boundaries to large economies: distributional consequences of alternative perspectives on distributive fairness. *Global Environmental Change*, 2020, 60: 102017.
- [19] Cole M J, Bailey R M, New M G. Tracking sustainable development with a national barometer for South Africa using a downscaled “safe and just space” framework. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2014, 111(42): E4399-E4408.
- [20] O'Neill D W, Fanning A L, Lamb W F, Steinberger J K. A good life for all within planetary boundaries. *Nature Sustainability*, 2018, 1(2): 88-95.
- [21] 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.

- [22] 方恺, 段峥. 全球主要国家环境可持续性综合评估——基于碳、水、土地的足迹-边界整合分析. 自然资源学报, 2015, 30(4): 539-548.
- [23] 张军泽, 王帅, 赵文武, 刘焱序, 傅伯杰. 地球界限概念框架及其研究进展. 地理科学进展, 2019, 38(4): 465-476.
- [24] 陈先鹏, 方恺, 彭建, 刘爱原. 资源环境承载力评估新视角: 行星边界框架的源起、发展与展望. 自然资源学报, 2020, 35(3): 513-531.
- [25] 苏彦瑜, 李燕, 董旭辉. 湖北梁子湖流域社会生态系统可持续发展的“安全公正空间”. 应用生态学报, 2020, 31(12): 4206-4214.
- [26] 邵庆龙, 李默, 康鹏, 郭海男. 可持续发展评估的新方法: “甜甜圈”理论的中国案例分析. 自然资源学报, 2022, 37(2): 334-347.
- [27] Ryberg M W, Andersen M M, Owsianiak M, Hauschild M Z. Downscaling the planetary boundaries in absolute environmental sustainability assessments—a review. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 276: 123287.
- [28] Fang K, Heijungs R, De Snoo G R. Understanding the complementary linkages between environmental footprints and planetary boundaries in a footprint-boundary environmental sustainability assessment framework. *Ecological Economics*, 2015, 114: 218-226.
- [29] 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.
- [30] 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.
- [31] 陈志青, 邵天杰, 赵景波, 曹军骥, 岳大鹏. 东北地区臭氧浓度空间格局演变规律及影响因素. 环境科学学报, 2020, 40(9): 3071-3080.
- [32] 江文甲, 林满红, 翁佩莹, 庞孜钦, 林文雄, 魏道智, 苏凯. 福建省安溪县土地利用时空演变规律及其关键驱动因素. 生态学报, 2022, 42(2): 513-527.
- [33] 秦佳, 李建民. 中国人口城镇化的空间差异与影响因素. 人口研究, 2013, 37(2): 25-40.
- [34] 程叶青, 王哲野, 张守志, 叶信岳, 姜会明. 中国能源消费碳排放强度及其影响因素的空间计量. 地理学报, 2013, 68(10): 1418-1431.
- [35] 刘海猛, 方创琳, 黄解军, 朱向东, 周艺, 王振波, 张蔷. 京津冀城市群大气污染的时空特征与影响因素解析. 地理学报, 2018, 73(1): 177-191.
- [36] 王争磊, 刘海龙, 丁娅楠, 王炜桥, 张丽萍, 郭晓佳. 山西省生态安全时空演变特征及影响因素. 生态学报, 2022, 42(18): 7470-7483.
- [37] Elhorst J P. Applied spatial econometrics: raising the bar. *Spatial Economic Analysis*, 2010, 5(1): 9-28.
- [38] 樊元, 刘云敏, 李瑞杰. 空间计量模型的演化研究综述. 统计与决策, 2016, 20: 35-39.
- [39] 赵雪雁. 甘南牧区人文因素对环境的影响. 地理学报, 2010, 65(11): 1411-1420.
- [40] UNDP. Human development report 2007/2008. New York, 2007.
- [41] 陈先鹏. 中国资源环境可持续性的时空格局、影响因素与优化路径研究. 杭州: 浙江大学, 2022.