

文章编号:1001-9383(2025)01-0034-09

不同区域土地利用碳排放格局及影响因子探测

赵丹丹, 武潇健, 张培, 张红娟, 赵青恩, 刘猛, 李泓燕

(保定理工学院, 河北 保定 071000)

摘要:本研究基于我国东中西部三大分区视角,系统探讨了区域间及区域内不同土地利用类型的碳排放效应差异,分析其碳源与碳汇分布格局与变化趋势。在土地利用碳排放效应测算结果基础上,依托 ArcGIS 和 GeoDa 实现碳排放量、碳源与碳汇空间可视化,并借助 GeoDetector 实现地理探测器结果表达。结果表明:①2009—2021 年耕地碳排放量表现为中部地区>西部地区>东部地区,建设用地碳排放量表现为东部地区>中部地区>西部地区;林地、草地、水域碳固定吸收总量与林地碳吸收量均表现为西部地区>中部地区>东部地区。②总碳源热点分布区域涵盖东部地区的京津冀、辽宁、山东、江苏与中部地区的内蒙古、山西,以及西部地区的陕西、甘肃,总碳汇热点分布区主要为四川和云南,其置信度均在 90% 以上。③建设用地规模扩张、人口规模增加以及经济发展水平提升成为土地利用碳排放量的重要影响因素,研究期内其影响程度表现为不断增加的变化趋势;农业生产尤其是耕作农业发展也是碳排放的来源,但其影响程度呈现一定下降的发展形势。因此,东中部地区应以产业生态化为目标,疏解碳排放效应;西部地区应以生态产业化为导向,实现空间生态资源价值化。

关键词:土地利用;碳排放;空间可视化;地理探测器分析

中图分类号:F299.2

文献标识码:A

Pattern and influencing factors of inter-provincial land use carbon emission in China

ZHAO Dandan, WU Xiaojian, ZHANG Pei, ZHANG Hongjuan,

ZHAO Qing'en, LIU Meng, LI Hongyan

(Baoding University of Technology, Baoding Hebei 071000, China)

Abstract: From the perspective of the differences between and within the east region, the central region and the west region of China, the differences in carbon emission effects of different land use patterns are discussed, and the distribution patterns and trends of carbon sources and carbon sinks are analyzed. The spatial visualization of carbon emissions, carbon sources and sinks is achieved by utilizing ArcGIS and GeoDa, in accordance with the outcomes of the land use carbon emission effects. The GeoDetector results are expressed with the assistance of GeoDetector. The results demonstrate that: ① From 2009 to 2021, the carbon emissions from cultivated land exhibited a pattern of central region > western region > eastern region. For carbon emissions from construction land, it exhibited a pattern of eastern region > central region > western region. Meanwhile, both the total amount of carbon fixation and absorption of forest

收稿日期:2024-07-15

作者简介:赵丹丹(1997—),女,河北保定人,硕士,主要研究方向为城市土地利用与可持续发展。

E-mail:1446542925@qq.com

land, grassland, and waters areas as well as the carbon absorption of forest land exhibited a pattern of the western region > central region > eastern region. ②The hotspot distribution area of total carbon source covers Beijing-Tianjin-Hebei, Liaoning, Shandong, Jiangsu and Inner Mongolia and Shanxi, as well as Shanxi and Gansu. The hotspot distribution area of total carbon sinks is primarily located in Sichuan and Yunnan, with a confidence level exceeding 90%. ③The expansion of construction land, the increase in population scale and the improvement in economic development level have been identified as significant influencing factors of land use carbon emission, and the degree of influence of these factors shows an increasing trend during the study period. Agricultural production, particularly the development of farming agriculture, is also a source of carbon emission. However, the extent of its impact demonstrates a discernible decline in the progression of the circumstances. Consequently, the eastern and central region of the country should pursue the ecologization of industries to mitigate the consequences of carbon emissions, whereas the western region should prioritize the industrialization of ecology to actualize the valorization of spatial ecological resources.

Keywords: Land use; Carbon emissions; Spatial visualization; Geographic exploration analysis

0 引言

全球每年排放的 CO₂ 约 400 亿 t, 其中约 14% 来自土地利用过程^[1]。目前, 飞速的城镇化和工业化使我国土地利用变化剧烈, 碳排放快速增长。二十大报告提出实现高质量发展与区域协调发展, 这需要优化国土空间开发格局。因此, 剖析区域土地利用碳排放时空格局, 对实现“双碳”目标有重要意义^[2,3]。

学者从土地利用碳排放的时空差异分析^[4,5-9]、土地利用碳排放核算^[10]、城市碳排放与经济发展的关系^[8]、土地利用碳排放驱动及影响因素^[11,12]、土地利用碳排放与经济增长^[13,14]、碳排放量核算与减碳增汇对策^[15,16]、土地利用碳收支与经济增长的协同关系^[17,18]、土地利用碳排放影响机理^[19,20]等方面展开分析。已有研究从研究尺度上多集中在某一区域^[21-24]、省级行政单元^[25,26]或某一城市^[27,28]方面, 但目前基于宏观站位, 贴合国家区域协调发展战略, 从不同区域间及区域内部层面展开分析土地利用碳排放效应的研究较少; 同时对碳排放影响因素研究方法缺少对空间异质性的考虑, 而地理探测器将空间效应纳入其中, 并可以探究两两影响因素对土地利用碳排放的交互作用, 对探究土地利用碳排放影响机理有重要作用。

本研究从国家区域协调发展战略出发, 基于土地利用数据和能源统计数据, 估算不同区域土地利用碳排放量, 从宏观区域尺度上探究不同区域土地利用碳排放时空分布特征, 并利用探索性空间数据分析方法和地理探测器揭示其土地利用碳排放空间相关性和影响因素, 拟尝试发现区域间与区域内碳源及碳汇空间异质性分布变化规律及其影响因子, 为深入探索区域间与区域内碳排放空间溢出效应及空间关联网络的构建奠定基础, 从而为实现区域协调发展提供一定参考。

1 数据与方法

1.1 数据来源

土地利用数据来源于中国科学院资源环境科学数据平台(<https://www.resdc.cn/>), 研究区土地利用类型包括耕地、林地、草地、水域、建设用地。社会经济数据及能源数据来源于 2010—2022 年的《中国统计年鉴》《中国城市统计年鉴》《中国能源统计年鉴》。

1.2 研究区域

研究尺度为全国层面, 其中, 东部地区包括北京、天津、河北、辽宁、山东、上海、江苏、浙江、福建、广东、海南; 中部地区包括吉林、黑龙江、山西、安徽、江西、河南、湖北、湖南; 西部地区包括内蒙古、陕西、甘肃、青海、宁夏、新疆、广西、重庆、四川、贵州、云南。因香港、澳门、台湾及西藏地区数据缺失明显, 故研究区域并未包含上述地区。

1.3 研究方法

1.3.1 碳排放量估算

土地利用碳排放包括直接碳排放和间接碳排放,前者包括耕地、林地、草地、水域、未利用地的碳排放,后者即建设用地碳排放^[3]。

1)直接碳排放。依据 IPCC 清单的直接估算法,采用碳排放系数来计算各土地利用类型的直接碳排放,不同地类碳排放(吸收)系数参考已有研究(表 1)^[3],测算公式为

$$C = S_i \times E_i \quad (1)$$

式中: C 为碳排放量(t); S_i 为不同地类面积(hm²); E_i 为各地类的碳排放(吸收)系数。

2)间接碳排放。建设用地碳排放参考 IPCC 能源碳排放系数法^[3],公式如下:

$$C_e = \sum_{i=1}^N B_i \times D_i \times E_i \quad (2)$$

式中: C_e 为建设用地碳排放量(t); B_i 为某化石能源的消耗量(t); D_i 为化石能源标准煤折算系数(kg/kg); E_i 为化石能源碳排放系数(t/t),标准煤折算系数、碳排放系数参考《中国能源统计年鉴》和 IPCC 公布的数据(表 2)。

1.3.2 空间自相关分析

空间自相关分析用于衡量相邻观测值之间的相似性程度,从而揭示空间变量的区域结构特征。全局空间自相关主要用于分析研究对象在整个区域的空间聚集程度,最常用的是 Moran's I,取值范围为 $[-1, 1]$ 。局部空间自相关主要用于分析研究对象在局部地区的空间聚集程度,通常采用 Local Moran's I 来衡量。

1.3.3 地理探测器分析

地理探测器是探测空间分异特征及其驱动因素的统计学方法,相对于传统计量方法,地理探测器既可以通过 q 值来度量单个因素对区域土地利用碳排放空间分异的驱动力度,也可以用于探测两因子交互作用于因变量,进一步识别不同因素对区域土地利用碳排放空间分异的交互影响,在解释空间异质性和探究驱动机制方面具有独特优势^[29],适用于从不同角度探索不同区域土地利用碳排放空间分异的驱动因素。本研究主要采用分异及因子探测,通过选择 2009、2014、2021 年的建设用地面积、耕地面积、总人口、GDP 指标来探测土地利用结构、人口规模、经济发展水平对土地利用碳排放量的影响。其计算公式为^[3]

$$q = 1 - \frac{\sum_{i=1}^L N_i \sigma_i^2}{N \sigma^2} \quad (3)$$

式中: q 为影响因素的影响力大小; $i = 1, 2, \dots, L$, L 为某种因子的分类个数; N 为研究区样本数量; N_i 为 i 级单位样本数; σ_i^2 为研究区 i 级单元土地利用碳排放量的方差; σ^2 为研究区土地利用碳排放量的方差。

2 结果与分析

2.1 碳排放量分析

由图 1 可知,2009—2014 年,全国土地利用碳排放总量变化幅度为 33.77%,其中直接碳排放量变化幅度为 -0.24% ,间接碳排放量变化幅度为 34.54%,由此看出建设用地碳排放居于主体地位。从区域间层面来看,东部地区土地利用碳排放总量变化幅度为 18.62%,其中直接碳排放量变化幅度为 0.38%,间接碳排放量变化幅度为 18.86%;中部地区土地利用碳排放总量变化幅度为 40.80%,其中直接碳排放量变化幅度为 -0.39% ,间接碳排放量变化幅度为 41.92%;西部地区土地利用碳排放总量变化幅度为 49.42%,其中直接碳排放量变化幅度为 -0.0004% ,间接碳排放量变化幅度为 51.04%。综上分析,东中西部地区区域间呈现出上述与全国碳排放相同的变化趋势。从区域内层面来看,东部地区河北土地利用碳排放总量变化幅度最

表 1 不同土地利用类型碳排放系数

土地利用类型	碳排放系数/(t/hm ²)
耕地	0.461
林地	-0.581
草地	-0.021
水域	-0.253

表 2 不同能源类型标准煤折算系数和碳排放系数

能源类型	标准煤折算系数	碳排放系数
原煤	0.714 3	0.755 9
焦炭	0.971 4	0.855 0
洗精煤	0.900 0	0.755 9
其他洗煤	0.285 7	0.755 9
汽油	1.471 4	0.553 8
煤油	1.471 4	0.571 4
柴油	1.457 1	0.592 1
燃料油	1.428 6	0.618 5

高 23.85%,直接碳排放量变化幅度为-0.39%,间接碳排放量变化幅度为 24.16%;中部地区山西土地利用碳排放总量变化幅度最高 105.35%,直接碳排放量变化幅度为-0.28%,间接碳排放量变化幅度为 106.08%;西部地区内蒙古土地利用碳排放总量变化幅度最高 62.92%,直接碳排放量变化幅度为 0.45%,间接碳排放量变化幅度为 64.47%。综上分析,区域内层面东部地区的河北土地利用碳排放尤其是建设用地碳排放增幅远远小于中部地区的山西和西部地区的内蒙古,究其原因可能在于山西和内蒙古属于煤炭等传统能源主体区,故建设用地碳排放明显。

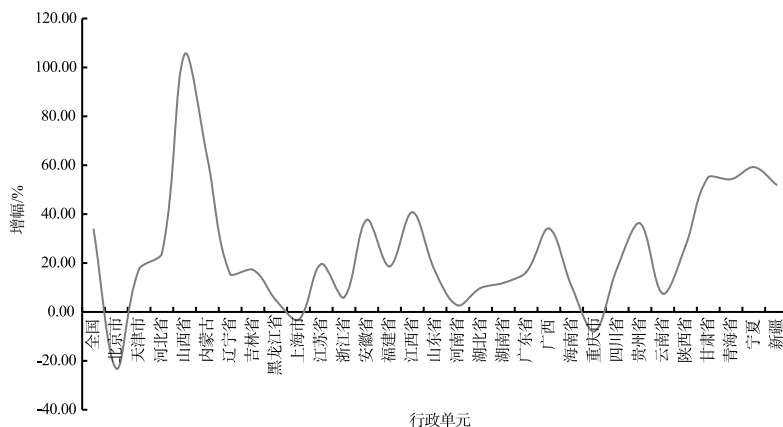


图 1 2009—2014 年土地利用碳排放增幅

由图 2 可知,2014—2021 年,全国土地利用碳排放总量变化幅度为 2.62%,其中直接碳排放量变化幅度为-5.33%,间接碳排放量变化幅度为 2.75%。从区域间层面来看,东部地区土地利用碳排放总量变化幅度为 2.32%,其中直接碳排放量变化幅度为-13.63%,间接碳排放量变化幅度为 97.80%;中部地区土地利用碳排放总量变化幅度为 1.09%,其中直接碳排放量变化幅度为-1.24%,间接碳排放量变化幅度为 1.13%;西部地区土地利用碳排放总量变化幅度为 10.86%,其中直接碳排放量变化幅度为-4.56%,间接碳排放量变化幅度为 11.20%。从区域内层面来看,东部地区山东土地利用碳排放总量变化幅度最高,增幅为 3.04%,直接碳排放量变化幅度为-15.21%,间接碳排放量变化幅度为 3.24%;中部地区山西土地利用碳排放总量变化幅度最高,为 9.47%,直接碳排放量变化幅度为-4.62%,间接碳排放量变化幅度为 9.51%;西部地区内蒙古土地利用碳排放总量变化幅度最高 25.90%,直接碳排放量变化幅度为 24.55%,间接碳排放量变化幅度为 25.93%。

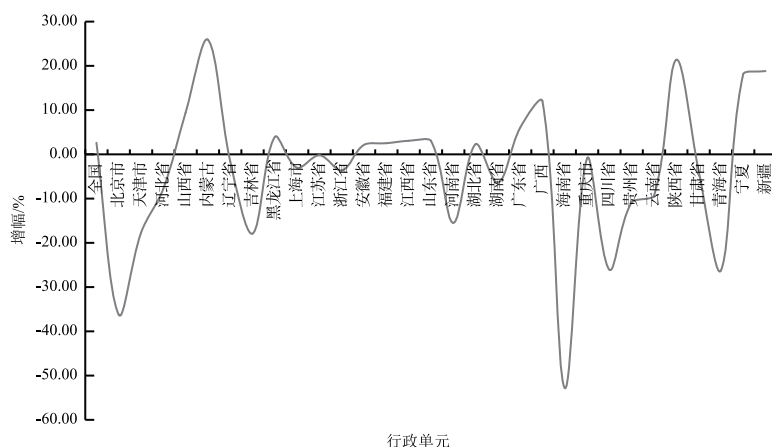


图 2 2014—2021 年土地利用碳排放增幅

2.2 碳源与碳汇变化分析

2.2.1 2009 年三大分区间及分区内部碳源、碳汇变化

碳源方面,从区域间层面看,东中西部地区耕地碳排放量分别为 1 451.95 万 t、2 483.82 万 t、2 316.13 万 t,表现为中部地区>西部地区>东部地区。其中可能的原因有两方面:一方面,中部地区在 2006 年印发的《中共

中央国务院关于促进中部地区崛起的若干意见》中的定位为“粮食生产基地”，且我国部分商品粮基地集中分布在中部地区，因而中部地区耕地碳排放量居首；另一方面，东部地区存在明显的耕地被占用现象，部分耕地成为新增建设用地来源，因而其耕地碳排放量相对低于中西部地区。建设用地碳排放量分别为117 496.96 万 t、91 571.78 万 t、70 698.18 万 t，表现为东部地区>中部地区>西部地区。可能的原因集中表现在东部地区城市化进程快速，建设用地增速快，能源消费总量远远超过中西部地区。从区域内层面看，东部地区辽宁、河北、山东、江苏耕地碳排放效应较为显著，成为直接排放碳源的主体；中部地区黑龙江、吉林、河南三个产粮大省耕地直接碳排放效应较明显；西部地区除青海、宁夏以外，其余省级行政单元耕地碳排放量分布较为均匀(表 3)。

表 3 2009 年研究区域土地利用碳源与碳汇分布

地区	行政单元	碳源			碳汇			
		耕地	建设用地	总计	林地	草地	水域	总计
东部	北京	10.53	2 476.94	2 487.47	43.42	0.18	2.04	45.64
	天津	20.72	3 524.59	3 545.31	3.30	0.03	7.24	10.57
	河北	303.99	23 738.84	24 042.80	270.46	5.94	22.49	298.89
	辽宁	233.60	13 710.66	13 944.30	329.05	2.32	24.51	355.88
	山东	8.79	5 263.43	5 272.22	2.95	0.00	6.99	9.94
	上海	213.72	15 094.76	15 308.50	15.42	0.09	78.54	94.05
	江苏	92.04	9 130.14	9 222.18	332.08	0.22	21.86	354.16
	浙江	62.17	5 131.38	5 193.55	489.27	0.48	14.27	504.02
	福建	355.27	28 186.78	28 542.10	89.63	1.00	41.63	132.26
	广东	117.32	10 704.09	10 821.40	591.62	0.76	39.64	632.02
中部	海南	33.81	1 535.36	1 569.17	70.81	0.08	7.20	78.09
	吉林	325.73	6 182.70	6 508.43	517.56	1.46	18.21	537.23
	黑龙江	735.07	9 616.16	10 351.23	1 275.1	4.35	55.37	1 334.8
	山西	188.49	27 453.98	27 642.47	284.51	8.69	7.48	300.68
	安徽	273.68	9 276.66	9 550.34	220.76	0.17	47.28	268.21
	江西	143.12	4 154.78	4 297.90	608.58	0.64	32.39	641.61
	河南	379.54	19 259.13	19 638.67	204.77	1.43	26.81	233.01
	湖北	246.62	8 148.58	8 395.20	505.95	0.62	52.85	559.42
	湖南	191.58	7 479.78	7 671.36	718.00	1.03	38.90	757.93
	内蒙古	425.74	17 141.18	17 566.92	1 360.00	124.84	53.69	1 538.5
西部	陕西	185.21	6 908.73	7 093.94	655.83	6.10	7.88	669.81
	甘肃	250.66	3 156.13	3 406.79	356.53	30.00	19.05	405.58
	青海	27.24	1 111.28	1 138.52	206.97	88.91	71.65	367.53
	宁夏	59.68	4 055.06	4 114.74	45.19	4.48	4.51	54.18
	新疆	237.35	5 122.08	5 359.43	524.16	105.83	128.21	758.20
	广西	205.27	3 936.56	4 141.83	779.43	2.38	21.98	803.79
	重庆	112.97	4 414.32	4 527.29	221.40	0.71	6.82	228.93
	四川	311.34	9 688.54	9 999.88	1 296.37	25.82	26.21	1 348.4
	贵州	211.38	7 904.66	8 116.04	526.02	3.44	6.22	535.68
	云南	289.28	7 259.64	7 548.92	1 347.00	6.39	17.05	1 370.47

碳汇方面，从区域间层面看，东中西部林地、草地、水域碳固定吸收总量分别为 2 515.55 万 t、4 632.90 万 t、8 081.05 万 t，其中林地碳吸收量分别为 2 238.03 万 t、4 335.21 万 t、7 318.88 万 t，两者均表现为西部地区>中部地区>东部地区。可能的原因为西部地区自然生态环境相对脆弱，生态环境制约性明显，我国在西部地区深入实施重点生态工程，加强天然林保护、退耕还林还草、退牧还草、重点防护林体系建设等重点生态工程实施力度，从而使得西部地区林地碳吸收生态效应明显；中部地区涵盖东北的大小兴安岭山脉、太行山、秦巴山脉等大型山体，林地覆盖率高，其碳汇功能明显；东部地区多为平原与低山丘陵形态，林地覆盖

率相对较弱化。从区域内层面看,东部地区辽宁、浙江、福建、广东碳吸收效应较为明显,中部地区除山西、河南、安徽以外,其余省级行政单元碳固定吸收量差异不明显,西部地区云南、四川、广西与内蒙古碳吸收效应明显(表 3)。

2.2.2 2014 年三大分区间及分区内部碳源、碳汇变化

碳源方面,从区域间层面看,东中西部地区耕地碳排放量分别为 1 446.41 万 t、2 474.25 万 t、2 316.12 万 t,表现为中部地区>西部地区>东部地区。建设用地碳排放量分别为 139 656.25 万 t、129 954.88 万 t、106 780.14 万 t,表现为东部地区>中部地区>西部地区。从区域内层面看,东中西部地区耕地直接碳源主体分布与 2009 年保持一致,东部和中部地区建设用地间接碳源主体分布与 2009 年基本一致,西部地区 2014 年与 2009 年略有不同,新疆建设用地碳排放量明显增加(表 4)。

碳汇方面,从区域间层面看,东中西部林地、草地、水域碳吸收总量分别为 2 493.08 万 t、4 612.22 万 t、8 063.20 万 t,其中林地碳排放量分别为 2 221.97 万 t、4 317.88 万 t、7 301.25 万 t,两者均为西部地区>中部地区>东部地区。从区域内层面看,东中西部地区林地、草地、水域碳汇功能分布格局与 2009 年一致(表 4)。

表 4 2014 年研究区域土地利用碳源与碳汇分布

单位:万 t

地区	行政单元	碳源			碳汇			
		耕地	建设用地	总计	林地	草地	水域	总计
东部	北京	10.19	1 900.79	1 910.98	43.06	0.18	1.99	45.23
	天津	20.26	4 147.4	4 167.66	3.22	0.02	6.91	10.15
	河北	302.79	29 474.45	29 777.2	268.96	5.85	21.75	296.56
	辽宁	230.80	15 866.75	16 097.6	328.08	2.28	24.30	354.66
	山东	8.72	5 092.100	5 100.82	2.76	0.00	6.63	9.39
	上海	211.93	20 099.26	18 311.20	15.07	0.08	76.38	91.53
	江苏	91.58	9 677.61	9 769.19	330.10	0.20	21.07	351.37
	浙江	61.92	6 097.87	6 159.79	487.02	0.50	13.99	501.51
	福建	353.07	32 943.03	33 296.10	87.28	0.94	41.18	129.40
	广东	121.54	12 458.16	12 579.70	586.34	0.69	38.84	625.87
中部	海南	33.62	1 698.81	1 732.43	70.08	0.09	7.22	77.39
	吉林	324.38	7 308.96	7 633.34	517.10	1.43	18.31	536.84
	黑龙江	734.80	10 128.16	10 862.96	1 274.40	4.28	55.19	1 333.80
	山西	187.96	56 575.80	13 151.44	283.70	8.62	7.37	299.69
	安徽	272.06	12 879.38	56 763.76	219.24	0.16	46.39	265.79
	江西	142.95	5 909.36	6 052.31	604.1	0.60	32.00	636.70
	河南	376.11	19 790.12	20 166.23	202.99	1.38	26.10	230.47
	湖北	243.78	8 973.70	9 217.48	502.61	0.60	52.34	555.55
	湖南	192.23	8 389.39	8 581.62	713.78	1.01	38.57	753.36
	内蒙古	427.66	28 191.56	28 619.22	1 357	124.57	53.67	1 535.22
西部	陕西	185.08	14 821.22	15 006.30	653.82	6.04	7.86	667.72
	甘肃	249.16	5 035.06	5 284.22	356.21	29.97	19.01	405.19
	青海	27.14	1 729.25	1 756.39	206.84	88.86	71.64	367.34
	宁夏	59.57	6 492.67	6 552.24	44.88	4.43	4.49	53.80
	新疆	239.51	10 944.74	11 184.25	523.49	105.46	128.41	757.36
	广西	204.33	5 351.62	5 555.95	777.42	2.35	21.91	801.68
	重庆	113.73	4 050.99	4 164.72	220.76	0.69	6.79	228.24
	四川	312.00	11 487.80	11 799.80	1 294.10	25.79	26.20	1 346.05
	贵州	210.35	10 848.65	11 059.00	522.30	3.37	6.30	531.97
	云南	287.60	7 826.58	8 114.18	1 344.50	6.35	17.81	1 368.66

2.2.3 2021 年三大分区间及分区内部碳源、碳汇变化

碳源方面,从区域间层面看,东中西部地区耕地碳排放量分别为 1 249.27 万 t、2 443.65 万 t、2 210.51 万 t,表现为中部地区>西部地区>东部地区。建设用地碳排放量分别为 136 579.80 万 t、131 423.83 万 t、118 738.07 万 t,表现为东部地区>中部地区>西部地区。从区域内层面看,东中西部地区耕地直接碳源主体分布与 2009、2014 年一致(表 5)。

表 5 2021 年研究区域土地利用碳源与碳汇分布

单位:万 t

地区	行政单元	碳源			碳汇			
		耕地	建设用地	总计	林地	草地	水域	总计
东部	北京	4.33	1 214.31	1 218.64	56.5	0.03	1.57	58.10
	天津	15.27	3 414.09	3 429.36	8.66	0.03	6.03	14.72
	河北	279.57	27 186.23	27 465.8	375.18	4.11	14.52	393.81
	辽宁	240.09	15 604.95	15 845.00	351.26	1.03	17.58	369.87
	山东	7.50	4 938.06	4 945.56	4.78	0.03	4.86	9.67
	上海	189.48	20 078.20	20 267.70	45.95	0.20	63.65	109.80
	江苏	59.79	9 354.56	9 414.35	355.81	0.13	17.86	373.80
	浙江	43.18	6 641.02	6 314.20	514.50	0.16	9.49	524.15
	福建	299.38	34 010.26	34 309.60	152.13	0.50	33.70	186.33
	广东	88.12	13 248.66	13 336.80	630.18	0.50	34.13	664.81
	海南	22.56	889.46	912.02	68.56	0.04	4.66	73.26
中部	吉林	347.41	5 918.18	6 265.59	511.45	1.42	15.21	528.08
	黑龙江	796.67	10 494.94	11 291.61	1 262.60	2.50	42.88	1 308.00
	山西	179.28	61 957.32	62 136.60	355.93	6.55	4.40	366.88
	安徽	256.99	13 177.58	13 434.57	238.90	0.10	43.95	282.95
	江西	126.09	6 111.66	6 237.75	608.06	0.19	32.79	641.04
	河南	348.13	16 695.63	17 043.76	256.70	0.54	21.63	278.87
	湖北	220.93	9 207.89	9 428.82	541.87	0.19	50.44	592.50
	湖南	168.14	7 860.62	8 028.76	742.56	0.30	32.00	774.86
西部	内蒙古	532.64	35 500.38	36 033.02	1 422.4	114.33	27.00	1 563.72
	陕西	135.95	18 077.11	18 213.06	728.48	4.66	6.95	740.09
	甘肃	241.36	4 850.94	5 092.30	464.95	30.20	10.41	505.56
	青海	26.14	1 269.11	1 295.25	268.81	83.30	62.21	414.32
	宁夏	55.39	7 682.69	7 738.08	55.62	4.29	4.29	64.20
	新疆	326.10	12 962.30	13 288.40	713.09	109.72	134.98	957.79
	广西	153.24	6 068.91	6 222.15	939.81	0.58	19.05	959.44
	重庆	86.65	4 039.92	4 126.57	273.79	0.05	6.91	280.75
	四川	242.18	8 481.55	8 723.73	1 484.3	20.45	26.78	1 531.49
	贵州	160.89	9 700.80	9 861.69	654.56	0.40	6.49	661.45
	云南	249.98	7 104.35	7 354.33	1 458.00	2.79	15.47	1 476.21

碳汇方面,从区域间层面看,东中西部林地、草地、水域碳吸收总量分别为 2 778.31 万 t、4 773.15 万 t、9 155.02 万 t,其中林地碳排放量分别为 2 563.50 万 t、4 518.06 万 t、8 463.73 万 t,两者均表现为西部地区>中部地区>东部地区。从区域内层面看,东中西部地区林地、草地、水域碳汇功能分布格局与 2009 年、2014 年一致(表 5)。

2.2.4 碳源、碳汇热点区域分析

2021 年总碳源热点分布区域包括京津冀、辽宁、山东、内蒙古、山西(置信度为 99%)和陕西、甘肃(置信度为 95%),以及江苏(置信度为 90%),其余区域均不显著;总碳汇热点分布区域包括云南(置信度为 99%)、四川(置信度为 90%),其余区域均不显著。碳源热点区域大部分与黄河中下游城市群相吻合,这可

能与产业结构分布有关:黄河中游的内蒙古与陕西为传统能源集中分布区,能源消耗直接带动以建设用地碳排放为主的碳源增加,黄河下游的京津冀与辽宁、山东为传统的环渤海城市带,产业结构分布相似,重型制造业体系较完善,这与长三角和珠三角偏向于轻制造业与服务业的产业结构不同,因而碳源热点分布区并未涵盖长三角和珠三角。碳汇热点区域包括四川和云南,这与其独特的地形地貌特征有关,一、二级阶梯交界处天然的地理位置优势为其带来了丰富的空间生态资源,碳吸收效应明显。

2.3 地理探测器分析

基于相关研究成果^[3],同时考虑到经济发展会增强区域的产业和人口集聚效应,带动区域常住人口增加,进而导致生产、生活碳排放增加;而区域经济发展将土地尤其是建设用地的扩张作为空间载体,即经济发展要求建设用地发生扩张,扩张后的建设用地空间资源承载力明显增强,附带的碳排放效应更为明显;而耕地作为部分直接碳排放源,在经济发展与人口增加过程中,其与建设用地的转换变化也会导致碳排放发生变化。基于此,本研究将建设用地面积、耕地面积、总人口、GDP 作为土地利用碳排放量的影响因素进行分析,经 ArcGIS 与 GeoDetector 运行,得出最终的 2009、2014、2021 年土地利用碳排放量影响力探测结果(表 6)。

地理探测器分析结果表明,建设用地规模扩张、人口规模增加以及经济发展水平提升成为土地利用碳排放量的重要影响因素,研究期内其影响程度表现为不断增加的变化趋势;农业生产尤其是耕作农业发展也是碳排放的来源,但其影响程度呈现一定下降的发展形势。

表 6 2009—2021 年全国土地利用碳排放量影响力探测结果

因子	2009 年		2014 年		2021 年	
	影响力 q 值	排名	影响力 q 值	排名	影响力 q 值	排名
建设用地面积	0.479	2	0.569	3	0.710	2
耕地面积	0.650	1	0.570	2	0.548	4
总人口	0.427	4	0.664	1	0.726	1
GDP	0.453	3	0.550	4	0.649	3

3 结论与讨论

3.1 结论

1)从碳源、碳汇角度来看,耕地碳排放量表现为中部地区>西部地区>东部地区,建设用地碳排放量表现为东部地区>中部地区>西部地区;林地、草地、水域碳吸收总量与林地碳吸收量均表现为西部地区>中部地区>东部地区。

2)从碳源与碳汇热点空间分布来看,总碳源热点分布区域涵盖东部地区的京津冀、辽宁、山东、江苏与中部地区的山西,以及西部地区的内蒙古、陕西、甘肃;总碳汇热点分布区主要为四川和云南,其置信度均在 90%以上。

3)从土地利用碳排放量影响因素来看,建设用地规模扩张、人口规模增加以及经济发展水平提升成为土地利用碳排放量的重要影响因素,研究期内其影响程度表现为不断增加的变化趋势;农业生产尤其是耕作农业发展也是碳排放的来源,但其影响程度呈现一定下降的发展形势。

3.2 讨论

基于上述分析,从碳源、碳汇角度来看,未来东中部地区应侧重于实现产业生态化:东部地区经济发展基础雄厚,具有极强的人口、产业集聚力,过度饱和的发展状态要求其需要以产业生态化为目标调整已有产业结构,以生态化方向为倒逼准则,消解积累的碳排放效应;中部地区“制造业基地”“能源基地”的发展定位,更需要抓稳产业生态化朝向。西部地区应侧重于实现生态产业化,因其自然本底环境相对脆弱而又干扰较少,因而该区应立足于自身具有不可替代的优势地位的空间生态资源,实现空间生态资源价值化。

参考文献:

- [1] 文琦, 万媛媛, 陆冰洁, 等. 中国能源地理学研究进展及展望[J]. 经济地理, 2022, 42(11): 95-102, 132.
- [2] 魏心雨, 王雁杰, 孙梦媛, 等. 基于土地利用结构变化的河南省碳排放时空格局及驱动力分析[J]. 农业现代化研究, 2023, 44(5): 881-891.
- [3] 李志英, 朱晓珊, 杨丽, 等. 云南省土地利用碳排放时空演变特征及影响因素[J]. 水土保持通报, 2023, 43(5): 297-303, 311.
- [4] 吴长兰, 王东, 苏彦涛. 广东省市域碳排放时空分异特征及影响因素——基于 EDGAR 数据的分析[J]. 地域研究与开发, 2020, 39(1): 127-132, 151.
- [5] 李彦旻, 沈育生, 王世航. 基于土地利用变化的安徽省陆地碳排放时空特征及效应[J]. 水土保持学报, 2022, 36(1): 182-188.
- [6] 李缘缘, 魏伟, 周俊菊, 等. 中国土地利用碳排放变化及协调分区[J]. 环境科学, 2023, 44(3): 1267-1276.
- [7] 孙雷刚, 刘剑锋, 徐全洪, 等. 环京津区域城市碳排放效应及时空格局分析[J]. 地理与地理信息科学, 2016, 32(4): 113-118.
- [8] 苑韶峰, 唐奕钰. 低碳视角下长江经济带土地利用碳排放的空间分异[J]. 经济地理, 2019, 39(2): 190-198.
- [9] 张杰, 陈海, 刘迪, 等. 基于县域尺度土地利用碳排放的时空分异及影响因素研究[J]. 西北大学学报(自然科学版), 2022, 52(1): 21-31.
- [10] 侯建坤, 陈建军, 张凯琪, 等. 基于 InVEST 和 GeoSoS-FLUS 模型的黄河源区碳储量时空变化特征及其对未来不同情景模式的响应[J]. 环境科学, 2022, 43(11): 5253-5262.
- [11] 李键, 毛德华, 蒋子良, 等. 长株潭城市群土地利用碳排放因素分解及脱钩效应研究[J]. 生态经济, 2019, 35(8): 28-34, 66.
- [12] 韩方红, 高凡, 何兵, 等. 1990~2020 年阿克苏河流域土地利用碳排放时空轨迹与影响因素[J]. 环境科学, 2024, 45(6): 3297-3307.
- [13] 李玉玲, 李世平, 祁静静. 陕西省土地利用碳排放影响因素及脱钩效应分析[J]. 水土保持研究, 2018, 25(1): 382-390.
- [14] 邝嫦娥, 李文意, 黄小丝. 长江中游城市群碳排放强度与经济高质量发展耦合协调的时空演变及驱动因素[J]. 经济地理, 2022, 42(8): 30-40.
- [15] 方精云, 黄耀, 朱江玲, 等. 森林生态系统碳收支及其影响机制[J]. 中国基础科学, 2015, 17(3): 20-25.
- [16] PIAO S L, HE Y, WANG X H, et al. Estimation of China's terrestrial ecosystem carbon sink: Methods, progress and prospects[J]. Science China Earth Sciences, 2022, 65(4): 641-651.
- [17] SHEN X Z, HUANG L, ZHU J, et al. Relationship between land use carbon emission and economic growth based on GIS[J]. Arabian Journal of Geosciences, 2021, 14:457.
- [18] 李竹, 王兆峰, 吴卫, 等. 碳中和目标下中国省域碳平衡能力与城镇化的关系[J]. 自然资源学报, 2022, 37(12): 3136-3152.
- [19] WANG K, LI X B, LYU X, et al. Optimizing the land use and land cover pattern to increase its contribution to carbon neutrality[J]. Remote Sensing, 2022, 14(19): 4751.
- [20] 李云燕, 张硕. 中国城市碳排放强度时空演变与影响因素的时空异质性[J]. 中国环境科学, 2023, 43(6): 3244-3254.
- [21] 张娜, 孙芳城, 胡钰苓, 等. 长江经济带三大城市群土地利用碳排放的区域差异及空间收敛性[J]. 环境科学, 2024, 45(8): 4656-4669.
- [22] 郭安宁, 牛陆, 刘需珈, 等. 黄河流域城市群土地利用的碳排放效应[J]. 经济地理, 2023, 43(9): 172-178, 240.
- [23] 赵先超, 田一豆, 张潇湘. 长株潭城市群土地利用碳排放与生态系统服务价值时空关系分析[J]. 水土保持学报, 2023, 37(5): 215-225.
- [24] 杨扬, 周浩, 文高辉, 等. 1980—2020 年洞庭湖流域土地利用变化及其碳效应[J]. 水土保持通报, 2023, 43(3): 390-397.
- [25] 武爱彬, 赵艳霞, 郭小平, 等. 碳中和目标下河北省土地利用碳排放格局演变与多情景模拟[J]. 农业工程学报, 2023, 39(14): 261-270, 293.
- [26] 李效顺, 李志鑫, 谢晓彤, 等. 河南省城镇化、碳排放与“三生”空间交互机制分析[J]. 农业工程学报, 2023, 39(11): 256-265.
- [27] 胡冉再琪, 孔雪松, 文高辉, 等. 武汉城市圈“三生”功能与土地利用碳排放耦合测度及协同分区[J]. 中国农业资源与区划, 2024, 45(5): 209-221.
- [28] 王静, 李抒芮. 基于土地利用格局的城市碳效应及空间分布特征[J]. 统计与决策, 2023, 39(11): 72-77.
- [29] 方林, 李灿锋, 李浩杰, 等. 长江经济带土地利用碳排放时空效应及驱动力[J]. 草业科学, 2022, 39(12): 2539-2553.