

黄河流域土地利用碳排放的时空 演变及影响因素研究

马远 刘真真¹

(新疆财经大学, 新疆 乌鲁木齐 830012)

【摘要】: 黄河流域各省份碳减排压力仍然较大, 研究黄河流域土地利用碳排放对黄河流域生态保护和高质量发展具有重要意义。根据黄河流域各省份 2000—2017 年的土地利用、能源消费以及相关经济统计数据, 分析了黄河流域土地利用碳排放的时空格局演变以及影响因素, 结果表明: 黄河流域净碳排放总量在不断增加, 但增速在不断下降; 土地利用碳吸收量和建设用地碳排放量呈现增加趋势; 单位 GDP 碳排放强度不断下降而人均碳排放强度在增加; 黄河流域净碳排放呈现空间正自相关, 空间分布上呈现东南—西北的格局; 影响黄河流域碳排放的主要因素为土地利用、产业结构和能源结构, 各影响因素在不同时间、不同地区对碳排放的影响程度均不相同。

【关键词】: 土地利用 碳排放 时空演变 影响因素 黄河流域

【中图分类号】: F062.2 **【文献标识码】:** A **【文章编号】:** 1671-4407(2021)07-035-09

随着极端天气以及自然灾害频发, 全球变暖问题受到全世界的广泛关注, 中国作为一个负责任的大国, 肩负着节能减排的重任, 并承诺“到 2030 年中国单位 GDP 碳排放量要比 2005 年下降 60%~65%”。黄河流域近年来经济发展速度较快, 经济实力显著提升, 对中国未来经济发展将起到重要支撑作用。黄河流域是我国重要的生态功能区域, 也是华北地区的生态屏障, 因此, 黄河流域的生态保护对我国生态安全具有重要意义。2019 年 9 月 18 日, 习近平总书记在郑州主持召开黄河流域生态保护和高质量发展座谈会并发表重要讲话, 黄河流域生态保护和高质量发展上升为国家重大战略。节能减排是实现高质量发展的重要一环, 加之黄河流域又是我国粮食主产区, 其土地利用变化也是引起碳排放变化的重要因素, 因此平衡土地利用和经济发展的关系, 增强陆地碳吸收能力可以减轻我国碳排放的压力。黄河流域覆盖 9 个省份, 受制于各省份能源结构、产业结构的影响, 黄河流域各省份面临的减排压力较大, 各省份经济发展又给生态环境带来巨大的压力, 如黄河流域生态屏障被破坏, 碳排放量持续走高。因此, 科学认识黄河流域不同省份土地利用碳排放的时空差异及影响因素, 对黄河流域生态保护和高质量发展意义重大。

关于土地利用碳排放的研究, 国内学者对各类土地利用方式的碳源和碳汇能力进行了估计^[1-3], 研究涵盖了不同的土地利用方式^[4-5]。现有文献运用 ESDA、时间序列分析等方法对不同地区范围碳排放的时间、空间差异进行研究, 研究范围包括中国 30 个省份、浙江湾区经济带、新疆 14 个地州市、京津冀等^[6-9]。对碳排放影响因素的研究主要包括经济发展水平、城市化率、能源消费结构、人口数量、产业结构等, 用到的研究方法有 LMDI 分解方法、面板数据回归分析、投入产出分析、STIRPAT 模型、GWR、GTWR 分析等^[8,10-15]。考虑到碳排放的时空差异, 近年来学者开始利用空间计量分析方法研究碳排放及其影响因素^[8,15]。

黄河流域被认为是未来中国经济发展和生态环境安全的重要支撑区域, 同时也是中国重要粮食生产基地。未来如何推动黄河流域实现节能减排, 保护生态环境是我们需要思考的问题。本文选取黄河流域 9 个省份作为研究对象, 根据其 2000—2017 年

作者简介: 马远, 博士, 教授, 博士研究生导师, 研究方向为区域经济。E-mail:mayuanzhulei@163.com
基金项目: 国家社会科学基金项目“和谐共融目标下新疆城乡经济社会一体化问题研究”(15BJL109)

土地利用以及能源消耗数据计算各省份的碳排放量，分析各省份土地利用碳排放量时空演变趋势，并在此基础上运用面板回归分析研究各影响因素对黄河流域碳排放的影响，同时运用时空地理加权 (GTWR) 方法对各影响因素的时空差异进行分析，以期为政府制定差异化的减排政策以及土地利用规划提供支持。

1 研究区域及数据来源

研究区域选择黄河流域 7 个省和 2 个自治区，总面积为 35930.3 万公顷，2018 年年末总人口达 4.2 亿。本研究中土地利用数据来自 2001—2019 年的《中国统计年鉴》、2005—2018 年的《中国国土资源统计年鉴》、国家统计局官网；能源使用数据来自 2004—2018 年的《中国能源统计年鉴》；GDP、人口数据均来自 2001—2019 年的《中国统计年鉴》；货物进出口总额、财政预算支出数据来自黄河流域各省统计年鉴；研发投入 (R&D) 数据来自 CEIC 数据库。

2 研究方法

2.1 碳排放量计算方法

土地利用碳排放 (以下统称为净碳排放) 可以分为直接碳排放和间接碳排放，直接碳排放是指耕地、园地、草地、林地等土地利用方式带来的碳排放 (以下统称为土地利用碳排放)，间接碳排放主要是指建设用地中由于人类活动所引起的碳排放 (以下统称为能源消费碳排放)。

2.1.1 土地利用碳排放计算方法

参考以往研究，耕地、园地、林地和草地的碳排放采用直接碳排放系数法进行计算，计算公式为：

$$E = \sum T_i \times \delta_i \tag{1}$$

式中： i 为土地利用类型，共 4 种； E 表示土地利用碳排放量 (吨)； T_i 表示各种土地利用方式的面积 (公顷)； δ_i 表示各种土地利用类型的碳排放系数，参考相关学者的研究，本文耕地、林地、园地、草地的碳排放系数取值分别为 0.497 吨/公顷、-0.581 吨/公顷、-0.73 吨/公顷和 -0.021 吨/公顷，其中负值代表碳吸收，正值代表碳排放。

2.1.2 能源消费碳排放计算方法

建设用地碳排放是通过各种能源消费量 (万吨标准煤) 与能源碳排放系数相乘，求和就得出各省建设用地碳排放的间接测算值，计算公式为：

$$E = \sum E_i \times b_i \times \theta_i \tag{2}$$

式中： E_i 表示各种能源的消费量，本文主要选取煤炭、焦炭、原油、汽油、煤油、柴油、燃料油、天然气、电力十种主要能源； b_i 表示各种能源的标准煤折算系数， θ_i 表示各种能源的碳排放系数。不同能源标准煤折算系数和碳排放系数如表 1 所示。

表 1 不同能源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
煤炭	0.7143 千克标准煤/千克	0.7559 千克/千克标准煤
焦炭	0.9714 千克标准煤/千克	0.855 千克/千克标准煤
原油	1.4826 千克标准煤/千克	0.59 千克/千克标准煤
汽油	1.4714 千克标准煤/千克	0.59 千克/千克标准煤
煤油	1.4714 千克标准煤/千克	0.57 千克/千克标准煤
柴油	1.4571 千克标准煤/千克	0.59 千克/千克标准煤
燃料油	1.4286 千克标准煤/千克	0.62 千克/千克标准煤
天然气	12.143 千克标准煤/立方米	0.4483 千克/千克标准煤
电力	0.1229 千克标准煤/千瓦时	0.2132 千克/千克标准煤

2.2 影响因素分析

2.2.1 面板回归分析

本文基于 STIRPAT 模型，引入人均 GDP、产业结构、技术投入、土地利用、政府干预、能源结构来解释净碳排放的波动，构建实证分析模型为：

$$\ln cc_{it} = \beta_0 + \beta_1 \ln pgdp_{it} + \beta_2 \ln ind_{it} + \beta_3 \ln rd_{it} + \beta_4 \ln s_{it} + \beta_5 \ln gov_{it} + \beta_6 \ln es_{it} + \mu_{it} \quad (3)$$

式中： β_0 为常数项， $\ln pgdp_{it}$ 、 $\ln ind_{it}$ 、 $\ln rd_{it}$ 、 $\ln s_{it}$ 、 $\ln gov_{it}$ 、 $\ln es_{it}$ 分别为人均 GDP、产业结构、技术投入、土地利用、政府干预、能源结构的实际值取自然对数， μ_{it} 为随机干扰项。各变量的含义如表 2 所示。

2.2.2 时空地理加权回归模型

表 2 各变量的含义

变量	变量含义	单位
碳排放量 cc	土地利用净碳排放量	万吨
经济发展水平 pgdp	人均 GDP	元
产业结构 ind	第二产业增加值占 GDP 的比重	%
研发投入 rd	研发投入	万元

土地利用 s	建设用地面积占比	%
政府干预 gov	财政支出占 GDP 的比重	%
能源结构 es	煤炭消费占能源消费的比重	%

考虑到影响因素的时空差异性，本文引入 GTWR 模型进行分析，GTWR 采用面板数据进行分析，能够弥补 GWR 分析中受制于样本量限制的缺陷导致的非平稳性问题，具体模型为：

$$Y_i = \beta_0(u_i, v_i, t_i) + \sum_k \beta_k(u_i, v_i, t_i) X_{ik} + \varepsilon_i \quad (4)$$

式中： Y_i 为被解释变量， X_{ik} 为解释变量， i 代表第 i 个点， k 表示第 k 个解释变量， β_0 、 β_k 分别为常数项和解释变量的系数， (u_i, v_i, t_i) 为第 i 个点的时空坐标， ε_i 为随机扰动项。

3 土地利用碳排放时空演变特征

3.1 时间演变特征

3.1.1 区域碳排放总体分析

根据黄河流域 9 省份 2000—2017 年土地利用和能源消费相关数据，按照公式 (1)、(2) 计算得出 2000—2017 年的碳排放情况。从表 3 的数据可以看出，黄河流域的净碳排放量为正值，表现为碳源，其中建设用地区为主要碳源区。在土地利用方面，耕地为主要的碳源区，林地为主要的碳汇区。但是与碳排放量相比，各种植被的碳吸收量比较有限，减排工作仍然严峻。从图 1 可以看出，2000—2017 年，碳汇占碳源的比重急剧下降，这主要是由于建设用地碳排放量迅速上升所致。黄河流域净碳排放总量从 2000 年的 32070.32 万吨增加到 2017 年的 141245.07 万吨，涨幅高达 440.42%，这与区域经济快速发展、工业化、城镇化率提高有着密切的联系。通过对数据的进一步计算发现，虽然 2000—2017 年黄河流域净碳排放总量呈上升趋势，但是净碳排放增长率呈波动下降趋势，净碳排放量增长率 2004 年达到最大值 30%，这与当时经济结构不合理以及经济发展过度依赖能源有较大的关系。2013 年以来，黄河流域净碳排放增长率维持在 3% 左右，说明我国经济由高速增长阶段转向高质量发展阶段，经济结构、产业结构合理化程度逐步提升，能源强度不断降低，这也是 2013 年以来净碳排放增长率下降的主要原因。

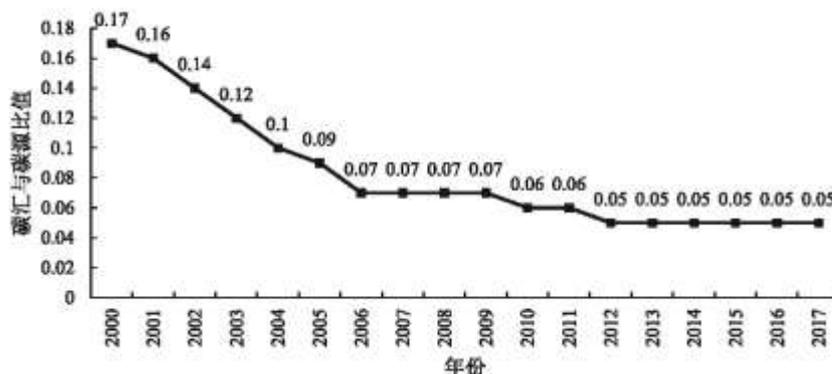


图 1 2000—2017 年碳汇与碳源的比值

3.1.2 土地利用碳排放分析

根据公式(1)可计算得到 2000—2017 年黄河流域各省耕地、园地、林地以及草地的碳排放量，并计算黄河流域各省土地利用碳排放总量及平均值。同时将 2000—2017 年土地利用碳排放总量数据作为因变量，年份作为自变量对其线性趋势进行分析，结果如表 4 所示。

从表 4 可以看出，总体上，黄河流域土地利用中耕地表现为碳排放，林地则表现出明显的碳吸收，除山东、河南外，其余省份的林地、草地、园地碳吸收量均大于耕地的碳排放量。从各省份土地利用(除建设用地)碳排放的线性变化趋势来看，黄河流域土地利用碳排放随着年份变化呈现下降趋势，变化速率为 24.74 万吨/年，这表明黄河流域土地利用(除建设用地)表现为碳吸收，且每年土地利用碳吸收量的增加规模为 24.74 万吨，这反映出黄河流域土地利用碳吸收能力逐渐提高。但是与全国土地利用碳吸收平均每年增加 114.19 万吨^[10]相比仍有较大差距，未来土地利用碳吸收可以作为黄河流域降低碳排放的重要内容，也是缓解工业碳减排压力的一个重要补充。

表 3 2000—2017 年黄河流域各省份碳排放

年份	林地/万吨	园地/万吨	草地/万吨	耕地/万吨	建设用地/万吨	碳汇/万吨	碳源/万吨	净碳排放/万吨
2000	-6153.12	-235.55	-293.67	2161.80	36590.87	6682.35	38752.67	32070.32
2001	-6153.12	-236.93	-293.22	2128.45	40056.72	6683.27	42185.16	35501.90
2002	-6153.12	-238.34	-292.76	2137.93	45492.56	6684.23	47630.49	40946.26
2003	-6153.12	-239.80	-292.31	2058.40	54052.19	6685.23	56110.59	49425.36
2004	-6167.70	-244.71	-291.85	2065.33	63567.20	6704.26	65632.52	58928.26
2005	-6164.05	-244.89	-290.88	2068.87	74658.52	6699.82	76727.39	70027.57
2006	-6160.40	-246.33	-290.61	2137.09	90028.15	6697.33	92165.24	85467.91
2007	-6156.76	-245.35	-290.51	2065.46	94331.60	6692.62	96397.06	89704.44
2008	-6153.12	-244.72	-290.46	2098.53	99524.82	6688.30	101623.35	94935.05
2009	-6736.29	-247.34	-233.41	2341.96	104052.52	7217.04	106394.48	99177.44
2010	-6737.24	-245.14	-233.34	2339.39	114061.63	7215.73	116401.03	109185.30
2011	-6736.58	-244.05	-233.26	2338.36	127067.88	7213.90	129406.24	122192.34
2012	-6736.72	-242.43	-233.20	2336.69	132139.38	7212.35	134476.06	127263.72
2013	-6737.63	-240.92	-233.13	2336.40	132163.34	7211.68	134499.74	127288.06
2014	-6735.20	-239.59	-233.07	2336.53	136100.96	7207.86	138437.49	131229.63
2015	-6737.78	-238.77	-233.00	2335.59	137484.79	7209.55	139820.38	132610.83
2016	-6732.74	-237.85	-232.90	2336.18	139720.94	7203.49	142057.12	134853.63

2017	-6732.74	-236.88	-232.84	2335.62	146111.92	7202.47	148447.54	141245.07
------	----------	---------	---------	---------	-----------	---------	-----------	-----------

从各省份的情况来看，除山东、河南土地利用碳排放为正值外，其余省份的土地利用均表现为碳吸收。从土地利用碳排放的线性变化趋势来看，土地利用碳排放为正值的山东和河南，其土地利用碳排放随时间变化表现出递减趋势，减少速率分别为2.97万吨/年、2.61万吨/年。土地利用碳排放为负值的内蒙古，其碳排放总量随年份变化呈现增加趋势，增加速率为11.99万吨/年。内蒙古是中国重要的森林和草原分布区，但是2000—2017年内蒙古的耕地面积大幅度增加，从2000年的732万公顷增加到2017年的927万公顷；林地面积下降幅度较小，由2000年的4410万公顷减少为2017年的4398万公顷；草地退化现象较为严峻，从2000年的6622万公顷下降到2017年的4950万公顷；园地面积也从2000年的7.33万公顷减少为2017年的5.64万公顷。通过分析发现，耕地利用面积增加，园地、林地、草地面积减少共同导致内蒙古土地利用碳吸收量的下降。四川省土地利用碳排放线性变化趋势不显著，其余省份的碳吸收量随着时间变化均表现为增加趋势。

3.1.3 能源消费碳排放分析

基于上文能源消费碳排放计算公式，得到黄河流域各省份能源消耗碳排放量，以此作为黄河流域各省份建设用地碳排放量的间接测量值，将黄河流域各省份2000—2017年能源消耗碳排放量作为因变量，将年份作为自变量进行回归，计算各省份能源消耗碳排放量的线性变化趋势，结果如表5所示。

表4 2000—2017年黄河流域土地利用碳排放均值及变化趋势

省份	2000—2017 碳排放量平均值/万吨					线性变化趋势及显著性		
	耕地	林地	草地	园地	碳排放总量	变化速率/(万吨/年)	R ²	P
山西	201.37	-423.30	-0.72	-25.50	-248.15	-4.39	0.78	0.000
内蒙古	406.47	-2558.06	-121.42	-4.74	-2277.75	11.99	0.76	0.000
山东	361.33	-179.73	-0.05	-64.01	117.54	2.97	0.73	0.000
河南	379.66	-279.82	-0.02	-19.83	80.00	2.61	0.78	0.000
四川	319.09	-1335.03	-25.92	-52.77	-1094.63	-0.60	0.16	0.100
陕西	208.60	-668.70	-5.59	-54.60	-520.29	-10.63	0.78	0.000
甘肃	253.32	-519.56	-19.49	-16.58	-302.31	-11.49	0.78	0.000
青海	28.92	-396.40	-85.26	-0.50	-453.23	-12.34	0.76	0.000
宁夏	61.17	-85.93	-4.00	-3.11	-31.88	-2.85	0.82	0.000
总计	2219.92	-6446.52	-262.47	-241.64	-4730.72	-24.74	0.78	0.000

表5 黄河流域各省份能源消耗碳排放量及其变化趋势

省份	2000—2017年能源消耗碳排放量/亿吨					线性变化趋势及显著性		
	2000	2006	2012	2017	平均值	变化速率/(亿吨/年)	R ²	P
山西	0.97	1.80	2.20	2.60	1.82	0.08	0.95	0.000
内蒙古	0.37	1.44	2.23	2.31	1.45	0.13	0.94	0.000
山东	0.75	2.34	3.44	4.15	2.59	0.20	0.97	0.000
河南	0.60	1.37	1.79	1.68	1.39	0.07	0.79	0.000
四川	0.37	0.72	1.03	0.95	0.80	0.04	0.86	0.000
陕西	0.24	0.63	1.24	1.44	0.85	0.08	0.98	0.000
甘肃	0.25	0.40	0.59	0.58	0.45	0.02	0.92	0.000
青海	0.04	0.09	0.16	0.17	0.11	0.01	0.94	0.000
宁夏	0.07	0.23	0.53	0.73	0.36	0.04	0.96	0.000
合计	3.66	9.00	13.21	14.61	9.82	0.69	0.97	0.000

由表 5 可知,总的来看,与土地利用碳排放相比,能源消耗碳排放量均较大。整体来看,黄河流域能源消耗碳排放量从 2000 年的 3.66 亿吨增加至 2017 年的 14.61 亿吨,增加超过 4 倍,说明黄河流域近年来的发展对能源的消耗量较大。从线性变化趋势结果来看,黄河流域总体碳排放量呈增加趋势,且未来仍将进一步增加,其线性增加速率为 0.69 亿吨/年(P=0.000)。

从省域层面来看,黄河流域能源消耗碳排放量较高的省份为山东、内蒙古、山西和河南,2000—2017 年能源消耗碳排放量分别增加 1.88 倍、3.92 倍、3.45 倍和 2.31 倍。黄河流域碳排放量较低的省份为宁夏、甘肃和青海,2000—2017 年能源消耗碳排放量分别增加 10.42、2.32 和 4.25 倍。对比来看,黄河流域能源消费碳排放量较高的省份主要为中部地区,经济发展水平相对较高,而能源消费碳排放量较低的省份为西部省份,经济发展比较落后。但从 2000—2017 年碳排放量增加值来看,山东、内蒙古、山西和河南的增速慢于宁夏、甘肃和青海的增速,说明碳排放拐点可能先在山西、内蒙古、山东和河南出现。从线性变化趋势的结果来看,黄河流域各省的能源碳排放量均呈现上升趋势,未来这一趋势仍将持续,这是因为能源碳排放具有较大的经济发展惯性,短期内很难达到经济发展与能源减排的双赢,但能够尽量控制能源消耗碳排放量的增加速率,最终实现减排目标。

3.1.4 净碳排放分析

根据土地利用碳排放量数据以及能源消耗碳排放量数据计算得到黄河流域各省份 2000—2017 年净土地利用碳排放量数据,结果如表 6 所示。2000—2017 年,黄河流域各省份净碳排放量均为正值,结合表 4 和表 5 可知,2000—2017 年,园地、林地和草地能够吸收耕地的碳排放,并且有一定的剩余,均值为 0.47 亿吨,但同期能源消耗碳排放量的均值为 9.82 亿吨,碳吸收量仅占能源消耗碳排放量的 4.8%。由此可见,即使 2000—2017 年黄河流域土地利用碳吸收量处于增加趋势,但这个规模与能源消耗碳排放量的增加相比较小,这并不意味着土地利用碳吸收不重要,只是单纯利用土地碳吸收难以弥补能源消耗碳排放量,土地利用碳吸收仅能作为减少碳排放量的补充措施,主要措施还是应该从技术创新减排、转变能源消费结构以及优化产业结构等方面着手。但是,由于土地利用碳吸收见效快、可操作性强,也是当前碳减排过程中的一项重要补充措施。

表 6 黄河流域各省份净土地利用碳排放量及其变化趋势

省份	2000—2017 年净土地利用碳排放量/亿吨					线性变化趋势及显著性		
	2000 年	2006 年	2012 年	2017 年	平均值	变化速率/(亿吨/年)	R ²	P
山西	0.95	1.77	2.17	2.57	1.80	0.08	0.94	0.000
内蒙古	0.14	1.20	2.01	2.09	1.22	0.13	0.94	0.000
山东	0.76	2.35	3.45	4.16	2.60	0.21	0.97	0.000
河南	0.61	1.38	1.80	1.69	1.40	0.07	0.79	0.000
四川	0.26	0.61	0.92	0.84	0.69	0.04	0.86	0.000
陕西	0.19	0.58	1.18	1.38	0.79	0.08	0.98	0.000
甘肃	0.23	0.37	0.55	0.54	0.42	0.02	0.92	0.000
青海	0.003	0.05	0.11	0.12	0.07	0.008	0.93	0.000
宁夏	0.07	0.23	0.53	0.72	0.35	0.04	0.96	0.000
合计	3.21	8.55	12.73	14.12	9.34	0.69	0.97	0.000

从黄河流域整体上来看，净碳排放量由 2000 年的 3.21 亿吨增加至 2017 年的 14.12 亿吨，增加 4.40 倍，并且呈显著的线性增加趋势，增加速率为 0.69 亿吨/年(P=0.000)。从各省情况来看，净碳排放量较高的省份仍然是山西、内蒙古、山东和河南，2000—2017 年净土地利用碳排放量分别增加 2.71 倍、14.93 倍和 2.77 倍，可以看出内蒙古的净碳排放量增加最多，一方面由于经济发展所导致的能源消耗碳排放量增加，同时与林地、园地面积减少导致土地利用碳吸收量减少明显有关。净碳排放量增加较少的省份仍然为甘肃、宁夏和青海，其净碳排放量分别增加 2.34 倍、10.29 倍和 2.4 倍，并且所有省份净碳排放量的变化速率均为正，表明未来黄河流域各省净碳排放量仍将增加，未来降低碳排放量仍然面临较大阻力，减排形势仍然比较严峻。

3.1.5 碳排放强度分析

上述分析中的碳源、碳汇及土地利用碳排放量均为绝对量指标，为进一步对比黄河流域各省份碳排放量情况，通过计算各省份碳排放强度进行分析。本文从单位 GDP 碳排放量和人均碳排放量两方面计算碳排放强度，其中 GDP 数值调整为以 2000 年为基期的实际值，通过净碳排放量除以 GDP 的实际值得到单位 GDP 碳排放强度，除以年末总人口得到人均碳排放强度，计算结果见表 7。

表 7 黄河流域各省份能源强度及变化趋势

省份	人均碳排放强度				单位 GDP 碳排放强度			
	平均值 (千克/人)	变化速率/ (千克/人·年)	R ²	P	平均值/ (千克/万元)	变化速率/ (千克/万元·年)	R ²	P

山西	5122.45	201.77	0.90	0.000	3774.25	-187.29	0.95	0.000
内蒙古	4943.64	522.82	0.93	0.000	1760.00	25.45	0.08	0.270
山东	2708.31	204.88	0.96	0.000	1033.49	-13.61	0.20	0.065
河南	1479.36	78.94	0.77	0.000	1062.79	-41.65	0.69	0.000
四川	844.33	52.62	0.8	0.000	643.19	-22.40	0.57	0.000
陕西	2115.27	209.47	0.98	0.000	1340.00	1.41	0.002	0.850
甘肃	1640.56	83.81	0.91	0.000	1639.37	-70.02	0.93	0.000
青海	1180.37	132.32	0.92	0.000	318.28	13.16	0.36	0.009
宁夏	5537.13	526.41	0.96	0.000	4040.00	51.88	0.22	0.050
平均值	2891.65	223.67	0.97	0.000	1734.60	-243.05	0.43	0.003

单位 GDP 碳排放强度反映地区经济发展中碳排放的多少，也从侧面反映出地区经济结构是否合理、科学技术水平是否先进。由表 7 可知，黄河流域各省份平均单位 GDP 碳排放强度为 1734.60 千克/万元，2000—2017 年单位 GDP 碳排放强度呈下降趋势，下降速率为每年 243.05 千克/万元，这表明黄河流域整体上碳排放的增加速率慢于 GDP 的增长率，反映出随着经济发展，黄河流域各省份经济结构逐渐合理、科技水平不断提升，未来单位 GDP 碳排放强度仍将保持下降趋势。从各省份单位 GDP 碳排放强度的数据来看，宁夏、山西的单位 GDP 碳排放量远高于其他省份，一方面是由于宁夏、山西经济发展相对较差，且能源消耗量较大。另一方面是由于山西煤炭资源丰富，对煤炭依赖程度较高，产业结构不合理导致耗能较高，而宁夏的经济发展水平在黄河流域各省份中最差，但其能源消耗量又较大，因此山西和宁夏的单位 GDP 碳排放量远高于其他省份。从各省份单位 GDP 碳排放量的变化速率来看，山西、山东、河南、四川和甘肃均表现为负值，表明这些省份的单位 GDP 碳排放量处于下降趋势，未来仍将保持这一趋势；而内蒙古、陕西和宁夏的单位 GDP 碳排放量变化速率为正值但不显著，表明不存在明显的上升或下降趋势。

黄河流域人均碳排放强度为 2891.65 千克/人，且 2000—2017 年呈现上升趋势，增加速率为每年 233.67 千克/人，黄河流域人均碳排放量未来一段时期内仍会继续增加。这是由于随着经济的发展，人们生活水平不断改善，对各种物质的需求量不断增加，使得人均碳排放水平不断增加。从各省份的数据来看，人均碳排放强度较高的省份为山西、内蒙古和宁夏，且所有省份的人均碳排放均表现为显著的线性增加趋势，所以未来减排任务仍然比较艰巨，应着力推动黄河流域各省份产业结构升级实现减排目标，助力黄河流域的高质量发展。

3.2 空间差异分析

3.2.1 总体演变特征分析

2000—2017 年黄河流域各省份净碳排放的 Moran' sI 值见表 8。由表 8 可知，2000—2017 年的 Moran' sI 指数均为正，说明土地利用碳排放表现出正自相关，即碳排放量高值区和高值区相邻，低值区和低值区相邻。从检验统计量的值可知，2003 年之后各年 Moran' sI 指数均通过检验 ($P < 0.05$)，总体上来看，黄河流域各省份土地利用碳排放表现为空间正自相关，且各省份土地利用碳排放之间的空间相关性呈现出增强趋势。Moran' sI 值 2003—2008 年迅速增加，是由于这一时期经济发展过度依赖高耗能产业，与能源消耗量迅速增加有关。全局自相关只揭示了黄河流域土地利用碳排放的全局特征，因此本文结合标准差椭圆分析黄河流域土地利用碳排放局部空间演化特征。

表 8 2000—2017 黄河流域各省份土地利用碳排放空间自相关 Moran' sI 值

年份	Moran' sI	Z 值	P 值	年份	Moran' sI	Z 值	P 值
2000	0.2184	1.9280	0.054	2009	0.2821	2.3742	0.018
2001	0.2316	2.0010	0.045	2010	0.2814	2.3873	0.017
2002	0.2083	1.9001	0.057	2011	0.2767	2.2300	0.021
2003	0.2125	1.9016	0.057	2012	0.2437	2.1389	0.032
2004	0.2857	2.2918	0.022	2013	0.2549	2.2011	0.028
2005	0.3101	2.4641	0.014	2014	0.2259	2.0591	0.039
2006	0.2912	2.3430	0.019	2015	0.2205	2.0805	0.037
2007	0.3124	2.5030	0.013	2016	0.2011	2.0284	0.043
2008	0.3010	2.4704	0.013	2017	0.2077	1.9975	0.045

3.2.2 局部演变特征分析

2000—2017 年黄河流域土地利用碳排放标准差椭圆参数计算结果见表 9，其空间分布总体覆盖范围包括山东、河南、山西、陕西、内蒙古、宁夏等地区，基本涵盖了黄河流域土地利用碳排放的主体地区。

表 9 2000—2017 年黄河流域净碳排放标准差椭圆参数

年份	2000	2009	2017
沿 X 轴的标准差/千米	660.64	687.53	659.31
沿 Y 轴的标准差/千米	508.51	505.78	400.96
椭圆的方向角度/度	66.68	62.33	76.34

椭圆的长半轴表示数据分布的方向，短半轴表示数据分布的区域。长轴值和短轴值之间的差异越大，数据的方向性越明显。从表 9 可以看出，2017 年相较于 2000 年方向性增强，转角从 2000 年的 66.68 度增加到 2017 年的 76.34 度，表明东南—西北格局增强。从 Y 轴标准差来看，2000—2017 年，Y 轴标准差从 508.51 千米缩小为 400.96 千米，表明黄河流域土地利用碳排在东南和西北方向上呈现极化现象。2000—2017 年，X 轴标准差从 660.64 千米减少为 659.31 千米，变化趋势不明显。因此，从分析结果来看，黄河流域净碳排在空间分布上呈现东南—西北的格局，且这一趋势在逐渐强化。

4 影响因素分析

4.1 面板回归分析

根据建立的实证模型将搜集的数据进行取自然对数处理，然后进行回归分析。对黄河流域净碳排放的影响因素进行分析，统计发现各变量的方差膨胀因子值最大为 3.7，均小于 10，因此选取变量间不存在多重共线性。因为面板数据在做普通 OLS 回归时应判断采用固定效应还是随机效应模型，根据 Hausman 检验结果判断应采用固定效应模型，具体回归分析结果见表 10。

表 10 回归分析结果

影响因素	固定效应	随机效应
lnpgdp	1.050*** (0.113)	0.675*** (0.100)
lnind	1.232*** (0.181)	1.248*** (0.204)
lnrd	-0.115* (0.067)	0.084 (0.061)
lns	1.428* (0.748)	3.202*** (0.582)
lngov	-0.188* (0.107)	-0.044* (0.115)
lnes	0.716* (0.408)	0.931** (0.462)
常数项	3.415* (1.807)	-2.242 (1.472)
观测值	162	162
R ²	0.887	0.877
Hausman 检验	chi2=565.71 (P>chi2=0.0000)	

从表 10 可以看出，在面板回归分析中：人均 GDP 对黄河流域净碳排放的影响为正，说明随着经济发展水平的不断提升，经济结构优化以及人们环保意识提升使得经济发展带来的碳排放量波动下降。产业结构的系数为正，由于第二产业的发展对能源的依赖程度较高，因此第二产业占比的提高会造成净碳排放的增加。研发投入的系数为负，表明技术水平提高能够提高能源使用效率，使得碳排放量下降。建设用地面积占比、能源消费结构的系数均为正，表明随着建设用地面积的增加，碳排放量将会增加；煤炭消耗量的增加会导致碳排放量的增加。政府干预的系数为负，说明政府可以通过财政手段引导企业提升科技水平，鼓励高新技术产业发展从而使得碳排放量下降。

4.2 时空地理加权回归分析

利用 ArcGIS 软件的 GTWR 分析模块对影响因素进行分析，其中模型拟合优度 R² 为 0.9958，AICc 为 -83.5202，带宽为 0.1120。各变量回归系数的描述性统计结果见表 11。从表 11 中可以看出，土地利用、产业结构、能源结构、经济发展水平、政府干预等变量的回归系数均有较大的差距，即黄河流域各省份净碳排放量的影响因素具有较大差异，在分析中应考虑黄河流域净碳排放量的差异性。因此，采用时空地理加权回归分析方法，从拟合优度来看，GTWR 分析中的拟合优度优于面板回归分析。将 GTWR 分析结果中各解释变量的系数通过 ArcGIS 进行可视化表达，结果如图 2 所示。

从图 2 可以看出，经济发展水平对黄河流域净碳排放影响较大的省份为内蒙古、山东和河南。从各省回归系数来看，回归系数的跨度较大，跨度为 -0.481~1.134。回归系数为正的省份中，系数值最大的省份为河南，其次为山东和内蒙古，表明随着经济发展水平的提升，会导致净碳排放量的增加。说明山西、内蒙古、山东、河南、陕西和青海经济发展的碳排放强度依然较大，需要进一步优化经济和产业结构，实现减排。回归系数为负的省份为四川、甘肃和宁夏，这些省份的经济发展水平较低，

其净碳排放量随着经济发展不断降低。

产业结构对黄河流域净碳排放的影响均为正值，由于第二产业的发展对能源的依赖程度较高，因此第二产业占比的提高会造成净碳排放的增加。其中，系数值最大的为宁夏，其次为青海和甘肃，原因是这些省份的经济发展相对落后，第二产业的能源使用效率较低。煤炭电力是支撑宁夏工业发展的主要能源，能源结构不合理加之能源使用效率较低使得第二产业占比变动对碳排放量产生较大的影响。青海的工业体系也是以采矿和化工为主，石油、电力、有色金属和盐化工已成为青海的支柱产业，但是这些产业对能源依赖程度较高，加之资源型企业在发展过程中缺乏以技术进步推动能源使用效率提升的意识，因此导致第二产业增加值带来更多的碳排放。

表 11 影响因素回归系数描述统计

变量	观测值数量	均值	标准差	最小值	最大值
lnpgdp	162	0.432	0.842	-1.452	3.587
lnind	162	1.439	1.884	-2.880	9.461
lnrd	162	0.136	0.281	-0.793	0.697
lns	162	0.771	5.952	-26.466	11.777
lngov	162	0.218	0.885	-1.429	2.966
lnes	162	1.194	1.391	-1.618	11.778
常数项	162	0.008	0.082	-0.277	0.409

研发投入代表了科技水平，一般认为科技水平的提高会使能源使用效率上升从而降低碳排放，但“回弹效应”认为，技术进步偏向性以及技术进步路径的不同可能会对碳排放强度产生不同影响^[15]，技术进步不一定总能实现节能减排^[16]。厂商的研发投入可能是为了进一步扩大生产规模获得更多的利润，因此研发投入的增加反而会进一步加剧碳排放的增加。研发投入系数为负的省份为山东和河南，其他省份的研发投入系数均为正。未来应引导研发投入向提高能源使用效率、降低能耗等方面发展，使得通过技术水平提升达到减排的目标。

土地利用系数的变化差异也比较大，回归系数为负的城市为山西、内蒙古、山东和河南，表明这些省份的土地利用方式为集约型，能够实现资源的合理配置，有助于能源资源使用效率的提升，从而降低碳排放。回归系数为正的省份为四川、陕西、甘肃、青海和宁夏，表明这些省份在城市扩张过程中土地利用效率较低，城市采用粗放型扩张方式造成资源和能源消费的浪费现象，从而导致净碳排放量的增加。

政府干预系数有正有负，其中，系数为正的省份中绝对值最大的为宁夏，其次为甘肃；系数为负的省份中绝对值最大的为河南。政府干预尤其是财政预算支出具有一定的导向性，从而导致相似的企业扎堆出现，甚至造成重复建设，不利于降低碳排放。因此，政府可以通过补贴等方式引导企业进行技术升级，提升能源使用效率，从而使得碳排放量降低。

能源消费结构对黄河流域净碳排放的影响均为正值，即随着煤炭消耗量的增加，会带来碳排放量的增加。能源消费结构影响较大的是内蒙古、宁夏，其次为青海、甘肃、山西、陕西和河南，影响程度较小的为山东和四川。

5 主要结论及建议

(1) 整体来看, 黄河流域耕地、园地、林地和草地主要以碳吸收为主, 且碳吸收量以每年 24.74 万吨的速度增加。但是从各省份情况来看, 山东、河南以土地利用碳排放为主, 碳排放量呈线性减少趋势, 表明这些省份土地利用的碳排放总量将会持续下降, 而内蒙古土地利用的碳排放虽然以碳吸收为主, 但内蒙古的土地利用碳吸收量呈现下降趋势, 下降速率为 11.99 万吨/年, 这需要引起关注。

(2) 2000—2017 年, 黄河流域各省份能源消耗碳排放量规模增大, 且线性增加趋势显著, 短期内经济发展惯性会使能源消耗碳排放保持增加趋势, 给技术进步的减排效应带来一定的阻力。

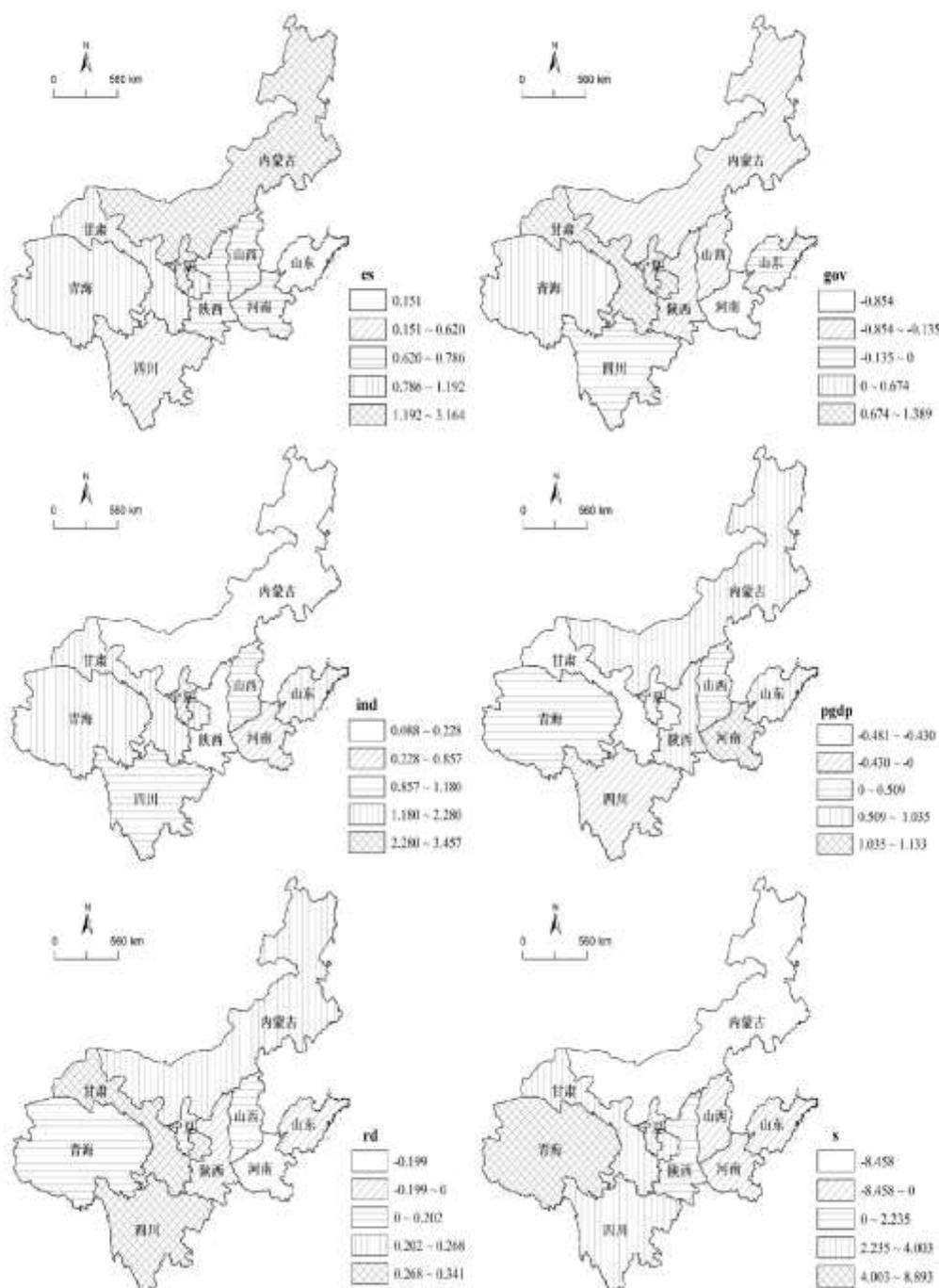


图 2 黄河流域土地利用碳排放影响因素回归系数图

(3) 黄河流域林地、园地、草地的碳吸收量有限, 仅占能源消费碳排放量的 5%左右。从各省份的净碳排放量来看, 山西、内蒙古、山东、河南和陕西净碳排放量较大且增速较快, 尤其是内蒙古和山东净碳排放的增速远高于其他省份, 未来减排任务严峻。

(4) 2000—2017 年, 黄河流域单位 GDP 碳排放强度在持续降低, 而人均碳排放强度在持续升高, 青海和宁夏的单位 GDP 碳排放强度线性增加趋势显著, 未来在发展经济的同时应注重产业结构优化, 提高技术水平降低碳排放。

(5) 从碳排放的空间特征来看, 通过空间统计方法分析黄河流域净碳排放的空间差异动态演化特征, 得出 2000 年以来, Moran' sI 指数均为正值, 黄河流域净碳排放呈现空间正自相关, 净碳排放量高的省份相邻, 净碳排放量低的省份相邻。从标准差椭圆分析结果来看, 黄河流域净碳排放的空间分布上呈现东南—西北的格局, 且这一趋势在逐渐强化。

(6) 根据面板回归和 GTWR 分析结果, 从黄河流域整体来看, 产业结构、能源结构、研发投入、政府干预和建设用地占比对碳排放均为正向影响。碳排放影响因素存在显著空间异质性, 经济发展水平对碳排放影响较大的省份有内蒙古、河南、山西和陕西。在山西、内蒙古、山东、河南、陕西和青海, 经济发展水平与碳排放呈现正相关, 碳排放量随着经济发展水平的提高而增加; 在四川、甘肃和宁夏, 经济发展水平与碳排放呈现负相关, 经济发展能够有效控制碳排放。产业结构对碳排放影响较大的省份为甘肃、青海和宁夏, 其次为山西、山东和四川, 影响较弱的为内蒙古、河南和陕西, 系数均为正值, 第二产业占比降低会带来碳排放量的下降。技术进步对碳排放影响为负的省份为山东和河南, 即技术进步能够抑制碳排放, 四川、甘肃和内蒙古等省份技术进步会带来碳排放的增加。土地利用对碳排放影响较大的省份为内蒙古、四川、青海和宁夏。在山西、内蒙古、山东和河南, 土地利用与碳排放呈负相关; 在四川、陕西、青海、甘肃和宁夏, 土地利用与碳排放呈正相关。政府干预对碳排放影响较大的省份为宁夏、青海、甘肃和河南, 其中, 影响为正的省份为宁夏、甘肃、青海、四川和山东, 影响为负的省份有山西、内蒙古、河南和陕西。能源消费结构对各省碳排放的影响均为正, 影响较大的省份为内蒙古、宁夏、青海和甘肃, 影响程度较弱的是山东和四川。

从研究结果来看, 未来降低碳排放仍需从转变能源结构、提升偏向节能减排的科技投入以及工业减排入手, 只有真正通过转变现有能源消费结构、增加清洁能源的占比、降低第二产业对能源的依赖程度、提升其能源使用效率才能真正解决碳排放问题, 实现真正意义上的减排。增加林地、园地和草地的碳吸收量是对工业碳减排的补充和辅助选项, 在黄河流域生态文明建设和高质量发展政策指导下, 保护天然生态屏障将会对碳减排起到很大的缓冲作用。

参考文献:

- [1] 肖红艳, 袁兴中, 李波, 等. 土地利用变化碳排放效应研究——以重庆市为例[J]. 重庆师范大学学报(自然科学版), 2012(1): 38-42, 115.
- [2] 方精云, 郭兆迪, 朴世龙, 等. 1981—2000 年中国陆地植被碳汇的估算[J]. 中国科学(D辑: 地球科学), 2007(6): 804-812.
- [3] 赵荣钦, 刘薇, 刘英, 等. 基于碳收支核算的河南省碳排放峰值预测[J]. 水土保持通报, 2016(4): 78-83, 89.
- [4] 张俊华, 李国栋, 南忠仁, 等. 黑河中游不同土地利用类型下土壤碳储量及其空间变化[J]. 地理科学, 2011(8): 982-988.
- [5] 孙赫, 梁红梅, 常学礼, 等. 中国土地利用碳排放及其空间关联[J]. 经济地理, 2015(3): 154-162.

[6]李建豹, 黄贤金, 吴常艳, 等. 中国省域碳排放影响因素的空间异质性分析[J]. 经济地理, 2015(11): 21-28.

[7]沈杨, 汪聪聪, 高超, 等. 基于城市化的浙江省湾区经济带碳排放时空分布特征及影响因素分析[J]. 自然资源学报, 2020(2): 329-342.

[8]刘晓婷, 陈闻君. 基于 ESDA-GIS 的新疆能源碳排放空间差异动态演化分析[J]. 干旱区地理, 2016(3): 678-685.

[9]宫倩楠, 王莹莹, 童玉芬. 京津冀人口对碳排放的压力: 空间格局及变动分析[J]. 首都经济贸易大学学报, 2020(2): 56-67.

[10]冯杰, 张胜, 王涛. 中国省际土地利用碳排放及其影响因素分析[J]. 统计与决策, 2019(5): 141-145.

[11]路正南, 罗雨森. 中国双向 FDI 对二氧化碳排放强度的影响效应研究[J]. 统计与决策, 2020(7): 81-84.

[12]张忠杰, 李真真, 李宪慧. 金融发展、城镇化对人均能源消费碳排放的影响[J]. 统计与决策, 2020(8): 106-110.

[13]王风云, 苏焯琴. 京津冀能源消费结构变化及其影响因素[J]. 城市问题, 2018(8): 59-67.

[14]童磊, 王运鹏. 省域碳排放的空间网络结构特征与影响因素研究——基于产业转移视角[J]. 经济问题, 2020(3): 18-24.

[15]李丹丹, 刘锐, 陈动. 中国省域碳排放及其驱动因子的时空异质性研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2013(7): 84-92.

[16]邓吉祥, 刘晓, 王铮. 中国碳排放的区域差异及演变特征分析与因素分解[J]. 自然资源学报, 2014(2): 189-200.