

大秦岭地区县域土地利用碳排放与生态环境质量脱钩关系

马超群^{1,2}, 杨天丽¹, 员学锋^{1,2}, 王晓峰^{1,2}, 任朝霞^{1,2}, 任晨辰¹

(1. 长安大学土地工程学院, 西安 710054; 2. 陕西省土地整治重点实验室, 西安 710054)

摘要: [目的] 土地利用碳排放与生态环境质量之间保持强脱钩是实现“双碳”目标的重要途径, 明晰二者关系对深入理解区域可持续发展具有重要意义。[方法] 以大秦岭地区县域尺度视角, 基于土地利用数据、ODIAC 数据和 MODIS 数据, 分析了 2000—2020 年土地利用引起的碳排放和地区生态环境质量的时空演变特征, 并借助脱钩模型探究二者在 20 年间的演变过程。[结果] (1) 大秦岭地区土地利用类型时空变化显著, 建设用地面积持续增加。(2) 地区土地利用碳排放总量从 2000 年的 1.57×10^7 t 增加至 2020 年 5.31×10^7 t, 历经“快速增长—缓慢增长”两个阶段; 碳排放量重心向西迁移后保持稳定。(3) 地区生态环境质量时间上呈“波动下降—波动上升—波动下降”的演变过程, 多年均值为 0.63, 生态环境质量整体较高; 空间分布上呈现“中间好、四周差”的特征。(4) 20 年间, 大秦岭地区县域土地利用碳排放与生态环境质量脱钩关系呈现显著的时空异质性, 时间上呈现出“恶化—改善—恶化”的变化过程; 空间上以负脱钩为主, 各县脱钩进程不一, 存在显著的县际差异。[结论] 土地利用碳排放对生态环境质量潜在威胁较大, 研究结果可为各区县因地制宜管理土地利用碳排放, 实现绿色高质量发展提供政策参考。

关键词: 土地利用碳排放; 生态环境质量; 脱钩模型; 大秦岭地区; 县域尺度

中图分类号: X171.1

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2026)02-0302-12

Decoupling relationship between county-level land use carbon emissions and ecological environment quality in Great Qinling Mountains region

Ma Chaoqun^{1,2}, Yang Tianli¹, Yuan Xuefeng^{1,2}, Wang Xiaofeng^{1,2}, Ren Zhaoxia^{1,2}, Ren Chenchen¹

(1. School of Land Engineering, Chang'an University, Xi'an 710054, China;

2. Shaanxi Key Laboratory of Land Consolidation, Xi'an 710054, China)

Abstract: [Objective] Maintaining a strong decoupling between land use carbon emissions (LUCE) and ecological environment quality (EEQ) is a key approach to achieving the “dual carbon” goals, and clarifying their relationship is of great significance for deepening the understanding of regional sustainable development. [Methods] From a county-level perspective in the Great Qinling Mountains region, land use data, ODIAC data, and MODIS data were used to analyze the spatiotemporal evolution characteristics of carbon emissions caused by land use and regional EEQ from 2000 to 2020. Additionally, a decoupling model was employed to explore their evolution processes over the past 20 years. [Results] (1) Land use types in the Great Qinling Mountains region exhibited significant spatiotemporal variations, with the area of construction land continuously increasing. (2) The total LUCE in the region increased from 1.57×10^7 t in 2000 to 5.31×10^7 t in 2020 and went through two stages of “rapid growth and slow growth”. The centroid of carbon emissions shifted westward and then stabilized. (3) Temporally, the regional EEQ exhibited an evolution pattern of “fluctuating decline,

收稿日期: 2025-05-25

修回日期: 2025-06-18

接受日期: 2025-07-08

资助项目: 国家自然科学基金秦岭专项(72349002); 国家自然科学基金项目(42371210); 陕西省重点研发项目(2022ZDLSF07-05); 陕西省土地整治重点实验室开放资助项目(211927180168); 长安大学中央高校资助项目(300102354204, 300102354901)

第一作者: 马超群(1976—), 男, 陕西西安人, 博士, 副教授, 主要从事农村变化方面研究。E-mail: chaoqunm@chd.edu.cn

<https://stbeyj.publish.founderss.cn>

fluctuating rise, and fluctuating decline”, with a multi-year average value of 0.63, indicating generally high EEQ. Spatially, it exhibited a distribution pattern of “better in the middle and worse in surrounding areas”. (4) During the past 20 years, the decoupling relationship between LUCE and EEQ in counties in the Great Qinling Mountains region demonstrated significant spatiotemporal heterogeneity. Temporally, it showed a changing process of “deterioration, improvement, and deterioration”. Spatially, negative decoupling dominated, with varying decoupling progress across counties and significant inter-county differences. [Conclusion] LUCE poses a significant potential threat to EEQ. The findings can provide policy references for districts and counties to manage LUCE tailored to local conditions and achieve green and high-quality development.

Keywords: land use carbon emissions; ecological environment quality; decoupling model; Great Qinling Mountains region; county-level

21世纪以来,工业化和城市化快速发展^[1],CO₂ 过量排放与生态环境质量恶化,已成为影响区域乃至世界的重要问题^[2-3]。因此,为实现人与自然和谐共生的中国式现代化目标,并向世界提供中国式发展路线,在国际上,中国承诺2030年力争实现碳达峰、2060年实现碳中和^[4];在国内,党的二十大报告中强调,必须牢固树立和践行“绿水青山就是金山银山”的理念,站在人与自然和谐共生的高度谋划发展。面对我国“双碳”战略部署,以及经济社会可持续发展的迫切需求,深入探究土地利用所引起的碳排放与地区生态环境质量的关系,可为区域可持续发展提供重要理论支撑。

土地利用格局剧烈变化会造成碳排放量和生态环境质量的改变^[5-6],干扰生态系统的结构和功能。近年来,国内外学者对土地利用碳排放和生态环境质量的关系开展了较多研究,研究多围绕国家^[7]、城市群^[8]、省域^[9]、市域等^[10]大尺度研究对象展开,揭示了二者在一定程度上相互影响和制约。研究方法主要有耦合协调度模型^[11-12]、空间自相关分析^[13]、相关性分析等^[14-15],其中耦合协调度模型应用比较广泛,注重分析土地利用碳排放与生态环境质量的协调一致程度。但这些研究多集中于静态分析和同步变化分析二者关系,当区域土地利用碳排放与生态环境质量不同步变化时,脱钩理论被引入,能够将两者所处状态进行详细划分^[16],为描述两者同步关系的破裂提供了新的思路。脱钩理论起源于20世纪60年代,早期应用于物理领域,后来扩展到环境经济学科,主要用于探究基于速度标准的资源环境与经济增长之间的关系^[17]。受县级碳排放数据源的限制,现有研究主要将脱钩理论运用于国家^[18]、省域^[19]和区域等^[20]宏观层面碳排放与经济增长方面研究。日本国家环境研究所开发的人为二氧化碳开源数据清单(Open Data Inventory for Anthropogenic CO₂, ODIAC)^[21],将夜间灯光数据和单个发电厂排放/位

置信息结合使用,估算了全球空间范围内化石燃料二氧化碳排放情况,现已广泛运用于不同尺度的土地利用碳排放研究中^[11]。相关研究成果为本研究分析和量化更精细化的县域尺度土地利用碳排放与生态环境质量的脱钩关系奠定了基础。

大秦岭作为中国南北分界线,勾连东西、和合南北,是我国重要的生态安全屏障^[22],在人类自然和社会经济发展中占有重要地位。习近平在2020年4月视察秦岭时就指出“保护好秦岭生态环境,对确保中华民族长盛不衰、实现可持续发展具有重大而深远的意义”。近年来,大秦岭地区依靠土地占用增量发展与生态环境保护的矛盾突出,生态系统格局变化剧烈,已经严重威胁到地区的生态平衡^[23]。针对此,有学者从碳排放时空分布^[24]和生态环境效应时空分异性等^[25-26]方面开展了不同研究,但这些研究仅局限于秦岭陕西段,仍是地区内差异研究,具有同样或较为类似的非自然背景,如产业结构、生产方式和政策影响等;大秦岭则属于跨区域,特别是跨自然地理区和经济区,故而更能反映不同环境背景的效果差异,且目前鲜有研究系统性分析大秦岭地区土地利用碳排放与生态环境质量脱钩关系。未来如何协调二者关系,是实现该区人与自然和谐相处的关键。鉴于此,本文以大秦岭地区县域尺度视角,分析土地利用碳排放与生态环境质量时空演变特征,探讨二者之间的关系,以期科学认识大秦岭地区土地利用碳排放与生态环境质量的演变过程,针对不同类型区县提出具体优化策略,为推动地区绿色高质量发展提供有益的参考。

1 研究区概况

本研究中大秦岭指在狭义的秦岭(陕西境内关中平原和汉江谷地之间山脉主体部分)基础上,向西连接甘肃省白石山,向东延伸至河南省分为崤山、熊耳山和伏牛山,横跨陕甘豫三省,东西长约1600 km,南北宽200~300 km,范围介于32°22′—34°48′N,

105°13′—113°13′E^[27],总面积约为 10.08 万 km²,涉及 45 个县(区)(图 1)。本文以县级行政单元为研究对象展开,大秦岭按延伸方向自西向东分为秦岭西段(麦积区、秦州区、徽县、两当县)、秦岭中段(陕西关中南诸县)、秦岭东段(灵宝市、卢氏县、西峡县、栾川县、嵩县、内乡县、镇平县、南召县、鲁山县)。其中秦岭西段以山脉为主,城市化水平较低;秦岭中段地形差异显著,人口沿北部和南部边缘集中分布;秦岭东段山脉与盆地交替出现,经济发展模式具有多样性。大秦岭地跨暖温带和亚热带,其北部属于暖温带大陆

性季风气候区,年均降水量 600~700 mm,年均温约为 10℃;南部地区属于亚热带湿润季风气候区,年均降水量,800~1 700 mm,年均温为 14℃,整体而言年均降水量和年均温从东至西、由南至北逐渐减少和降低。研究区内以山地为主,海拔 90~3 678 m,地形复杂,生态系统类型多样,森林覆盖率相对较高,是我国重要的生态屏障带、物种基因库和水源涵养区,也是中部地区重要的碳汇区域。研究区发展历史悠久,区位东接中原城市群,北部毗邻关天经济区,近年来土地利用变化显著。

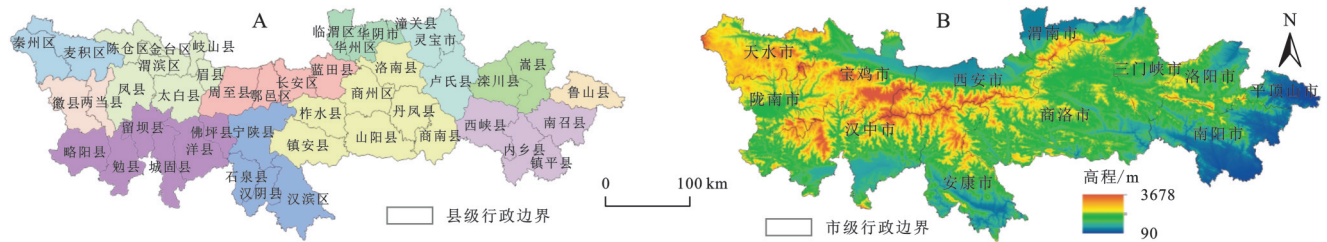


图 1 研究区行政区划及高程

Fig. 1 Administrative division and elevation of the study area

2 数据来源与方法

2.1 数据来源及预处理

本文所用的遥感数据来自美国国家航空航天局(<https://landsweb.modaps.eosdis.nasa.gov>),通过GEE平台在线调用2000—2020年植被生长季节6—9月MODIS数据。其中绿度指标(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)源自MOD13A1数据集,空间分辨率为500 m;热度指标(Land Surface Temperature, LST)源自MOD11A2数据集,空间分辨率为1 km;湿度(WET)和干度(Normalized Difference Built-up and Soil Index, NDBSI)指标通过MOD09A1地表反射率数据集计算,空间分辨率为500 m。为保证各指标提取结果的准确性,在GEE平台直接对遥感影像进行去云、合成和重采样等预处理,并运用改进的归一化差异水体指数(Modified Normalized Difference Water Index, MNDWI)对水体信息进行掩膜处理^[28]。

行政边界数据来自国家地理信息公共服务平台一天地图(<https://www.tianditu.gov.cn/>);土地利用类型数据来自中国科学院资源与环境数据中心(<http://www.resdc.cn>),空间分辨率为30 m,根据中国科学院土地利用分类标准,通过ArcGIS 10.8软件将研究区土地利用类型分为6大类,即耕地、林地、草地、水体、建设用地和未利用土地;ODIAC数据来自全球环境数据库(<https://db.cger.nies.go.jp>),空间分辨率为1 km。由于数据来源和类型不同,空间分辨率也存在较大差异,为保证数据一致性和可比性,本

研究将所有栅格数据重采样为500 m×500 m,所有数据坐标系统一为WGS_1984_Albers投影坐标系,栅格数据按县域范围为最小单元分区统计。

2.2 主要研究方法

2.2.1 土地利用碳排放计算 土地利用碳排放是直接碳排放与间接碳排放的总和。直接碳排放是土地利用结构变化所引起的碳排放,而间接碳排放是土地利用过程中产生的人为碳排放,如建设用地和耕地开发活动引起的能源消耗。本研究使用直接碳排放系数估算林地、草地、水域和未利用土地碳排放,建设用地和耕地利用间接碳排放进行估算。土地利用碳排放总量计算公式为:

$$LUCE = E_a + E_b \quad (1)$$

式中:LUCE为土地利用碳排放总量; E_a 为土地利用直接碳排放量; E_b 为土地利用间接碳排放量。

土地利用直接碳排放量的计算公式为:

$$E_a = \sum e_i = \sum s_i \times \delta_i \quad (2)$$

式中: E_a 为土地利用直接碳排放量; e_i 为各土地利用类型产生的碳排放量,包括林地、草地、水域和未利用土地; S_i 为各土地利用类型面积, δ_i 为各土地利用类型碳排放系数。本研究参考已有研究结果,并结合研究区实际情况,确定林地^[29]、草地^[6]、水域^[15]和未利用土地^[30]的碳排放系数依次为-0.644, -0.021, -0.253, -0.005 t/hm²。

本研究利用ODIAC数据估算耕地和建设用地间接碳排放^[29],土地利用间接碳排放量的计算公式为:

$$E_b = \sum E_i \quad (3)$$

式中: E_b 为间接碳排放量, E_i 为月尺度碳排放量数据,单位为t, $i=1,2,\dots,12$ 。

2.2.2 遥感生态指数 遥感生态指数(Remote Sensing Ecological Index, RSEI)可以客观、快速地反映生态环境质量,RSEI包含4个生态指标,遥感定义为:

$$RSEI = f(NDVI, WET, LST, NDBSI) \quad (4)$$

式中:NDVI代表绿度;WET代表湿度;LST代表热度;NDBSI代表干度,4项指标的计算公式参考文献^[31],为避免各生态指标量纲不同而造成影响,需对4个指标进行归一化处理^[32],然后通过主成分分析对4项生态指标综合处理^[32],再次归一化得到RSEI,RSEI值越接近1表明生态环境质量越好,越接近0代表生态环境质量越差。

2.2.3 Tapio脱钩模型 Tapio脱钩模型引入弹性系

数计算脱钩指数,计算结果不受统计量纲的影响,可以更加真实、动态地反映变量之间的脱钩关系^[33]。基于Tapio脱钩理论,构建秦岭地区土地利用碳排放与生态环境质量的脱钩弹性表达式:

$$\epsilon = \frac{\Delta LUCE/LUCE_0}{\Delta RSEI/RSEI_0} = \frac{(LUCE_i - LUCE_0)/LUCE_0}{(RSEI_i - RSEI_0)/RSEI_0} \quad (5)$$

式中: ϵ 为脱钩弹性, $\Delta LUCE$ 和 $\Delta RSEI$ 分别为土地利用碳排放与生态环境质量在现期与基期之间的差值, $LUCE_i$ 代表计算年土地利用碳排放, $LUCE_0$ 代表基期年土地利用碳排放; $RSEI_i$ 代表计算年生态环境质量, $RSEI_0$ 代表基期年生态环境质量。将0,0.8,1.2设置为脱钩的临界值^[10],分为8种脱钩类型,见表1。强脱钩是最理想的脱钩状态,强负脱钩是最不理想的脱钩状态。

表1 脱钩状态判别

Table 1 Decoupling state classification

类别	脱钩状态	$\Delta LUCE$	$\Delta RSEI$	脱钩指数	含义
负脱钩	扩张负脱钩	> 0	> 0	$\epsilon > 1.2$	RSEI提高幅度 $<$ LUCE增加幅度
	强负脱钩	> 0	< 0	$\epsilon < 0$	RSEI降低,LUCE增加
	弱负脱钩	< 0	< 0	$0 < \epsilon < 0.8$	RSEI降低幅度 $>$ LUCE降低幅度
脱钩	衰退脱钩	< 0	< 0	$\epsilon > 1.2$	RSEI降低幅度 $<$ LUCE降低幅度
	强脱钩	< 0	> 0	$\epsilon < 0$	RSEI提高,LUCE减少
	弱脱钩	> 0	> 0	$0 < \epsilon < 0.8$	RSEI提高幅度 $>$ LUCE增加幅度
连接	增长连接	> 0	> 0	$0.8 < \epsilon < 1.2$	两者均提高,且提高幅度相似
	衰退连接	< 0	< 0	$0.8 < \epsilon < 1.2$	两者均降低,且降低幅度相似

3 结果与分析

3.1 土地利用时空变化特征

2000—2020年研究区各土地利用类型面积汇总和空间分布图见表2和图2。土地利用类型以林地为主,其次为草地、耕地,三者面积之和共占土地利用总面积的99%。土地利用在空间上具有明显的地形分布差异性,其中林地主要分布于研究区中西部及东部海拔较高且坡度较大地区,草地沿林地周围分布,建设用地及耕地分布在秦岭北麓、南麓及东部边缘海拔低且地势平坦地区,未利用土地和水域呈零散分布。20年间地区土地利用变化整体表现为“两增两减”,“两增”指建设用地和林地面积增加,其中建设用地面积增加最为显著,从2000年的1 728.75 km²增加到2020年的2 392.75 km²,增幅达到38.46%,其间在2005—2010年增加最为迅速,从1 860.50 km²增加到2 121.25 km²,增幅占全部增量的39.27%;林地面积增加缓慢,从2000年的40 728.50 km²增加到2020年的41 094.25 km²,增幅为0.9%。“两减”为耕地和草地面积减少,耕地

和草地面积分别从2000年的27 524.50 km²,29 812.25 km²降低至2020年的26 603.50 km²,29 586.75 km²,降幅分别为3.35%和0.76%。水域和未利用土地面积均呈小幅波动增加趋势,变化较小。

2000—2020年研究区各土地利用类型有不同程度的转移(图3和图4),其中2005—2010年和2015—2020年转移最为显著,主要表现为耕地、草地、林地和建设用地转移。具体来看,耕地以转出为主,20年间共转出4 040.25 km²,主要转化为草地(1 700 km²)、林地(1 049 km²)和建设用地(1 039 km²),其中2015—2020年转为草地和林地面积分别为863.5 km²,636 km²,分别高于2000—2015年转入草地、林地面积之和;耕地的转入部分主要来源于草地;草地也以转出为主,总转出面积为3 075 km²,主要转为耕地与林地,2005—2010年转为耕地和林地的面积分别为714.25 km²,394.75 km²,2015—2020年转为耕地和林地的面积分别为626 km²,636 km²,4个时期转为建设用地的面积为72.5 km²;林地的转入量为2 384.5 km²,转出量为2 018 km²,转入略高于转出,主要与草地、耕地相互

转换;建设用地以转入为主,主要从耕地转入而来,4个时期耕地转入建设用地面积分别为 126.5 km², 418 km², 115.5 km², 380.25 km², 此外,林地转为建设用地也较多,仅 2005—2010 年就达到 51 km², 占林地转为建设用地面积的 63.35%, 建设用地扩张以秦州区、麦

积区、金台区、陈仓区、周至县、鄠邑区和长安区及东段各县等县域变化最为明显。总体来看,大秦岭地区土地利用变化具有显著的时空变化特征,这些变化是由于城市化发展、退耕还林政策、国家保障粮食安全和农业结构调整等原因引起。

表 2 2000—2020 年大秦岭地区各类土地利用面积变化

Table 2 Changes in areas of different land use types in Great Qinling Mountains region (2000—2020)

年份	土地利用类型						总计
	耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用土地	
2000 年	27524.50	40728.50	29812.25	963.50	1728.75	39.25	100796.75
2005 年	27167.50	40792.50	29921.25	1015.75	1860.50	39.25	100796.75
2010 年	27277.50	41104.25	29260.25	995.75	2121.25	37.75	100796.75
2015 年	27186.50	41092.75	29246.00	998.25	2223.75	49.50	100796.75
2020 年	26603.50	41094.25	29586.75	1069.25	2392.75	50.25	100796.75

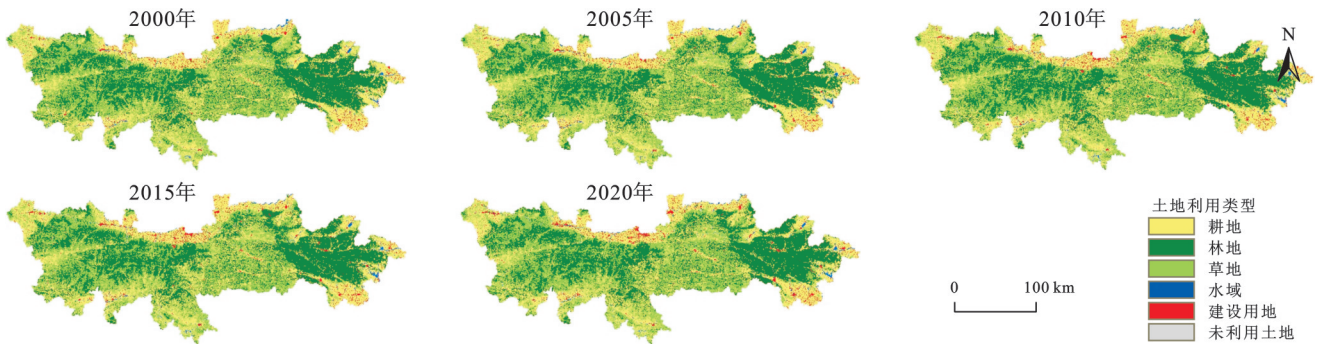


图 2 2000—2020 年大秦岭地区土地利用空间分布格局

Fig. 2 Spatial distribution patterns of land use in Great Qinling Mountains region (2000—2020)

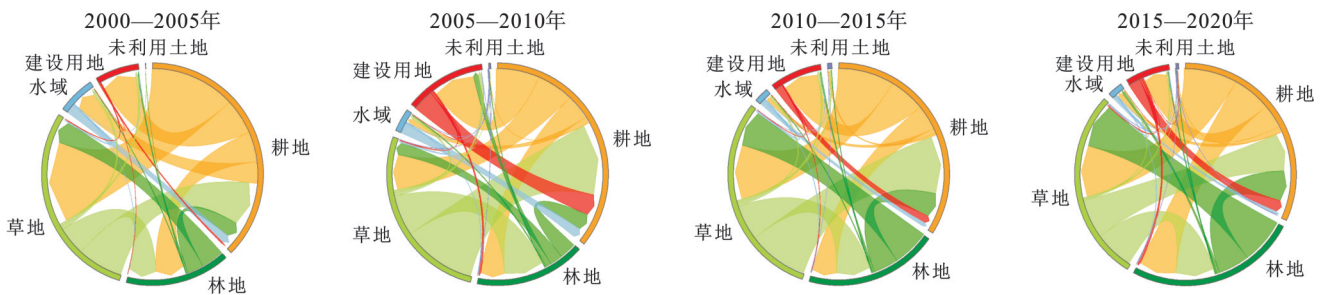


图 3 2000—2020 年大秦岭地区土地利用转移弦图

Fig. 3 Chord diagrams of land use transfer in Great Qinling Mountains region (2000—2020)

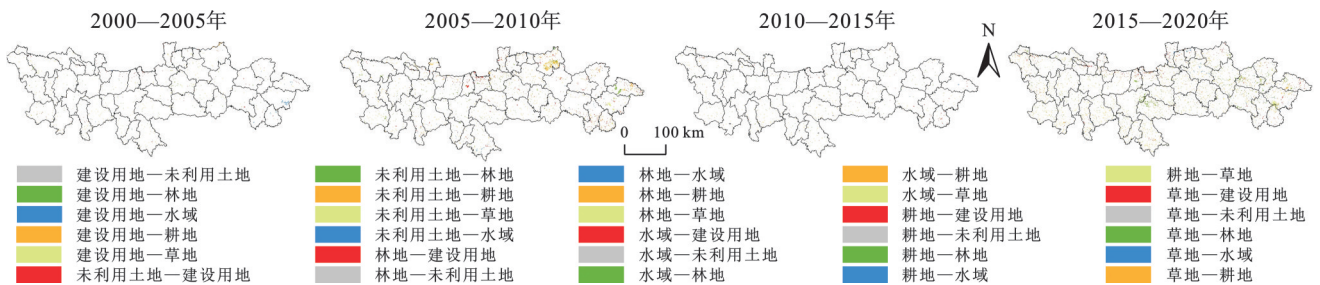


图 4 2000—2020 年大秦岭地区土地利用转换空间分布图

Fig. 4 Spatial distribution of land use conversion in Great Qinling Mountains region (2000—2020)

3.2 土地利用碳排放时空特征

2000—2020 年大秦岭地区土地利用碳排放总量呈现显著上升趋势,从 2000 年的 1.57×10^7 t 增加到 2020 年的 5.31×10^7 t, 20 年间土地利用碳排放总量增

加了 2.38 倍(图 5),碳排放趋势大致可分为两个阶段: 2000—2010 年快速增长(年均增长量为 2.5×10^6 t), 2010—2020 年缓慢增长(年均增长量为 1.24×10^6 t)。从不同区域来看,秦岭西段碳排放量从 2000 年的

5.7×10^5 t增加到2020年的 2.09×10^6 t,增加了2.67倍;秦岭中段碳排放量从 8.76×10^6 t增加到2020年的 3.318×10^7 t,增加了2.79倍;秦岭东段碳排放量从2000年的 6.37×10^6 t增加到2020年的 1.784×10^7 t,增加了1.8倍。总体来看,大秦岭地区土地利用碳排放总量分布规律为秦岭中段>秦岭东段>秦岭西段,碳排放量增速变化的空间分布规律为秦岭中段>秦岭西段>秦岭东段。

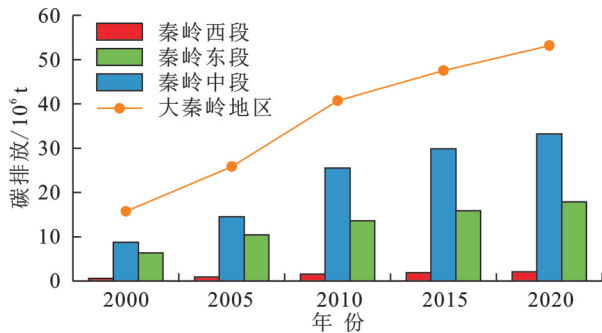


图5 2000—2020年大秦岭地区不同区域土地利用碳排放变化趋势

Fig. 5 Trends in land use carbon emissions in different sections of Great Qinling Mountains region (2000—2020)

从县域尺度来看,2000—2020年大秦岭地区县域碳排放量时空变化显著(见图6和图7)。整体而言,高碳排放县分布在研究区北部、东部及南部的山地边缘,低碳排放县集中分布在研究区中部海拔较高的山区。2000—2020年所有县的碳排放量都有所提高,尤其在2000—2010年提高明显。20年间,碳汇县数量在2000年为11个,到2020年仅剩留坝县、太白县、佛坪县和宁陕县4个县;碳排放量在0~20万t的县基本稳定在10~12个;而碳排放量在(20~50)万t的县数量减少最多,由15个大幅减少到5个;相比之下,碳排放量超过50万t的县域由8个增加到了26个,增加了2.25倍。研究区内碳排放量最高的县是东段河南省的鲁山县,从2000年的382.08万t攀升至2020年1151.38万t,增加了2.01倍。

从空间分异格局来看,研究区土地利用碳排放量的空间分布范围主要表现为东西走向(图7)。地区碳排放量空间分布在长轴方向上(东西方向)逐步发展,在短轴方向上(南北方向)相对稳定,长轴从2000年的304.25 km下降到2010年的299.27 km,2020年继续下降至299.16 km,短轴保持在73 km左右,表明大秦岭地区土地利用碳排放量空间分布范围自2000—2020年在东西方向上呈收缩态势。研究区的碳排放重心呈现出向西部移动的趋势,大致从商州区内迁移至蓝田县内,其中2000—2010年重心迁移速度较快,向西偏移了27.82 km,此后则相对稳定,多年间重心仅向东南方向仅迁移了0.7 km,也说

明在2000—2010年西部碳排放量增强对整个地区碳排放量空间格局改变作用显著。

结合图2,图4和图7可知,碳排放量较高的县和增加明显的县与建设用地、耕地分布和扩张的县相契合,但耕地碳排放量远小于建设用地,且耕地整体以转出为主,而建设用地面积持续增加。因此,可以认为研究区碳排放量逐年增加的主要原因为建设用地扩张,其转入来源主要为耕地;此外,建设用地开发对草地和林地部分占用,导致碳汇作用下降,也是碳排放量逐年增加的重要原因。政策干预下,虽然耕地转入林地和草地面积较大,但林地成林和草地生长需要时间且受气候变化影响,这些原因共同作用使得土地利用碳排放时空变化显著。

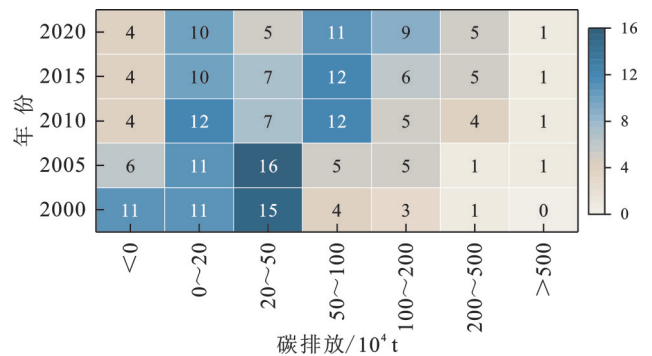


图6 2000—2020年大秦岭地区不同类型碳排放区县数量
Fig. 6 Number of counties with different types of carbon emissions in Great Qinling Mountains region (2000—2020)

3.3 生态环境质量时空变化特征

2000—2020年研究区生态环境质量指标RSEI的值域范围为0.54~0.73,在2010年达到最小值0.54,在2017年达到最大值0.73,多年均值为0.63,生态环境质量总体较好。从变化趋势来看,研究区生态环境质量年际变化波动性显著,经历了“波动下降(2000—2010年)—波动上升(2010—2017年)—波动下降(2017—2020年)”的变化过程(图8),在2010年显著下降后,2011年开始波动回升,在2017年达到峰值后,又呈现波动下降态势。

为了探究大秦岭地区生态环境质量空间分布特征,参照已有研究^[31],将RSEI结果划分为5个等级,即差[0,0.2)、较差[0.2,0.4)、中[0.4,0.6)、良[0.6,0.8)、优[0.8,1],据此得到2000年、2005年、2010年、2015年和2020年大秦岭地区不同等级RSEI区县数量(图9)和生态环境质量空间分布图(图10)。生态环境质量空间上呈现出“中部好、四周差”的分布特征,良和优等级分布于秦岭中段,这些地区与碳排放量较低的县相对应,主要是由于森林覆盖率较高,如留坝县、太白县、佛坪县和宁陕县等;差和较差等级主要分布在研究区北部、东部和南部边缘,如秦州区、麦积区、陈

仓区、金台区、鄠邑区、长安区、临渭区、鲁山县、南召县和镇平县等这些区县耕地面积较大、城市化水平较高。2000—2020年,RSEI等级为差和优的县数量均为0,基本都保持在中和良,说明各县整体生态环境较为可观;较差等级的县数量较少,保持在0~2个。分时段来看,2000—2010年由于人类活动对土地的开发,尤其是2005—2010年建设用地急剧扩张、耕地面

积也在增加,能源消耗量增加,使得各县生态环境质量有所退化,良等级的县由32个减少至4个,减少了7倍;与此同时,中等级的县从13个提升至39个,增加了2倍;2010—2020年,生态环境质量显著改善,良等级的县占据多数,原因在于随着政策的干预,2010—2015年土地利用变化放缓,2015—2020年建设用地面积大幅增加的同时,草地和林地面积也在大幅增加。

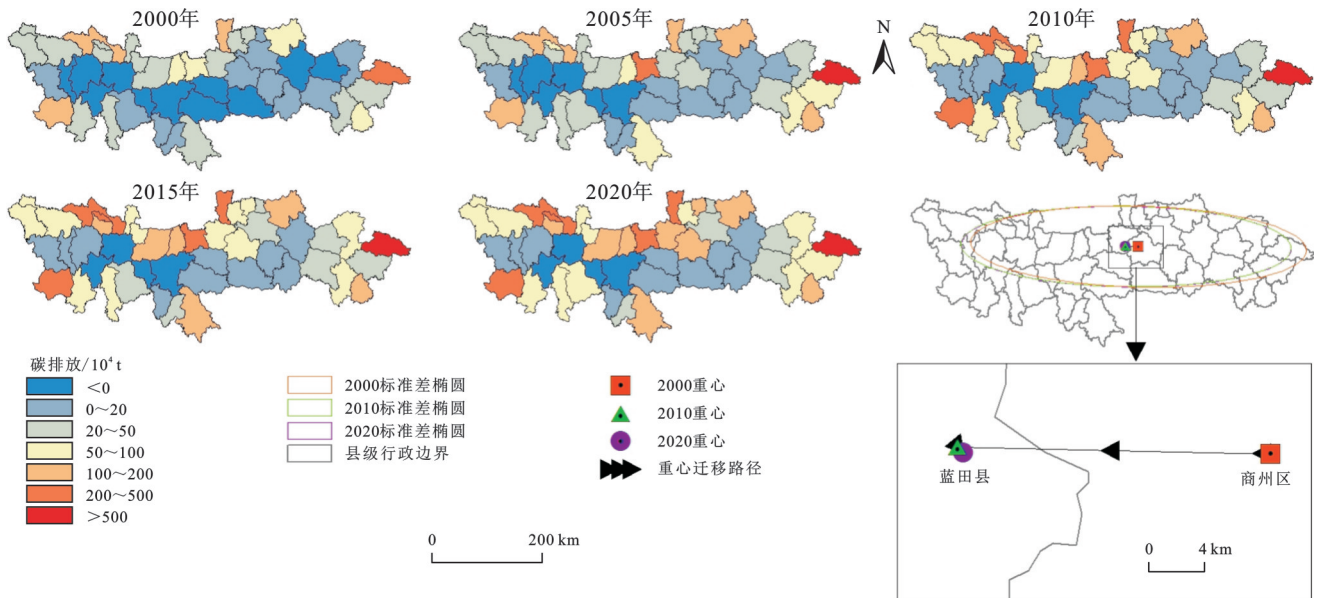


图 7 2000—2020年大秦岭地区县域土地利用碳排放的空间分布及标准差椭圆和迁移路径

Fig. 7 Spatial distribution, standard deviation ellipse, and migration paths of county-level land use carbon emissions in Great Qinling Mountains region (2000—2020)

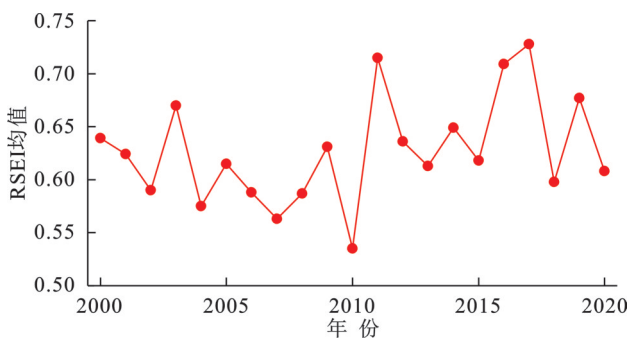


图 8 2000—2020年大秦岭地区 RSEI 年际变化趋势
Fig. 8 Interannual variation trends of RSEI in Great Qinling Mountains region (2000—2020)

从生态环境质量的变化过程来看,研究区生态环境质量空间分布呈东西走向,2000—2020年空间分布范围基本保持稳定(图 10)。从其分布重心来看,20年间重心偏移不大,2000年生态环境质量分布重心在柞水县,至2010年向东北方向迁移至长安区,迁移距离为 5.9 km,此后至 2020年折向西南方向迁移,迁移距离为 8.54 km。由于2005—2010年研究区内秦州区、麦积区、金台区、陈仓区、周至县、鄠邑区和长安区等城市化水平较高县域建设用地转入较多,对整个地区生态环境质量负向影响显著,推动了

生态环境质量重心向东北偏移;而2010—2020年,随着政策干预,整个地区生态环境质量渐好,西部地区生态环境质量改善明显,尤其是2015—2020年宁陕县、镇安县林地转入面积较多,将生态环境质量重心拉回西南方向。

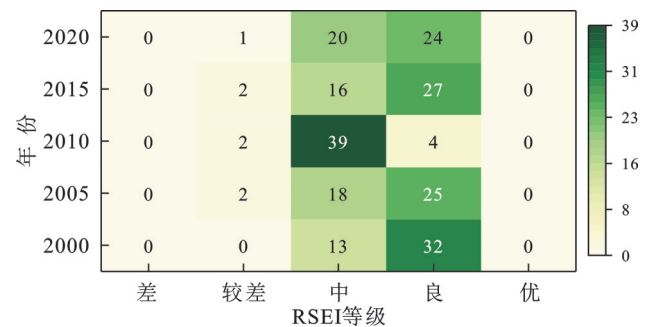


图 9 2000—2020年大秦岭地区不同等级 RSEI 区县数量
Fig. 9 Number of counties with different RSEI levels in Great Qinling Mountains region (2000—2020)

3.4 土地利用碳排放与生态环境质量的脱钩特征

基于 Tapio 脱钩理论,估算了大秦岭地区 2000—2005 年、2005—2010 年、2010—2015 年和 2015—2020 年 4 个时期土地利用碳排放与生态环境质量的脱钩指数。2000—2020 年大秦岭地区所有县土地利

用碳排放和生态环境质量的关系类型都发生了变化,空间上以负脱钩类型为主,时间上呈现出恶化(2005—2010年)—改善(2010—2015年)—恶化

(2015—2020年)的变化过程(见图 11 和表 3),4 个时期主要脱钩类型分别为强负脱钩、强负脱钩、扩张负脱钩和强负脱钩。

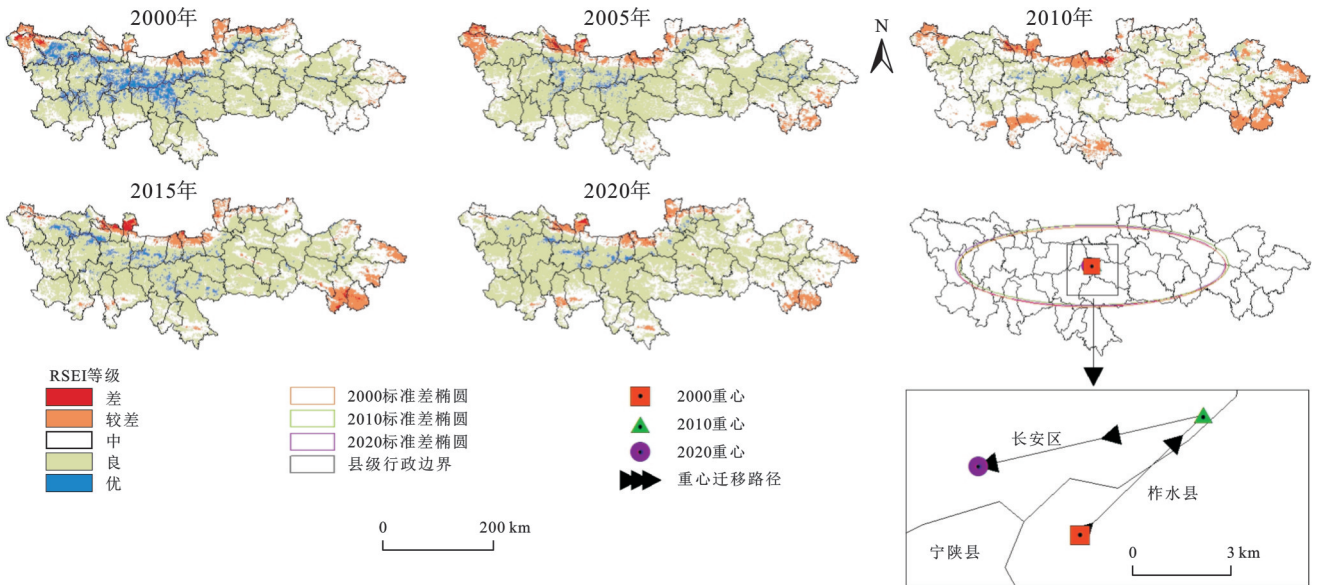


图 10 2000—2020 年大秦岭地区 RSEI 空间分布及标准差椭圆和迁移路径
 Fig. 10 Spatial distribution, standard deviation ellipse, and migration paths of RSEI in Great Qinling Mountains region (2000—2020)

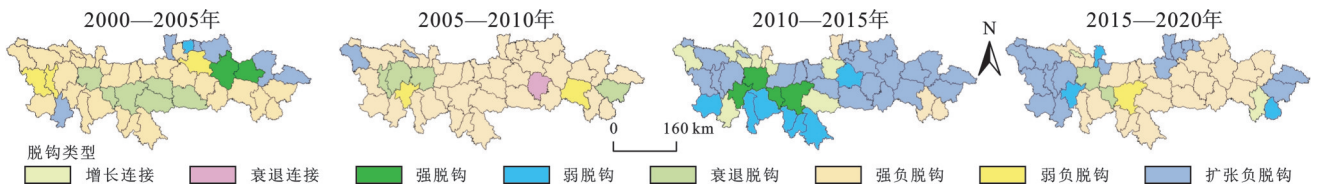


图 11 2000—2020 年大秦岭地区土地利用碳排放与生态环境质量的脱钩关系
 Fig. 11 Decoupling relationship between land use carbon emissions and ecological environment quality in Great Qinling Mountains region (2000—2020)

表 3 大秦岭地区土地利用碳排放与生态环境质量脱钩类型区县数量

Table 3 Number of districts and counties with different decoupling types of land use carbon emissions and ecological environment quality in Great Qinling Mountains region

脱钩类型	脱钩状态	2000—2005年	2005—2010年	2010—2015年	2015—2020年
负脱钩	扩张负脱钩	6	2	22	15
	强负脱钩	27	36	5	22
	弱负脱钩	3	2	—	1
脱钩	衰退脱钩	6	4	—	2
	强脱钩	2	—	4	—
	弱脱钩	1	—	7	3
连接	增长连接	—	—	7	2
	衰退连接	—	1	—	—

注:“—”代表未发现。

2000—2005年地区县域土地利用碳排放与生态环境质量脱钩状况相对较好,但总体情况仍不理想。该时期脱钩县数量为历年第二,但仅有 9 个,占比为 20%,连片分布在秦岭中段海拔较高的县、华阴市和东段的卢氏县、栾川县;绝大多数县处于负脱钩状态,以生态环境质量下降、碳排放提高的强负脱钩类

型为主,数量为 36 个,占比为 60%。

2005—2010年脱钩情况明显恶化,发展模式较不理想,40 个县表现为负脱钩状态,占比为 88.89%,在研究区内广泛分布;仅有 4 个县为脱钩类型,表现为生态环境质量虽有所降低但碳排放减少显著的衰退脱钩类型,分布在中段的两当县、凤县、太白县和

东段的南召县;衰退连接类型的县仅有秦岭中段丹凤县1个,这一时期丹凤县生态环境质量降低且碳排放也减少,二者降低幅度相似。

2010—2015年脱钩关系大幅改变,脱钩县数量为历年最高,达到11个,占比为24.44%,分布在秦岭中段地区;增长连接类型县也有所增加,达到7个,为秦岭西段的秦州区和秦岭中段部分县,这些地区生态环境质量提高的同时碳排放增加,且二者提高幅度相似;负脱钩类型的县数量显著减少至27个,占比为60%,其中强负脱钩类型的县由上一时期36个急剧减少到5个,仅剩秦岭中段的岐山县、临渭区、潼关县和秦岭东段的内乡县、镇平县,扩张负脱钩数量达到22个,在区域内分布广泛,主要是从强负脱钩转变而来,虽然扩张负脱钩不是理想的状态,但是相比较强负脱钩,这一时期土地利用碳排放增加有所放缓,生态环境质量显著提高。

2015—2020年脱钩状况再次发生变化,秦岭西段相对较好,没有强负脱钩类型县。负脱钩类型的县数量重回主导,数量为38个,占比为84.44%,以强负脱钩类型县为主,数量为22个,集中分布在秦岭中段和东段,其次是扩张负脱钩类型,数量为15个,主要分布在研究区西部、东部和北部边缘建设用地和耕地集中分布的县,弱负脱钩类型的县有1个,为中段的宁陕县;脱钩类型的县仅剩5个,其中弱脱钩类型的县有3个,为中段岐山县、留坝县和东段镇平县;衰退脱钩类型的仅有2个县,为秦岭中段的中段太白县和佛坪县;中段金台区和东段内乡县2个县发展为增长连接状态。

4 讨论

4.1 社会经济活动主导了大秦岭地区脱钩关系发展过程

脱钩关系的动态变化反映了区县经济发展、土地政策和自然状况之间复杂的作用关系。王丹等^[34]研究曾指出土地利用变化能够显著影响碳排放空间分布格局。研究区范围内2000—2020年林地面积增加、耕地和草地面积减少,一方面植被覆盖度提高^[35],另一方面多年积累使以NDVI为代表的林地等生态用地的质量不断提升^[36],生态环境质量在2010年后显著改善;但研究区建设用地在2005—2010年和2015—2020年转入显著,20年间使土地利用碳排放量持续增长。从碳排放与生态环境质量关系来看,已有研究^[15,34]也发现碳汇用地减少和建设用地扩张等会使碳排放量增加,进而降低生态系统服务价值,证明了土地利用碳排放与生态系统服务价值呈显著的空间负相关关系,这与本研究中土地利用碳排放与生态环境

质量的脱钩关系在空间上分布相似,研究区北麓、南麓和东部边缘等地势平坦地区的建设用地主要分布县,以负脱钩类型为主,海拔较高的山区部分县以脱钩类型为主;时间上随建设用地增长变化呈“恶化—改善—恶化”的变化过程相契合。在区域整体生态环境质量提升的背景下,脱钩关系显现出的变化特征与空间分布特点与碳排放的形式更为贴近,表明了大秦岭地区近20年间脱钩关系更受人为活动所影响。然而,个别年份生态环境质量的下降可能受气候变化影响,近年来全国气候波动性变化显著^[37],由个别年份气候无序变化传导而引起的生态环境质量变化也是影响脱钩指数数值波动的重要原因,大尺度环境变化对大秦岭地区造成的影响并不能完全忽视。

4.2 建设用地变化是影响脱钩过程的关键

土地建设活动是地区人为影响的综合表现,在一定程度上既反映了经济发展的变化状态,又体现了区域社会建设的基本形式。建设用地作为主要碳源,急剧扩张会加剧土地利用碳排放与生态环境质量之间不平衡的发展关系。与土地利用变化在2005—2010年和2015—2020年的两个剧烈变化时期相对应,碳排放与生态环境质量脱钩关系恶化,进一步表明地区经济和社会发展变化对碳排放和生态环境质量脱钩关系影响较大。再结合土地利用变化、碳排放与生态环境质量的趋势分析可得,2005—2010年时期内,由于快速城市化和经济发展,导致大量土地被开发为建设用地,大量的县转为强负脱钩;而2015—2020年时期再次变化明显,建设用地继续扩张加剧碳排放增长,继而大量的县又转为强负脱钩,尽管得益于退耕还林、自然保护区建设、生态红线划定和违建别墅拆除等多重生态保护措施加强和生态重建政策的共同作用^[25],生态环境质量在2011年恢复后,保持在相对较高的水平,但整个大秦岭地区的脱钩情况在2015—2020年仍在恶化,表明生态环境质量的改善不能跟上建设用地扩张引起的碳排放增长。而从县域层面来看,土地利用变化,特别是建设用地变化与土地利用碳排放和生态环境质量具有较高的关联性^[5,15,26],例如,太白县、留坝县、佛坪县和石泉县等位于秦岭核心区域,海拔较高,建设用地较少,变化缓慢,且植被覆盖率高,碳汇作用强,生态环境质量也相对较好,具备强脱钩的优势;而以建设用地和耕地为主的秦州区、麦积区、陈仓区、金台区、长安区、临渭区、略阳县、汉滨区、鲁山县和镇平县等县域地势平坦,人口相对密集,经济活动较多,能源消耗量大,城市化和经济发展对建设用地需求不断扩大,增加了碳排放,同时对生态环境质量造成一定压力,是

制约区域实现良好脱钩关系的主要障碍。事实上,土地利用碳排放与生态环境质量共同构成一个相互影响和相互作用的系统^[10],过量的碳排放会破坏生态环境质量,而良好的生态环境质量可以提供更多生态系统服务产品缓解碳排放压力。然而研究区建设用地阶段性快速扩张,不仅直接增加了碳排放,还挤占了林地等生态用地,削弱了生态系统的碳汇能力和自我调节功能,从而打破了系统原有的平衡状态,成为导致脱钩关系向恶化转变的关键因素。

4.3 局限性及未来展望

本研究对近20年大秦岭地区县域土地利用碳排放与生态环境质量脱钩关系进行了探究,但仍然存在不足之处。首先,本文主要参考已有研究的碳排放系数估算土地利用直接碳排放量,由于气候差异、土壤条件等差异可能导致结果存在偏差,后续研究可以结合样地观测等多源数据,调整碳排放系数,建立更全面且适用于特定区域的碳排放计算体系。其次,本研究使用的MODIS数据分辨率精度有限,未来的研究可以考虑使用更高分辨率数据集,通过实地调查、走访等获取实证数据来验证研究结果的准确性和科学性,添加如PM_{2.5}、生物丰度等指标综合评价该区生态环境质量。此外,本文从县域尺度对土地利用碳排放与生态环境质量脱钩关系变化进行研究,为了更有效改进脱钩状况,未来的研究可以考虑从其他更多尺度揭示二者的规律与效应,实现人口、经济与生态协调发展。

5 结论与建议

5.1 结论

(1) 2000—2020年大秦岭地区各土地利用类型时空变化显著,以建设用地和林地增加、耕地和草地减少为主要特征,其中建设用地面积呈持续增加趋势,地类转换在2005—2010年和2015—2020年转换剧烈,主要以耕地、林地、草地和建设用地转换为主。

(2) 20年间地区土地利用碳排放总量呈显著上升趋势,从2000年的 1.57×10^7 t增加到2020年 5.31×10^7 t,经历“快速增长—缓慢增长”两个阶段;碳排放总量空间分布规律为秦岭中段>秦岭东段>秦岭西段,碳排放量增速变化空间分布规律为秦岭中段>秦岭西段>秦岭东段;碳排放量重心向西迁移后保持稳定。

(3) 20年间研究区生态环境质量在时间上呈“波动下降—波动上升—波动下降”的演变过程。空间分布上呈“中部好、四周差”的分布特征,生态环境质量重心多年保持稳定。

(4) 从动态脱钩视角分析,2000—2020年大秦岭地区土地利用碳排放与生态环境质量的脱钩关系呈现出“恶化—改善—恶化”的变化过程。所有县的脱钩关系都在变化,空间上负脱钩类型的县占据主导,各县脱钩进程不一,存在显著的县际差异。土地利用碳排放对生态环境质量的潜在威胁较大,应当采取措施及时化解土地利用碳排放大量增加与生态环境质量下降的深刻矛盾。

5.2 建议

因地制宜管理区域土地利用碳排放与提高生态环境质量需要相关政策的推进,本研究提出以下建议:(1) 对于国家批复的生态文明示范区县,如两当县、商州区、石泉县、佛坪县、城固县、留坝县、渭滨区、太白县、凤县、柞水县、嵩县和栾川县,应坚持生态保护优先的原则,以实现强脱钩为目标,各县应该依托自然优势,大力发展旅游业保证经济发展,根据区域资源环境承载力,合理科学控制城镇规模及布局,避免过度推进城镇化造成碳排放量大量增加,从而牺牲生态环境质量。(2) 对于西安都市区的区县,周至县、鄠邑区、长安区、蓝田县、华州区和临渭区,应努力摆脱强负脱钩,提高土地集约利用,积极推动产业转型升级,发展新能源产业,在人口密集区设置绿化用地,建设生态廊道,防范都转为强负脱钩。(3) 对于地级市和中心城区,如秦州区、麦积区、陈仓区、金台区、华阴市、灵宝市和汉滨区,不应过分追求强脱钩,要加强与西安都市区合作,并通过产业转移带动周边其他区县协同发展。(4) 对于其他一般区县,努力实现负脱钩向增长连接和衰退连接过渡,尤其是碳排放量较高的鲁山县,合理控制城市扩张规模,限制高碳排放产业发展,建立碳排放奖惩并举制度,推进生态农业战略,推广节能减排技术,提高公众环境保护意识。

参考文献(References):

- [1] Li X P, Hu S, Jiang L F, et al. Spatiotemporal patterns and the development path of land-use carbon emissions from a low-carbon perspective: a case study of Guizhou Province[J]. *Land*, 2023,12(10):1875.
- [2] 马晓哲,王铮.土地利用变化对区域碳源汇的影响研究进展[J]. *生态学报*,2015,35(17):5898-5907.
Ma X Z, Wang Z. Progress in the study on the impact of land-use change on regional carbon sources and sinks[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015,35(17):5898-5907.
- [3] Sun R, Wu Z X, Chen B Q, et al. Effects of land-use change on eco-environmental quality in Hainan Island, China[J]. *Ecological Indicators*, 2020,109:105777.
- [4] 黎霞,兰小机.环鄱阳湖城市群土地利用碳排放轨迹分析与多情景预测[J]. *环境科学与技术*,2024,47(11):11-21.

- Li X, Lan X J. Trajectory analysis and multi-scenario prediction of carbon emission from land-use of urban agglomeration around Poyang Lake [J]. *Environmental Science & Technology*, 2024,47(11):11-21.
- [5] 郑慧慧,宋月琪,魏宸博,等.阿克苏地区近30年土地利用变化及其生态环境效应研究[J].*中国农业大学学报*, 2025,30(4):217-229.
- Zheng H H, Song Y Q, Wei C B, et al. Land use change and its eco-environmental effect of Aksu region in recent 30 years [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2025,30(4):217-229.
- [6] 张智扬,尹海魁,李新旺,等.河北省县域土地利用碳排放空间格局及协调分区[J].*江苏农业学报*, 2024,40(2):281-292.
- Zhang Z Y, Yin H K, Li X W, et al. Spatial pattern and coordination division of carbon emissions of county land use in Hebei Province [J]. *Jiangsu Journal of Agricultural Sciences*, 2024,40(2):281-292.
- [7] Chen J D, Li Z W, Dong Y Z, et al. Coupling coordination between carbon emissions and the eco-environment in China [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 276: 123848.
- [8] Liu J L, Peng K L, Zuo C C, et al. Spatiotemporal variation of land-use carbon emissions and its implications for low carbon and ecological civilization strategies: evidence from Xiamen-Zhangzhou-Quanzhou metropolitan circle, China [J]. *Sustainable Cities and Society*, 2022,86:104083.
- [9] An M, Xie P, He W J, et al. Local and tele-coupling development between carbon emission and ecologic environment quality [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2023, 394:136409.
- [10] Yang Y J, Li H Y. Spatiotemporal dynamic decoupling states of eco-environmental quality and land-use carbon emissions: a case study of Qingdao City, China [J]. *Ecological Informatics*, 2023,75:101992.
- [11] Zhang X M, Fan H B, Hou H, et al. Spatiotemporal evolution and multi-scale coupling effects of land-use carbon emissions and ecological environmental quality [J]. *Science of the Total Environment*, 2024,922:171149.
- [12] Hasanah A, Wu J. Exploring dynamics relationship between carbon emissions and eco-environmental quality in Samarinda Metropolitan Area: a spatiotemporal approach [J]. *Science of the Total Environment*, 2024, 927:172188.
- [13] Zhang R J, Yu K H, Luo P P. Spatio-temporal relationship between land use carbon emissions and ecosystem service value in Guanzhong, China [J]. *Land*, 2024, 13(1):118.
- [14] 汤峰,殷彦玲,张蓬涛,等.基于土地利用变化的高阳县生态系统服务价值和碳排放风险研究[J].*水土保持研究*, 2019,26(4):265-271.
- Tang F, Yin Y L, Zhang P T, et al. Research on ecosystem service value and carbon emission risk of Gaoyang County based on land use change [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2019,26(4):265-271.
- [15] 付帅,徐炳先,彭雨欣,等.基于土地利用的鄱阳湖流域碳排放与生态系统服务价值时空耦合关系分析[J].*水土保持研究*, 2025,32(3):321-331.
- Fu S, Xu B X, Peng Y X, et al. Analysis of spatiotemporal coupling relationship between carbon emission and ecosystem service value in Poyang Lake Basin based on land use [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2025,32(3):321-331.
- [16] Yang P J, Peng S, Benani N, et al. An integrated evaluation on China's provincial carbon peak and carbon neutrality [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2022,377: 134497.
- [17] 陈田田,陈果,王强.贵州省碳吸收/碳排放时空变化特征及其与经济的脱钩效应 [J].*生态学报*, 2024,44(3): 915-929.
- Chen T T, Chen G, Wang Q. Spatiotemporal change patterns of carbon absorption/emission and decoupling effect with economy in Guizhou Province [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2024,44(3):915-929.
- [18] 王奕淇,黄涵祝.中国碳排放脱钩效应、时空特征与驱动因素 [J].*生态学报*, 2024,44(6):2228-2243.
- Wang Y Q, Huang H Z. Research on the decoupling effect, spatio-temporal characteristics, and driving factors of carbon emissions in China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2024,44(6):2228-2243.
- [19] 王越,赵婧宇,李志学,等.东北三省碳排放脱钩效应及驱动因素研究 [J].*环境科学与技术*, 2019,42(6):190-196.
- Wang Y, Zhao J Y, Li Z X, et al. Study on decoupling effect and driving factors of carbon emission and economic growth in Northeast China [J]. *Environmental Science & Technology*, 2019,42(6):190-196.
- [20] 宁静,王震,杜国明,等.东北地区农业碳排放特征与农业经济的脱钩状态分析 [J].*经济地理*, 2023,43(11): 173-180.
- Ning J, Wang Z, Du G M, et al. Characteristics of agricultural carbon emissions in Northeast China and its decoupling state with agricultural economy [J]. *Economic Geography*, 2023,43(11):173-180.
- [21] Liu X J, Jin X B, Luo X L, et al. Quantifying the spatiotemporal dynamics and impact factors of China's county-level carbon emissions using ESTDA and spatial econometric models [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2023,410:137203.
- [22] 彭建兵,申艳军,金钊,等.秦岭生态地质环境系统研究关键思考 [J].*生态学报*, 2023,43(11):4344-4358.

- Peng J B, Shen Y J, Jin Z, et al. Key thoughts on the study of eco-geological environment system in Qinling Mountains [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43(11): 4344-4358.
- [23] 李君轶,傅伯杰,孙九林,等.新时期秦岭生态文明建设:存在问题与发展路径[J]. *自然资源学报*, 2021, 36(10):2449-2463.
- Li J Y, Fu B J, Sun J L, et al. Ecological civilization construction at Qinling Mountains in the new era [J]. *Journal of Natural Resources*, 2021, 36(10):2449-2463.
- [24] 马新萍,李晶,余玉洋,等.秦岭山地碳中和空间服务范围及其模拟预测[J]. *生态学报*, 2022, 42(23):9431-9441.
- Ma X P, Li J, Yu Y Y, et al. Spatial service scope and simulation prediction of carbon neutralization in Qinling mountains [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(23): 9431-9441.
- [25] 罗旭,王丽霞,张晶,等.秦岭地区生态环境质量时空变化及驱动力分析[J]. *环境科学*, 2025, 46(6):3720-3729.
- Luo X, Wang L X, Zhang J, et al. Spatio-temporal dynamic and driving factor analysis of ecological environment quality in Qinling Mountains [J]. *Environmental Science*, 2025, 46(6):3720-3729.
- [26] 崔国屹,张艳,晁阳,等.秦岭地区近40年土地利用变化及其生态环境效应[J]. *水土保持研究*, 2023, 30(1): 319-326.
- Cui G Y, Zhang Y, Chao Y, et al. Land use change and eco-environmental effects in Qinling Mountains in recent 40 years [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2023, 30(1):319-326.
- [27] Zhang Y B, Wang Y Z, Phillips N, et al. Integrated maps of biodiversity in the Qinling Mountains of China for expanding protected areas [J]. *Biological Conservation*, 2017, 210:64-71.
- [28] 徐涵秋.利用改进的归一化差异水体指数(MNDWI)提取水体信息的研究[J]. *遥感学报*, 2005, 9(5):589-595.
- Xu H Q. A study on information extraction of water body with the modified normalized difference water index (MNDWI) [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2005, 9(5):589-595.
- [29] Li J F, Han J C, Zhang Y, et al. Decoupling characteristics of county-level land use carbon emissions and ecological environment quality at spatiotemporal scales: A case study of Shaanxi Province, China [J]. *International Journal of Digital Earth*, 2024, 17(1):2436494.
- [30] 曹周亮,张欣蓉,员学锋,等.基于土地利用变化的陕西省县域碳排放时空变化及影响因素研究[J]. *水土保持通报*, 2022, 42(5):376-385.
- Cao Z L, Zhang X R, Yuan X F, et al. Spatio-temporal variation and influencing factors of CO₂ emission at county scale in Shaanxi Province based on land use change [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2022, 42(5):376-385.
- [31] Shi S F, Peng S Y, Lin Z Q, et al. Analysis of ecological environment quality heterogeneity across different landform types in Myanmar and its driving forces [J]. *Ecological Indicators*, 2024, 168:112755.
- [32] 王婉,张浩斌,宋好婧,等.宁夏西海固九县区遥感生态质量变化及驱动分析[J]. *测绘科学*, 2024, 49(6):106-125.
- Wang W, Zhang H B, Song Y J, et al. Remote sensing-based ecological quality change and driver analysis for nine counties of Xi-Hai-Gu area, Ningxia, China [J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2024, 49(6): 106-125.
- [33] 韩磊,高毅丰,常钰卿,等.黄土高原城镇化与生态系统服务脱钩关系[J]. *生态学报*, 2024, 44(20):9108-9121.
- Han L, Gao Y F, Chang Y Q, et al. Decoupling relationship between urbanization and ecosystem services on the Loess Plateau [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2024, 44(20):9108-9121.
- [34] 王丹,荆延德,韩善梅,等.基于格网的南四湖流域土地利用碳排放与其生态系统服务价值时空关系分析[J]. *生态学报*, 2022, 42(23):9604-9614.
- Wang D, Jing Y D, Han S M, et al. Spatio-temporal relationship of land-use carbon emission and ecosystem service value in Nansi Lake Basin based upon a grid square [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(23):9604-9614.
- [35] 赵侃,师芸,牛敏杰. Google Earth Engine 平台下秦岭地区植被覆盖时空变化分析[J]. *测绘通报*, 2022(5):49-55.
- Zhao K, Shi Y, Niu M J. Research on the temporal and spatial changes of vegetation coverage in Qinling mountains based on Google Earth Engine platform [J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2022(5):49-55.
- [36] 汲玉河,周广胜,王树东,等.2000—2019年秦岭地区植被生态质量演变特征及驱动力分析[J]. *植物生态学报*, 2021, 45(6):617-625.
- Ji Y H, Zhou G S, Wang S D, et al. Evolution characteristics and its driving forces analysis of vegetation ecological quality in Qinling Mountains region from 2000 to 2019 [J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2021, 45(6):617-625.
- [37] 曹晴,郝振纯,傅晓洁,等.1960—2017年中国极端气候要素时空变化分析[J]. *人民黄河*, 2020, 42(2):11-17.
- Cao Q, Hao Z C, Fu X J, et al. Analysis of spatial-temporal changes of extreme climatic elements in China from 1960 to 2017 [J]. *Yellow River*, 2020, 42(2):11-17.