

# 宁夏土地利用碳排放强度时空变化与效应

贾科利, 李浩宇, 刘瑞亮, 李小雨, 杨思雨

(宁夏大学 地理科学与规划学院, 宁夏 银川 750021)

**摘要:** [目的] 土地利用变化是影响碳排放和环境质量的重要驱动力之一。研究土地利用碳排放时空格局变化与效应,为制定低碳发展策略提供理论依据。[方法] 基于灰色理论和生态承载系数,利用1980—2020年宁夏回族自治区22个县区土地利用和能源消耗数据,分析了土地利用变化与碳排放强度变化及效应。[结果] ①碳排放变化量与土地利用变化之间具有密切的关联性。其中,建设用地与碳排放的关联度最大,为0.95。②1980—2020年宁夏土地利用类型碳排放量净增加了 $5.24 \times 10^7$  t,增幅625.43%。建设用地面积以年均4.42%的速率增长,碳排放量增幅达2385.85%;草地面积减少了 $2.95 \times 10^5$  hm<sup>2</sup>,碳汇量减少了 $5.80 \times 10^4$  t;林地对碳汇的贡献超过75%,且随林地面积的不断增大而增加。③1980—2020年宁夏土地利用碳排放强度以年均0.25 t/hm<sup>2</sup>的速率增大,中度及以上等级覆盖面积逐渐增大,在空间上形成沿黄城市碳排放强度高于中、南部的分布格局。④宁夏各县区碳排放生态承载系数空间差异明显,碳生态容量表现出北弱南强的分布格局。[结论] 1980—2020年宁夏土地利用碳排放强度逐渐增大,北部沿黄河各县区碳生态容量逐渐减小,中南部县区碳生态容量增大,但减排压力较大。建议优化建设用地空间格局,增加混交林面积,增强森林碳汇能力。

**关键词:** 土地利用; 碳排放; 灰色理论; 生态承载系数; 宁夏回族自治区

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2023)05-0312-08

中图分类号: F301.2, X32

**文献参数:** 贾科利, 李浩宇, 刘瑞亮, 等. 宁夏土地利用碳排放强度时空变化与效应[J]. 水土保持通报, 2023, 43(5): 312-319. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2023.05.037; Jia Keli, Li Haoyu, Liu Ruiliang, et al. Spatial-temporal evolution characteristics of land use carbon emissions in Ningxia Hui Autonomous Region [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023, 43(5): 312-319.

## Spatial-temporal Evolution Characteristics of Land Use Carbon Emissions in Ningxia Hui Autonomous Region

Jia Keli, Li Haoyu, Liu Ruiliang, Li Xiaoyu, Yang Siyu

(College of Geographical Sciences and Planning, Ningxia University, Yinchuan, Ningxia 750021, China)

**Abstract:** [Objective] Land use change is one of the important driving forces for increasing carbon emissions and the environmental quality. The temporal and spatial pattern changes and effects of land use carbon emissions were analyzed in order to provide a theoretical basis for the formulation of low-carbon development strategies. [Methods] The internal relationships between land use changes and carbon emissions, carbon emission intensity and ecological effect were determined based on gray theory and ecological carrying coefficient by using land use and energy consumption data for 22 counties in Ningxia Hui Autonomous Region from 1980 to 2020. [Results] ① There was a close correlation between carbon emission changes and land use changes. The correlation between construction land and carbon emissions was the largest (0.95). ② Net carbon emissions of land use types in Ningxia increased by  $5.24 \times 10^7$  t and had a growth rate of 625.43% from 1980 to 2020. This pattern was associated with significant increases in construction land area and carbon emissions (average annual rates of 4.42% and 2385.85%, respectively) during the period of 1980—2020. Additionally, grassland area decreased by  $2.95 \times 10^5$  hm<sup>2</sup>, and the carbon sink decreased by  $5.80 \times 10^4$  t. Forest land was the main carbon sink, accounting for more than 75% of the carbon sink in 2020, and

收稿日期: 2023-03-21

修回日期: 2023-05-09

资助项目: 国家自然科学基金项目“旱寒灌区土地利用与土壤盐渍化风险互耦合关系研究: 以银川平原为例”(42061047); 宁夏自然科学基金项目“土地利用视角下宁夏碳排放效应及时空演变研究”(2022AAC03119)

第一作者: 贾科利(1975—), 男(汉族), 陕西省宝鸡市人, 博士, 教授, 主要从事土地资源利用与3S技术应用研究。Email: jiakeli@nxu.edu.cn.

increased with increasing area. ③ The carbon emission intensity of land use in Ningxia increased at an average annual rate of  $0.25 \text{ t/hm}^2$  from 1980 to 2020, and the coverage area of moderate and above grades increased gradually. A spatial distribution pattern of carbon emission intensity for cities along the Yellow River developed higher than observed for the central and southern regions. ④ Due to differences in county economic level and natural environment, the spatial differences in ecological support coefficients of carbon emissions for the 22 counties in Ningxia was obvious, and the distribution pattern of carbon sink capacity was weak in the north and strong in the south. [Conclusion] The carbon emission intensity of land use in Ningxia gradually increased from 1980 to 2020. The carbon ecological capacity of counties along the Yellow River in the north gradually decreased. The carbon ecological capacity of counties in the central and southern regions increased, but the pressure of emission reduction was greater. We recommend optimizing the spatial pattern of construction land, increasing the area of mixed forests, and enhancing forest carbon sink capacity.

**Keywords:** land use; carbon emissions; gray theory; ecological support coefficient; Ningxia Hui Autonomous Region

土地利用变化对陆地碳循环过程产生重要影响<sup>[1-2]</sup>,被认为是全球和区域碳排放变化的关键驱动力之一<sup>[3]</sup>。据估算,1850年以来,土地利用/覆被变化产生的直接碳排放量约占人类活动碳排放总量的三分之一<sup>[4]</sup>。1992—2015年土地利用变化直接导致的碳排放量达到  $2.65 \times 10^{10} \text{ t}$ <sup>[5]</sup>。政府间气候变化专门委员会第六次评估第三组报告指出,农业、林业和其他土地利用可以做到大规模的减排,以及大规模清除并储存  $\text{CO}_2$ <sup>[6]</sup>。因此,研究土地利用碳排放强度时空格局变化,对“双碳”背景下制定节能减排措施,促进区域协调可持续发展具有重大意义<sup>[7]</sup>。

近年来,国内外学者利用多因素分析法、迪氏对数指标分解法(LMDI)、STIRPAT模型、Laspeyres指数法、IPAT模型等方法,分析土地利用碳排放强度时空差异<sup>[8-9]</sup>,探讨土地利用碳排放影响因素和驱动机制<sup>[10-12]</sup>及效应<sup>[13-14]</sup>,探究区域土地利用变化与碳排放空间差异与相关性,为厘清碳排放效益和机理提供了理论与技术方法,具有重要的科学价值,对于制定区域低碳发展策略具有重要的实践意义<sup>[15]</sup>。然而,大多研究侧重于土地利用类型碳排放测算方法、评价模型及对生态系统碳排放的影响因素研究,利用县域数据探讨土地利用碳排放格局时空差异研究较少;而利用县级单元数据研究区域碳排放格局及异质性,对于制定合理有效的碳减排政策至关重要<sup>[16]</sup>。为此,本文选取西部地区经济增长较快的宁夏回族自治区(以下简称“宁夏”)为研究区,研究土地利用碳排放强度时空格局与效应。尽管郑永超等<sup>[17]</sup>研究了2000—2016年宁夏土地利用碳排放效应,但未从县域尺度研究土地利用碳排放差异;Guan Yang等<sup>[18]</sup>虽然分析了宁夏县域能源消费  $\text{CO}_2$  排放的异质性,但未研究土地利用变化与  $\text{CO}_2$  排放的关系。受西部大开发、退耕还林还草等政策的宏观调控,宁夏社会

经济快速发展,土地利用发生显著变化<sup>[19]</sup>;并且宁夏地处中国能源“金三角”,能源消费从1980年的  $3.20 \times 10^6 \text{ t}$  标准煤增长到2020年  $8.58 \times 10^7 \text{ t}$  标准煤<sup>[20]</sup>,年均增长 64.54%。因此,本文利用宁夏各县区1980—2020年土地利用数据,分析县域碳排放与土地利用变化的内在联系及时空分异特征,探讨土地利用变化碳排放强度的空间异质性及碳生态容量,以期作为“两型社会”建设过程中构建低碳型土地利用结构提供决策参考。

## 1 研究区概况

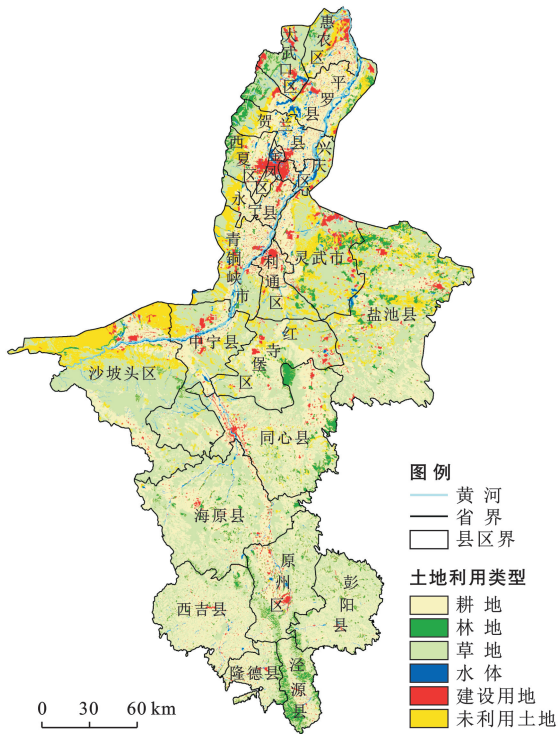
宁夏位于黄河上游,地处东经  $104^\circ 17' - 107^\circ 39'$ ,北纬  $35^\circ 14' - 39^\circ 23'$ ,东连陕西、南接甘肃、北与内蒙古自治区接壤,土地面积  $6.64 \times 10^4 \text{ km}^2$ ,辖 5 市 22 个县区。地势南高北低,南北狭长,相距约 450 km。南部以黄土地貌为主,中北部以干旱剥蚀、风蚀地貌为主,北部为冲积平原,平均海拔超过 1 000 m。宁夏属大陆性气候,多年平均气温  $5.3 \sim 9.9 \text{ }^\circ\text{C}$ ,年均降水量在 195~268 mm 之间。黄河穿境而过,平原地区湖泊密布。2020年,宁夏地区生产总值  $3.92 \times 10^{11}$  元,林覆盖率 15.8%,城镇化率 64.96%。土地利用类型包括耕地、林地、草地、建设用地、水体和未利用土地(图 1),其中以草地和耕地为主,约占总面积的 44.5% 和 33.5%。

## 2 数据与方法

### 2.1 数据来源与处理

研究使用的 1980,1990,2000,2010,2020 年土地利用数据来源于中国科学院资源环境科学与数据中心数据平台(<http://www.resdc.cn>),空间分辨率为 30 m,土地利用类型包括耕地、林地、草地、水体、建设用地和未利用土地这 6 个一级类型。能源消耗数据来源于 1981—2021 年《宁夏统计年鉴》及各县市统

计年鉴。各县行政区划边界以 2020 年行政边界为基准,对行政调整了县区,间接碳排放数据按当年该县 GDP 占所在市 GDP 比重进行了分割。



注:该图基于宁夏标准地图在线服务网站下载的审图号为宁S(2022)第 001 号的标准地图制作,底图边界无修改。下同。

图 1 宁夏回族自治区土地利用状况

Fig.1 Land use condition of Ningxia Hui Autionomous Region

## 2.2 研究方法

2.2.1 土地利用碳排放计算 对耕地、林地、草地、水体和未利用土地碳排放量采用直接排放法进行估算,建设用地通过能源消耗产生的碳排放量来间接计算。

(1) 直接碳排放量计算式为<sup>[1,13]</sup>:

$$C = \sum_{i=1}^n S_i \times E_i \quad (1)$$

式中: $C$  为碳排放总量; $i$  为土地利用类型( $i=1,2,3,4,5$ ); $S_i$  为第  $i$  种用地类型对应的面积; $E_i$  为第  $i$  种用地类型碳排放系数,参考已有研究成果<sup>[9,10,12,16]</sup>,耕地、林地、草地、水体和未利用土地碳排放系数分别取 0.497 0, -0.581 0, -0.020 5, -0.025 3, -0.000 5 kg/(m<sup>2</sup>·a)。

(2) 间接碳排放计算式为<sup>[1,13]</sup>:

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

式中: $C_e$  为建设用地总碳排放量; $B_i$  为第  $i$  种能源消费量; $E_i$  为第  $i$  种能源的碳排放系数; $D_i$  为第  $i$  种能源的折标准煤系数; $n$  为能源类型数量; $i$  为能源类型。结合宁夏实际,考虑到数据的可靠性,根据《宁夏统计年鉴》,煤炭、石油、天然气、一次电力及其

他能源为主要类型,且已转换成标准煤,故计算过程仅考虑煤炭碳排放系数,煤炭碳排放系数取 0.68 t/t 标准煤<sup>[21]</sup>。

2.2.2 灰色关联度分析 灰色关联度理论是被广泛应用于定量分析因素间关联程度的方法,非常适合系统动态历程分析。本文采用灰色关联度计算土地利用变化与碳排放量的灰色关联度。我们以碳排放量变化、各土地利用类型面积变化为参数,计算土地利用变化与碳排放关联系数。灰色关联度模型计算原理见严慈等<sup>[21]</sup>研究。

2.2.3 土地利用碳排放强度 采用单位面积碳排放量测度土地利用类型碳排放强度,反映碳排放情况。参考相关研究方法<sup>[22]</sup>,计算式为:

$$CI = \frac{\sum_{i=1}^n C_{ij} / S_{ij}}{S_{ij}} \quad (3)$$

式中: $CI$  为土地利用碳排放强度(t/hm<sup>2</sup>); $C_{ij}$  为第  $j$  个县区第  $i$  种土地利用类型碳排放量(t); $S_{ij}$  为第  $j$  个县区第  $i$  种土地利用类型面积(hm<sup>2</sup>)。

2.2.3 土地利用碳排放效应 利用生态承载系数(ecological support coefficient, ESC)测度碳生态容量,反映区域碳汇能力强弱。ESC 表示区域碳汇量占全域碳汇量的比例与该区域碳排放量占全域碳排放量比例的商<sup>[23]</sup>。计算公式为:

$$ESC = \frac{E_i / C_i}{E / C} \quad (4)$$

式中: $ESC$  为生态承载系数; $C_i, E_i$  分别表示县域单元碳排放量(t)和吸收量(t); $C$  和  $E$  分别表示全区碳排放总量(t)和碳汇总量(t)。ESC>1 表示该县区碳汇比率大于碳排放比率,对吸收碳排放具有积极作用,意味着较强的碳汇能力;反之,对碳排放的吸纳作用低,碳汇能力较弱。

## 3 结果与分析

### 3.1 土地利用变化与碳排放关联分析

运用灰色关联度模型对宁夏土地利用类型面积变化量与碳排放变化量进行关联计算(表 1)的结果表明,各土地利用类型与碳排放变化量之间关联度较高,关联度大小次序为:建设用地>耕地>草地>林地>水体>未利用土地。其中,建设用地、耕地与碳排放的关联度较大,说明建设用地和耕地是碳排放最大的碳源。受城市化进程加快、人口及经济增长影响,耕地、林地、草地等用地类型向建设用地转化,且耕地、建设用地承载了居民生产、生活和产业发展,成为能源消费的主要场所,是影响碳排放的主要碳源。林地和草地能增加植物体碳储存量,对碳吸收具有较

强影响,是碳汇的主要用地类型,与碳排放具有较高的关联度。

表 1 宁夏碳排放量与土地利用类型关联度

Table 1 Correlation between land use types and carbon emissions in Ningxia

土地利用类型	关联度
耕地	0.944
林地	0.931
草地	0.941
水体	0.864
建设用地	0.950
未利用地	0.855

### 3.2 碳排放与土地利用变化分析

土地利用碳排放由碳源和碳汇两方面组成,碳源是耕地和建设用地的碳排放量,为正值;碳汇为林地、草地、水体和未利用地的碳吸收量,为负值。由图 2 可知,1980—2020 年宁夏土地利用碳排放量增加了  $5.26 \times 10^7$  t,增幅 514.91%;碳汇量以年均 0.31% 的速率增加了  $2.34 \times 10^7$  t;净碳排放增加了  $5.24 \times 10^7$  t,增幅达 625.43%。植树造林、禁牧、退耕还湿等措施的实施,对碳汇增加起到了显著作用。由于碳汇土地总面积减少了 6.58%,加之宁夏处于干旱、半干旱地区,草地类型以荒漠草原为主,碳吸收能力弱,且能源消耗大幅增加,到 2020 年碳排放总量是其碳汇总量的 30 倍。

从不同土地利用类型看,耕地碳排放量随耕地面积的增减而变化,呈先增加后减少,总体呈增加趋势,表现出明显的阶段性(图 3a)。其中,1980—2000 年耕地面积以年均 0.73% 的速率增加,面积增加了  $1.32 \times 10^5$   $\text{hm}^2$ ,碳排放量增加了  $1.17 \times 10^6$  t,增幅 14.6% (图 3b)。2000 年后,耕地面积逐渐减小,碳排放量显

著降低。主要是 20 世纪 80 年代以来,为缓解人口增长与粮食需求矛盾,填湖造田,扩整灌渠,兴建青铜峡、沙坡头等水利枢纽及固海、盐环定扬黄灌溉工程建设,使宁夏平原及中部山间平原、河谷平原的荒原和“撞田”变成了新灌区<sup>[24]</sup>,耕地面积显著增加。随着退耕还林、还草等政策的实施及城市化快速发展,耕地向林地、草地、建设用地等转化,面积逐渐减少,碳排放随之降低。建设用地以年均 4.42% 的速率增大,1980—2020 年增加了  $1.58 \times 10^5$   $\text{hm}^2$ ,增幅达 176.87% (图 3a);碳排放量增加了  $5.20 \times 10^7$  t,增幅高达 2 385.85% (图 3b)。特别是 2000 年后,建设用地取代耕地成为主要碳源,碳排放比例由 2000 年的 39.25% 提升到 2020 年的 86.15%,年均增加碳排放  $2.41 \times 10^6$  t。由于宁夏经济社会快速发展,城镇化水平由 2000 年的 32.54% 提高到 2020 年的 64.96%,能源消耗快速增长,导致建设用地间接碳排放大幅增加。

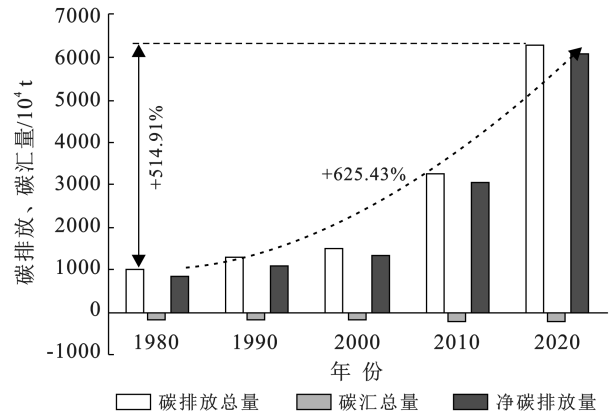


图 2 1980—2020 年宁夏土地利用碳排放、碳汇总量  
Fig.2 Total carbon emissions and carbon sinks of land use in Ningxia from 1980 to 2020

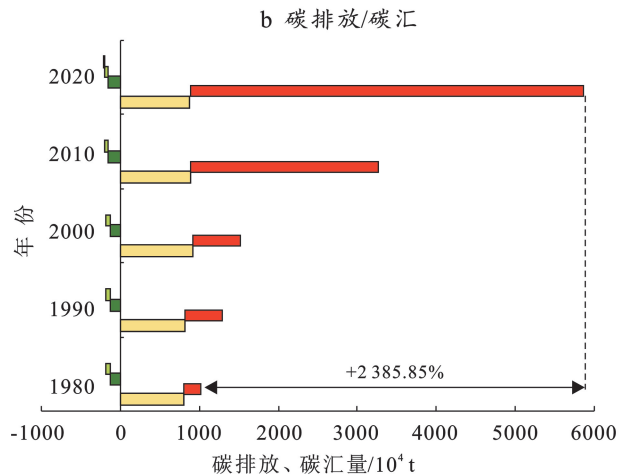
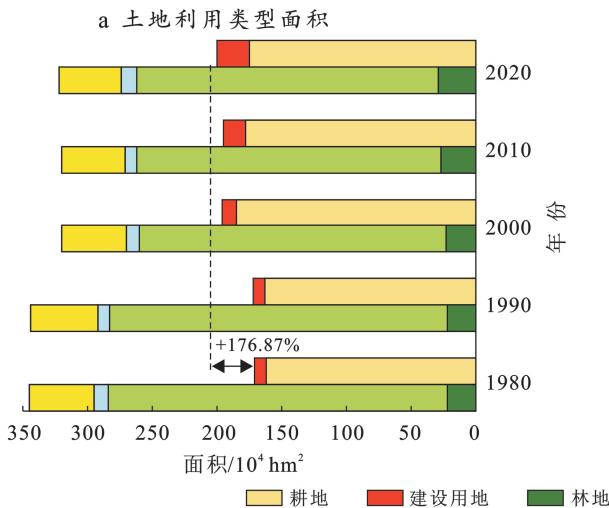


图 3 1980—2020 年宁夏不同土地利用类型面积与碳排放、碳汇量(负值)变化

Fig.3 Area and carbon emissions/carbon sinks changes of different land types in Ningxia from 1980 to 2020

草地是面积占比最大的土地利用类型,面积比例超过 44%,但碳汇比例较小,不足碳汇总量的 24%,且研究期内随草地面积的减小呈递减趋势,40 a 来面积减少了  $2.95 \times 10^5 \text{ hm}^2$  (图 3a),碳汇量减少了  $5.80 \times 10^4 \text{ t}$  (图 3b)。林地覆盖了不足 6%的土地面积 (图 3a),但贡献了 75%以上的碳汇量 (图 3b),且随林地面积的不断增大而增加,到 2020 年,林地碳汇密度达  $0.53 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 。水体、未利用土地面积较小,碳汇占比比较小,碳汇作用较弱 ( $<1.5\%$ )。

### 3.3 土地利用碳排放与碳汇强度变化

根据公式(3),计算 1980—2020 年宁夏土地利用碳排放强度,结果见图 4。40 a 来碳排放强度呈显著增大趋势,年均增速为  $0.25 \text{ t}/\text{hm}^2$ 。特别是 2000—2020 年,碳排放强度呈线性急剧增大,增长率达 350.45%,年均增加  $0.45 \text{ t}/\text{hm}^2$ 。

为进一步探究土地利用碳排放强度空间格局变化,通过计算宁夏各县区碳排放强度,并在 ArcGIS

软件中,采用断点分级法将土地利用碳排放强度从低到高划分为 5 级 (图 5):轻度排放 ( $\leq 1.31 \text{ t}/\text{hm}^2$ )、低度排放 ( $1.31 \sim 3.15 \text{ t}/\text{hm}^2$ )、中度排放 ( $3.15 \sim 11.81 \text{ t}/\text{hm}^2$ )、高度排放 ( $11.81 \sim 21.04 \text{ t}/\text{hm}^2$ ) 和重度排放 ( $>21.04 \text{ t}/\text{hm}^2$ )。

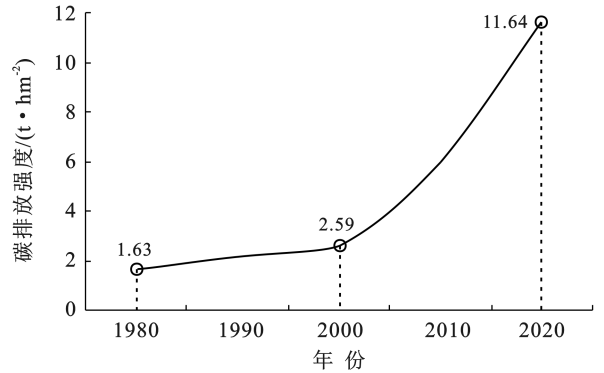


图 4 1980—2020 年宁夏土地利用碳排放强度  
Fig.4 Carbon emission intensity of land use in Ningxia from 1980 to 2020

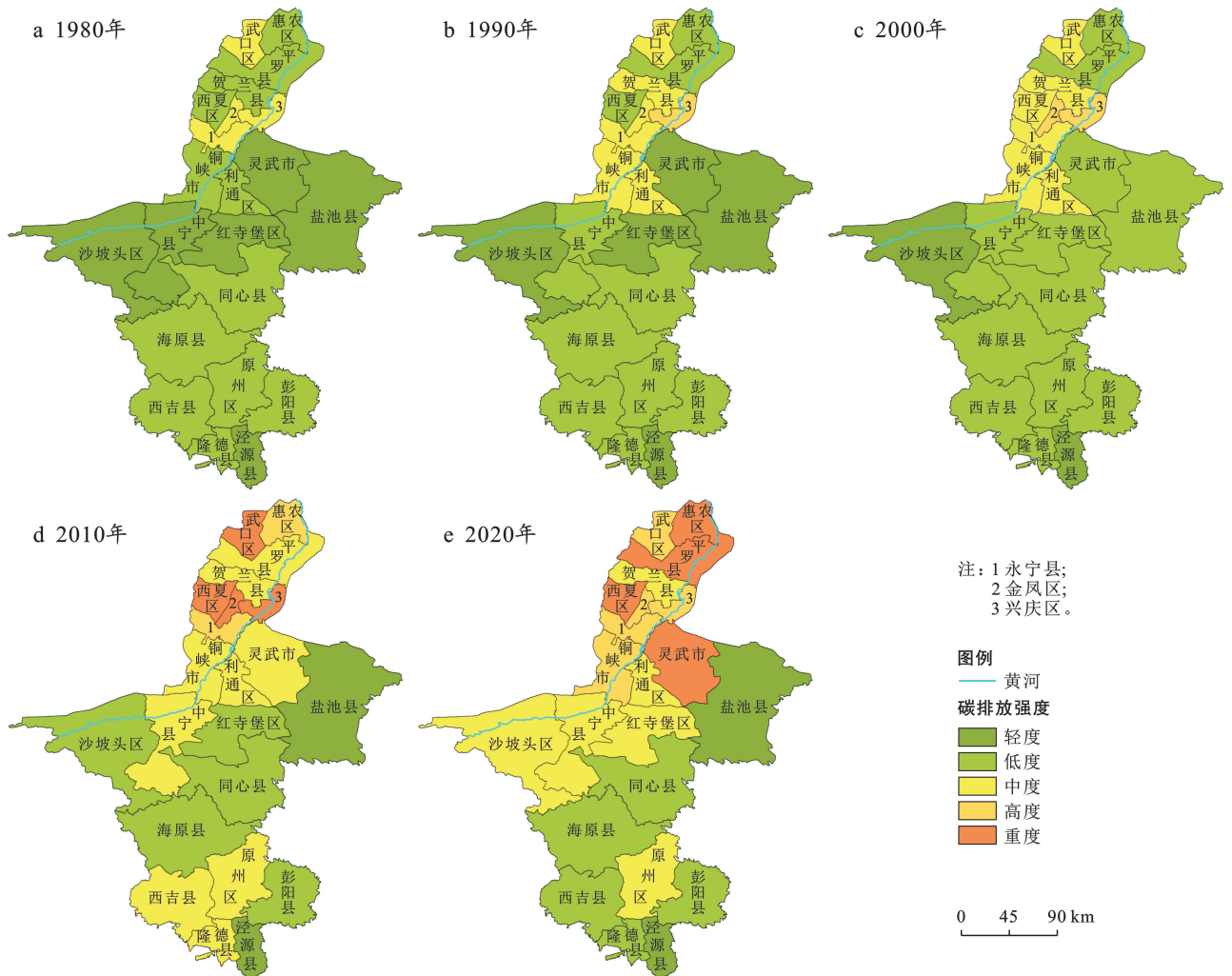


图 5 1980—2020 年宁夏土地利用碳排放强度空间格局

Fig.5 Spatial pattern of carbon emission intensity of land use in Ningxia from 1980 to 2020

由图 5 可知,1980—2000 年,宁夏 85.12% 的土地面积为轻度、低度碳排放覆盖。随着经济的发展,土地开发强度增加,各县区碳排放均呈增加态势。其中,中宁县、红寺堡区、灵武市和盐池县土地利用碳排放强度由轻度向低度转化;西夏区、贺兰县、青铜峡市和利通区转化为中度碳排放;兴庆区和金凤区达到高度碳排放强度。2000—2020 年,土地利用碳排放中度强度以上覆盖面积达到 48.89% 以上,呈增加趋势。其中,中北部沿黄县区碳排放强度快速增加,到 2020 年普遍达到中度以上碳排放强度(图 5e),原州区因是固原市的政治、经济、文化中心,土地开发强度的增大使土地利用碳排放强度达到中度等级。

总体上,1980—2020 年宁夏土地利用碳排放轻度、低度等级覆盖面积不断减小,中度以上等级覆盖面积逐渐增大,在空间上形成沿黄城市碳排放强度高于中、南部的分布格局,这与宁夏沿黄经济区城市带发展水平基本一致。2005 年,宁夏实施沿黄城市带

建设的发展战略,且沿黄城市又处于“呼包银兰”经济带,集中了全区 90% 以上的水资源和约  $6.48 \times 10^5 \text{ hm}^2$  的耕地,资源丰富,交通发达,助力区域经济发展,使全区 92.43% 的能源消费集中在沿黄城市带,导致建设用地间接碳排放显著增加。

### 3.4 土地利用碳排放效应分析

利用公式(4)计算各县区生态承载系数 ESC,结果如图 6 所示。宁夏各县区 ESC 空间差异较为明显,表现出北弱南强的分布格局。1980—2020 年北部沿黄县区 ESC 逐渐减小,到 2020 年除贺兰县和大武口区外,沿黄河其他县区 ESC 普遍降低到 0.5 以下,说明这些县区碳排放比例超过了碳吸收比例,对碳排放的吸纳作用小,表现出较弱的碳汇能力;中南部县区 ESC 普遍增大到 1.0 以上,表明这些县区碳吸收比率大于碳排放比率,对碳排放的吸纳作用增大,有较强的碳汇能力及相对较低的碳排放强度,碳生态容量显著增强。

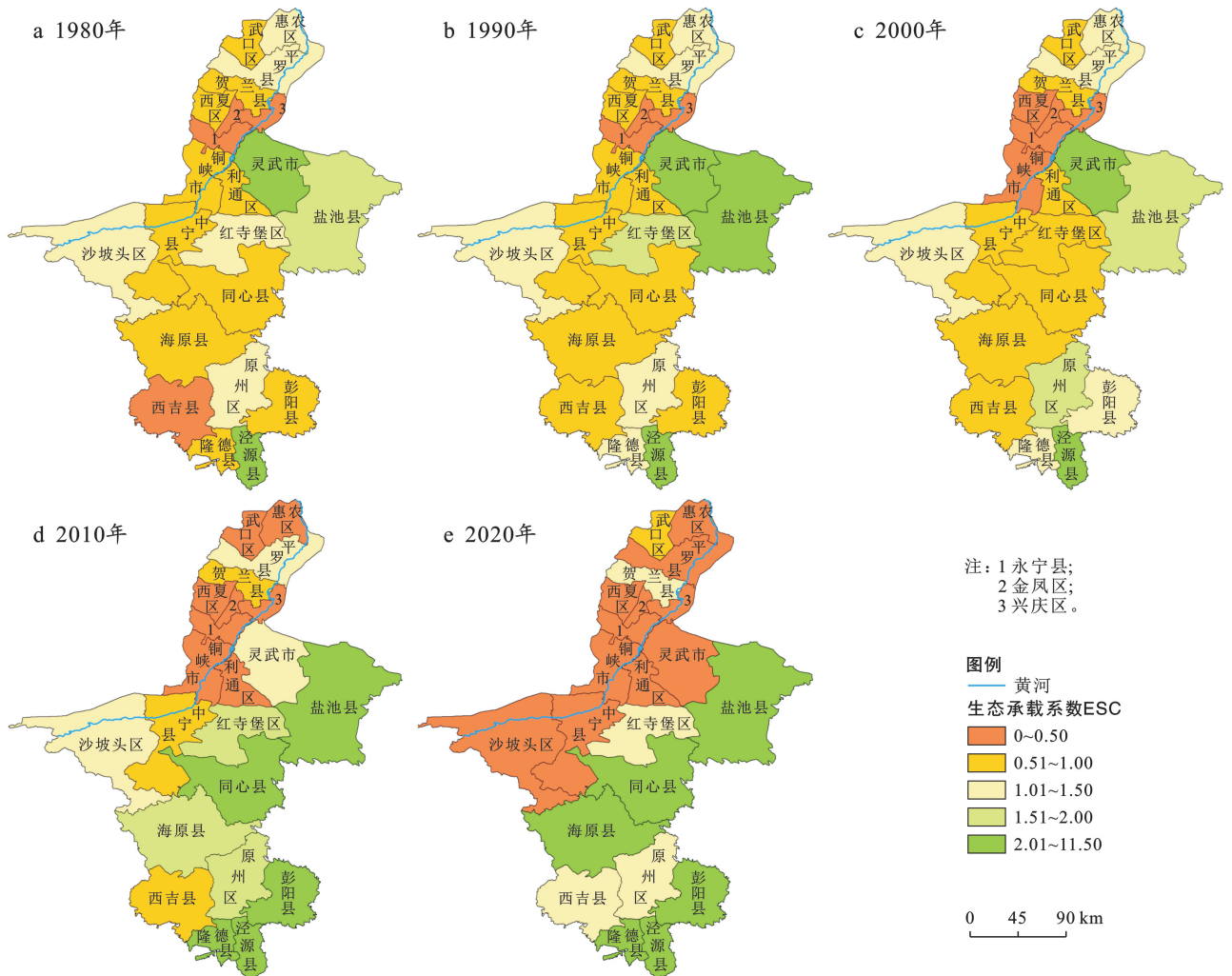


图 6 1980—2020 年宁夏土地利用碳排放效应空间格局

Fig.6 Spatial pattern of carbon emission effect of land use in Ningxia from 1980 to 2020

由于县域经济水平和自然环境差异,北部各县区处于沿黄经济区,区位优势明显,且黄河穿境而过,水土条件优越,交通发达,经济发展迅速,建设用地和耕地大幅增长<sup>[25]</sup>,土地利用碳排放增加显著。中南部各县地处黄土高原及荒漠草原区,在各种生态恢复措施的实施下,林、草地面积显著增加,碳生态容量增大,碳汇能力明显提升,且受区位影响,经济发展相对缓慢,间接碳排放相对较少,显示出较强的碳汇能力。

## 4 讨论与结论

### 4.1 讨论

土地利用变化引起的碳排放是全球碳收支中最不确定的因素之一<sup>[26]</sup>,但作为第二大碳排放源<sup>[27]</sup>,对实现“双碳”目标具有重要作用。因此,监测区域长期土地利用碳排放是实施和制定区域碳减排策略的科学依据。由于土地利用碳排放受到经济、技术、工业、城市化等因素的共同影响,尚未形成统一的土地利用碳排放核算方法。目前,土地利用碳排放核算从宏观尺度上常用的方法有模型模拟法、遥感估测法、碳排放系数法和因素分解法等;从微观尺度上有实测法、样地调查法等,其中碳排放系数法是宏观尺度上常用的测算方法。该方法是政府间气候变化专门委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)发布的《2006年IPCC国家温室气体清单指南》和中国发布的《省级温室气体清单编制指南》<sup>[2]</sup>中提供的核算方法,已被广泛用于全球、国家、省、市等不同尺度碳排放核算<sup>[1,5,7,11,13,15-16,19,22]</sup>。本文采用碳排放系数法,通过核算宁夏土地利用碳排放量,对1980—2020年宁夏土地利用碳排放强度时空格局进行分析,可为制定区域土地利用减排措施提供参考。

研究表明,宁夏土地利用变化与碳排放具有较高的关联性,且建设用地和耕地与碳排放的关联度较大,是碳排放增加的重要源头,这与已有其他省区研究结论<sup>[1,8,10,21]</sup>较为一致。并且,宁夏及各县区土地利用碳排放强度逐渐增大,在空间上形成沿黄河沿线县区碳排放强度高于中、南部县区;碳汇强度空间分布表现出北弱南强的分布格局。这种格局的形成主要是2000年以来,宁夏经济快速发展,建设用地面积扩张迅速,能源消耗快速增长,导致碳排放量大幅增加。尽管宁夏草地面积占比超过总土地面积的44%,但因地处于干旱半干旱区,并以荒漠草原为主,碳汇能力较弱;虽然林地贡献了75%以上的碳汇量,但面积小,分布不均,碳汇密度远低于全球森林平均固碳量 $[7.4 \text{ t}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})]$ <sup>[28]</sup>,难以吸纳建设用地、耕地的碳排放量,减排压力较大<sup>[29]</sup>。因此,本文建议宁夏在

推进黄河流域生态保护和高质量发展先行区建设中,一是优化建设用地空间格局,提高建设用地效率,尤其是沿黄河各县区,减少传统能源消耗,提高能源利用效率,促进城市建设向集约化、绿色化发展,助力降低碳排放强度;二是加强耕地管理,改善土壤结构,增加土壤有机碳含量,降低耕地碳排放,提升土壤碳汇能力;三是在坚持“适地适树”<sup>[30]</sup>原则下,着力增加混交林面积,提高森林净生产力,增强森林碳汇能力。

### 4.2 结论

(1) 碳排放变化量与土地利用变化之间具有密切的关联性,大小次序为:建设用地>耕地>草地>林地>水体>未利用土地。其中,建设用地与碳排放的关联度最大,为0.95,是碳排放最大的碳源;林地和草地变化与碳排放具有较高的关联度,是碳汇的主要用地类型。

(2) 1980—2020年宁夏土地利用碳排放量净增 $5.24 \times 10^7 \text{ t}$ ,增幅625.43%。建设用地面积以年均4.42%的速率增长,到2020年,碳排放量占碳排放总量的86.15%,是碳排放增加的主要源头。草地面积减少了 $2.95 \times 10^5 \text{ hm}^2$ ,碳汇量减少了 $5.80 \times 10^4 \text{ t}$ ;林地对碳汇的贡献超过75%,且随林地面积的不断增大而增加。

(3) 1980—2020年宁夏土地利用碳排放强度呈增大趋势,特别是2000—2020年,碳排放强度呈线性急剧增大,增幅达350.45%。轻度、低度碳排放等级覆盖面积不断减小,中度及以上等级覆盖面积逐渐增大,在空间上形成沿黄城市碳排放强度高于中、南部的分布格局。

(4) 宁夏各县区生态承载系数ESC空间差异明显,北部沿黄县区ESC逐渐减小,中南部县区ESC渐增大,碳生态容量表现出北弱南强的分布格局。

### [ 参 考 文 献 ]

- [1] 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.
- [2] 易丹,欧名豪,郭杰,等.土地利用碳排放及低碳优化研究进展与趋势展望[J].资源科学,2022,44(8):1545-1559.
- [3] Yang Hang, Huang Junlong, Liu Dianfeng. Linking climate change and socioeconomic development to urban land use simulation: analysis of their concurrent effects on carbon storage [J]. Applied Geography, 2020, 115: 102135.
- [4] Han Ji, Zhou Xiang, Xiang Weining. Research progress of land use effects on carbon emissions and low carbon management [J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(4): 1152-1161.

- [5] Tian Shiqi, Wang Shijie, Bai Xiaoyong, et al. Global patterns and changes of carbon emissions from land use during 1992—2015 [J]. *Environmental Science and Ecotechnology*, 2021, 7:100108.
- [6] 中国气象报. 六次评估报告第三工作组报告[N], 中国气象报, 2022-4-6(1).
- [7] 丁学谦, 吴群, 刘向南, 等. 土地利用、经济高质量发展与碳排放耦合协调度及影响因素: 来自中国 282 个地级市的经验研究[J]. *资源科学*, 2022, 44(11):2233-2246.
- [8] 汪菲, 王长建. 新疆能源消费碳排放的多变量驱动因素分析: 基于扩展的 STIRPAT 模型[J]. *干旱区地理*, 2017, 40(2):441-452.
- [9] 牛亚文, 赵先超, 胡艺觉. 基于 NPP-VIIRS 夜间灯光的长株潭地区县域土地利用碳排放空间分异研究[J]. *环境科学学报*, 2021, 41(9):3847-3856.
- [10] 马远, 刘真真. 黄河流域土地利用碳排放的时空演变及影响因素研究[J]. *生态经济*, 2021, 37(7):35-43.
- [11] 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, 35(5):141-145.
- [12] 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, 35(2):329-342.
- [13] 袁壮壮, 叶长盛, 李辉丹. 基于土地利用变化的南昌市碳排放效应分析[J]. *湖南师范大学自然科学学报*, 2021, 44(5):30-39.
- [14] Luo Xiang, Ao Xinhe, Zhang Zuo, et al. Spatiotemporal variations of cultivated land use efficiency in the Yangtze River Economic Belt based on carbon emission constraints [J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2020, 30(4):535-552.
- [15] 魏燕茹, 陈松林. 福建省土地利用碳排放空间关联性与碳平衡分区[J]. *生态学报*, 2021, 41(14):5814-5824.
- [16] 刘华军, 邵明吉, 吉元梦. 中国碳排放的空间格局及分布动态演进: 基于县域碳排放数据的实证研究[J]. *地理科学*, 2021, 41(11):1917-1924.
- [17] 郑永超, 文琦. 宁夏自治区土地利用变化及碳排放效应[J]. *水土保持研究*, 2020, 27(1):207-212.
- [18] Guan Yang, Kang Lei, Shao Chaofeng, et al. Measuring County-level heterogeneity of CO<sub>2</sub> emissions attributed to energy consumption: a case study in Ningxia Hui Autonomous Region, China [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 142:3471-3481.
- [19] 孙梦华, 牛文浩, 张蚌蚌, 等. 黄河流域土地利用变化下生态系统服务价值时空演变及其响应: 以陕甘宁地区为例[J]. *应用生态学报*, 2021, 32(11):3913-3922.
- [20] 宁夏回族自治区统计局, 国家统计局宁夏调查总队. 宁夏统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2022.
- [21] 严慈, 侯兰功. 基于灰色理论的陕西省土地利用变化及其碳排放研究[J]. *西安理工大学学报*, 2021, 37(1):25-31.
- [22] 周嘉, 杨琳, 董美娜, 等. 基于土地利用的哈尔滨市 2004—2012 年碳排放强度变化分析[J]. *地理科学*, 2015, 35(3):322-327.
- [23] 赵荣钦, 张帅, 黄贤金, 等. 中原经济区县域碳收支空间分异及碳平衡分区[J]. *地理学报*, 2014, 69(10):1425-1437.
- [24] 汪一鸣. 宁夏人地关系演化研究[M]. 宁夏: 银川: 宁夏人民出版社, 2005.
- [25] 毛鸿欣, 贾科利, 高曦文, 等. 1980—2018 年银川平原土地利用变化时空格局分析[J]. *科学技术与工程*, 2020, 20(20):8008-8018.
- [26] Friedlingstein P, O'Sullivan M, Jones M W, et al. Global carbon budget 2020 [J]. *Earth System Science Data*, 2020(12):3269-3340.
- [27] Mendelsohn R, Sohngen B. The net carbon emissions from historic land use and land use change [J]. *Journal of Forest Economics*, 2019, 34(3/4):263-283.
- [28] 邹晓明, 王国兵, 葛之葳, 等. 林业碳汇提升的主要原理和途径[J]. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2022, 46(6):167-176.
- [29] 贾科利, 李小雨, 魏慧敏, 等. 宁夏县域土地利用碳排放空间分异与风险研究[J/OL]. *干旱区地理*. <https://kns.cnki.net/kcms/detail//65.1103.x.20230227.1848.001.html>.
- [30] 周永斌, 邹晓明. 从适地适树到适钙适树的理论与例证[J]. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2017, 41(2):1-8.