

DOI:10.7522/j.issn.1000-0240.2023.0071

WANG Fei, HAN Jun. Spatiotemporal variations of carbon emissions based on land use change in the Hexi Inland River Basin [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2023, 45(3):940-952. [王飞, 韩君. 基于土地利用变化的河西内陆河流域碳排放时空特征[J]. 冰川冻土, 2023, 45(3):940-952.]

基于土地利用变化的河西内陆河流域 碳排放时空特征

王飞^{1,2}, 韩君¹

(1. 兰州财经大学统计学院, 甘肃兰州 730101; 2. 兰州财经大学金融学院, 甘肃兰州 730101)

摘要: 土地利用变化是引起碳排放增加的重要原因之一。探索区域土地利用变化引起的碳排放量和碳排放效率问题, 对于把握各土地利用类型的碳排放特征、制定土地利用减排策略具有重要意义。本研究以集中国生态系统重要性与脆弱性于一体的典型区域的河西内陆河流域为研究区, 利用1985—2020年的土地利用现状遥感数据, 通过土地利用动态变化模型、排放系数法深入分析了河西内陆河流域的土地利用变化及其引起的碳排放量和碳排放效率的时空变化特征。结果显示: (1) 1985—2020年绿洲规模呈持续扩张趋势, 与1985年相比, 2020年的绿洲面积相对增加了13.17%; 建设用地以单向转入为主, 其余土地利用类型之间的双向转变频繁。(2) 各土地利用类型的净碳排放量总体呈增加趋势, 2020年净碳排放量(113.17×10^4 t)相对1985年(48.57×10^4 t)增加了1.33倍, 净碳排放量与绿洲面积显著正相关, 耕地和建设用地扩张引起的碳排放量是净碳排放量增加的主要原因。碳排放弹性系数整体呈增加趋势, 由1990年的-1.83增至2020年的205.91。(3) 1985—2020年的耕地和建设用地碳排放强度、绿洲碳排放强度均呈增加趋势, 分别由1985年的 $32.17 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2}$ 和 $5.09 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2}$ 增至2020年的 $60.74 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2}$ 和 $10.48 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2}$, 但绿洲碳排放强度增加速率小于耕地和建设用地, 同期的绿洲碳吸收强度普遍呈递减趋势。(4) 工业城市嘉峪关市、金昌市的多年平均绿洲碳排放强度最大, 以灌溉农业为主的行政单元相对较低, 以畜牧业为主的祁连县最低。本研究通过定量分析河西内陆河流域土地利用的碳排放量及其变化, 有助于宏观把握河西内陆河流域土地利用的碳排放特征, 对于寻找解决土地利用的减排方案、加强土地管理和推动土地利用的低碳发展模式提供了科学认识基础和决策参考。

关键词: 土地利用变化; 碳排放量; 碳排放强度; 时空变化; 河西内陆河流域

中图分类号: X321; F301.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-0240(2023)03-0940-13

0 引言

越来越多的证据表明, 碳排放是导致全球气候变化的重要因素^[1]。全球气候变化日益广泛, 深刻地影响着自然、生态和社会经济系统, 这一观点已被广泛接受并得到许多研究的支持^[1-2]。因此, 开展碳排放相关研究有益于解决全球变暖问题, 而调节全球气候变化、减缓温室效应和践行低碳发展的关键问题之一就是清楚了解土地利用情况^[3]。土地利

用类型变化会引起“碳汇”到“碳源”的转变, 土地利用结构的转变对于碳排放效应具有重要影响^[4]。已有研究表明, 土地利用变化通过改变生态系统的碳循环过程进一步影响区域乃至全球的碳平衡^[5-11]。为此, 土地利用及其变化引起的碳排放影响备受科学界及各国政府广泛关注^[5-6, 12]。国外学者开始“土地利用与碳排放”方面的研究相对较早, 研究的主题主要为土地利用变化与土壤碳排放、气候变化模型与生态系统、热带雨林森林采伐与森林退化

收稿日期: 2023-05-17; 修订日期: 2023-06-14

基金项目: 甘肃省自然科学基金项目(22JR11RA136); 国家社科基金一般项目(22BTJ001); 兰州财经大学丝绸之路经济研究院一般项目(JYYY202001); 甘肃省青年科技基金计划项目(20JR5RA060)资助

作者简介: 王飞, 讲师, 主要从事遥感与环境可持续发展研究. E-mail: wmx2007@163.com

通信作者: 韩君, 教授, 主要从事资源环境与能源经济研究. E-mail: hanjun8012@126.com

(REDD)碳排放及 REDD 和生物燃料利弊等^[13];国内相关研究始于 2000 年,受宏观“双碳”政策影响,2016 年之后进入深入发展时期,研究方法的多样化使得研究成果日益丰富。目前学者们在土地利用的碳排放研究方面多侧重于单一陆地生态系统的碳效应计算^[7-11]或某一土地利用类型引起的碳排放效应测度^[14-18]及其影响因素识别^[19-22],研究方法主要是探索性空间数据分析^[23]、时序分析与空间计量分析^[24-38];研究区主要集中在武汉^[28-29]、长三角^[21-22,30-32]、江浙^[33-34]、京津冀^[35-36]、黄河流域^[37]等社会经济发展热点区域的省市层面^[23-24,38-44],或是全国范围^[45-50],但总体上针对中国西北地区的研究较少。

西北内陆河流域绿洲几乎集中了范围内所有的人口、社会经济与生态要素,其承载的由于人口快速增加和社会经济加速发展所带来的压力明显高于其他地区^[51]。在复杂的全球变化和极端气候事件频发下,加强西北内陆河流域的碳排放研究有助于解决区域生态环境问题。因此,本文以中国西北地区河西内陆河流域为研究区,基于该流域土地利用类型的动态变化分析,运用排放系数法估算了流域和行政区划两个层面各土地利用类型的碳排放量,同时引入了反映碳排放效率的三个指标,即通过碳排放强度、碳排放弹性系数分析不同层面碳排放量与各土地利用类型面积之间的关系,以揭示研究区不同层面土地利用的碳排放效率;通过经济发展低碳化指数反映各行政区划单元的经济碳排放效率,一方面有助于科学认识该热点地理区域的土地利用碳排放时空特征,另一方面基于研究区绿洲人类活动对环境的影响分析,为促进区域土地资源的科学管理、推动河西内陆河流域土地利用绿色低碳模式发展提供科学依据。

1 研究区概况

地处中国西北干旱区的河西内陆河流域,自西向东依次为疏勒河、黑河、石羊河三大内陆河流域,流域面积约 37 402 km²,1960—2017 年的多年平均出山径流量约为 49.49×10⁸ m³。研究区昼夜温差大,1960—2017 年山区的多年平均气温为-1.30℃,远低于同期平原绿洲(约 9.25℃);降水量少且时空分布不均,从山区到平原绿洲降水量骤减。河西内陆河流域主要河流的出山径流依赖于山区的大量降水及其高寒气候孕育的冰雪水资源。河西内陆

河流域的绿洲分布于主要河流的出山口冲洪积扇三角洲地带,及伴随输水、蓄水等水利工程修建发展的人工灌溉绿洲。近年来在人工调水、输水等措施下,石羊河流域和黑河流域的尾间绿洲维持了一定面积的湿地。这些绿洲一方面承载着区域内 90% 以上的人们生产生活功能,另一方面绿洲的维持对于自然环境的改善和生态系统的协调起着重要作用。

河西内陆河流域行政区划辖甘肃省的武威、金昌、张掖、嘉峪关、酒泉五市,及内蒙古自治区的额济纳旗和青海省的祁连县,是中国十大商品粮基地和五大蔬菜生产基地之一。河西内陆河流域绿洲主要赖以灌溉农业,灌溉农业用水量占总用水量的 85% 以上^[52],水资源是流域赖以生存和可持续发展的重要保障,上游来水量的多少和水资源的分配很大程度上影响着流域土地利用结构的动态变化。

2 数据与方法

2.1 数据来源

本文 1985—2020 年的土地利用现状数据来源于武汉大学杨杰和黄昕教授团队发布的基于谷歌地球引擎(GEE)平台的中国土地覆盖数据集(CLCD)^[53],空间分辨率 30 m,利用 ArcGIS 软件对其进行裁剪、栅格计算等处理,分别得到 1985 年、1990 年、1995 年、2000 年、2005 年、2010 年、2015 年和 2020 年的土地利用/覆被数据,进一步基于 ArcGIS 软件的空间合并分析,得出不同时段的土地利用类型转移矩阵以分析河西内陆河流域的土地利用动态变化。

结合研究区自然环境、社会经济特征及土地利用变化的实际,基于学者们的相关研究^[54-55],将研究区土地利用类型划分为:耕地、林地、草地、水域、建设用地和未利用地,其中:林地包括有林地和灌木林地;水域包括河渠、湖泊、水库、沼泽湿地和冰川/积雪。文中提到的绿洲涵盖的土地利用类型有耕地、林地、草地、水域和建设用地。

文中所需要的社会经济数据主要源于 1978—2007 年《甘肃改革开放 30 年》、2011—2021 年《甘肃统计年鉴》、2001—2021 年《青海统计年鉴》、1991—2021 年《内蒙古统计年鉴》和 2001—2021 年《中国县域统计年鉴》等。

2.2 研究方法

2.2.1 土地利用类型的动态变化

单一土地利用类型动态变化是指一定时期内研究区域的某一种土地利用类型面积的变化状况,通过土地利用类型的净变化来反映。单一土地利用类型的净变化为研究区某土地利用类型在一定时期内转入与转出面积之差^[56]。相关的计算公式如下:

$$N_c = \frac{U_b - U_a}{U_a} \times \frac{1}{T} \times 100\% \quad (1)$$

式中: N_c 表示某一土地利用类型在一定时期内的净变化率; U_a 、 U_b 分别表示研究初期和研究末期某土地利用类型的面积; T 为研究时期。

2.2.2 土地利用碳排放量估算

河西内陆河流域所辖行政区划覆盖甘肃省河西五市、青海省祁连县和内蒙古的额济纳旗,县、市层面的能源消耗量和农业生产条件数据(地膜使用量、农药使用量)缺乏,难以获取与土地利用数据对应的长时序资料,故本文主要通过应用普遍的排放系数法计算各土地利用类型及其转变的碳排放量,研究的前提是各土地利用类型碳排放系数取值的确定。

耕地兼具碳源与碳汇功能,碳源主要是农业生产活动诸如农业化肥使用、农业机械使用及灌溉等产生的碳排放量,碳汇则是农作物通过光合作用吸收的 CO_2 ,二者差值即为耕地的净碳排放量^[26]。林地和草地因其生态系统碳储量密度较高,通常被认为是陆地生态系统的碳汇;水域充当碳源还是碳汇抑或二者都有,取决于水域类型、地理位置和环境条件等多因素的影响。据国内学者们的研究共识,视水域为碳汇^[26]。未利用地则因其碳排放强度长时间变化不大,通常也被认为是碳汇;通常被认为是碳源的建设用地主要考虑其承载不同产业能源消耗所引起的间接碳排放。综上,基于已有相关研究结果,本文主要考虑建设用地和耕地引起的碳排放量及其余四种土地利用类型的碳吸收量来测算研究区土地利用的碳排放量变化。

据已有研究结果(表1),耕地、林地、草地、水域、建设用地和未利用地的碳排放系数分别取值为0.422、-0.578、-0.021、-0.253、42.970 $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 和-0.005 $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,正值表示碳排放系数,负值表示碳吸收系数。

综上,土地利用的碳排放量计算公式为:

$$C_i = S_i \times K_i \quad (2)$$

式中: C_i 表示第*i*种土地利用类型的碳排放量; S_i 表示研究区第*i*种土地利用类型面积; K_i 表示第*i*种土地利用类型的碳排放系数。

2.2.3 土地利用类型面积与碳排放的关系

本文选用土地利用类型的碳排放强度和土地利用碳排放弹性系数两个指标计算主要土地利用类型的面积与其产生的碳排放量之间的关系,有助于阐释并比对不同土地利用引起的碳排放状况。

土地利用类型的碳排放强度即各土地利用类型单位面积产生的碳排放量,参考已有研究^[42],计算公式如下:

$$CEI_i = \frac{CE_i}{S_i} \quad (3)$$

式中: CEI_i 表示第*i*种土地利用类型的碳排放强度; CE_i 表示第*i*种主要土地利用类型产生的碳排放量; S_i 代表第*i*种主要土地利用类型面积。

据弹性系数内涵提出了土地利用碳排放弹性系数,即土地利用引起的净碳排放量的变化率与相应年份某土地利用类型面积的变化率之比^[60]。计算公式如下:

$$E_j = \frac{\left(\frac{\Delta C_{(j,j-1)}}{C_{j-1}} \right)}{\left(\frac{\Delta S_{(j,j-1)}}{S_{j-1}} \right)} \quad (4)$$

式中: E_j 表示第*j*年的土地利用碳排放弹性系数; $\Delta C_{(j,j-1)}$ 表示第*j*-1年到第*j*年的净碳排放量的变化量; $\Delta S_{(j,j-1)}$ 表示第*j*-1年到第*j*年的某土地利用类型面积的变化量; C_{j-1} 、 S_{j-1} 分别表示第*j*-1年的净碳排放量和某土地利用类型面积。

2.2.4 空间单元经济低碳化发展指数

空间单元经济低碳化发展指数是空间单元在市、县层面的GDP比率与其范围内土地利用引起的碳排放量比率的比值,用以衡量空间单元市县层面经济发展的低碳程度^[61]。计算公式是:

$$ELCI_p = \frac{\left(\frac{G_p}{G} \right)}{\left(\frac{C_p}{C} \right)} \quad (5)$$

式中: $ELCI_p$ 表示流域范围内第*p*个行政单元的经济低碳化发展指数; G_p 、 G 分别表示第*p*个行政单元、流域范围的地区生产总值; C_p 、 C 分别表示第*p*个行政单元、流域范围的碳排放量。 $ELCI_p < 1$ 表明第*p*个行政单元的碳排放水平高于其经济发展水平, $ELCI_p > 1$ 表明第*p*个行政单元的碳排放水平低于其经济发展水平, $ELCI_p$ 值越大表明空间单元的经济低碳化发展水平越高。

表 1 各土地利用类型的碳排放系数参照表

Table 1 The referenced table of carbon emission coefficient of each land use type

土地利用类型	文献取值/(t·hm ⁻² ·a ⁻¹)	文献来源	本文取值/(t·hm ⁻² ·a ⁻¹)
耕地	0.422	范建双等 ^[14] ;方林等 ^[31] ;张余等 ^[38] ; 孙赫等 ^[45] ;邢秀为等 ^[46] ;吉雪强等 ^[57] ; 肖磊等 ^[58] ;李缘缘等 ^[49] ;李玉玲等 ^[59]	0.422
	0.497	阳凯等 ^[9] ;石洪昕等 ^[26] ;方林等 ^[31]	
	0.216	赵荣钦等 ^[5]	
	0.469	方林等 ^[31]	
	—	—	
林地	-0.581	阳凯等 ^[9] ;石洪昕等 ^[26]	-0.578
	-0.060	赵荣钦等 ^[5]	
	-0.578	孙赫等 ^[45] ;邢秀为等 ^[46] ;吉雪强等 ^[57] ;肖磊等 ^[58]	
	-0.644	李缘缘等 ^[49] ;方林等 ^[31] ;李玉玲等 ^[59]	
	-0.490	李波等 ^[29]	
	-6.440	唐洪松等 ^[24]	
	-0.577	李小康等 ^[25]	
	-0.613	范建双等 ^[14]	
草地	—	—	-0.021
	-0.021	方林等 ^[31] ;阳凯等 ^[9] ;范建双等 ^[14] ; 李小康等 ^[25] ;石洪昕等 ^[26] ;方林等 ^[31] ; 孙赫等 ^[45] ;邢秀为等 ^[46] ;李缘缘等 ^[49] ; 李波等 ^[29] ;吉雪强等 ^[57] ;李玉玲等 ^[59] ; 肖磊等 ^[58]	
	-0.950	赵荣钦等 ^[5]	
	0.390	唐洪松等 ^[24]	
水域	—	—	-0.253
	-0.253	阳凯等 ^[9] ;范建双等 ^[14] ;石洪昕等 ^[26] ; 方林等 ^[31] ;和海秀等 ^[44] ;李缘缘等 ^[49] ;	
	-0.460	赵荣钦等 ^[5]	
	-0.257	赖力 ^[12]	
	-0.248	段晓男等 ^[46]	
	-0.252	孙赫等 ^[45] ;邢秀为等 ^[46] ;吉雪强等 ^[57] ;肖磊等 ^[58]	
	-0.025	方林等 ^[31]	
	-0.245	唐洪松等 ^[24]	
建设用地	—	—	42.970
	40.730	石洪昕等 ^[26]	
	47.440	赵荣钦等 ^[5]	
	42.970	孙赫等 ^[43]	
	0.717	方林等 ^[31]	
未利用地	—	—	-0.005
	-0.005	阳凯等 ^[9] ;范建双等 ^[14] ;石洪昕等 ^[26] ; 方林等 ^[31] ;和海秀等 ^[44] ;孙赫等 ^[45] ; 邢秀为等 ^[46] ;李缘缘等 ^[49] ;吉雪强等 ^[57] ; 肖磊等 ^[58] ;李玉玲等 ^[59] ;	
	-0.050	赖力 ^[12] ;唐洪松等 ^[24]	

3 结果与分析

3.1 河西内陆河流域的土地利用变化

3.1.1 土地利用变化率

基于 1985—2020 年的土地利用类型面积遥感数据,利用 ArcGIS 栅格计算得出了各土地利用类型净变化率和绿洲面积(图 1)。由图 1(a)可知:1985—

2020 年各土地利用类型的多年平均净变化率从大到小依次为:建设用地>耕地>林地>水域>草地>未利用地,其多年平均净变化率分别为 13.23%、0.63%、0.57%、0.57%、0.30% 和 -0.10%,同期绿洲的年均净变化率为 0.37%。表明未利用地转入为其他土地利用类型(即绿洲)的面积大于其他土地

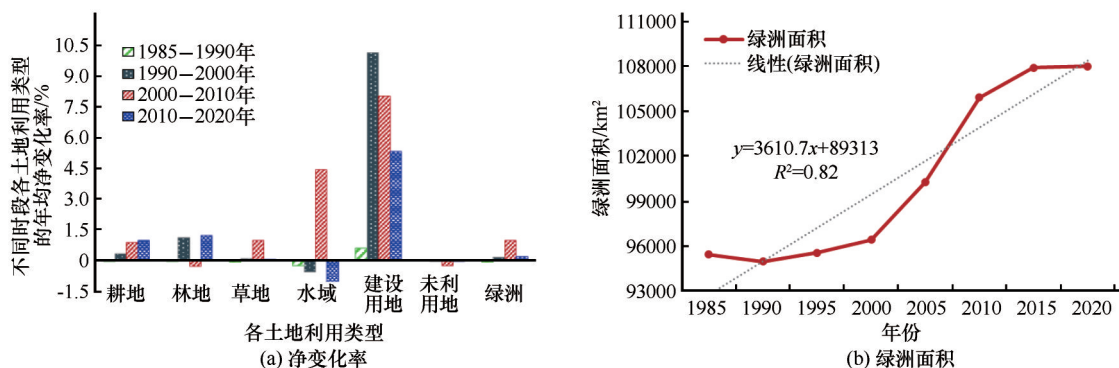


图1 1985—2020年河西内陆河流域各土地利用类型净变化率(a)与绿洲面积的动态变化(b)

Fig. 1 Net change rate of each land use type (a) and dynamic changes of oasis area (b) in the Hexi Inland River Basin during 1985—2020

利用类型(即绿洲)转出为未利用地的面积,未利用地减少的面积转变成了绿洲。

由图1(b)知:研究区绿洲面积整体呈增加趋势,1990年绿洲规模小幅萎缩,1990年之后显著快速增加并于2015年后趋缓。不同时期的绿洲面积净变化率亦反映了这一特征,2000—2010年期间绿洲面积增加最明显,净变化率高达0.99%。

3.1.2 土地利用变化过程

利用 ArcGIS 工具对不同时期土地利用类型的转移数据进行叠加分析,得到了1985—2020年不同土地利用类型面积变化转移弦图(图2),可以看到,研究期内各土地利用类型之间的双向转变剧烈。从某一土地利用类型的转出面积看,从大到小依次是未利用地、草地、耕地、水域、林地和建设用地,从转入流向上,草地主要由未利用地和耕地转入,这与生态环境改善和退耕还草措施实施有关;耕地主要由未利用地和草地转入,主要由于农民受经济利益驱使垦荒引起;林地主要由草地转入,水域主要由未利用地和草地转入,这与石羊河尾间和黑河尾间输水、调水形成的湿地和湖有关;建设用地基本呈单向转入态势,主要由未利用地、草地和耕地转入,未利用地则主要由草地和水域转入,主要是由局部生态环境退化和水域萎缩引起。

3.2 河西内陆河流域各土地利用类型的碳排放效应

3.2.1 土地利用类型的碳排放效应时序分析

根据式(2)、(4)计算得到河西内陆河流域各土地利用类型的碳排放量、净碳排放量和绿洲碳排放弹性系数(图3)。从各土地利用类型的碳排放量看,耕地和建设用地的碳排放量呈增加趋势,建设用地的碳排放量从1995年之后快速增加;从各土地

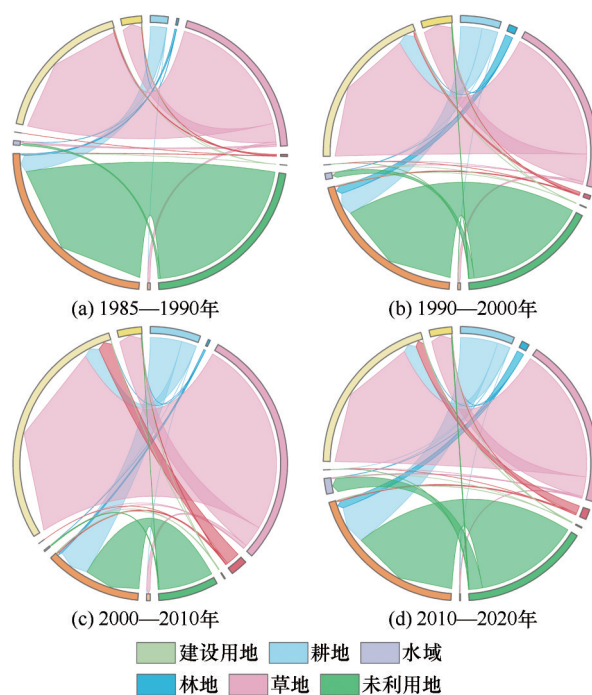


图2 河西内陆河流域土地利用转移弦图(1985—2020年)(箭头宽度表示土地利用类型之间转换的面积)

Fig. 2 Chord diagram of land use transfer in the Hexi Inland River Basin (1985—2020) (The width of the arrows represents the area due to land use transfer between different land use types)

利用类型的碳吸收量看,除未利用地呈轻微减少外,其余土地利用类型均呈缓慢增加趋势,综合得出土地利用的净碳排放量整体呈增加趋势,2020年的净碳排放量达 $113.17 \times 10^4 \text{ t}$,相对于1985年增加了1.33倍。1985—1995年的净碳排放量略微增加,这期间耕地面积略微减少、建设用地缓慢增加,因此引起的碳排放量变化不明显。1995—2020年的净碳排放量持续快速增加,主要是同期耕地面积和建设用地同时快速扩张,而且这两类土地利用类型

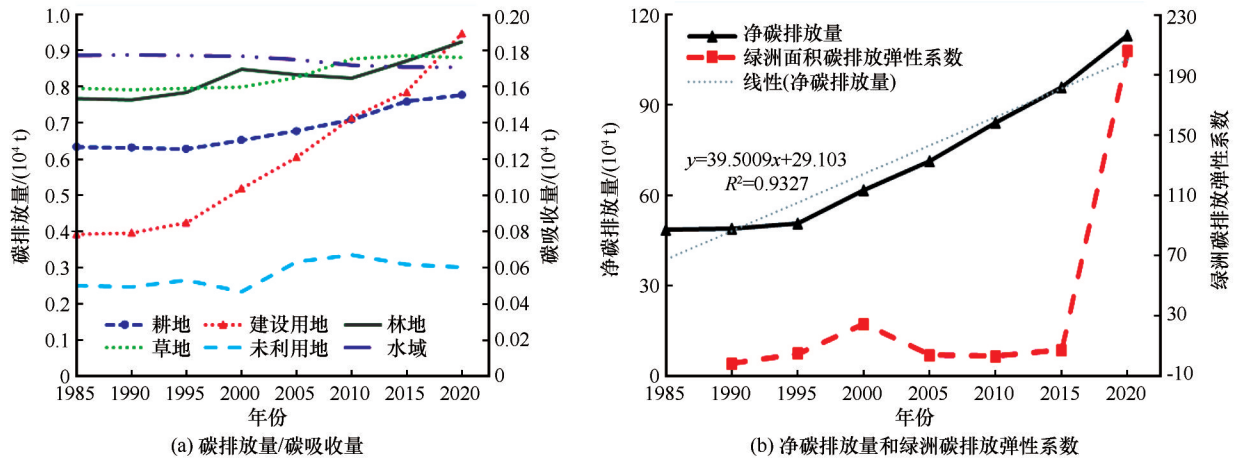


图3 1985—2020年河西内陆河流域各土地利用类型的碳排放量/碳吸收量(a)、总的净碳排放量和绿洲碳排放弹性系数(b)

Fig. 3 Carbon emissions / carbon absorption capacity of each land use type (a), total net carbon emissions and elasticity coefficient of oasis carbon emissions (b) in the Hexi Inland River Basin from 1985 to 2020

引起的碳排放量远大于同期草地、水域、未利用地的碳吸收量。综合来看,绿洲面积与净碳排放量呈显著的正向线性关系($R^2=0.97, P=0.01$)。

由绿洲面积碳排放弹性系数知,除1990年为-1.83外(即绿洲面积变化1%引起的碳吸收增量大于1%),1995—2020年的绿洲面积碳排放弹性系数由4.91增至205.91。以2010年为界,1990—2010年绿洲面积碳排放弹性系数先增后减,2010年之后逐渐增加,直至2020年最大,表明研究区绿洲扩张带来的边际碳排放量较高。基于式(3)计算得出1985—2020年耕地和建设用地及绿洲的碳排放强度均呈增大趋势,分别由1985年的 $32.17 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2}$ 和 $5.09 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2}$ 增至2020年的 $60.74 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2}$ 和 $10.48 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2}$,且耕地和建设用地的碳排放强度增加速率更大,表明绿洲土地利用的碳排放压力主要来自耕地和建设用地。

3.2.2 河西内陆河流域各土地利用类型碳排放量的空间差异

根据公式(3)、(5)计算得到各行政区划单元的多年平均碳排放强度和经济低碳化发展指数(以下称 $ELCI$) (图4)。从耕地和建设用地的碳排放强度看,额济纳旗的碳排放强度因建设用地急剧扩张表现出最高值;金昌市和嘉峪关市工业发展引起的碳排放强度高于以灌溉农业为主的武威市、张掖市和酒泉市;经济以畜牧业为主且人口相对稀少的祁连县最低。从绿洲碳排放强度视角,工业城市嘉峪关市(高)和金昌市(较高)的绿洲碳排放强度最高,其次是灌溉农业为主的武威市(较高)、张掖市(中)、酒泉市(低)、额济纳旗(低),祁连县因域内林地和

草地面积广布表现为最低。

利用绿洲碳吸收强度指标衡量绿洲的生态环境质量,由图4知,额济纳旗的绿洲碳吸收强度最高,表明向黑河尾间人工输水以维护生态功能的成效显著;酒泉市的相对较高,武威市、张掖市和嘉峪关的绿洲碳吸收强度居中,祁连县较低,金昌市的最低,主要原因是金昌市经济主要以工业为主,耕地和建设用地占绿洲面积的近1/3,生态用地相对较少。

借助于得到的 $ELCI$ 值评估各行政单元的经济低碳发展状况(图4)。武威市、张掖市和额济纳旗的 $ELCI$ 值小于1,表明这三个地方土地利用的碳排放水平高于其经济发展程度,经济低碳化发展程度较低;其余4个行政单元的 $ELCI$ 值都大于1,说明这些区域的碳排放水平低于其经济发展程度,经济低碳化发展程度相对较高,尤以嘉峪关市的 $ELCI$ 值最高,为14.91,表明嘉峪关市的低碳化经济发展程度相对最高。

通过计算1985—2020年各行政单元土地利用的碳排放量及其强度(图5),分析各土地利用类型单位面积的碳排放量变化趋势特征。主要结果是:①各行政单元的碳排放量均呈增加趋势,碳排放量增加速率显著的依次是额济纳旗、嘉峪关、武威市、金昌市,其余行政单元的增加速率相对较小;②各行政单元耕地和建设用地的碳排放强度普遍呈增加趋势,持续增加趋势显著的是额济纳旗、嘉峪关市、金昌市,其余行政单元的增加趋势相对较小;③除祁连县的绿洲碳排放强度呈弱减少趋势外,其余行政单元的绿洲碳排放强度呈增加趋势;④除祁连

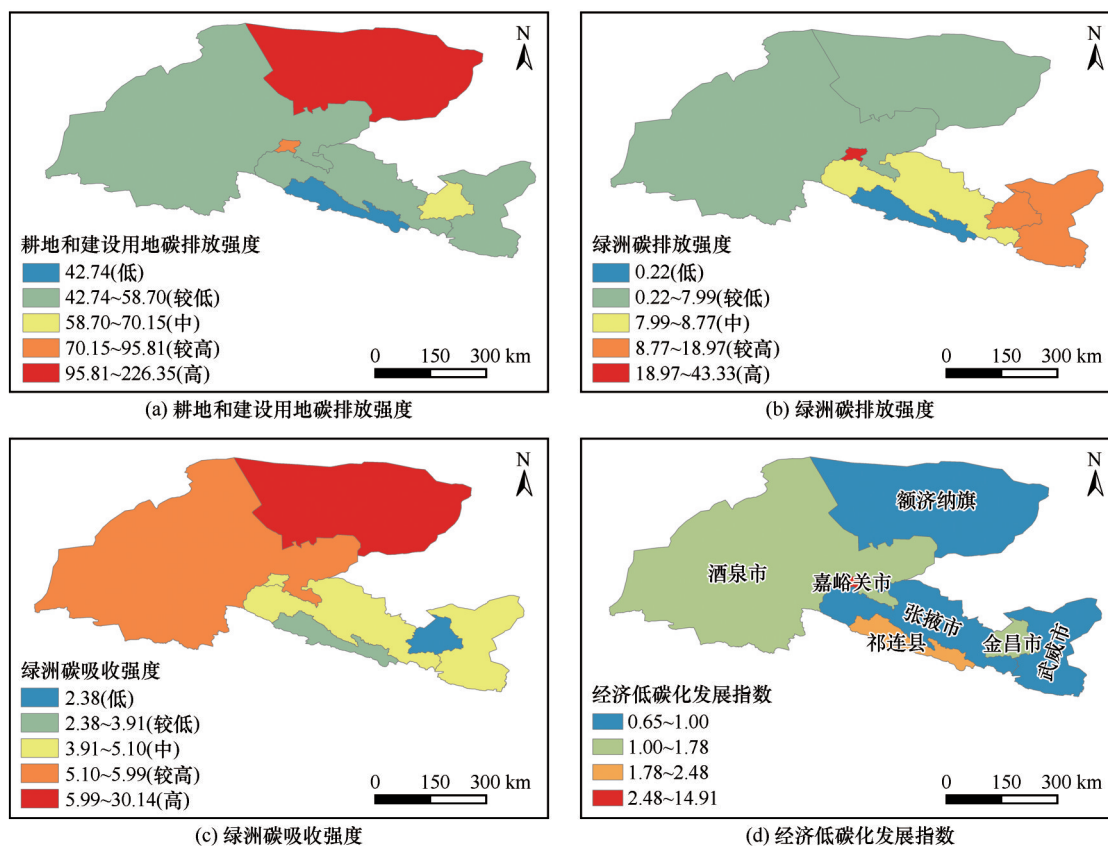


图4 河西内陆河流域各行政区划单元的多年平均碳排放强度、碳吸收强度和经济低碳化发展指数空间差异(1985—2020年)

Fig. 4 Spatial variations of multi-year average carbon emissions intensity, carbon absorption intensity and economic low-carbon development index of each administrative district in the Hexi Inland River Basin (1985—2020): carbon emissions intensity of cropland and construction land (a), oasis carbon emissions intensity (b), oasis carbon absorption intensity (c), economic low-carbon development index (d)

县和武威市的绿洲碳吸收强度呈微弱增加外,其余行政单元的绿洲碳吸收强度均呈下降趋势。结合式(4)计算得出酒泉市、额济纳旗、祁连县的多年平均绿洲碳排放弹性系数为正值,分别为12.56、4.15、0.29;张掖市、嘉峪关市、武威市和金昌市的多年平均绿洲碳排放弹性系数为负值,分别为-17.38、-3.88、-2.60、-2.19。若依此预计未来绿洲面积变化引起的碳排放强度,额济纳旗和酒泉市将随绿洲扩张而持续增大,祁连县小幅增加,其余单元将随绿洲扩张而减小,其中张掖市的减小幅度将最大。

4 讨论

全球变暖已成为毋庸置疑的事实,主要归因于人类活动燃烧化石燃料和土地利用引起的碳排放^[1]。因此,从人类活动综合影响方面开展土地利用与碳排放关系的研究对于全面评估人类活动对环境的影响程度、推进区域经济低碳转型和实现土地利用可持续发展具有重要指导意义^[32]。当前,

“土地利用与碳排放”主题已然成为了碳排放研究的集中领域之一^[26]。本文针对中国西北地区河西内陆河流域,基于前人的研究基础,在促进实现“双碳”目标的大背景下,通过估算流域土地利用的碳排放量揭示碳排放效应的时空差异,有助于提出科学的因地制宜减排措施和政策。

限于土地利用碳排放量数据较为匮乏,河西内陆河流域所辖行政区划长时序的能源消耗、农业生产条件等统计资料缺失,本文在研究方法上采用了排放系数法计算研究区土地利用的碳排放量,有别于依据单个产业部门统计数据或以《IPCC温室气体排放指南》为基础的主流碳排放量测算研究^[61]。基于此,有必要对本文采用的数据集、为何采用排放系数法以及未来研究方向给予讨论,以期类似研究提供参考。

土地利用碳排放研究的根本步骤,一方面是确定土地利用类型和计算土地利用类型的动态变化特征,即:利用长时序遥感资料获取土地利用现状

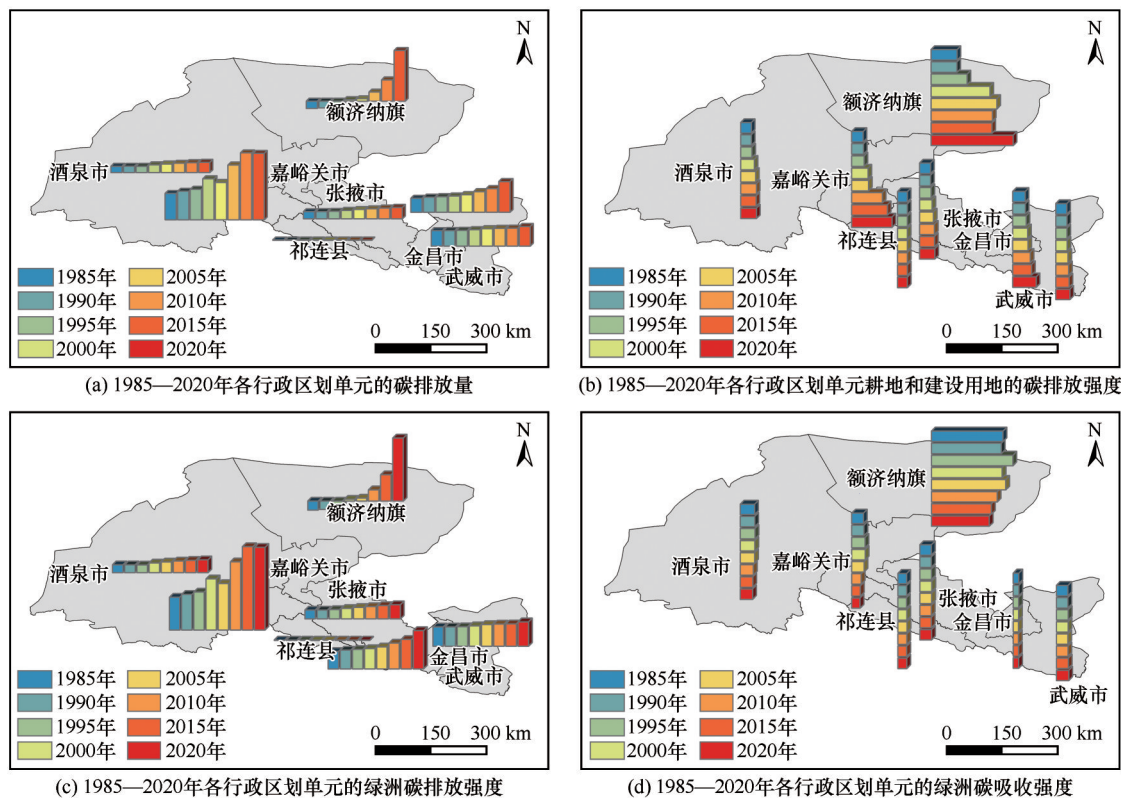


图5 河西内陆河流域各行政区划单元的碳排放量和碳排放强度的时空变化(1985—2020年)

Fig. 5 Spatiotemporal variations in carbon emissions and carbon emissions intensity of each administration district in the Hexi Inland River Basin (1985—2020): carbon emissions of each administration district (a), carbon emissions intensity of cropland and construction land in each administration district (b), oasis carbon emissions intensity of each administration district (c), oasis carbon absorption intensity of each administration district (d)

数据,通过比较多期土地利用现状数据分析土地利用类型的转移矩阵和变化趋势,揭示各土地利用类型的动态演变特征;另一方面是计算各土地利用类型的碳排放量,即通过碳排放估算模型将各土地利用类型与碳排放量关联起来分析碳排放量的变化特征。

针对土地利用类型变化,本文利用CLCD数据集从长时序、空间差异上分析了土地利用类型的动态变化特征。CLCD数据集^[53]总体的准确率达80%,具有空间分辨率高(30 m)、长时序逐年和可公开获取的优势,相比于现有的土地利用专题产品,其在多方面表现出良好的一致性。比对基于该数据集的研究结果和已有研究结论,周兰萍等^[62]、卢辉雄等^[63]、尚海洋等^[64]基于遥感影像解译得出了1970—2017年石羊河流域生态环境趋好、绿洲面积增加;巩杰等^[55]、唐霞等^[65]、肖飞艳^[66]基于遥感资料和文献研究得出了1990—2015年黑河流域人工绿洲面积增加、自然绿洲面积减少;齐敬辉^[67]和马晴等^[54]揭示了1977—2015年疏勒河流域中下游耕地、

建设用地和林地面积增加,草地、水域和未利用地减少。总之,本文得出的研究区绿洲面积持续扩张等反映流域土地利用动态变化特征的结果与已有研究一致,表明CLCD数据集适用于河西内陆河流域的土地利用变化研究。

针对土地利用的碳排放量核算,目前可公开获取的不同层面的碳排放数据集,缺乏基于土地利用的碳排放量数据。梳理已有的土地利用与碳排放研究成果,土地利用直接碳排放量的计算方法有排放系数法、机理模型以及样地清查法、遥感估测法等^[11-12]。其中,不少学者运用排放系数法研究了特定区域土地利用的直接碳排放量^[9,24,31,44-49,57-59];土地利用的间接碳排放量大都是利用IPCC指南方法结合能源平衡表核算^[14,25,28,59-60]。鉴于本研究区行政区划单元缺乏能源消耗和农业生产条件等长时序统计资料,本文采用了已有研究中应用较多的排放系数法估算土地利用的直接碳排放量和间接碳排放量。其中:排放系数采用的是研究中使用较多的经验系数,运用该方法获得的研究结果与杨文学

等^[68]、王怡睿^[69]的相似,基本阐明了河西内陆河流域土地利用的碳排放量及碳排放效应特征,为制定优化土地利用策略、推进土地利用低碳模式发展提供了决策指导。但因使用的各土地利用类型碳排放经验系数掩盖了不同地区、不同气候条件、不同作物生产方式及同一地类内部不同土地利用强度引致的碳排放差异,使得相关研究忽视了土地利用强度对碳排放量的影响。为此,下一步的研究方向是基于多源数据从多层次细分空间单元研究未来不同社会经济发展情景下的土地利用类型变化,并尝试征求碳排放研究领域权威专家意见基础上,按经纬度和地理环境进行分类以修正土地利用碳排放系数,从而预测未来的土地利用碳排放趋势,以弥补当前研究因忽略土地利用强度不同引起的碳排放量差异的缺憾。

5 结论

本文利用1985—2020年不同时段的土地利用类型遥感数据,结合河西内陆河流域的社会经济统计资料,围绕“土地利用的碳排放效应”科学问题,运用ArcGIS软件对遥感数据进行了处理和计算,得出主要结论如下:

(1)除建设用地呈单向转入外,其余各土地利用类型之间的双向转变较为剧烈。绿洲面积呈增加趋势,建设用地的净变化率在各土地利用类型中最大,这与研究区城市化程度增大引起的建设用地需求增加紧密相关。

(2)河西内陆河流域各土地利用类型引起的净碳排放量整体上呈持续增加趋势,1995—2020年的增加速率明显大于1985—1995年,这与1995年之后耕地和建设用地快速扩张引起的碳排放量急剧增加有关。绿洲的碳排放弹性系数均大于1(1990年为-1.83),绿洲碳排放弹性系数变化除2000—2010年外均呈增加趋势。耕地和建设用地、绿洲的碳排放强度均呈增大趋势,且耕地和建设用地的碳排放强度增加速率更大,河西内陆河流域绿洲的碳排放压力主要来自耕地和建设用地。

(3)从行政区划层面,1985—2020年各行政单元的净碳排放量均呈增加趋势,新兴工业城市(嘉峪关市和金昌市)的净碳排放量相对最高,增加速率也较快;经济以灌溉农业为主的行政单元净碳排放量相对较小,增加速率缓慢。各行政单元的碳排放强度呈增加趋势,碳吸收强度则普遍呈递减趋

势,总体上碳排放强度的增加速率普遍大于碳吸收强度的减小速率(额济纳旗例外)。

(4)从疏勒河流域依次向东到石羊河流域,1985—2020年的多年平均绿洲碳排放强度逐渐递增(嘉峪关市例外)、同期的多年平均绿洲碳吸收强度逐渐递减(金昌市例外)、多年平均经济低碳化发展指数递减(工业城市嘉峪关市、金昌市例外),且武威市、张掖市和额济纳旗的经济发展程度低于其碳排放水平,其余行政单元的经济发展程度都高于碳排放强度。

参考文献(References):

- [1] IPCC. Climate change 2021: the physical science basis [M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2021.
- [2] IPCC. Global Warming of 1.5 °C: an IPCC special report on the impacts of global warming of 1.5 °C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emissions pathways [R]. Geneva, Switzerland: World Meteorological Organization, 2018.
- [3] Xiang Shuijiang, Zhang Qian, Wang Dan, et al. Response and vulnerability analysis of carbon storage to LUCC in the main urban area of Chongqing during 2000—2020[J]. Journal of Natural Resources, 2022, 37(5): 1198-1213. [向书江, 张骞, 王丹, 等. 近20年重庆市主城区碳储量对土地利用/覆被变化的响应及脆弱性分析[J]. 自然资源学报, 2022, 37(5): 1198-1213.]
- [4] Liu Qing. Study on carbon emission calculation of land use in Hubei Province[D]. Wuhan: Hubei University, 2012. [柳青. 湖北省土地利用的碳排放测算研究[D]. 武汉: 湖北大学, 2012.]
- [5] Zhao Rongqin, Huang Xianjin, Zhong Taiyang, et al. Carbon effect evaluation and low-carbon optimization of regional land use[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, 29(17): 220-229. [赵荣钦, 黄贤金, 钟太洋, 等. 区域土地利用结构的碳效应评估及低碳优化[J]. 农业工程学报, 2013, 29(17): 220-229.]
- [6] Ge Quansheng, Dai Junhu, He Fanneng, et al. Land use, land cover change and carbon cycle over the past 300 years in China [J]. Science China: Earth Sciences, 2008, 38(2): 197-210. [葛全胜, 戴君虎, 何凡能, 等. 过去300年中国土地利用、土地覆被变化与碳循环研究[J]. 中国科学: 地球科学, 2008, 38(2): 197-210.]
- [7] Li Xudong. Soil respiration and carbon balance of grassland and farmland system in Loess Plateau [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2011. [李旭东. 黄土高原草地与农田系统土壤呼吸及碳平衡[D]. 兰州: 兰州大学, 2011.]
- [8] Ren Jizhou, Liang Tiangang, Lin Huilong, et al. Study on grassland's responses to global climate change and its carbon sequestration potentials [J]. Acta Prataculturae Sinica, 2011, 20(2): 1-22. [任继周, 梁天刚, 林慧龙, 等. 草地对全球气候变化的响应及其碳汇潜势研究[J]. 草业学报, 2011, 20(2): 1-22.]
- [9] Yang Kai, Wang Yiwen, Huang Chunhua, et al. Effect of land use change on carbon emission in Dongting Lake region [J]. Ecological Science, 2023, 42(2): 193-201. [阳凯, 王奕文, 黄春华, 等. 洞庭湖区域土地利用变化的碳排放效应研究

- [J]. 生态科学, 2023, 42(2): 193-201.]
- [10] Zhou Guangsheng, Wang Yuhui, Jiang Yanling, et al. Conversion of terrestrial ecosystems and carbon cycling[J]. *Acta Phytocologica Sinica*, 2002, 26(2): 250-254. [周广胜, 王玉辉, 蒋延玲, 等. 陆地生态系统类型转变与碳循环[J]. 植物生态学报, 2002, 26(2): 250-254.]
- [11] Zeng Yongnian, Feng Zhaodong. Effect of desertification on soil organic carbon pool of grassland in headwater area of Yellow River[J]. *Journal of Desert Research*, 2008, 28(2): 208-211. [曾永年, 冯兆东. 黄河源区土地沙漠化及其对土壤碳库的影响研究[J]. 中国沙漠, 2008, 28(2): 208-211.]
- [12] Lai Li. Carbon emissiin effect of land use in China[D]. Nanjing: Nanjing University, 2010. [赖力. 中国土地利用的碳排放效应研究[D]. 南京: 南京大学, 2010.]
- [13] Zhang Miao, Lan Mengting, Chen Yinrong, et al. Analysis on the knowledge mapping of the foreign research on land use and carbon emission based on the CiteSpace III [J]. *China Land Science*, 2017, 31(3): 51-60. [张苗, 兰梦婷, 陈银蓉, 等. 国外土地利用与碳排放知识图谱分析——基于CiteSpace软件的计量分析[J]. 中国土地科学, 2017, 31(3): 51-60.]
- [14] Fan Jianshuang, Yu Xiaofen, Zhou Lin. Carbon emission efficiency growth of land use structure and its spatial correlation; a case study of Nanjing City[J]. *Geographical Research*, 2018, 37(11): 2177-2192. [范建双, 虞晓芬, 周琳. 南京市土地利用结构碳排放效率增长及其空间相关性[J]. 地理研究, 2018, 37(11): 2177-2192.]
- [15] Ding Baogen, Yang Shuwang, Zhao Yu, et al. Study on spatio-temporal characteristics and decoupling effect of carbon emission from cultivated land resource utilization in China[J]. *China Land Science*, 2019, 33(12): 45-54. [丁宝根, 杨树旺, 赵玉, 等. 中国耕地资源利用的碳排放时空特征及脱钩效应研究[J]. 中国土地科学, 2019, 33(12): 45-54.]
- [16] Li Beibei, Wei Xueqiong, Shi Wei. Research review of the agricultural land use and carbon emission[J]. *Journal of Chinese Agricultural Mechanization*, 2014, 35(6): 285-291. [李蓓蓓, 魏学琼, 施威. 农业土地利用与碳排放研究综述[J]. 中国农机化学报, 2014, 35(6): 285-291.]
- [17] Liu Qiong, Xiao Haifeng. The impact of farmland management scale and fiscal policy for supporting agriculture on agricultural carbon emission[J]. *Resources Science*, 2020, 42(6): 1063-1073. [刘琼, 肖海峰. 农地经营规模与财政支农政策对农业碳排放的影响[J]. 资源科学, 2020, 42(6): 1063-1073.]
- [18] Ali Y. Carbon, water and land use accounting: consumption vs production perspectives[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017, 67: 921-934.
- [19] Carpio A, Ponce-Lopez R, Lozano-García D F. Urban form, land use, and cover change and their impact on carbon emissions in the Monterrey Metropolitan area, Mexico[J]. *Urban Climate*, 2021, 39: 100947.
- [20] Gao Yanli, Dong Jie, Li Lu, et al. Study on the effectiveness and mechanism of carbon emission right trading policy: based on the perspective of inter-provincial difference in the construction land carbon emission intensity[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2019, 28(4): 783-793. [高艳丽, 董捷, 李璐, 等. 碳排放权交易政策的有效性及其作用机制研究——基于建设用地碳排放强度省际差异视角[J]. 长江流域资源与环境, 2019, 28(4): 783-793.]
- [21] Yang Bin, Chen Xiang, Wang Zhanqi, et al. Analyzing land use structure efficiency with carbon emissions: a case study in the Middle Reaches of the Yangtze River, China[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 274: 123076.
- [22] Li Jianbao, Huang Xianjin, Chuai Xiaowei, et al. The impact of land urbanization on carbon dioxide emissions in the Yangtze River Delta, China: a multiscale perspective[J]. *Cities*, 2021, 116: 103275.
- [23] Liu Xiaoting, Chen Wenjun. Dynamic evolution of spatial disparity of energy carbon emissions in Xinjiang based on ESDA-GIS[J]. *Arid Land Geography*, 2016, 39(3): 678-685. [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, 39(3): 678-685.]
- [24] Tang Hongsong, Ma Huilan, Su Yang, et al. Carbon emissions and carbon absorptions of different land use types in Xinjiang[J]. *Arid Zone Research*, 2016, 33(3): 486-492. [唐洪松, 马惠兰, 苏洋, 等. 新疆不同土地利用类型的碳排放与碳吸收[J]. 干旱区研究, 2016, 33(3): 486-492.]
- [25] Li Xiaokang, Wang Xiaoming, Hua Hong. Research on influences of land use structure change on carbon emissions [J]. *Ecological Economy*, 2018(1): 14-19. [李小康, 王晓鸣, 华虹. 土地利用结构变化对碳排放的影响关系及机理研究[J]. 生态经济, 2018(1): 14-19.]
- [26] Shi Hongxin, Mu Xingmin, Zhang Yinglong, et al. Study on carbon emission effects of different land use types in Guangyuan City, Sichuan Province[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2012, 32(3): 101-106. [石洪昕, 穆兴民, 张应龙, 等. 四川省广元市不同土地利用类型的碳排放效应研究[J]. 水土保持通报, 2012, 32(3): 101-106.]
- [27] Yang Liangjie, Yang Yongchun. Effects of land use change on regional carbon emission and absorption in Shiyang River Basin [J]. *Journal of Lanzhou University (Natural Sciences)*, 2017, 53(6): 749-756, 763. [杨亮洁, 杨永春. 石羊河流域土地利用变化对区域碳排放和碳吸收的影响[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2017, 53(6): 749-756, 763.]
- [28] Zhang Junfeng, Zhang Anlu, Dong Jie. Carbon emission effect of land use and influencing factors decomposition of carbon emission in Wuhan urban agglomeration[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2014, 23(5): 595-602. [张俊峰, 张安录, 董捷. 武汉城市圈土地利用碳排放效应分析及因素分解研究[J]. 长江流域资源与环境, 2014, 23(5): 595-602.]
- [29] Li Bo, Liu Xueqi, Mei Qian, et al. Study on carbon effects and spatial differences based on changes of agricultural land use in Hubei Province[J]. *China Population Resources and Environment*, 2018, 28(10): 62-70. [李波, 刘雪琪, 梅倩, 等. 湖北省农地利用方式变化的碳效应特征与空间差异[J]. 中国人口·资源与环境, 2018, 28(10): 62-70.]
- [30] Tian Ze, Huang Mengmeng. Coupling analysis of carbon emission efficiency of terminal energy consumption and Industrial structure in Yangtze River economic belt[J]. *Journal of Anhui Normal University (Humanities & Social Sciences Edition)*, 2018, 46(1): 92-100. [田泽, 黄萌萌. 长江经济带终端能源消费碳减排效率与产业结构耦合分析[J]. 安徽师范大学学报(人文社会科学版), 2018, 46(1): 92-100.]
- [31] Fang Lin, Li Canfeng, Li Haojie, et al. Analysis of the spatio-temporal effects and driving factors of land use carbon emissions in the Yangtze River economic belt[J]. *Pratacultural Science*, 2022, 39(12): 2539-2553. [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.]
- [32] Yuan Shaofeng, Tang Yiyu. Spatial differentiation of land use carbon emission in the Yangtze River economic belt based on

- low carbon perspective[J]. *Economic Geography*, 2019, 39(2): 190-198. [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.]
- [33] Chuai Xiaowei, Huang Xianjin, Wang Wanjing, et al. Land use, total carbon emissions change and low carbon land management in Coastal Jiangsu, China[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2015, 103: 77-86.
- [34] Shen Yang, Wang Congcong, Gao Chao, et al. Spatial and temporal distribution characteristics and influencing factors of carbon emissions in Zhejiang Bay area economic belt based on urbanization[J]. *Journal of Natural Resources*, 2020, 35(2): 329-342. [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.]
- [35] Jiang Wenyan, Zeng Zhenxiang, Zhang Zhengyun, et al. Simulation of carbon emission system of urban water and land resources utilization based on system dynamics model: a case of Tianjin[J]. *Journal of Safety and Environment*, 2021, 21(2): 882-892. [江文渊, 曾珍香, 张征云, 等. 城市水土资源利用碳排放系统动力学仿真研究——以天津市为例[J]. *安全与环境学报*, 2021, 21(2): 882-892.]
- [36] Fu Xiaoyang, He Yongjian, Huo Ziwen. The coupling evaluation of carbon emission and land use: industry development in Tianjin[J]. *ArchiCreation*, 2022(1): 180-185. [付晓阳, 何邕健, 霍子文. 天津市碳排放与土地利用——产业发展的耦合评价[J]. *建筑创作*, 2022(1): 180-185.]
- [37] Ma Yuan, Liu Zhenzhen. Spatial-temporal evolution and influencing factors of carbon emissions from land use in the Yellow River Basin[J]. *Ecological Economy*, 2021, 37(7): 35-43. [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.]
- [38] Zhang Yu, Jiang Bo, Zhao Yinghui, et al. Study on carbon emission effect of urban land use in Northeast China[J]. *Environmental Science & Technology*, 2022, 45(7): 209-217. [张余, 姜博, 赵映慧, 等. 东北地区城市土地利用碳排放效应研究[J]. *环境科学与技术*, 2022, 45(7): 209-217.]
- [39] Chen Zhijun, Liu Yihua, Lin Huarong. Decoupling analysis of land-use carbon emissions and economic development in Guangdong Province[J]. *Ecological Economy*, 2018(5): 26-32. [陈芷君, 刘毅华, 林华荣. 广东省土地利用碳排放与经济增长之间的脱钩分析[J]. *生态经济*, 2018(5): 26-32.]
- [40] Ma Jianhui, Tian Gang, Xie Wanyi, et al. Spatio-temporal characteristics and decoupling analysis of land use carbon emissions in Hebei Province[J]. *Shanghai Land and Resources*, 2023, 44(1): 67-75. [马建辉, 田刚, 谢宛桢, 等. 河北省土地利用碳排放时空特征和脱钩分析[J]. *上海国土资源*, 2023, 44(1): 67-75.]
- [41] Liao Pan, Zhang Xiongyi, Wu Jilin, et al. Temporal and spatial differences of land use carbon emission and its influencing factors in Hunan Province[J]. *Journal of Hunan University of Arts and Science (Natural Science Edition)*, 2023, 35(1): 67-75, 94. [廖攀, 张雄一, 吴吉林, 等. 湖南省土地利用碳排放时空差异及其影响因素分析[J]. *湖南文理学院学报(自然科学版)*, 2023, 35(1): 67-75, 94.]
- [42] Zhou Jia, Yang Lin, Dong Meina, et al. Carbon emissions intensity change analysis based on land use in Harbin city from 2004 to 2012[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2015, 35(3): 322-327. [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.]
- [43] Zhang hongli, Liu Fang. Spatial and temporal disparities in agricultural carbon emissions in Xinjiang and decomposition of impact factors[J]. *Chemical Engineering Transactions*, 2018, 66: 553-558.
- [44] He Haixiu, Zhou Honghua, Bai Ruxiao. Characteristics of carbon emissions based on land use changes in Tacheng area of Xinjiang Uygur Autonomous Region[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2022, 42(3): 373-380. [和海秀, 周洪华, 白如霄. 基于土地利用变化的新疆塔城地区碳排放特征分析[J]. *水土保持通报*, 2022, 42(3): 373-380.]
- [45] Sun He, Liang Hongmei, Chang Xueli, et al. Land use patterns on carbon emission and spatial association in China[J]. *Economic Geography*, 2015, 35(3): 154-162. [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, 35(3): 154-162.]
- [46] Xing Xiuwei, Li Xiaodan, Huang Xin, et al. Study on evolution of spatial characteristics of land use carbon emission in China[J]. *Resource Development & Market*, 2019, 35(11): 1351-1361. [邢秀为, 李晓丹, 黄鑫, 等. 中国土地利用碳排放空间特征演化研究[J]. *资源开发与市场*, 2019, 35(11): 1351-1361.]
- [47] Li Jianbao, Huang Xianjin, Wu Changyan, et al. Analysis of spatial heterogeneity impact factors on carbon emissions in China[J]. *Economic Geography*, 2015, 35(11): 21-28. [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, 35(11): 21-28.]
- [48] Duan Xiaonan, Wang Xiaoke, Lu Fei, et al. Carbon sequestration and its potential by wetland ecosystems in China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(2): 463-469. [段晓男, 王效科, 逯非, 等. 中国湿地生态系统固碳现状和潜力[J]. *生态学报*, 2008, 28(2): 463-469.]
- [49] Li Yuanyuan, Wei Wei, Zhou Junju, et al. Changes in land use carbon emissions and coordinated zoning in China[J]. *Environmental Science*, 2023, 44(3): 1267-1276. [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.]
- [50] Li Dandan, Liu Rui, Chen Dong. Research on space-time heterogeneity of carbon emission and influencing factors in provinces of China[J]. *China Population Resources and Environment*, 2013, 23(7): 84-92. [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, 23(7): 84-92.]
- [51] Chen Xi, Luo Geping. Researches and progress of oasis ecology in arid areas[J]. *Arid Land Geography*, 2008, 31(4): 487-495. [陈曦, 罗格平. 干旱区绿洲生态研究及其进展[J]. *干旱区地理*, 2008, 31(4): 487-495.]
- [52] Wang Shengxia, Wang Fei. Response of oasis area to the surface runoff in Hexi Inland River Basin of China[J]. *Journal of Desert Research*, 2021, 41(2): 231-241. [王生霞, 王飞. 河西内陆河流域绿洲面积对地表径流的响应[J]. *中国沙漠*, 2021, 41(2): 231-241.]
- [53] Yang Jie, Huang Xin. The 30 m annual land cover dataset and its dynamics in China from 1990 to 2019[J]. *Earth System Science Data*, 2021, 13(8): 3907-3925.
- [54] Ma Qing, Li Ding, Liao Jie, et al. Analysis of land use change and its driving forces in the oasis of Shule River middle and lower reaches[J]. *Economic Geography*, 2014, 34(1): 148-155. [马晴, 李丁, 廖杰, 等. 疏勒河中下游绿洲土地利用变化及其驱动力分析[J]. *经济地理*, 2014, 34(1): 148-155.]

- [55] Gong Jie, Qian Caiyun, Qian Dawen. Land use change and response of environment in the middle-lower reaches of the Shule River Basin during the period of 1977-2013[J]. Arid Zone Research, 2017, 34(4): 775-781. [巩杰, 钱彩云, 钱大文. 1977—2013年疏勒河中下游土地利用变化与环境响应[J]. 干旱区研究, 2017, 34(4): 775-781.]
- [56] Liao Jie, Wang Tao, Xue Xian. Oasis evolution in the Heihe River Basin during 1956—2010 [J]. Journal of Desert Research, 2012, 32(5): 1426-1441. [廖杰, 王涛, 薛娴. 近55a来黑河流域绿洲演变特征的初步研究[J]. 中国沙漠, 2012, 32(5): 1426-1441.]
- [57] Ji Xueqiang, Liu Huimin, Zhang Yuesong. Spatiotemporal evolution and driving factors of spatial correlation network structure of China's land-use carbon emission[J]. Economic Geography, 2023, 43(2): 190-200. [吉雪强, 刘慧敏, 张跃松. 中国省际土地利用碳排放空间关联网络结构演化及驱动因素[J]. 经济地理, 2023, 43(2): 190-200.]
- [58] Xiao Lei, Sun Guiyan. Study on temporal and spatial patterns of carbon emission in Chongqing based on land use change[J]. Territory & Natural Resources Study, 2023(3): 28-32. [肖磊, 孙贵艳. 基于土地利用变化的重庆碳排放时空格局研究[J]. 国土与自然资源研究, 2023(3): 28-32.]
- [59] Li Yuling, Li Shiping, Qi Jingjing. Influencing factors on carbon emissions of land uses and analysis of their decoupling effects in Shaanxi Province[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2018, 25(1): 382-390. [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.]
- [60] Lu Junyu, Huang Xianjin, Dai Jing, et al. Spatio-temporal scale analysis on the equality of energy consumption carbon emission distribution in China[J]. Journal of Natural Resources, 2012, 27(12): 2006-2017. [卢俊宇, 黄贤金, 戴靓, 等. 基于时空尺度的中国省级区域能源消费碳排放公平性分析[J]. 自然资源学报, 2012, 27(12): 2006-2017.]
- [61] Zhang Zhenlong, Hou Yanzhen, Sun Honghu. Calculation of spatial carbon emission in urban land and the difference of low-carbon development efficiency[J]. Journal of Natural Resources, 2023, 38(6): 1464-1481. [张振龙, 侯琰珍, 孙鸿鹄. 市域国土空间碳排放测算及低碳化发展效率差异[J]. 自然资源学报, 2023, 38(6): 1464-1481.]
- [62] Zhou Lanping, Wei Huaidong, Ding Feng, et al. Spatial-temporal variation and dynamic evolution of the cultivated land in Shiyang River Basin from 1973 to 2010 [J]. Arid Zone Research, 2015, 32(3): 483-491. [周兰萍, 魏怀东, 丁峰, 等. 1973—2010年石羊河流域耕地时空变化研究[J]. 干旱区研究, 2015, 32(3): 483-491.]
- [63] Lu Huixiong, Nie Zhenlong, Liu Min, et al. Research on land cover changes in Shiyang River Basin in recent 50 years based on RS and GIS [J]. Geology and Resources, 2020, 29(2): 165-171, 179. [卢辉雄, 聂振龙, 刘敏, 等. 基于RS和GIS的石羊河流域近50年土地覆被类型变化研究[J]. 地质与资源, 2020, 29(2): 165-171, 179.]
- [64] Shang Haiyang, Zhang Zhiqiang. Analysis on effect of land-use types and change of Shiyang River Basin[J]. Resource Development & Market, 2015, 31(1): 40-43, 125. [尚海洋, 张志强. 石羊河流域土地利用类型变化与转换效果分析[J]. 资源开发与市场, 2015, 31(1): 40-43, 125.]
- [65] Tang Xia, Feng Qi. Analysis on driving mechanism of land use change in Heihe River Basin during historical period [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2015, 22(3): 336-340, 348. [唐霞, 冯起. 黑河流域历史时期土地利用变化及其驱动机制研究进展[J]. 水土保持研究, 2015, 22(3): 336-340, 348.]
- [66] Xiao Feiyan. Spatial-temporal characteristics and driving factors of land use and landscape changes in the middle reaches of the Heihe River[D]. Xi'an: Chang'an University, 2019. [肖飞艳. 黑河中游土地利用和景观变化的时空特征与驱动因素[D]. 西安: 长安大学, 2019.]
- [67] Qi Jinghui. Study on ecological evolution of oasis in Shule River Basin[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2017. [齐敬辉. 疏勒河流域绿洲生态演变研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2017.]
- [68] Yang Wenxue, Zhang Xiaoping. Carbon emission effect of land-use and influencing factors decomposition of carbon emission in Gansu Province[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2016, 44(33): 49-53. [杨文学, 张小平. 甘肃省土地利用碳排放变化及影响因素分解[J]. 安徽农业科学, 2016, 44(33): 49-53.]
- [69] Wang Yirui. Spatial and temporal changes of land use and analysis of carbon emission in Ganzhou district [D]. Lanzhou: Northwest Normal University, 2016. [王怡睿. 甘州区土地利用时空变化及碳排放分析[D]. 兰州: 西北师范大学, 2016.]

Spatiotemporal variations of carbon emissions based on land use change in the Hexi Inland River Basin

WANG Fei^{1,2}, HAN Jun¹

(1. School of Statistics, Lanzhou University of Finance and Economics, Lanzhou 730101, China; 2. School of Finance, Lanzhou University of Finance and Economics, Lanzhou 730101, China)

Abstract: Land use change was one of the important reasons for increases in carbon emissions. To explore regional carbon emissions and carbon emission efficiency due to land use change are crucial for understanding carbon emissions characteristics of different land use types and formulating carbon emissions reduction policies of land use. This study takes the Hexi Inland River Basin, a typical region that integrates the importance and vulnerability of China's ecosystems, as the study area. Based on remote sensing data of land use from 1985 to 2020, we studied on spatiotemporal variations of each land use type and its carbon emissions, carbon emission efficiency in the Hexi Inland River Basin by using land use dynamic changes models and carbon emission coefficient method. The following results were discovered: (1) From 1985 to 2020, oasis area showed a continuous expansion trend, with a relative increase of 13.17% in 2020 compared with 1985. Except the construction land was dominated by unidirectional transfer, bidirectional transfers were frequent among the remaining land use types. (2) The net carbon emissions of all land use types showed an overall upward trend, and the net carbon emissions in 2020 (113.17×10^4 t) increased by 1.33 times relative to 1985 (113.17×10^4 t). Moreover, there is a significantly positively correlation between the net carbon emissions and the oasis area, also the carbon emissions caused by the expansion of cropland and construction land was the main reason for the increase in the net carbon emissions. Additionally, the carbon emissions elasticity coefficient showed an increasing trend overall, which increased from -1.83 in 1990 to 205.91 in 2020; (3) The carbon emissions intensity of cropland and construction land showed increasing trend from 1985 to 2020, which increased from $32.17 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2}$ in 1985 to $60.74 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2}$ in 2020; as well as the oasis carbon emissions intensity, which increased from $5.09 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2}$ in 1985 to $10.48 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2}$ in 2020, but the increasing rate of oasis carbon emissions intensity was smaller than that of cropland and construction land. Also, oasis carbon absorption capacity intensity decreased generally from 1985 to 2020. (4) As industrial cities, Jiayuguan city and Jinchang city have the largest multi-year average oasis carbon emissions intensity, following the administrative divisions dominated by irrigated agriculture were relatively lower, and Qilian County was the lowest, which is dominated by animal husbandry. Based on quantitatively analyzing the carbon emissions and its changes due to land use in the Hexi Inland River Basin, this study helps us understand the carbon emissions characteristics of land use in the inland river basin, meanwhile, provide scientific knowledge and decision-making reference for seeking solutions to carbon emissions reduction schemes of land use, strengthening land use management and promoting the low-carbon development model of land use.

Key words: land use change; carbon emissions; carbon emissions intensity; spatiotemporal variations; Hexi Inland River Basin

(责任编辑: 牟翠翠)