基于系统动力学的黄河流域土地利用碳排放核算及预测

孟庆香[1], 郑燕娜[1], 王学文[2], 林利伟[3], 吴天[4], 蔡恩香[1], 栗滢超[1]

(1. 河南农业大学 资源与环境学院,河南 郑州 450046; 2.三门峡市土地储备整理中心,河南 三门峡 472000; 3.鹿邑县不动产登记服务中心,河南,周口,477200; 4.阿合奇县哈拉奇乡人民政府,新疆维吾尔自治区 克孜勒苏柯尔克孜自治州 843504)

摘 要:【**目的**】黄河流域作为中国经济发展和环境保护的重要区域,相关省区面临着较大的碳减排压力,在此背景下,研究碳排放旨在实现黄河流域生态保护和高质量发展战略目标。【**方法**】根据黄河流域九省区1990—2020土地利用、人口、能源和经济等数据,对土地利用碳排放和碳足迹指数等进行核算并构建系统动力学预测模型,预测土地利用碳排放的变化情况,揭示碳排放变化规律。【**结果**】①1990—2020年,黄河流域净碳排放量呈持续上升的趋势。与此同时,碳足迹压力指数和碳排放风险指数同步上升。建设用地是主要碳源,耕地和林地则是主要碳汇。②灰色关联分析表明,各地类对黄河流域净碳排放量的影响按从大到小的顺序排列为:建设用地>水域>林地>耕地>未利用地>草地。③借助系统动力学模型预测黄河流域未来总体的土地利用碳排放量并进行情景模拟分析,到2035年,在生态优先发展情景下,研究区域内净碳排放量为23 070万 t,现状延续情景下为28 040万 t,经济高速发展情景下为35 610万 t。【**结论**】为实现黄河流域低碳转型与高质量发展,应严格控制建设用地扩张,增强碳汇能力,推动发展模式向生态优先方向转变。

关键词:黄河流域,土地利用碳排放,灰色关联度,系统动力学

中图分类号:K903,F301.1 **文献标识码:**A

随着极端天气自然灾害的增加,全球变暖问题已经受到各界广泛关注。当前中国正处于经济社会发展关键阶段,经济增长虽有所放缓,但仍需大量能源支撑,碳减排压力显著[1]。2020年习近平主席在联合国第75届会议上提出,“二氧化碳排放力争于2030年前达到峰值,努力争取2060年前实现碳中和。”[2]。黄河流域是中国的主要粮食生产区,其土地利用的变化对碳排放的影响较大,由于受到区域能源结构和产业结构的制约,黄河流域的内蒙古自治区、山西省等多个省份均为主要煤炭产地和能源消费地,面临着巨大的碳减排压力。因此,研究黄河流域相关省区碳排放量变化规律,在不同情景下预测碳排放峰值,对早日实现流域内碳达峰,进而实现国家的碳中和战略目标具有重要意义[3]。

国内外多个学者从多个角度采用不同方法对土地利用碳排放进行了深入细致的探讨,研究内容主要聚焦于土地利用变化、土地利用碳排放效应、影响因素及预测等核心方向。张玉苛等运用了IPCC碳排放清单法,核算了2010—2020年环渤海地区43个城市的碳排放量[4]。李鹏等利用遥感估算技术,对近30年来鹤壁市的土地利用和覆被变化进行了评估,并分析了整体碳效应的变化情况[5]。陈菡等在能源服务需求的基础上耦合MARKAL模型与MACRO模型构成了中国MARKAL-MACRO模型,研究发现中国碳排放量在2050年之前具有持续上升的特点[6]。魏心雨等基于2000—2020年河南省土地利用和能源消费数据,量化河南省碳排放的时空格局分布,并借助地理探测器方法分析河南省土地利用碳排放量空间分异的影响因素[7]。雷涯邻等基于2015年多区域投入产出表,运用多区域投入产出分析框架,核算了黄河流域消费驱动下的产业与CO_2流动,揭示了各省份、各部门的产出与CO_2排放在流域内外双循环中的特征[8]。ANG B等全面分析了各国总碳强度的变化,并对减少碳排放的主要驱动因素进行了分析[9]。MAINAK B等采用智能体模型对研究区域未来的土地利用碳排放进行了预测[10]。MICHELE F V等采用回归分析模型对研究区域的土地利用碳排放影响因素进行了分析[11]。TONG等采用元胞模型对研究区域的土地利用碳排放影响因素进行了分析,对研究区域未来的土地利用碳排放进行了预测[12]。TAN X C等基于GM(1,1)灰色预测模型,对重庆市2020年的碳排放

收稿日期/Received:2025-10-27 **修回日期/Revised:**2026-01-28

基金项目: 河南省教育厅人文社会科学研究项目(2025-ZZJH-164);国家自然科学基金面上项目(42371314);河南省科协2026年度科技决策咨询研究课题(SKXJCZX-2026-93B)。

第一作者:孟庆香(1977—),女,教授,博士,从事土地资源调查与评价方面的研究。E-mail:qxmeng@126.com。

通信作者:栗滢超(1979—),女,教授,博士,从事土地利用方面的研究。E-mail:ycli666@126.com。

量做出了预测[13]。ZHANG Y 等以保定市为研究对象,通过情景预测得出二氧化碳排放峰值时间[14]。

总体来看,国内外研究聚焦于区域土地利用碳汇/源核算及其时空格局的分析,但未从区域系统视角深入揭示土地利用变化对碳排放的影响机理,且对于土地利用碳排放未来变化的预测研究相对较少,尤其是对区域碳排放的社会、经济和生态等驱动因素的研究还需要进一步加强。本研究基于黄河流域内九个省区 1990—2020 年土地利用、人口、能源和经济数据,利用 IPCC 清单法中的碳排放系数法,结合能源消费数据,对土地利用碳排放从多角度核算分析,构建系统动力学预测模型,分别预测不同情景黄河流域相关省区土地利用碳排放情况,以期为区域内重点省区早日实现碳达峰目标提供理论参考。

1 研究区域与数据来源

1.1 研究区域概况

黄河是中华民族的母亲河,是仅次于长江的中国第二大河流,源于青藏高原,全长 5 464 km,流域面积约 75 万 km^2,约占国土总面积的十二分之一。西起青海,东至山东,涵盖青海、四川、甘肃、宁夏回族自治区、陕西、山西、内蒙古自治区、河南和山东等九个省区[15]。流域内,气候差异显著,生态环境脆弱,地形较为复杂。人口众多,截至2020 年末,研究区域总人口为 42 160.41 万 人,占全国人口的 30%。地区生产总值为 253 861.61 亿元,与长江流域相比,黄河流域的产业结构主要以传统产业为主,转型升级的内生动力较为不足,经济发展水平差别大且发展质量有待提高。研究以黄河自然流经地区为研究对象,考虑到相关研究数据的可获取性和准确性,最终选取流域内 9 个省区作为研究区域。

1.2 数据来源

土地利用数据采用中国科学院的土地利用监测数据,分辨率为 30m×30m,2000、2005、2010、2020 年各期数据均基于当年 Landsat TM/ETM 遥感影像制作。青海、四川、甘肃等黄河流域九省区的能源消费及碳排放量数据,均选取于 1991 年、2001 年、2011 年及 2021 年四个年份的《中国能源统计年鉴》;GDP、产业产值、固定资产投资、第一产业投资额、第二产业投资额、第三产业投资额、能源消耗总量和居民生活能源消费量等数据来源于各省份统计年鉴。

2. 研究方法

2.1 土地利用碳排放核算

2.1.1 土地利用直接碳排放核算

土地利用直接碳排放是指在土地直接利用过程中产生的碳排放,该部分涉及耕地、林地、草地、水域和未利用地五个土地利用类型。非建设用地的碳排放系数主要考虑研究区域跨度较大,结合各省实际和前人研究成果确定,具体土地利用类型碳排放系数见表 1。土地利用直接碳排放核算方法参照阳凯[16]相关研究成果,结合研究区域实际,计算公式如下:

$$E = \sum e_i = \sum S_i \times Q_i \#(1)$$

式中:土地利用类型以i来代表,区域内土地利用碳排放总量用E代表,e_i表示不同土地类型所产生的碳排放量,S_i表示不同土地类型的面积,Q_i表示不同土地类型的碳排放系数。

表 1 非建设用地碳排放系数表

Tab. 1 Carbon emission factors of non-construction land

地类	碳排放系数 t/(hm^2·a)	参考来源
耕地	0.497	蔡祖冲、何勇[17-18]
林地	-0.612 5	石洪昕[19]]
草地	-0.021	方精云[20]
水域	-0.253	段晓男[21]
未利用地	-0.005	刘希雅[22]

2.1.2 土地利用间接碳排放核算

人们使用土地作为载体进行社会经济活动时,其碳排放的计算方法是以人在生产和生活中所消耗的能量为基础。建设用地是中国土地利用中最重要的碳来源,而矿物燃料的碳排放量则以燃烧为主要来源。《IPCC 国家温室气体清单指南》(2006)中的标准煤转换系数和碳排放系数,参照有关研究结果[23]。结合本地区的能源消耗,选择了 8 种不同类型的能源。

$$E_c = \sum_{i=1}^{8} (E_{ci} \times b_i \times f_i) \#(2)$$

式中:E_c为建设用地碳排放量,E_{ci}为不同类型能源消耗量。针对原煤、焦炭、原油等关键化石能源,采用标准煤折算系数b_i与碳排放系数f_i进行核算,具体系数值见表 2。

表 2 各类能源碳排放系数

Tab. 2 Carbon emission factors of various energy sources

能源类型	原煤	焦炭	原油	燃料油	汽油	煤油	柴油	天然气(m^3)

碳排放系数 (kg/kg 标准煤)	0.755 9	0.855 0	0.585 7	0.553 8	0.571 4	0.592 1	0.618 5	0.448 3
标准煤折算系数 (kg 标准煤/kg)	0.714 3	0.971 4	1.428 6	1.428 6	1.471 4	1.471 4	1.457 1	1.214 3

2.1.3 碳足迹与碳排放风险核算

碳足迹压力指数通过衡量土地利用中的碳源/碳汇比,来间接揭示区域人类经济活动对生态系统的影响[24]。具体计算公式如下:

$$C_P = \frac{C_0}{C_q} \#(3)$$

公式中:C_P代表碳足迹压力指数,C_0代表不同土地利用方式的碳源,C_q代表不同土地利用方式的碳汇。为了进一步探究土地利用碳排放带来的影响,引入碳排放风险指数来测度碳排放的风险性[25]。

$$C_{Rl} = \frac{\sum_{i=1}^{n}(S_i \times P_i)}{S} \#(4)$$

公式中:C_{Rl}表示碳排放风险指数,S_i表示第i种土地利用类型面积,S示区域土地总面积,P_i表示第i种类型碳排放系数。

2.2 灰色关联度理论

灰色关联度理论分析,是针对系统内部各要素之间的关系进行探讨,由于土地利用类型与碳排放之间数据有限,信息不完整,选取灰色系统理论进行关联度测算[26]。具体模型构建如下:

将研究区内各土地利用类型的面积作为子序列,假设 s 个分析区内包含 w 个原始序列:

$$\left\{x_1^{(0)}(s), x_2^{(0)}(s), ..., x_w^{(0)}(s)\right\} \#(5)$$

将研究区内不同土地利用类型的碳排放量作为母序列,假设 s 个分析区内有 z 个原始母序列:

$$\left\{y_1^{(0)}(s), y_2^{(0)}(s), ..., y_z^{(0)}(s)\right\} \#(6)$$

由于以上数列的量化程度不同,采用均值化处理,消除数据量纲,得到全新的数列,将比较数据序列与参考序列进行绝对值差值,计算公式如下:

$$\Delta m(q) = \left|y_i^{(0)}(s) - x_i^{(0)}(s)\right| \#(7)$$

比较数列对参考数列在 k 点上的相对差值,就表示为 k 点上的关联系数,计算公式如下:

$$\xi_i(k) = \frac{\min\limits_i \min\limits_k |y(k) - x_i(k)| + \alpha \max\limits_i \max\limits_k |y(k) - x_i(k)|}{|y(k) - x_i(k)| + \alpha \max\limits_i \max\limits_k |y(k) - x_i(k)|} (8)$$

$\alpha \in (0,\infty)$称为分辨系数,α的取值范围一般为(0,1),本研究中α取值 0.5,将比较数列与参考数据的关系系数的平均值称之为关联度。计算公式如下:

$$r_i = \frac{1}{q}\sum_{k=1}^{q}\xi_i(k) \#(9)$$

公式中:r_i表示灰色关联度,q表示关联系数数量。

2.3 系统动力学模型

系统动力学模型是基于多因素相互作用和因果关系的动态反馈系统、以系统理论为指导思想,强调系统的整体行为,从多角度、多层次、多侧面研究综合问题[27]。通过构建系统动力学模型,模拟不同情景下土地利用碳排放的演变趋势,可实现对未来排放量的预测[28]。本研究中采用系统动力学模型,结合以往研究中土地利用碳排放影响因素,构建研究区域碳排放预测模型,以 2010—2020 年为仿真检验时期,2020—2035 年为预测模拟期,从土地、经济、人口和能源四个子系统入手,对研究区域未来的土地利用碳源量、碳汇量、以 2010 年为基期的累积净碳排放量进行预测和模拟。

2.3.1 子系统构建

根据研究区域土地利用实际发展情况,结合以往的研究结果,将碳排放系统分为人口、经济、土地和能源四个子系统[29]。借助 Vensim 软件构建研究区域土地利用碳排放系统动力学模型,探索研究区域土地利用碳排放系统内部各子系统之间的因果关系,在对模型进行有效性检验的基础上,对研究区域未来土地利用碳排放效率进行预测。

(1)人口子系统

人类是能源消耗和碳排放的主体,人口规模决定着能源消耗和碳排放的总量,结合上文分解分析结果,本研究人口子系统变量主要包括:区域总人口、第一、二、三产业的从业人数。

(2)经济子系统

GDP 和人均 GDP 等因素是影响碳排放总量变化的重要因素。研究的主要经济子系统是 GDP、第一产业产出、第二产业产出、第三产业产出、固定资产投资、第一、二、三产产业投资。

(3)土地子系统

土地是人类社会经济活动的重要载体,对碳排放的增长和吸收起着直接或间接的作用。因此将耕地、林地、草地、建设用地、未利用地和居民生活用地设定为本研究的系统变量。

(4)能源子系统

能源子系统主要研究能源消耗量对碳排放的影响,能源子系统的变量主要包括:能源消耗总量和居民生活能源消费量。

2.3.2 子系统回路分析

根据系统动力学原理,从人口、经济、土地和能

源四个子系统入手,构建研究区域土地利用碳排放因果关系图,分析各子系统内部变量之间的相互关系,具体如图 1 所示。

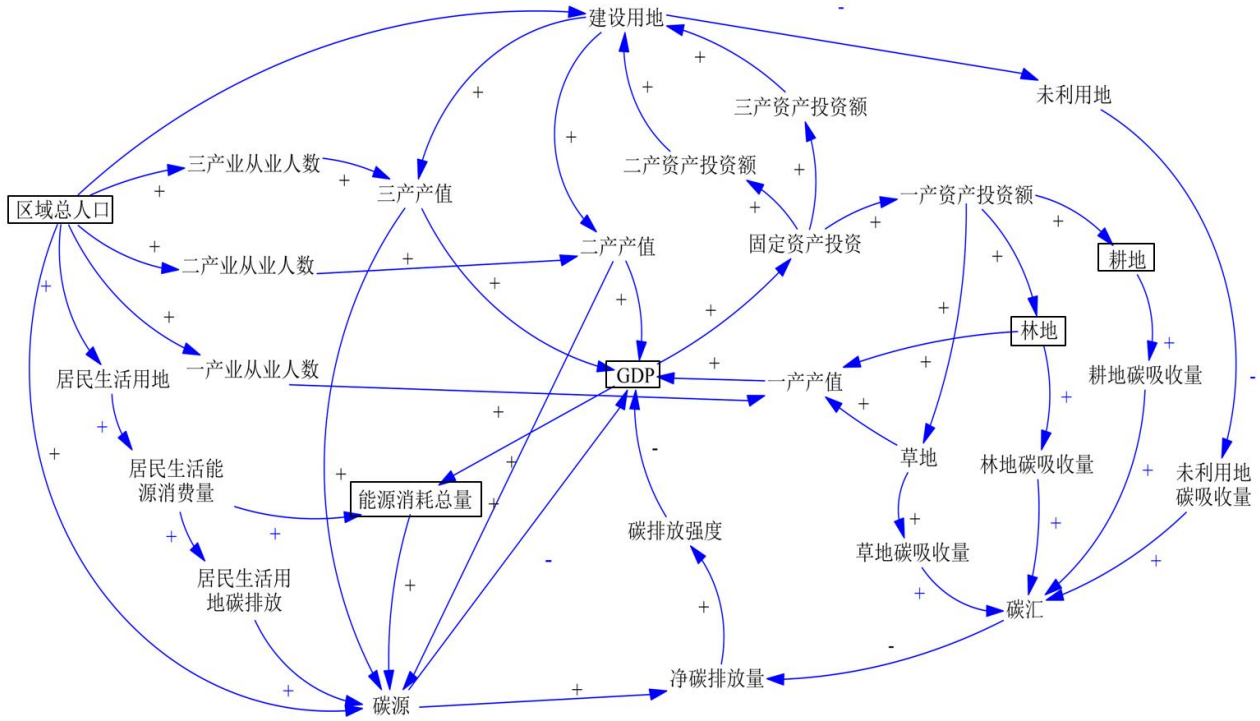

图 1　研究区域土地利用碳排放因果关系图

Fig. 1　Causal Relationship Diagram of Land Use and Carbon Emissions in the Study Area

注:“+”表示正向因果关系,“-”表示反向因果关系。

2.3.3　系统方程的构建

运用 Vensim 软件建立系统动力学模型流量图,根据收集处理的数据,参考相关文献[30],过数学计算、回归分析和经验预测方法推导变量之间关系的方程表达式,定量反映变量之间相互反馈关系。反映变量间关系的因素方程根据实际数据设定(限于篇幅原因,只列出了部分因素方程,见表 3)。

表 3　部分因素方程

Tab. 3　Equations for selected factors

变量名称	计算公式
GDP 总量/亿元	一产产值+三产产值+二产产值
一产产值增加量/亿元	(一产自然增加率+一产额外增加率)*一产产值
一产业从业人数/万人	-2.113 6*区域总人口+95 738
一产产值/亿元	INTEG(一产 GDP 增加量,初始量)
一产资产投资额/亿元	固定资产投资*一产资产投资比例
一产额外增加率/%	一产资产投资额/1.5e+007+一产业从业人数/1e+007+(草地面积+林地面积+耕地面积)/2.5e+007
人口增加量/万人	区域总人口*人口增长率
人均建设用地面积/10^4hm^2	建设用地/区域总人口
人均能源消耗量/10^4t	能源消耗总量/区域总人口
净碳排放量/10^4t	INTEG(碳排放增加量-碳排放减少量,初始量)
区域总人口/万人	INTEG(人口增加量,初始量)

单位 GDP 能耗/10^4t 标准煤/亿元	能源消耗总量/GDP
固定资产投资/亿元	1.2 818*GDP-63 117
居民生活用地/10^4hm^2	INTEG(居民生活用地变化量,初始量)
居民生活用地变化量/10^4hm^2	0.1+人口增加量/500
居民生活碳排放量/10^4t	煤炭消耗碳排放系数*居民生活能源消费量
居民生活能源消费量/10^4t	156.65*居民生活用地-28 328
建设用地/10^4hm^2	INTEG(新增建设用地,初始量)
新增建设用地/10^4hm^2	15.8+(二产资产投资额+三产资产投资额)/300 000+人口增加量/200
未利用地/10^4hm^2	总面积-居民生活用地-林地面积-耕地面积-草地面积
未利用地碳吸收量/10^4t	未利用地*未利用地碳排放系数
林地变化量/10^4hm^2	0.000 1*一产资产投资额-新增建设用地*0.33
林地碳排放吸收量/10^4t	林地面积*林地碳排放吸收系数
林地面积/10^4hm^2	INTEG(林地变化量,初始量)
碳排放强度/10^4t	净碳排放量/GDP
能源消耗总量/10^4t	0.281 4*GDP+91 908

注:变量初始值设定取 2010 年数据,第二产业、第三产业相关数据可参照第一产业数据推出,耕地、草地相关数据可参照林地数据推出。

根据可持续发展复杂系统内部各子系统之间及要素之间的逻辑关系,利用系统动力学软件 VensimPIE 构建土地利用碳排放存量流量图模型,如图 2 所示。

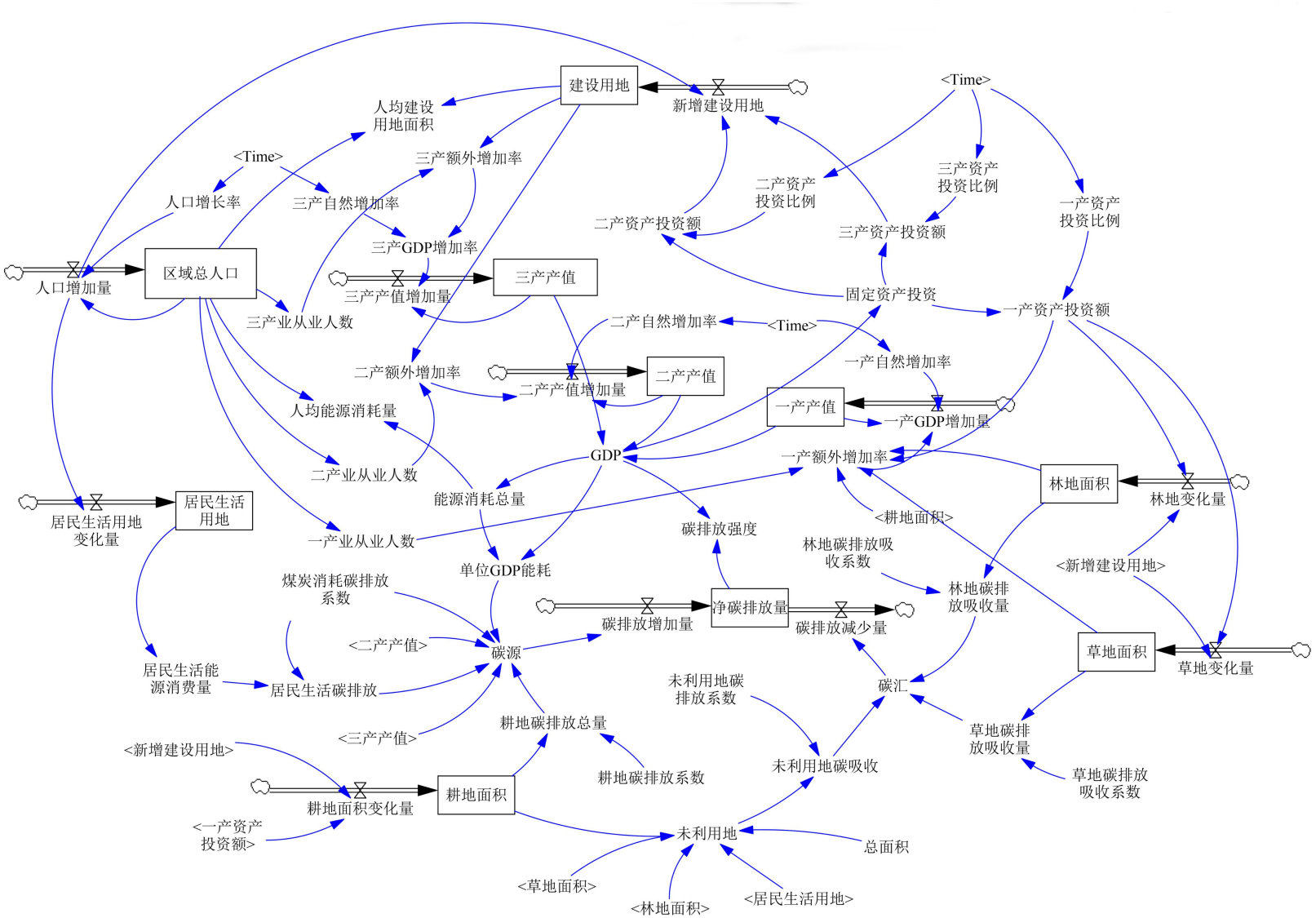

图 2　研究区域土地利用碳排放存量流量图

Fig. 3　Stock-flow diagram of land use carbon emissions in the study area

3. 结果分析

3.1 土地利用碳排放分析

通过计算,研究区域 1990 年、2000 年、2010 年、2020 年净碳排放量分别为 25 349.37 万 t、35 140.27 万 t、112 451.63 万 t 和 157 891.79 万 t,呈现直线上升趋势,这与以往研究结果较为接近,研究结果具有可靠性[31]。1990—2000 年、2000—2010 年、2010—2020 年三个时间段的变化量分别为 9 790.9 万 t、77 311.36 万 t、45 440.16 万 t。其中变化量最大的时期是 2020—2010 年,变化率达到了 220%,这与中国这段时期经济高速发展,碳减排意识薄弱密切相关。

1990 年、2000 年、2010 年、2020 年,耕地的碳排放量先上升后下降,总体变化幅度不大,三个时段内变化率分别为 2%、-1%和-3.7%。建设用地的碳排放量总体呈上升趋势,变化幅度较大,三个时段内的变化率分别为 37.84%、219.23%和 40.64%,总体变化量为 133 023.32 万 t,变化率为 518.86%。林地和草地总体变化幅度不大。水域的碳吸收量呈逐渐上升趋势,三个时段的变化率分别为 0.6%、7.39%和 2.08%,总体变化量为 16.33 万 t,变化率为 10.30%。未利用地的碳吸收量呈先下降后上升再下降的趋势,三个时段内变化率分别为-0.2%、1.47%和-5.39%,总体变化量为 1.63 万 t,变化率为 4.2%,具体情况见表 4。

表 4 研究区域各土地利用类型碳排放量(10^4 t)

Tab. 4 Carbon emissions by land-use type in the study area (unit:10^4 t)

年份	耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用地	净排放量
1990	3 281.32	-3 077.77	-294.38	-158.58	25 637.56	-38.78	25 349.37
2000	3 341.48	-3 050.00	-292.10	-159.53	35 339.12	-38.70	35 140.27
2010	3 306.10	-3 174.06	-281.89	-171.33	112 812.09	-39.27	112 451.63
2020	3 180.80	-33 439.67	-298.14	-174.91	158 660.88	-37.15	157 891.79

1990—2020 年间,黄河流域各省区的净碳排放量持续攀升,表现为碳源的逐年增加与碳汇的逐年下降。此消彼长导致碳足迹压力指数与碳排放风险系数同步上扬,前者从 225.81 增至 1 339.48(年均增 47.84,且c_p>1),后者从 0.74 增至 0.82(年均增 0.03)。这表明,在研究期内,建设用地能源消费碳排放持续增长对林地、草地及水域的碳汇能力不断挤压,致使源汇比例失衡,区域生态环境压力日益严峻。

从省份层面看,经济社会发展差异导致了碳足迹压力与碳排放风险的空间分异。经济与人口大省,如宁夏回族自治区、山东、河南,其两项指数均居沿黄省区前列,明显高于其他地区。仅在 2020 年,占研究区内总指数的 84%。碳足迹压力指数总体上呈增加趋势,且增长幅度大于 50%。其余五省区碳足迹压力指数维持低于 20%的增长幅度,碳排放风险指数变化略有差异。内蒙古自治区由于地处北部草原区,碳足迹压力指数及碳排放风险指数基本维持稳定状态,没有较大波动,具体情况如表 5 所示。

表 5 黄河流域九省区碳足迹压力指数和碳排放风险指数表

Tab. 5 Carbon Footprint Pressure Index and Carbon Emission Risk Index of the Nine Provinces within the Yellow River Basin

省份	碳足迹压力指数				碳排放风险指数			
	1990 年	2000 年	2010 年	2020 年	1990 年	2000 年	2010 年	2020 年
内蒙古自治区	0.73	0.87	1.45	1.87	-0.05	-0.04	-0.04	-0.04
甘肃	17.74	14.76	36.31	34.33	0.02	0.02	0.02	0.03
山西	7.03	10.25	18.86	22.96	0.04	0.04	0.05	0.05
陕西	3.10	3.68	13.35	30.09	0.04	0.04	0.03	0.04
青海	7.48	11.37	51.24	88.84	-0.04	-0.04	-0.04	-0.04
宁夏回族自治区	83.09	111.55	406.00	631.22	0.13	0.15	0.15	0.16
山东	73.73	124.41	262.16	398.51	0.38	0.38	0.41	0.40
河南	26.65	38.53	104.56	90.25	0.30	0.30	0.30	0.31
四川	6.26	7.87	30.31	41.42	-0.08	-0.08	-0.08	-0.08
合计	225.81	323.28	924.24	1 339.48	0.74	0.79	0.81	0.82

3.2 土地利用类型与碳排放关联度分析

由表 6 可知,不同的土地利用方式,和它产生的净碳排放量之间,存在着明显的线性关联,其中建设用地以 0.811 的关联度起主导作用。这归因于沿黄省区高度的人口与工业集聚,对建设用地的持续需求直接拉动了碳排放。其余类型的关联度依次为水域(0.718)、林地(0.698),林地作为关键碳汇发挥重要固碳功能;耕地与未利用地关联度相近,草地最低。研究结果表明,在严格保护耕地、草地及林地,杜绝建设占用之余,调控建设用地规模是减碳的关键。

表 6 土地利用类型与净碳排放量的关联度表(0—1)

Tab. 6 Degree of association between land-use types and net carbon emissions (0—1 scale)

土地利用类型	耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用地
平均关联度	0.691	0.698	0.674	0.718	0.811	0.685

总体来看,不用地类对研究区净碳排放的影响程度按以下顺序排列:建设用地>水域>林地>耕地>未利用地>草地。时序动态显示,关联度在 2010 年前后出现拐点性变化,整体呈先升后降的波动格局(图 3),且碳源地类的关联度振幅普遍大于碳汇地类。这充分表明,“十一五”规划后,沿黄省区的经济发展模式转型取得成效,通过产业结构调整与节能减排,生态经济已成长为新的增长极。

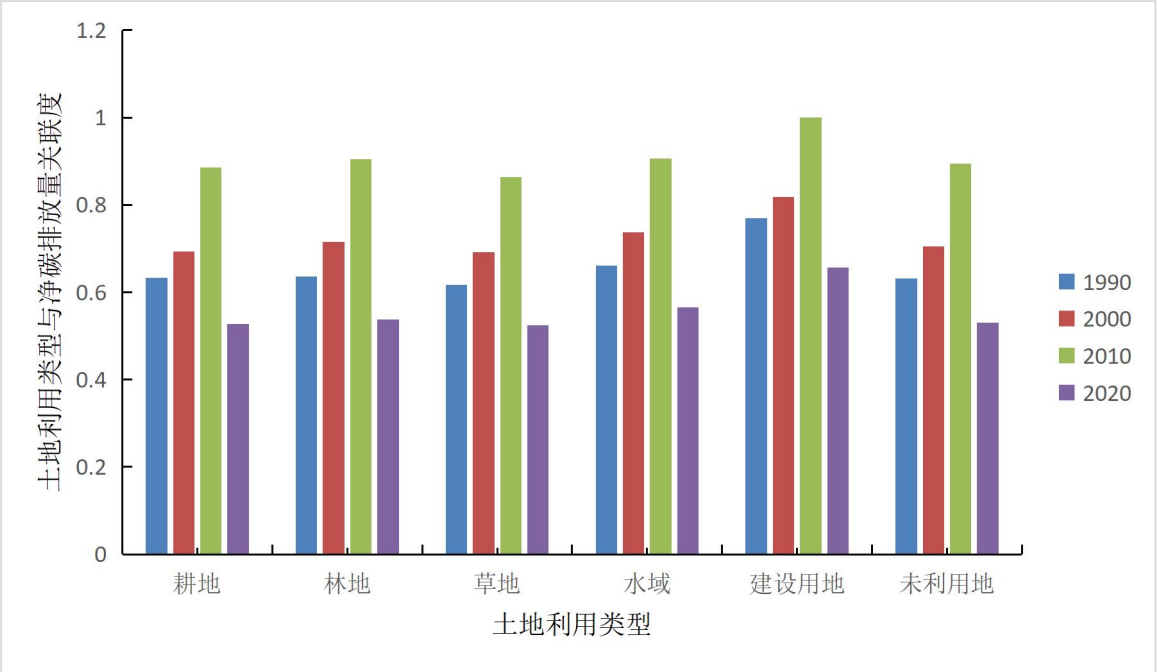

图 3 土地利用类型与净碳排放关联趋势图

Fig. 3 Trends in the relationship between land-use types and net carbon emissions

3.3 土地利用碳排放预测

3.3.1 模型有效性检验

由上文可知,建设用地对土地利用碳排放关联性最强,结合以往的研究[32],从建设用地的主要评价指标中选取区域总人口和 GDP 两个指标 2010—2020 年的数据为检验变量,将 2010—2020 年历史数据与模型模拟值进行历史性检验,检验结果如表 7 所示:

表 7 模拟相对误差

Tab. 7 Simulation relative error

年份	区域总人口/万人				GDP/亿元			
	真实值	预测值	差量	误差率/%	真实值	预测值	差量	误差率/%
2010	40 567	40 760	5	0.008 1	107 411	107 400	-11	-0.010 1
2011	40 755	40 910	3	0.011 5	127 081	126 600	-481	-0.378 7
2012	40 907	41 000	-4	0.008 4	141 190	141 700	510	0.361 3
2013	41 004	32 360	-1	-0.008 7	154 835	156 200	1 365	0.881 3

2014	32 361	41 360	-3	-0.003 7	166 736	170 200	3 464	2.077 3
2015	41 363	41 630	-5	-0.007 7	176 546	183 600	7 054	3.995 5
2016	41 635	41 820	-4	-0.011 7	188 879	197 100	8 221	4.352 4
2017	41 824	41 950	4	-0.010 5	209 600	219 400	9 800	4.675 5
2018	41 946	42 050	2	0.010 7	229 890	240 300	10 410	4.528 3
2019	42 048	42 160	0	0.004 9	245 997	256 500	10 503	4.269 5
2020	42 160	40 570	3	-0.001 0	253 862	263 300	9 438	3.717 9

由表 7 可知:两个指标 11 年指标值的相对误差均小于 5%,表明模型模拟结果基本可靠。可在此基础上模拟预测研究区域土地利用碳排放的状态及变化趋势。

3.3.2 预测结果及仿真性分析

通过仿真研究区域土地利用碳排放系统,得到研究区域 2010—2035 年土地利用碳源量、碳汇量和净碳排放量(累积,2010 年为 0)模拟结果和变化趋势(2010—2020 年的碳排放量为实际值,2020 年之后为预测值)。其结果如图 4 所示:

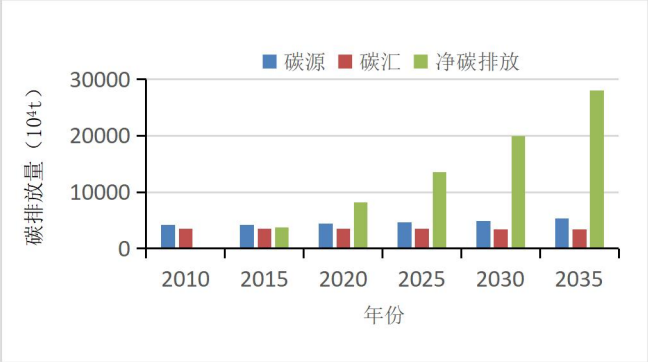

图 4 研究区域土地利用碳排放(累积)预测图

Fig. 4 Projection of Cumulative Land Use Carbon Emissions in the Study Area

根据预测结果,2025 年碳源预测量为 4 637 万 t、2030 年为 4 917 万 t、2035 年为 5 339 万 t,呈现连续上升趋势。2025 年碳汇预测量为 3 459 万 t、2030 年为 3 449 万 t2035 年为 3 441 万 t,呈现下降趋势,但趋势较缓。2025 年净碳排放量(累积)为 13 490 万 t、2030 年为 19 910 万 t,2035 年为 28 040 万 t,呈现连续上升趋势。

3.3.3 地利用碳排放情景模拟分析

由于黄河流域相关省区的 GDP 产值较高,分析在经济发展速度不同的几种情景里,累积净碳排放量会呈现出怎样的变化趋势较为重要。将经济发展分为:生态优先发展、现状延续发展、经济快速发展三种模拟方案,研究不同经济发展程度下对土地利用碳排放的影响。“生态优先发展”情景对应国家“黄河流域生态保护和高质量发展”及“双碳”战略的强约束目标,旨在探讨在最优政策与技术组合下的理论“碳减排”潜力。“现状延续发展”情景反映了当前发展模式与政策力度下的碳排放量的可能路径,用于评估“不作为”的碳排放后果。“经济快速发展”情景则聚焦于发展压力下环境规制可能松动的风险路径,用于揭示若未能有效转型而产生的碳排放量。具体模拟方案如表 8 所示:

表 8 经济子系统情景模拟

Tab. 8 Economic Subsystem Scenario Simulation

情景	模拟方案
生态优先发展	将第一、二、三产业 GDP 自然增长率各降低 30%
现状延续发展	不改变任何变量,按照现有趋势模拟
经济高速发展	将第一、二、三产业 GDP 自然增长率各增加 30%

如图 5 所示,在所有发展模式下(包括生态优先、现状延续及经济快速发展),净累积碳排放量均呈上升趋势,且经济发展速度越快,净碳排放量(累积)增长越快。同时由表 9 可以看出,生态优先发展下,2035 年净碳排放量(累积)为 23 070 万 t,现状延续发展下,2035 年净碳排放量(累积)为 28 040 万 t,经济高速发展下,2035 年净碳排放量(累积)为 35 610 万 t。经济快速发展下 2 035 年的净碳排放量(累积)比平稳发展下多 7 570 万 t,比低速发展下多 12 540 万 t,这也说明经济发展对土地利用碳排放的影响是十分重要的。

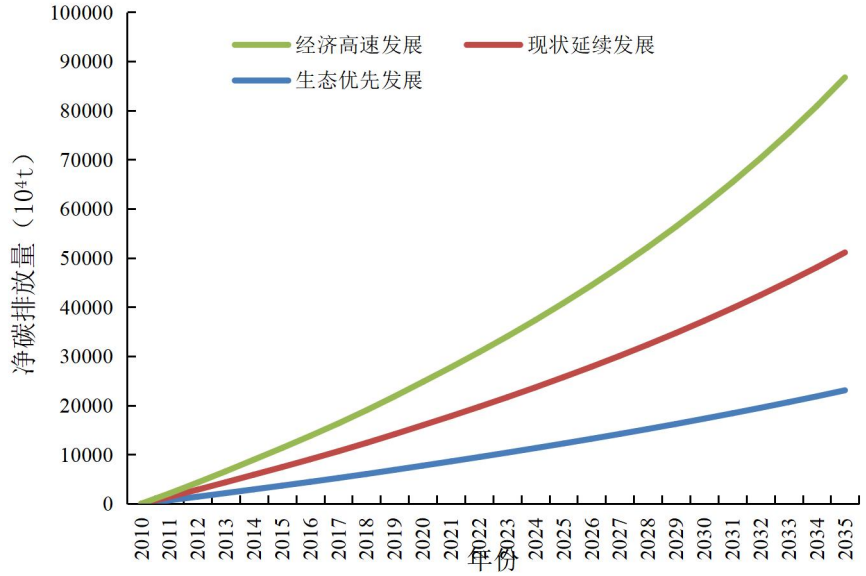

图 5　经济子系统模拟净碳排放量(2020 年前为实际值,2020 年之后为预测值)

Fig. 5　Simulated Net Carbon Emissions of the Economic Subsystem (Actual values pre-2020; Projected values post-2020)

表 9　经济子系统情景模拟(10^4t)

Tab. 9　Economic Subsystem Scenario Simulation (10^4 t)

年份	生态优先发展	现状延续发展	经济高速发展
2010	0	0	0
2011	695.8	695.8	695.8
2012	1 422	1 435	1 448
2013	2 163	2 198	2 233
2014	2 920	2 986	3 054
2015	3 672	3 775	3 886
2016	4 443	4 591	4 752
2017	5 231	5 434	5 660
2018	6 045	6 323	6 638
2019	6 885	7 257	7 690
2020	7 743	8 225	8 797
2021	8 606	9 203	9 923
2022	9 487	10 220	11 110
2023	10 390	11 260	12 360
2024	11 310	12 350	13 680
2025	12 250	13 490	15 080
2026	13 210	14 660	16 570
2027	14 190	15 890	18 150
2028	15 200	17 170	19 830
2029	16 230	18 510	21 630
2030	17 300	19 910	23 560
2031	18 390	21 380	25 620
2032	19 510	22 920	27 840
2033	20 660	24 540	30 230

2034	21 840	26 240	32 810
2035	23 070	28 040	35 610

注:此处净碳排放量为以 2010 年为基期的累积量,2010—2020 年为实际值,2020 年之后为预测值。

4. 结论

研究利用 1990—2020 近 30 年黄河流域相关省区不同土地利用类型的面积、能源消费数据、人口和经济数据,参考借鉴国内外学者的相关研究成果,多角度分析了研究区域内土地利用碳排放情况。用灰色关联度模型探寻不同地类间的主导影响因素,最后运用系统动力学模型对研究区域未来的碳排放量进行模拟预测,主要得出以下结论:

1)1990—2020 年期间,研究区域的净碳排放量一直处于增长趋势,2000—2010 年增长幅度较大。碳汇量比较稳定,且变化幅度较小,碳源量持续增加,变化幅度较大,碳汇量远不及碳源量。在研究区域内碳足迹压力指数与碳排放风险指数呈现同步上升趋势;但两指数受沿黄省份经济社会发展差异的影响,这两个指数存在一定的空间异质性。

2)黄河流域九省区各地类与碳排放的关联度在时序上呈波动性变化,并于 2010 年出现拐点,呈现先升后降的态势,且碳源地类的波动幅度普遍大于碳汇地类。从均值来看,关联度排序为:建设用地>水域>耕地≈林地>草地。

3)借助系统动力学模型,对研究区域总体未来的土地利用碳排放量进行预测,预测结果显示:到 2035 年,研究区域碳源量为 5 339 万 t、碳汇量为 3 441 万 t、净碳排放量(累积)为 28 040 万 t。同时在经济低速发展情景下,研究区域净碳排放量为 23 070 万 t,经济平稳发展情景下为 28 040 万 t,经济低速发展情景下为 35 610 万 t。

研究存在以下不足:不同省份的社会、经济、自然条件不同,碳排放情况会存在差异。本研究将研究区域所涉及省份作为一个整体研究对象,未考虑不同省份之间存在的相互关系,因此在今后应深入对比研究区域内各省份的碳排放变化,考虑其省际效应,采取差异性管控,落实碳减排政策,有利于更深层次地把握土地利用变化对碳排放的影响。

参 考 文 献

[1]. 汤宏波,赵素婷,李富山,等.“碳达峰”视角下的碳排放大国的历史排放量及碳强度研究[J].环境生态学,2024,6(3):137-144.[YANG H B,ZHAO S T,LI F,et al.Carbon emissions and intensity of major carbon emitting countries from a perspective of carbon peak [J].Environmental Ecology,2024,6(3):137-144.]

[2]. 黄汉志,贾俊松,张振旭.江西县域土地利用变化碳排放时空演变及其影响因素[J].生态学报,2023,43(20):8 390-8 403.[HUANG H Z,JIA J S,ZHANG Z X.Spatiotemporal pattern evolution and influencing factors of land-use carbon emissions in counties,Jiangxi Province.Acta Ecologica Sinica,2023,43(20):8 390-8 403.]

[3]. 韩楠,罗新宇.多情景视角下京津冀碳排放达峰预测与减排潜力[J].自然资源学报,2022,37(5):1 277-1 288.[HAN N,LUO X Y.Carbon emission peak prediction and reduction potential in Beijing-Tianjin-Hebei region from the perspective of multiple scenarios [J].Journal of Natural Resources,2022,37(5):1 277-1 288.]

[4]. 张玉苛,牛建广,辛伯雄,等.环渤海地区城市碳排放时空差异及影响因素分析[J].河北省科学院学报,2024,41(6):15-24.[ZHANG Y K,NIU G J,XIN B Y,et.Temporal and spatial differences and influencing factors of urban carbon emissions in Bohai Rim region[J].Journal of Hebei Academy of Sciences,2024,41(6):15-24.]

[5]. 李鹏,李静婷,梁亚红,等.近 30 年鹤壁市土地利用/覆被变化及碳效应分析[J].生态经济,2019,35(7):121-128.[LI P,LI J T,LIANG Y H,et al.Analysis of Land Use/Cover Change and Carbon Effect in Hebi in Recent 30 Years[J].Ecological Economy,2019,35(7):121-128.]

[6]. 陈菡,陈文颖,何建坤.实现碳排放达峰和空气质量达标的协同治理路径[J].中国人口·资源与环境,2020,30(10): 12-18.[CHEN H,CHEN W Y,HE J K.Pathway to meet carbon emission peak target and air quality standard for China[J].China Population,Resources and Environment,2020,30(10):12-18.]

[7]. 魏心雨,王雁杰,孙梦媛,等.基于土地利用结构变化的河南省碳排放时空格局及驱动力分析[J].农业现代化研究,2023,44(5):881-891.[WEI X Y,WANG Y J,SUN M Y,et al.Spatial-temporal patterns and driving forces of carbon emissions in Henan Province based on land use structure changes[J].Studies on Agricultural Modernization,2023,44(5):881-891.]

[8]. 雷涯邻,李东芮,张安,等.消费驱动下黄河流域隐含碳流动特征研究[J].华北水利水电大学学报(自然科学版),2022,43(4):83-90.[LEI Y L,LI D R,ZHANG A,et al.Study on the Characteristics of Embodied Carbon Flow in the Yellow River Basin Driven by Consumption[J].Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition),2022,43(4):83-90.]

[9]. ANG B W,SU B.Carbon emission intensity in electricity production:A global analysis[J].Energy Policy,2016,94:56-63.
[10]. MAINAK B,VARUN S.Development of agent based model for predicting emergency response time[J].Perspectives in Science,2016,8(C):138-141.
[11]. MICHELE F V,SRINATH P.Parametric embodied carbon prediction model for early stage estimating[J].Energy & Buildings,2018,168:106-119.
[12]. TONG,FENG.A review of assessment methods for cellular automata models of land-use change and urban growth[J].International Journal of Geographical Information Science,2020,34(5):866-898.
[13]. TAN X C,DONG L L,CHEN D X,et al.China's regional CO2 emissions reduction potential:A study of Chongqing city[J].Applied Energy,2015,162:1 345-1 354.
[14]. ZHANG Y,LIU C,CHEN L,et al.Energy-related CO2 emission peaking target and pathways for china's city:a case study of baoding city[J].Journal of Cleaner Production,2019,226:471-481.
[15]. 宋冬凌,卢文宇.黄河流域城市群碳排放时空演变多尺度分析[J].华北水利水电大学学报(自然科学版),2024,45(5):48-59.[SONG D L,LU W Y.Multi-scale Analysis of Spatial and Temporal Evolution of Carbon Emissions in Urban Agglomerations in the Yellow River Basin[J].Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition),2024,45(5):48-59.]
[16]. 阳凯.湖南省土地利用变化的碳排放效应研究[D].湖南:南华大学,2021.[YANG K.Effects of Different Land Use Patterns on Carbon Emission of Hunan Province[D].Hunan:University of South China,2021.]
[17]. CAI Z C,KANG G D,TSURUTA H,et al.Estimate of ch4 emissions from year-round flooded rice fields during rice growing season in China[J].Pedosphere,2005,15(1):66-71.
[18]. 何勇.中国气候、陆地生态系统碳循环研究[M].北京:气象出版社,2006,1-20.[HE Y.Study on Carbon Cycle of China's Climate and Terrestrial Ecosystems [M].Beijing:China Meteorological Press,2006,1-20.]
[19]. 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.[SHI H X,MU X M,ZHANG Y L,et al.Effects of Different Land Use Patterns on Carbon Emission in Guangyuan City of Sichuan Province[J].Bulletin of Soil and Water Conservation,2012,32(3):101-106.]
[20]. 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.[FANG J Y,GUO Z D,PU S L,et al.Estimation of Terrestrial Vegetation Carbon Sinks in China from 1981 to 2000[J].Science China (Series D:Earth Sciences),2007(6):804-812.]
[21]. 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(2):463-469.[DUAN X N,WANG X K,LU F,et al.Carbon sequestration and its potential by wetland ecosystems in China[J].Acta Ecologica Sinica,2008(2):463-469.]
[22]. 刘希雅,王宇飞,宋祺佼,等.城镇化过程中的碳排放来源[J].中国人口·资源与环境,2015,25(1):61-66.[LIU X Y,WANG Y F,SONG Q J,et al.Study on Carbon Emissions Sources in China’s Urbanization Process[J].China Population,Resources and Environment,2015,25(1):61-66.]
[23]. 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.[MA Y,LIU Z Z.Study on the Spatial-Temporal Evolution and Influencing Factors of Land Use Carbon Emissions in the Yellow River Basin[J].Ecological Economy,2021,37(7):35-43.]
[24]. 景勇,左玲丽,彭文甫.四川盆地西北部土地利用碳排放时空变化分析:以绵阳市为例[J].环境科学与技术,2021,44(6):172-185.[JING Y,ZUO L L,PENG W F.Spatial-temporal Change Analysis of Carbon Emission from Land Use in Mianyang the Case Study of Mianyang[J].Environmental Science & Technology,2021,44(6):172-185.]
[25]. 刘春英,檀斯园,王骏博,等.长江中下游典型区域土地利用碳排放风险——以江西省九江市为例[J].水土保持通报,2023,43(1):341-349.[LIU C Y,TAN S Y,WANG J B,et al.Carbon Emission Risk from Land Use in Typical Regions of Middle and Lower Yangtze River --A Case Study at Jiujiang City,Jianxi Province[J],Bulletin of Soil and Water Conservation,2023,43(1):341-349.]
[26]. 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.[YUAN Z Z,YE C S,LI H D.Impacts of Land Use Changes in Nanchang on Carbon Emission[J].Journal of Natural Science of Hunan Normal University,2021,44(5):30-39.]
[27]. 王其藩.系统动力学[M].北京:清华大学出版社,1995,12-22.[WANG Q F.System Dynamics [M].Beijing:Tsinghua University Press,1995:12-22.]
[28]. 王火根,肖丽香,廖冰.基于系统动力学的中国碳减排路径模拟[J].自然资源学报,2022,37(5):1 352-1 369.[WANG H G,XIAO L X,LIAO B.Simulation of China's carbon emission reduction path based on system dynamics[J].Journal of Natural Resources,2022,37(5):1 352-1 369.]
[29]. 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):1 267-1

276.[LI Y Y,WEI W,ZHOU J J,et al.Changes in Land Use Carbon Emissions and Coordinated Zoning in China[J].Environmental Science,2023,44(3):1 267-1 276.]
[30].夏正启,王凯,彭道民,等.基于系统动力学模型的胶州湾海域承载力预测[J].中国海洋大学学报(自然科学版),2023,53(6):123-133.[XIA Z Q,WANG K,PENG D M,et al.Prediction of Marine Carrying Capacity of Jiaozhou Bay Based on System Dynamics Model[J].Periodical of Ocean University of China (Natural Science Edition),2023,53(6):123-133.]
[31].UEKAI K,YAPING W,JIUSHENG D,et al.Research on spatial and temporal patterns of carbon emissions and influencing factors in the Yellow River Basin based on county scale[J].E3S Web of Conferences,2024,561:01 014-01 014.
[32].杨皓然,吴群.不同政策方案下的南京市土地利用碳排放动态模拟[J].地域研究与开发,2021,40(3):121-126.[YANG H R,WU Q.Dynamic Simulation of Carbon Emissions from Land Use in Nanjing City under Different Policy Scenarios[J].Areal Research and Development,2021,40(3):121-126.]

Carbon Emissions Accounting and Prediction of Land Use in the Yellow River Basin Based on a System Dynamics

MENG Qingxiang[1]; ZHENG Yanna[1]; Wang Xuewen[2]; Lin Liwei[3]; WU Tian[4]; CAI Enxiang[1]; LI Yingchao[1]

(1.Henan Agricultural University,Zhengzhou 450046, China; 2.Land Reserve and Consolidation Center of Sanmenxia City, Sanmenxia, 472000 China; 3. Real Estate Registration Service Center of Luyi County, Zhoukou, 477200 China;4.Government of Halakqi Township, Kizilsu Kirghiz Autonomous Prefecture 843504, China.)

Abstract: As a crucial region for China's economic development and environmental conservation, the provinces and regions along the Yellow River Basin face significant pressure to reduce carbon emissions. Investigating carbon emissions in the basin holds great significance for ecological protection and high-quality development. Utilizing panel data from nine provinces and regions within the Yellow River Basin from 1990 to 2020, this study calculates land use carbon emissions and carbon footprint indices. Based on land use, population, energy, and economic data, a system dynamics prediction model is constructed to explore and forecast trends in land use carbon emissions. The results indicate: (1) From 1990 to 2020, the net carbon emissions in the Yellow River Basin showed a continuous upward trend. Meanwhile, both the carbon footprint pressure index and the carbon emission risk index increased simultaneously. Construction land was the main carbon source, while cropland and forest land served as the main carbon sinks. (2) Grey relational analysis revealed that the influence of various land types on net carbon emissions in the basin, ranked in descending order, was: construction land > water bodies > forest land > cultivated land > unused land > grassland. (3) Scenario simulations using the system dynamics model to predict future land use carbon emissions demonstrated that by 2035, under the ecological priority development scenario, net carbon emissions in the study area would reach 230.7 million tons; under the status quo continuation scenario, emissions would be 280.4 million tons; and under the high-speed economic development scenario, emissions would rise to 356.1 million tons.

Keywords: Yellow River Basin; Land use carbon emissions; Grey correlation; System Dynamics