



杨蕴琦, 郝晋珉, 张金懿, 武子豪, 孙逸航. 曲周县土地利用碳排放测算及情景预测研究[J]. 中国农业大学学报, 2024, 29(02): 160-175.
YANG Yunqi, HAO Jinmin, ZHANG Jinyi, WU Zihao, SUN Yihang. Carbon emission measurement and prediction of land use in Quzhou County based on carbon neutrality target[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2024, 29(02): 160-175.
DOI: 10.11841/j.issn.1007-4333.2024.02.16

曲周县土地利用碳排放测算及情景预测研究

杨蕴琦 郝晋珉* 张金懿 武子豪 孙逸航

(中国农业大学 土地科学与技术学院/自然资源部农用地质量与监控重点实验室, 北京 100193)

摘要 在全球气候变暖的背景下, 中国积极承诺并开展控制温室气体排放行动以期2030年实现碳达峰、2060年实现碳中和的目标。为厘清土地利用碳排放产生机制并合理预测碳排放, 以曲周县为研究区, 采用排放系数法、样地清查法、IPAT模型和最小二乘法等方法, 构建碳排放核算体系以度量曲周县2009—2019年土地利用碳排放, 并预测81类情景组合下2030年的碳排放情况。结果表明: 1) 曲周县2009—2019年土地利用碳排放总量呈先增加后减少的变化趋势。耕地、建设用地是两大碳排放源; 2) 预测首先按人均GDP设置, 进一步根据人口、能源强度、产业结构共设置81类情景组合: 当GDP处于高速发展时, 曲周县未来碳排放总量模拟值区间为50万~221万t; 当GDP处于惯性发展时, 上升趋势组区间分别为51万~119万t, 最小值为45万t, 下降趋势组最小值29万t; 当GDP处于低速发展时, 呈下降趋势的两组最小值分别为21万和12万t, 另一组在2030年预测值为35万~50万t。研究结论: 土地利用变化会直接或间接影响碳排放, 摸清地类碳属性可为预测碳排放及优化土地利用结构提供抓手。综上, 曲周县可通过人口优化、调整能源结构、优化产业结构等路径在发展经济的同时实现低碳绿色发展。

关键词 碳排放; 土地利用; IPAT模型; 碳排放预测

中图分类号

文章编号 1007-4333(2024)02-0160-16

文献标志码 A

Carbon emission measurement and prediction of land use in Quzhou County based on carbon neutrality target

YANG Yunqi, HAO Jinmin*, ZHANG Jinyi, WU Zihao, SUN Yihang

(College of Land Science and Technology/Key Laboratory of Agricultural Land Quality and Monitoring of Ministry of Natural Resources, China Agricultural University, Beijing 100193, China)

Abstract In the context of global warming, China has actively committed to and carried out actions to control greenhouse gas emissions with a view to achieving carbon peaks by 2030 and achieving carbon neutrality by 2060. In order to clarify the mechanism of land use carbon emissions and reasonably predict carbon emissions, Quzhou County was taken as the research area, and the carbon emission accounting system was constructed by using emission coefficient method, sample plot inventory method, IPAT model and least square method to measure the carbon emissions of land use in Quzhou County from 2009 to 2019, and to predict the carbon emissions in 2030 under 81 scenario combinations. The results show that: 1) The total land use carbon emissions of Quzhou County from 2009 to 2019 showed a trend of increasing first and then decreasing. Cultivated land and construction land are two major sources of carbon emissions; 2) The prediction is first set based on per capita GDP, and further 81 scenario combinations are set based on population, energy intensity, and industrial structure: it can be obtained that when GDP is in high-speed

收稿日期: 2023-07-18

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2015BAD06B01)

作者简介: 杨蕴琦(ORCID: 0009-0003-8706-3054), 硕士研究生, E-mail: yangyunqi@cau.edu.cn

通讯作者: 郝晋珉(ORCID: 0000-0002-1978-5181), 教授, 主要从事国土空间规划和区域可持续发展研究, E-mail: jmhao@cau.edu.cn

development, the simulated value range of total carbon emissions in Quzhou County in the future is 0.50—2.21 million tons; when GDP is in inertial development, the upward trend group interval is 0.51—1.19 million tons, the minimum value is 0.45 million tons, and the minimum value of the downward trend group is 0.29 million tons; when GDP is developing at a low speed, the two groups of minimum values that show a downward trend are 0.21 million tons and 0.12 million tons respectively, and the other group is predicted to be 0.35—0.50 million tons in 2030. It is concluded that land use change will directly or indirectly affect carbon emissions, and finding out the carbon attributes of land can provide a starting point for predicting carbon emissions and optimizing land use structure. In summary, Quzhou County can achieve low-carbon green development while developing the economy through population optimization, adjustment of energy structure, and optimization of industrial structure.

Keywords carbon emissions; land use; IPAT model; carbon emission prediction

全球气候变化已经对人类的生存和发展产生了巨大的影响。工业革命以来,人类一直在消耗越来越多的化石能源,加速侵占草原和森林等自然生态系统,二百年内大气中二氧化碳的平均浓度从过去42万年中的180~300 $\mu\text{L/L}$ 上升到目前的400 $\mu\text{L/L}$ ^[1]。Tian等^[2]研究表明全球碳循环变化与化石能源利用强度增加和土地利用变化之间存在着密切的联系,其中土地利用变化是仅次于化石能源燃烧的全球大气碳增长的第二大来源。土地利用变化改变生态系统及人类活动强度,导致自然碳排放与人为碳排放的变化。可见,以土地利用角度开展碳排放研究对区域经济社会低碳转型具有重要意义。

目前,国际上以土地利用碳排放作用机制^[3]、碳通量模拟^[4]、土地利用、能源消费与碳排放影响机制^[5]等为重点开展了相关研究。国内相关研究也逐渐增多,如土地利用碳收支与经济增长的协同关系研究^[6],推动了碳排放研究理论体系的进一步完善与应用扩展。在碳排放核算研究方面,实测法^[7]、生命周期法^[8]、排放系数法^[9]以及物料平衡法^[10]、样地清查法^[11]、产量估算法^[12]、遥感估测法^[13]和模型模拟法^[14-16]等方法是十分常见的测算方法。人口^[17]、经济^[18]及技术^[19]是影响碳排放最主要的3个驱动因素。其中,人口指标包括人口数量、城镇化率等因素,能源强度、人均GDP、产业结构等是最主要的经济指标。

丁仲礼等^[20]认为二氧化碳排放影响因素的复杂性和多样性给预测工作带来巨大挑战。Ding等^[21]通过建立改进灰色多变量模型对碳排放量进行预测;Sun等^[22]使用极端学习机和粒子群优化算法的组合来预测河北省碳排放量;曹丽斌等^[23]利用柯布-道格拉斯函数,基于历史和未来长

三角碳排放情况通过碳排放达峰判断方法进行碳达峰预测;王勇等^[24]将北京、上海等特大城市作为研究区开发阈值STIRPAT模型来预测不同发展情景下的峰值排放。其中,IPAT模型^[25]有高水平扩展潜力,可以分解人口、经济、技术和环境等要素之间的关系。如朱宇恩等^[26]通过改进IPAT模型,引入科技进步因素对中国碳排放进行了预测和分析。

综上,从土地利用结构角度科学测算碳排放并对未来发展做出预测是必要的,有助于探索经济与生态双赢之路以实现碳中和目标。目前国内在研究尺度上主要聚焦于大尺度,而基于县域尺度的土地利用碳排放与预测研究较少,在某种程度上不利于揭示区域的异质性特征与因地制宜地指导低碳土地利用的实践。因此,本研究拟以曲周县土地利用碳排放为研究对象,采用排放系数法、样地清查法、IPAT模型和最小二乘法等方法,将自然与社会统计数据在空间尺度上进行有效匹配以核算曲周县各土地利用类型产生的碳排放,基于IPAT模型多情景预测曲周县未来碳排放,以期理清土地利用碳排放形成机理,建立一个完整的县域尺度土地利用碳排放核算与预测研究体系,为黄淮海平原区其他区域国土空间规划编制提供可参考的经验。

1 数据来源与研究方法

1.1 数据来源

曲周县人口、行政区面积、人均GDP、产业产值、农业生产等经济社会数据来自2009—2020年的《邯郸市统计年鉴》^[27]和《曲周县统计年鉴》^[28]。不同土地利用类型的面积及变化来自曲周县2009—2020年的土地利用调查及变更调查数据库。在碳

排放核算和预测中,单位GDP能耗、农作物产量、农膜、农药、化肥等数据来自2009—2020年《邯郸市统计年鉴》^[27]。生活垃圾处理相关数据来自河北省统计局网站的统计数据,园地、林地和草地的相关参数来源于文献参考和实地调查。

1.2 研究方法

1.2.1 不同土地利用类型碳排放核算方法

碳排放核算包括耕地、园地、林地、草地的碳排放量以及建设用地中能源消费、生物呼吸、食物、废弃物等方面。核算方法具体见表1。

表1 不同土地利用类型碳排放核算方法

Table 1 Carbon emission accounting methods of different land use types

土地利用类型 Land-use type	碳排放产生过程 Carbon emission generation process	计算公式 Formula	相关参数 Related parameter
耕地 Cultivated land	土壤呼吸 Soil respiration	$i = W_i \times H_i \quad (1)$	i 为土壤呼吸中的碳释放量,t/a; W_i 为第 <i>i</i> 种植被类型的面积,hm ² ; H_i 为第 <i>i</i> 种植被类型的平均土壤呼吸速率。相关参数参考牛灵安等 ^[29] 、禄兴丽等 ^[30] 和张宇等 ^[31] 。
	农业生产活动 Agricultural production activities	$L = Y_i i \quad (2)$	L 为农业生产活动中产生的碳排放量,t/a; Y_i 为农业生产活动的中第 <i>i</i> 种生产投入的消耗量,t; i 为农业生产活动的中第 <i>i</i> 种生产投入的碳排放系数。主要考虑柴油、农药、农膜和化肥的碳排放,相关参数参考研究 ^[32-34] 。
	秸秆燃烧 Straw burning	$B_i = q_i \times g_i \times h_i \times k_i \times n_i \times \frac{12}{44} \quad (3)$	B_i 为燃烧秸秆的碳排放量,t/a; q_i 为第 <i>i</i> 种作物的产量(玉米、小麦、棉花),t; g_i 为第 <i>i</i> 种作物的草谷比; h_i 为第 <i>i</i> 种作物秸秆的干物质比例; k_i 为秸秆燃烧比例; n_i 为第 <i>i</i> 种作物秸秆的燃烧效率; $\frac{12}{44}$ 为二氧化碳和碳质量的转换因子。参考高利伟等 ^[35] 及实地调研参数与研究 ^[36-37] 。
园地 Garden	土壤呼吸 Soil respiration	$i = W_i \times H_i \quad (4)$	实地调研品种大多为苹果树,参考已有的研究结果 ^[38] ,园地土壤呼吸碳排放量为2.89 t/hm ² ,根系贡献率按纬度取41.17%。
	凋落物分解 Litter decomposition	$F = s \times \chi \times \phi \quad (5)$	F 为凋落物分解的碳排放量,t/a; s 为林地面积,hm ² ; χ 为凋落物量,t/hm ² ; ϕ 为凋落物中碳释放到大气比例。结合曲周气候地理条件,其凋落情况与林地相似,因此参考林地计算。
林地 Woodland	土壤呼吸 Soil respiration	$i = W_i \times H_i \quad (6)$	刘绍辉等 ^[39] 研究表明土壤呼吸量随着地理纬度的增加而减少,易志刚等 ^[40] 对林地土壤呼吸碳排放量的研究结果为8.60 t/hm ² ,朱强根研究结果为4.07 t/hm ² ^[41] ,查同刚 ^[42] 研究结果为2.89 t/hm ² ,三者的研究结果符合土壤呼吸碳排放量随纬度变化规律。根据曲周县纬度,土壤呼吸碳排放量取其平均值3.48 t/hm ² ,根据常建国等 ^[43] 对北亚热带-温暖带过渡区林地土壤呼吸根系贡献率的研究结果41.17%~53.86%,取平均值47.52%进行计算。

表 1（续）

土地利用类型 Land-use type	碳排放产生过程 Carbon emission generation process	计算公式 Formula	相关参数 Related parameter
草地 Grassland	凋落物分解 Litter decomposition	$F = s \times \chi \times \psi \quad (7)$	参考陈金磊等 ^[44] 研究,凋落物全部以枯枝落叶计算,刘斌等 ^[45] 测算的枯落物总储量变化范围为 4.42~9.72 t/hm ² ,齐特等 ^[46] 测算的枯落物总储量变化范围为 6.85~11.82 t/hm ² ,李铭红等 ^[47] 发现释放到大气中的碳素量占凋落时碳素量的 39.68 %,结合实际,凋落物储量和释放比例分别取 5.635 t/hm ² 、30%
	土壤呼吸 Soil respiration	$i = W_i \times H_i \quad (8)$	崔海等 ^[48] 测得草原的呼吸速率为 3.145 t/hm ² ,李凌浩等 ^[49] 研究温带草原根系呼吸占土壤总呼吸的 30%,即草地土壤呼吸碳排放量为 0.944 t/hm ² 。
	凋落物分解 Litter decomposition	$F = s \times \chi \times \psi \quad (9)$	关于凋落物分解核算具体参数,刘斌等 ^[42] 研究草地系统凋落物中碳储量约在 30~400 g/m ² ,取平均值 2.15 t/hm ² 、3 %。
建设用地 Construction land	能源消耗 Energy consumption	$E_i = \sum [(A_i - S_i) \times O_i \times \frac{12}{44}] = \sum [A_i \times C_i \times O_i \times \frac{12}{44}] \quad (10)$	E_i 为能源消耗的碳排放量, t/a; A_i 为第 i 种类型能源消耗量, t/a; S_i 为第 i 种能源的固碳量, t/a; O_i 为第 i 种能源的碳氧化系数; C_i 为每吨标准煤的含碳率; $\frac{12}{44}$ 为二氧化碳和碳质量的转换因子。
	生物呼吸 Biological respiration	$M_i = \sum N_i \times P_i \quad (11)$	M_i 为生物呼吸碳排放总量, t/a; N_i 为研究区第 i 种生物的生物量, 人或者头; P_i 为研究区第 i 种生物年均呼吸的碳释放量, t/a。主要包括人体呼吸和主要牲畜猪、牛、羊的呼吸, 这几种生物对应碳排放量参考陶在朴 ^[50] 研究。
	食物消费 Food consumption	$F_i = \sum Q_i \times f_i \quad (12)$	F_i 为食物消费的碳排放量, t/a; Q_i 为第 i 种食物的消费量, t; f_i 为第 i 种食物的碳排放系数。主要考虑消费粮食、蔬菜、水果、畜禽肉、水产品、蛋类、奶类、糖料过程中释放的碳排放量, 参考罗婷文等 ^[51] 研究。
	废弃物处理 Waste disposal	$W_w = W_l + W_s \quad (13)$	W_w 为废弃物处理碳排放量, t/a; W_l 为废水排放的碳排放量, t/a; W_s 为生活垃圾处理排放的碳排放量, t/a; W_{s1} 为生活垃圾填埋产生的碳排放量, t/a; W_{s2} 为生活垃圾焚烧产生的碳排放量, t/a; P 为人口数; O 为人均生化需氧量有机物含量, g/(人·天); OC 为人均生化需氧量的甲烷排放因子; λ 为易于沉积的化学学生物需氧量比例, %; κ 为污水中无氧降解的化学学生物量比例, %; W_{s1} 为生活垃圾填埋处理的碳排放量, t/a; W_{s2} 为生活垃圾焚烧处理的碳排放量, t/a; M_{s1} 为固体废弃物填埋处理量, t/a; L 为垃圾填埋的甲烷产生潜力; R 为甲烷回收量, t/a; OX 为氧化系数; M_{s2} 为生活垃圾焚烧量, t/a; μ 为生活垃圾的碳含量率; τ 生活垃圾中矿物碳在碳总量中的比例; ν 为生活垃圾焚烧炉的燃烧效率。
		$W_l = P \times O \times OC \times \lambda \times \kappa \times 365 \quad (14)$	
		$W_s = W_{s1} + W_{s2} \quad (15)$	
		$W_{s1} = (M_{s1} \times L - R) \times (1 - OX) \quad (16)$	
		$W_{s2} = (M_{s2} \times \mu \times \tau \times \nu \quad (17)$	
			废弃物处理的核算标准主要考虑废水处理、生活垃圾处理和焚烧, 计算过程中的相关系数参考各省温室气体清单编制指南和研究 ^[52-55] 。

1.2.2 基于改进IPAT的碳排放预测模型

IPAT模型可以定量分析人口、经济、技术和环境之间的关系,本研究采用改进的IPAT模型,具体如下:

$$\ln I_i = \ln a + b \ln P_i + c \ln A_i + d \ln T_i \quad (18)$$

式中: I_i 为二氧化碳排放总量; P_i 为人口数量; A_i 为人均GDP; T_i 为能源强度。除了IPAT模型中的人口因素、人均GDP因素和能源强度因素外,产业结构因素也对曲周县的碳排放发挥重要作用。在模型的基础上引入能够表征产业结构变量可对IPAT模型进行改进。改进后的IPAT模型能结合曲周的背景更准确地预测未来碳排放量。因此,在修正的IPAT模型中,添加第一产业GDP(R)作为模型的新解释变量,得到下式:

$$\ln I_i = \ln a + b \ln P_i + c \ln A_i + d \ln T_i + e \ln R_i + \beta \quad (19)$$

式中: b 、 c 、 d 、 e 为弹性系数,表示当 P 、 A 、 T 、 R 每变化1%时,引起的 I_i 的 $b\%$ 、 $c\%$ 、 $d\%$ 、 $e\%$ 的变化。根据测算所得2009—2019年曲周县碳排放量及获取的人口、人均GDP、能源消费强度和产业结构等指标数据在MATLAB中构建优化的IPAT模型,并用最小二乘法回归并进行模型检验。

1.2.3 情景分析参数

情景为实现未来可能的结果而构建的场景^[56]。情景设置越精细,预测结果就会越准确。情景分析是通过假设可能发生的情景,从定性和定量两个角度对未来各种情景分类讨论,综合考虑各种因素^[57]从而预测未来一定时期内各个要素的数据或状况。

深入分析河北省、邯郸市等区域国土空间规划、经济规划政策文件、减排目标及曲周县自然社会条件与相关规划,从4个方面分别各设计3种不同类型的情景,即高碳发展情景,惯性发展情景以及低碳发展情景。对曲周县人口发展设置3种情景要素A1、A2、A3;对曲周县经济发展设置3种情景要素B1、B2、B3;结合曲周县能源结构以及碳减排发展设置3种能源强度情景要素C1、C2和C3;综合曲周县产业结构及发展形势对产业结构设置3种情景要素D1、D2、D3。

1)高碳发展情景是遵循目前的发展,未采取任何强制性措施来减少能源消耗,经济飞速发展,具有较强人口吸引力、较高出生率,能源技术、产业结构、生产技术等按照历史发展模式的情景,社会发展的主要目标仍然是经济增长,且存在对工业化进程强依赖性,区域能源消耗和碳排放量有增无减,具体特征描述见表2。

表2 2020—2030年曲周县高碳发展情景要素描述表

Table 2 2020—2030 Quzhou County high-carbon development scenario elements description table

情景要素 Scenario element	描述 Description
人口高速发展情景要素 A1	曲周县人口未来处于高速发展,即人口年均增速处于预测区间的高值状态
经济高速发展情景要素 B1	曲周县经济未来处于高速发展,即人均GDP年均增速处于预测区间的高值状态
能源高碳发展情景要素 C1	能源结构基本不做调整,按照当前发展而并不采取任何强制措施进行减排节能的高碳排放发展情景
产业高碳发展情景要素 D1	产业结构基本不做调整,生产方式略粗放,鼓励工业发展的情景

2)惯性发展情景是指政府、企业和民众都具有节能减排意识,并根据区域经济和能源结构现状发展清洁能源的情景。曲周县经济发展、政策背景、自然禀赋、人口与经济等方面延续稳定发展态势,坚持引入科学技术,增强土地利用系统碳汇能力,以减缓区域能源消费与碳排放的同时保持经济发展,具体特征描述见表3。

3)低碳发展情景是指政府、企业和民众都具有

较强节能意识,统筹实施鼓励绿色低碳技术研发,优化产业结构,大力发展清洁能源等高水平措施的情景。能源结构得到进一步优化调整,企业采用新技术,大力发展循环经济,提高能源利用效率;绿色低碳技术实现突破,低碳能源使用比显著增加;产业优化升级,高新技术产业蓬勃发展,生态种植、生态养殖繁盛;法规强化支撑,确保实现碳中和目标,具体特征描述见表4。

表 3 2020—2030 年曲周县惯性发展情景要素描述表

Table 3 2020—2030 Quzhou County inertial development scenario elements description table

情景要素 Scenario element	描述 Description
人口惯性发展情景要素 A2	曲周县人口未来处于惯性发展,即人口年均增速处于预测区间的中间值状态
经济惯性发展情景要素 B2	曲周县经济未来处于惯性发展,即人均 GDP 年均增速处于预测区间的中间值状态
能源惯性发展情景要素 C2	能源结构得到一定的调整,引进一定的先进技术,政府和民众有一定的节能意识,鼓励民众使用清洁能源等充分考虑当前措施发展情况下的惯性节能情景
产业惯性发展情景要素 D2	产业结构得到一定的调整,引进一定的先进技术,增强碳汇能力,推动三产稳步可持续发展的情景

表 4 2020—2030 年曲周县低碳发展情景要素描述表

Table 4 2020—2030 Quzhou County low-carbon development scenario elements description table

情景要素 Scenario element	描述 Description
人口低速发展情景要素 A3	曲周县人口未来处于低速发展,即人口年均增速处于预测区间的低值状态
经济低速发展情景要素 B3	曲周县经济未来处于低速发展,即人均 GDP 年均增速处于预测区间的低值状态
能源低碳发展情景要素 C3	能源结构得到优化调整,企业增加科研投入,降低能源强度,政府大力发展清洁能源,政府和民众有较强节能意识,鼓励民众使用清洁能源等发展情况下的低碳节能情景
产业低碳发展情景要素 D3	产业结构得到优化调整,发展高新技术产业,在农业方面增加科研投入,大力增强土地利用碳汇能力,推动低能耗、低排放产业可持续发展的情景

曲周县是农业大县,发展态势稳健,具有留住大量的农村人口的潜力。2017—2018 年,人口增长率从 0.71% 上升到 1.06%,但近年来增长也有所放缓,2019 年人口增长率下降到 0.54%,这说明二胎政策和人口引进政策的实施有效果但影响有限。根据《国家人口发展规划(2016—2030 年)》,中国的人口数量将于 2030 年前后达到顶峰。基于以上分析与情景要素定义,设置人口的高速增长 A1、惯性增长 A2、低速增长 A3 发展情景的人口年均增长率分别为 4.15%、2.50%、0.54%。

关于人均 GDP 情景设置,在《邯郸市国民经济和社会发展的第十四个五年规划和 2035 年远景目标纲要》中对十四五期间地区总值年均增长率规划为 6.5% 左右。曲周县 2009—2019 年经济发展的增长率最高值为 33.47%,最低值为 -20.70%,平均值为 6.85%。基于历史经济数据,本研究采用积极的视角对人均 GDP 设置高速增长 B1、惯性增长 B2、低速增长 B3 发展情景,相应的增长率为 20%,

6.85%, -9.31%。

能源强度反映了一个地区每单位 GDP 对一级能源的依赖程度。在《河北省国民经济和社会发展的第十四个五年规划和 2035 年远景目标纲要》中将单位地区 GDP 能耗下降 15% 作为第十四个五年计划的重要目标,并与各级挂钩进行约束。河北省人民政府在《关于建立健全绿色低碳循环发展经济体系的实施意见》中也提出至 2025 年单位 GDP 能耗下降 15%,单位 GDP 二氧化碳排放下降 19%,高新技术产业增加值占规模以上工业比重提高到 25% 左右,非化石能源消费所占比例提高到 11% 的主要目标。参考邯郸市国土空间规划并结合曲周历史数据,能源强度的年增长率的变化有一定的波动,设置高速增长 C1、惯性增长 C2、低速增长 C3 发展情景,对应的增长率分别设为 4.98%、-5.11%、-15%。

产业结构反映第一、二、三产业的比重。本研究以第一产业 GDP 作为指标,其 2009—2019 年增长率平均值为 6.85%,近两年的增长率为负值。

结合曲周当地自然经济社会条件和政策环境,上下浮动10%,设置高速增长D1、惯性增长D2、低速增长D3发展情景,相应的增长率为16.85%、6.85%、-4.85%。

通过各情景要素的不重复组合以全面预测曲周县未来土地利用碳排放,即人口、人均GDP、能源强度、产业结构4方面情景要素的全维度进行组合,共81种,具体见表5。

表5 曲周县2020—2030年土地利用碳排放预测全维度情景组合设置
Table 5 Full-dimensional scenario combination setting of land use carbon emission prediction in Quzhou County from 2020 to 2030

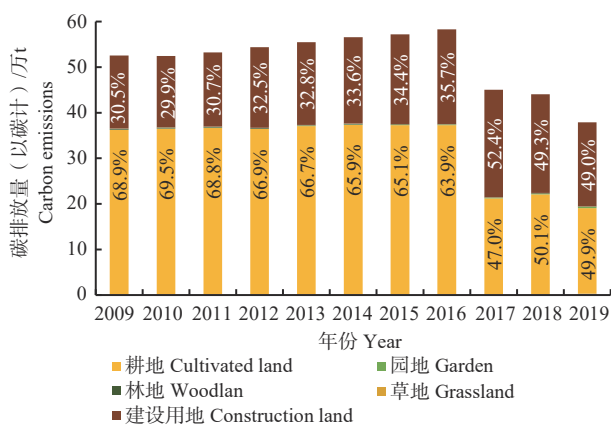
情景要素 Scenario element	A1			A2			A3		
	B1	B2	B3	B1	B2	B3	B1	B2	B3
C1	A1B1	A1B2	A1B3	A2B1	A2B2	A2B3	A3B1	A3B2	A3B3
	C1D1	C1D1	C1D1	C1D1	C1D1	C1D1	C1D1	C1D1	C1D1
	A1B1	A1B2	A1B3	A2B1	A2B2	A2B3	A3B1	A3B2	A3B3
	C1D2	C1D2	C1D2	C1D2	C1D2	C1D2	C1D2	C1D2	C1D2
	A1B1	A1B2	A1B3	A2B1	A2B2	A2B3	A3B1	A3B2	A3B3
	C1D3	C1D3	C1D3	C1D3	C1D3	C1D3	C1D3	C1D3	C1D3
C2	A1B1	A1B2	A1B3	A2B1	A2B2	A2B3	A3B1	A3B2	A3B3
	C2D1	C2D1	C2D1	C2D1	C2D1	C2D1	C2D1	C2D1	C2D1
	A1B1	A1B2	A1B3	A2B1	A2B2	A2B3	A3B1	A3B2	A3B3
	C2D2	C2D2	C2D2	C2D2	C2D2	C2D2	C2D2	C2D2	C2D2
	A1B1	A1B2	A1B3	A2B1	A2B2	A2B3	A3B1	A3B2	A3B3
	C2D3	C2D3	C2D3	C2D3	C2D3	C2D3	C2D3	C2D3	C2D3
C3	A1B1	A1B2	A1B3	A2B1	A2B2	A2B3	A3B1	A3B2	A3B3
	C3D1	C3D1	C3D1	C3D1	C3D1	C3D1	C3D1	C3D1	C3D1
	A1B1	A1B2	A1B3	A2B1	A2B2	A2B3	A3B1	A3B2	A3B3
	C3D2	C3D2	C3D2	C3D2	C3D2	C3D2	C3D2	C3D2	C3D2
	A1B1	A1B2	A1B3	A2B1	A2B2	A2B3	A3B1	A3B2	A3B3
	C3D3	C3D3	C3D3	C3D3	C3D3	C3D3	C3D3	C3D3	C3D3

2 结果与分析

2.1 不同土地利用类型碳排放量

根据构建的不同土地利用类型碳排放测算体系进行测算,各土地利用类型总体碳排放结果见图1。可知:2009—2019年曲周县碳排放总量先不断增加,然后于2016年到达顶峰后出现拐点,总量开始下降,具体表现为2019年较2009年减少了28.28%。其中耕地碳排放总量从2009年的36.12万t增加到2014年的37.24万t后开始缓慢下降,2019年的碳排放量为18.79万t;所占比例一直以来保持在50%~70%,从2009年的68.87%下降至2019年的

49.9%,在2016年后出现大幅度下降,低于建设用地,2018、2019年有所恢复,基本与建设用地持平。建设用地的碳排放量具体从2009年的16.01万t增加到2017年的23.56万t,增长了47.16%,在2017年后开始下降;所占比例保持在30%~50%,从2009年的30.5%上升到2017年的52.4%,2018、2019年下降至49.0%,是第二大碳排放源。总体上,曲周县各土地利用类型中耕地碳排放贡献高的根本原因是其为黄淮海平原上的典型的农业地区,以农业发展为主、产业为辅,耕地占行政区域总面积的80%左右,且土地利用结构稳定,农业生产中使用化肥和农药等过程会增加碳排放,即使近年来第二产业



百分比为图例对应土地利用类型产生的碳排放占总体比例。

The percentage is the proportion of carbon emissions from land use types corresponding to the legend to the total.

图1 曲周县2009—2019年不同土地利用方式碳排放量测算结果

Fig. 1 Calculation results of carbon emissions from different land use types in Quzhou County from 2009 to 2019

发展起来,建设用地的碳排放量增加,耕地仍然是影响整体土地利用碳排放的主要因素。

由于园地、林地、草地的碳排放量所占比例较小,在图1中体现的不明显,又以三者测算结果构图,详见图2。可知:园地、林地、草地的碳排放量总量大约占0.3万~0.4万t,其净值整体变化不大,所占比例由2009年的0.61%缓慢下降至2016年最低值0.49%,2019年上涨达最大值1.08%。园地的碳排放量所占比例从2009年的0.17%上涨至2019年的0.73%,主要受2019年园地面积大规模扩张影响。林地的碳排放量所占比例从2009年的0.32%

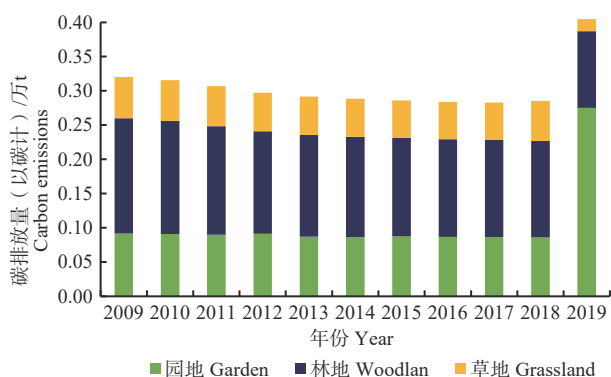


图2 曲周县2009—2019年园地、林地、草地碳排放量测算结果

Fig. 2 Calculation results of carbon emissions from garden land, forest land and grassland in Quzhou County from 2009 to 2019

先下降至2016年的最低值0.25%,而后回升至2019年的0.30%。草地的碳排放量所占比例从2009年的0.12%下降至2019年的0.05%,其受2019年草地面积大规模缩减的影响,此前在0.10%上下以0.002%幅度浮动。

耕地碳排放产生各过程的测算结果见图3。可知:耕地中农业生产活动的碳排放贡献最大,其次是土壤呼吸作用,秸秆燃烧的贡献最小。土壤呼吸作用的碳排放总体呈下降趋势,从2009年的15.01万t下降到2019年的12.74万t,下降15.14%,这源于耕地面积和粮食产量的下降。农业生产活动的碳排放从2009年到2016年趋于增加,从2017—2018年下降,然后于2019年再次上升到5.55万t,这主要是受生产中使用的技术水平变化的影响。农业生产活动的碳排放所占比例从2009年的57.35%上升到2016年的61.84%,然后开始下降到2018年的低点22.58%;在2017年之前是耕地碳排放的第一位贡献者,2017年后退为第二。由此可知,在农业生产活动中引入低碳技术是重要的减排方式。2009—2019年,秸秆燃烧的碳排放量在2012年达到峰值0.58万t,此后呈下降趋势,这源于减少秸秆燃烧的政策以及玉米和棉花种植减少。

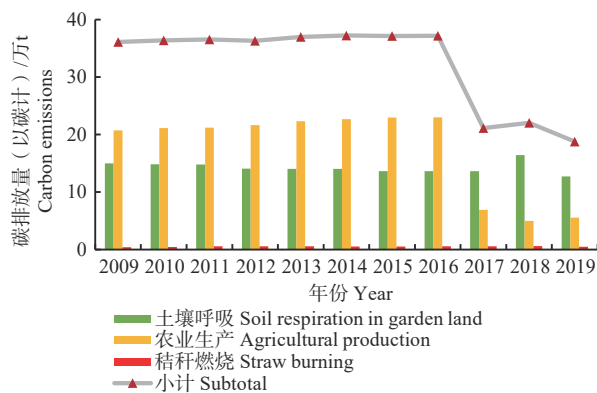


图3 曲周县2009—2019年耕地碳排放量测算结果

Fig. 3 Calculation results of cultivated land carbon emissions in Quzhou County from 2009 to 2019

建设用地碳排放产生各过程的测算结果见图4。可知:建设用地碳排放中能源消耗产生的碳排放量从2009年的6.69万t增加至2017年的12.83万t而后下降至8.32万t,生物呼吸产生的碳排放量从2009年的7.25万t增加至2017年的7.71万t后下降至2019年5.43万t,这两者在建设用地的碳排放

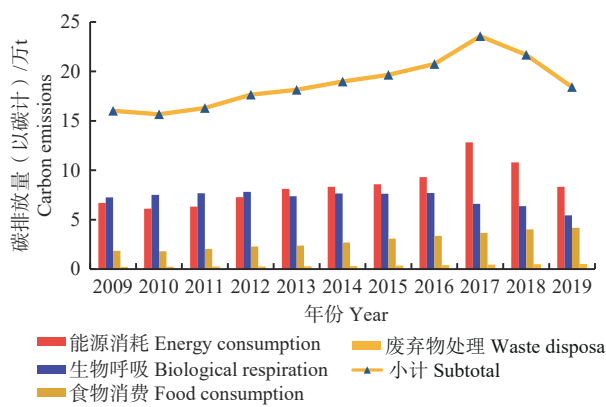


图4 曲周县2009—2019年建设用地碳排放量测算结果

Fig. 4 Calculation results of carbon emissions from construction land in Quzhou County from 2009 to 2019

中做主要贡献。食物消费和废弃物处理产生的碳排放一直处于稳步增长的趋势,与2009年相比分别增长了1.26倍和1.34倍,这与曲周人口的不断增长及工业、畜牧业的发展有关。

园地、林地、草地碳排放产生各过程的测算结果见图5。可知:园地、草地中土壤呼吸产生的碳排放与凋落物相比贡献略高,林地中两者相近,各部分碳排放量均在0~0.1万t,且处于缓慢下降状态,但在2019年园地和草地中出现较大变化,与其面积变化密切相关。综上,土地利用变化的碳排放效应至关重要,耕地和建设用地是曲周县碳排放主要用地类型,也是主要的“碳源”。在土地利用的过程中,耕地面积、建设用地面积、种植作物

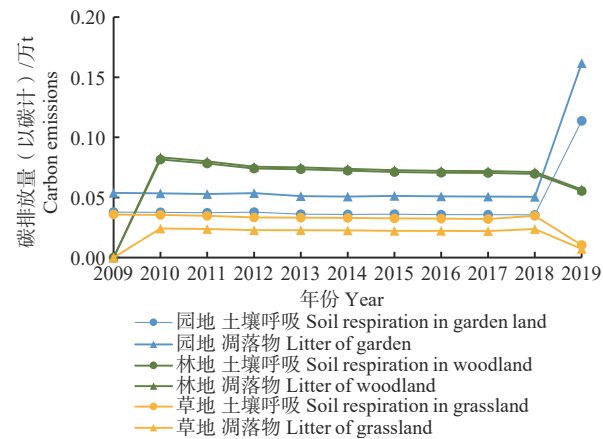


图5 曲周县2009—2019年园地、林地、草地碳排放量测算结果

Fig. 5 Calculation results of carbon emissions from garden land, forest land and grassland in Quzhou County from 2009 to 2019

类型和规模、农业生产技术水平、能源消耗和生物呼吸与碳排放密切相关,是节能减排的重要途径。

2.2 碳排放模型结果及验证

根据测算的2009—2019年曲周县土地利用碳排放量及人口、人均GDP、能源消费强度和产业结构等指标数据在MATLAB中运行优化后的IPAT模型,用最小二乘法回归,得到以下结果:

$$\ln I_i = 0.4207 \ln P_i + 0.4854 \ln A_i + 0.4582 \ln T_i + 0.0735 \ln R_i + 2.2240 \quad (20)$$

其回归统计结果 $R=0.95$ 、 $R^2=0.89$ 均接近1,说明模型拟合度较好。计算曲周县2009—2019年的土地利用碳排放预测模拟总量以进行模型验证,得到的拟合结果与实际测量结果的比较见表7及图6,可知其误差均在允许的范围内。

同时,公式结果表明人口、人均GDP、能源强度和产业结构的增加导致曲周县土地利用碳排放增加。从系数大小来看,3个驱动因素对碳排放的影响程度相近;人均GDP因素对曲周县碳排放影响最大,曲周县人均GDP每增加1%,碳排放将增加0.4854%,这说明经济社会发展对能源消费有一定的依赖性,这也是由曲周县目前的发展阶段决定的;能源强度每下降1%,其产生的碳排放量也会随之减少0.4582%,即技术进步有利于减少碳排放;人口的增加也会对碳排放产生正效应,人类活动本身影响着碳排放;第一产业系数相对较小,原因是曲周县的第一产业碳排放量所占比例大,但是耕地具有较强的碳汇属性,加之近年来第二产业比重仍在持续增加,因此产业结构尤其是第一产业对曲周县未来碳排放量产生着重要影响,但在数值上体现的不显著。

3 情景预测分析

3.1 曲周县土地利用碳排放预测结果

根据前文结果,人均GDP的弹性系数相比其他因素数值最大,因此以人均GDP的3种情景作为大类进行分类统计。

3.1.1 曲周县B1情景土地利用碳排放预测结果

GDP处于低速发展(B1)时与其他3种驱动因素的各情景组合预测结果见图7。可知:当GDP处于高速发展(B1)时,所有组合的碳排放预测量始终呈上升趋势,在2030年达到碳排放最大值,按其散点的聚合分布可以分为3组,总量分别为组合A3C1D3-组合A1C1D1,即160万~221万t;组合

表 7 模型验证结果

Table 7 Model validation results

年份 Year	土地利用产生的实际碳排放/t Actual carbon emissions from land use	模型预测的碳排放/t Model predicted carbon emissions	误差/% Error
2009	590 871	584 145	1.14
2010	584 084	573 367	1.83
2011	594 113	588 843	0.89
2012	614 925	631 081	-2.63
2013	634 752	667 369	-5.14
2014	647 833	671 769	-3.69
2015	656 275	634 990	3.24
2016	674 576	634 045	6.01
2017	577 410	579 107	-0.29
2018	547 208	535 604	2.12
2019	459 184	477 917	-4.08

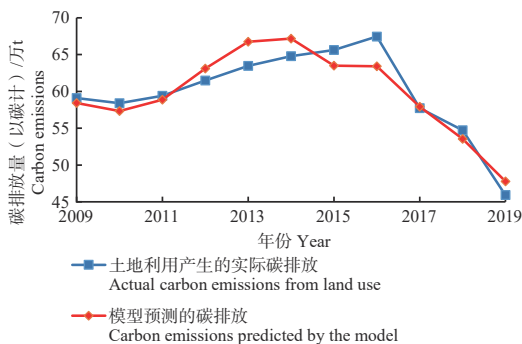


图 6 曲周县 2009—2019 年的土地利用碳排放预测总量与实际值对比图

Fig. 6 Comparison of predicted total land use carbon emissions and actual values in Quzhou County from 2009 to 2019

A3C2D3-组合 A1C2D1,即 113 万~206 万 t;组合 A3C3D3-组合 A1C3D1,即 50 万~76 万 t。最小值均出现在 2020 年,为 55 万 t 左右。按照增长率最高的一组情景,2030 年其碳排放量是 2020 年的 4.4 倍,增幅 342%,增长量十分显著。

3.1.2 曲周县 B2 情景土地利用碳排放预测结果

GDP 处于惯性发展(B2)时与其他 3 种驱动因素的情景组合预测结果见图 8。可知:当 GDP 处于惯性发展(B2)时,按其散点的聚合分布可以分为 3 组,碳排放的预测量有两组始终呈上升趋势,一组

呈现下降趋势。两组始终呈上升趋势的最大值区间分别为组合 A3C1D3-组合 A1C1D1,即 85 万~119 万 t;组合 A3C2D3-组合 A1C2D1,即 51 万~72 万 t;按照增长率最高的一组,其碳排放增长增加了 2.3 倍。最小值在期初,为 45 万~50 万 t。呈现下降趋势组的最小值区间为组合 A3C3D3-组合 A1C3D1,即 29 万~41 万 t,较期初略有减少,降幅最大的情景是期初的 0.75 倍。

3.1.3 曲周县 B3 情景土地利用碳排放预测结果

GDP 处于低速发展(B3)时与其他 3 种驱动因素的各情景组合预测结果见图 9。可知:当 GDP 处于低速发展(B3)时,按其散点的聚合分布可以分为 3 组,碳排放有两组所有的情景组合始终呈下降趋势,有一组主要呈现下降趋势但其中的一种情景组合呈现上升趋势,即组合 A1C1D1,其最大值为 49.6 万 t。两组全部情景组合呈一直下降趋势的最小值区间分别为组合 A3C2D3-组合 A1C2D1,即 21 万~30 万 t;组合 A3C3D3-组合 A1C3D1,即 12 万~18 万 t;其最大值均在 2020 年,约 42 万~47 万 t。另一组在 2030 年区间为组合 A3C1D3-组合 A1C1D1,即 35 万~50 万 t。增幅最高的情景组合预测量为期初的 1.1 倍,增幅 9.1%,降幅最大的情景预测为期初的 0.29 倍,降幅 70.7%。

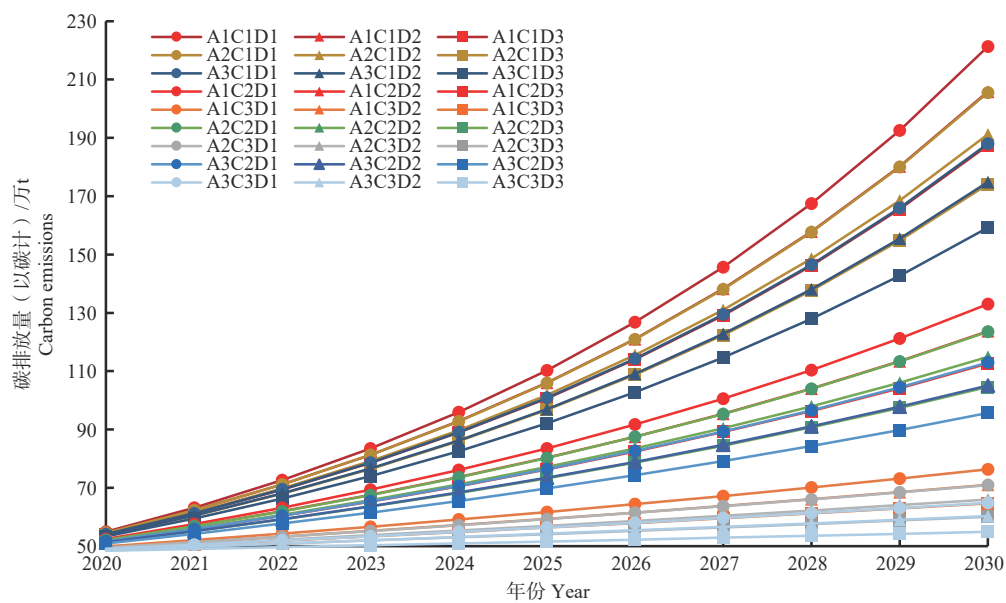


图7 2020—2030年曲周县B1情景土地利用碳排放预测结果

Fig. 7 Land use carbon emission prediction results of B1 scenario in Quzhou County from 2020 to 2030

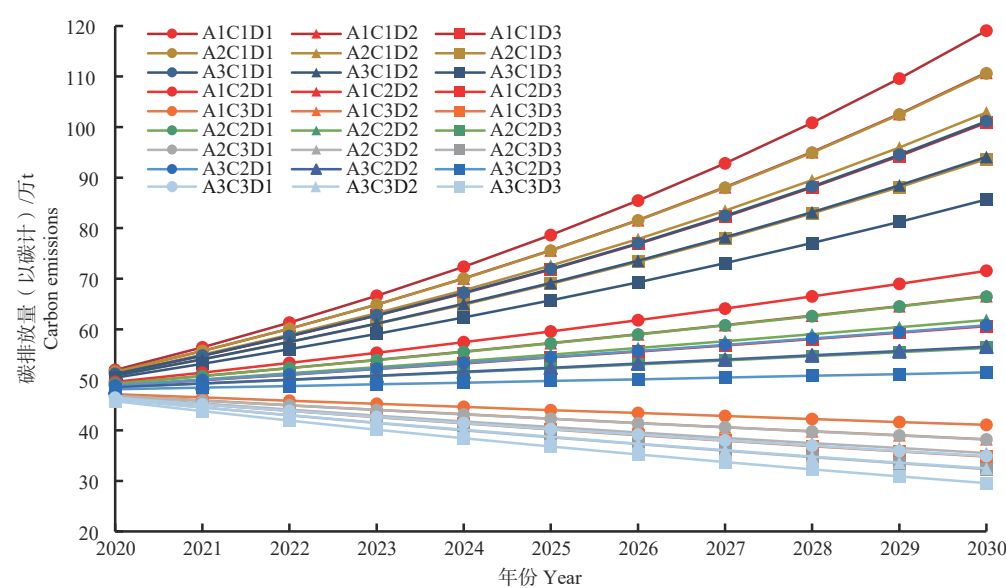


图8 2020—2030年曲周县B2情景土地利用碳排放预测结果

Fig. 8 Land use carbon emission prediction results of B2 scenario in Quzhou County from 2020 to 2030

综上,根据人均GDP各情景做大类进行分类统计后3张图表呈现不同的变化趋势,数值的变化差异大,说明人均GDP增速能够体现碳排放量的主要限制因子的作用;不同GDP情景下各图表中数据点的聚合分布清晰度高,这主要受能源强度的影响,组合中同一能源强度情景的组合与其他情景聚合在一起。当GDP高速发展时,人口、能源强度、产业

结构的改变未对碳排放预测产生趋势性影响而对其增长速率产生数值性影响。当GDP惯性发展时,有两组保持持续增长的情景组合其最大值区间降低,能源强度的低速发展情景(C3)对另一组的碳排放预测趋势产生影响,其趋势变为下降。由此可看出能源强度为次要的限制因子。当GDP低速发展时,可以观察到仅有一种情景组合能够保持增长,

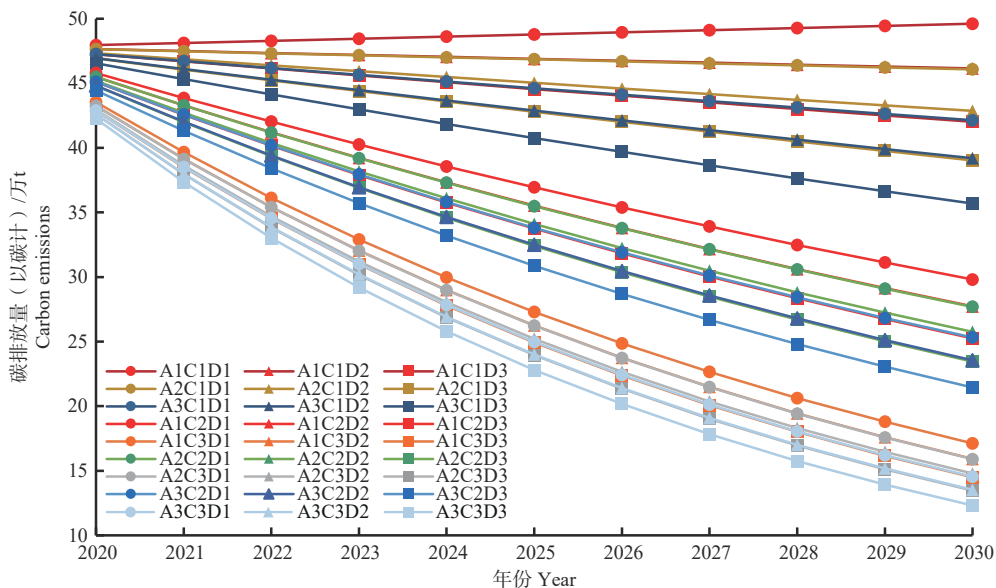


图9 2020—2030年曲周县B3情景土地利用碳排放预测结果

Fig. 9 Land use carbon emission prediction results of B3 scenario in Quzhou County from 2020 to 2030

其他组合均保持下降趋势的情况。因此,人均GDP为曲周县碳排放量的主要限制因子,能源强度为次要限制因子。人口和产业结构对碳排放的预测也有着一定程度的作用。

4 结论与建议

4.1 结论

本研究以土地利用类型为切入点,综合已有研究与实地调查,构建体系以测算曲周县2009—2019年的碳排放量,并结合曲周县粮食主产区的背景,通过改进IPAT模型并科学设置情景以预测曲周县至2030年的土地利用碳排放情况,结果如下:

1)曲周县耕地、建设用地是重要的碳排放源。曲周县2009—2019年的碳排放总量先持续增加,后于2016年开始减少。耕地碳排放所占比例从2009年的68.87%下降到2016年的63.90%,之后不再为第一大碳排放源。建设用地碳排放所占比例从2009年的30.5%上升到2017年的52.4%,后于2018年和2019年下降到49.0%,跃升为第一大碳排放源。园地、林地和草地的碳排放均呈现出普遍下降的趋势且三者所占比例低。在土地利用过程中,耕地面积、建设用地面积、种植作物类型和规模、农业生产中的技术水平、能源消耗和生物呼吸对碳排放产生重要影响。

2)各组情景土地利用碳排放预测总量趋势性

明显,预测区间变化大。GDP处于高速发展时曲周预测碳排放总量均呈持续上升趋势,预测值区间为50万~221万t,2030年其碳排放量是期初的4.4倍。GDP处于惯性发展时有两组呈持续上升趋势,一组呈下降趋势;上升组预测值区间为45万~119万t,下降趋势组的最小值区间为29万~41万t,降幅最大的情景预测值是期初的0.75倍。GDP处于低速发展时碳排放有两组呈现持续下降趋势,有一组呈现下降趋势但其中有一种情景呈现上升趋势,最大值为49.6万t;呈持续下降趋势的最小值区间为12万~30万t,最高增加情境预测量为期初的1.1倍,增幅9.1%;最高减少量的情景预测量为期初的0.29倍,降幅70.7%。

3)从驱动因素来看,人均GDP增速发挥土地利用碳排放量主要限制因子的作用,能源强度为次要限制因子。此外人口和产业结构对碳排放也产生一定程度的作用。如各因素均保持高速发展,则碳排放的增长十分显著;如各因素均保持低速发展,则其下降亦十分显著。即使GDP处于惯性发展,通过对能源等其他因子的限制也可以减缓增长趋势甚至逆转增长趋势,这为落实曲周县国土空间规划保证经济发展的同时实现低碳可持续发展提供了更有力的依据。

4.2 建议

综上,土地利用方式的变化是影响区域生态系

统碳收支的最重要因素之一。科学、适宜的土地利用结构在保证经济发展的同时可实现碳平衡目标,需降低土地利用碳排放强度并基于曲周县2030—2050年国土空间规划成果逐级落实。耕地是重要碳排放源的同时也具有较高的碳汇属性,基于曲周县农业大县的底色与规划成果,耕地是首要且必须优化的土地利用类型,在严格保证耕地资源的约束下需要以提高资源利用效率和生态系统保护为核心,以节地、节肥、节能、节药和农业生态环境建设为重点,不断推广农业固碳,提升生产技术水平,如节约型的耕作、播种、施肥、施药、减少农业废弃物生成、利于水土保持等低碳农业技术,积极推进农业结构向节能型发展^[58],确保粮食安全。

基于人均GDP、能源强度、人口和产业结构的模拟本研究对曲周土地利用碳排放发展的趋势和量级进行了合理预测,且比较分析出几种驱动因素对碳排放预测的影响。参考81类全维度情景组合与曲周县国土空间规划的经济指标,在经济发展时可通过优化提升能源结构、吸引优质人才、优化产业结构、完善监管等措施尽快实现碳中和目标。为此,建议如下:

1)伴随现代化进程加速,当前人口结构和消费水平较人口数量对碳排放的影响更为显著。因此,须注重优化人口结构,提高劳动力素质,吸引人才、争取相关高校、科研单位和社会组织的合作,为发展节能环保的技术密集型产业做足人员储备。同时,经济稳步发展保障低碳实践中具体执行能力,而因减排而停滞经济偏离实际,结合本研究情景,可以参考其他策略组合作为优化点实现减排节能,即经济和生态的“双赢”。

2)优化能源消耗结构,发展新能源,以高新技术改造提升传统产业,提高能源使用效率。如大力发展风能、太阳能、水能和生物质能等可再生能源,促进能源供应的多样化。促进形成低碳的生产方式、消费模式、公众意识、市场机制及政策和法律框架以逐步实现社会的低碳转型。

3)继农业现代化低碳发展后,继续以新的低碳理念和模式优化产业结构,推进高碳产业向低碳逐步转型。一方面,对落后产能进行资源整合促进产品升级换代。另一方面,加强低碳技术和产业的引进,鼓励扶持绿色产业,发展金融和信息服务等现代服务业,或发展低资源消耗、高附加值的新战略产业。

参考文献 References

- [1] Eldering A, Wennberg P O, Crisp D, Schimel D S, Gunson M R, Chatterjee A, Liu J, Schwandner F M, Sun Y, O'dell C W, Frankenberg C, Taylor T, Fisher B, Osterman G B, Wunch D, Hakkarainen J, Tamminen J, Weir B. The orbiting carbon observatory-2 early science investigations of regional carbon dioxide fluxes[J]. *Science*, 2017, 358(6360): eaam5745
- [2] Tian S Q, Wang S J, Bai X Y, Luo G J, Li Q, Yang Y J, Hu Z Y, Li C J, Deng Y H. Global patterns and changes of carbon emissions from land use during 1992-2015[J]. *Environmental Science and Ecotechnology*, 2021, 7: 100108
- [3] Xia Q Y, Li L, Dong J F, Zhang B. Reduction effect and mechanism analysis of carbon trading policy on carbon emissions from land use[J]. *Sustainability*, 2021, 13(17): 1-22
- [4] Palmer P I, Wilson E L, Villanueva G L, Liuzzi G, Feng L, DiGregorio A J, Mao J P, Ott L, Duncan B. Potential improvements in global carbon flux estimates from a network of laser heterodyne radiometer measurements of column carbon dioxide[J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2019, 12(4): 2579-2594
- [5] Ali G, Nitivattananon V. Exercising multidisciplinary approach to assess interrelationship between energy use, carbon emission and land use change in a metropolitan city of Pakistan[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2012, 16(1): 775-786
- [6] 李健,毛德华,蒋子良,李科.长株潭城市群土地利用碳排放因素分解及脱钩效应研究[J]. *生态经济*, 2019(8): 28-34, 66
Li J, Mao D H, Jiang Z L, Li K. Research on factors decomposition and decoupling effects of land use carbon emissions in Chang-Zhu-Tan urban agglomeration[J]. *Ecological Economy*, 2019(8): 28-34, 66 (in Chinese)
- [7] 刘学之,孙鑫,朱乾坤,尚玥佟.中国二氧化碳排放量相关计量方法研究综述[J]. *生态经济*, 2017, 33(11): 21-27
Liu X Z, Sun X, Zhu Q K, Shang Y T. Review on the measurement methods of carbon dioxide emissions in China[J]. *Ecological Economy*, 2017, 33(11): 21-27 (in Chinese)
- [8] Li H, Qiu J, Wang L G, Tang H J, Li C S, Ranst E V. Modelling impacts of alternative farming management practices on greenhouse gas emissions from a winter wheat-maize rotation system in China[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2009, 135(1/2): 24-33
- [9] 陈浮,于昊辰,卞正富,尹登玉.碳中和愿景下煤炭行业发展的危机与应对[J]. *煤炭学报*, 2021, 46(6): 1808-1820
Chen F, Yu H C, Bian Z F, Yin D Y. How to handle the crisis of coal industry in China under the vision of carbon neutrality[J]. *Journal of China Coal Society*, 2021, 46(6): 1808-1820 (in Chinese)
- [10] 郭春梅,黄梦娜,楚尚玲.绿色公共建筑运营阶段二氧化碳排放量化分析[J]. *环境工程*, 2018, 36(5): 184-188
Guo C M, Huang M N, Chu S L. The quantitative analysis of carbon emission of green public building based on operation stage[J]. *Environmental Engineering*, 2018, 36(5): 184-188 (in Chinese)
- [11] 赵宁,周蕾,庄杰,王永琳,周稳,陈集景,宋璐,丁键滢,迟永刚.中国陆地生态系统碳源/汇整合分析[J]. *生态学报*, 2021, 41(19): 7648-7658
Zhao N, Zhou L, Zhuang J, Wang Y L, Zhou W, Chen J J, Song J,

- Ding J X, Chi Y G. Analysis of carbon source/sink integration in terrestrial ecosystems in China [J]. *Journal of Ecology*, 2021, 41(19): 7648-7658 (in Chinese)
- [12] 胡国霞, 雷国平, 周浩, 路昌, 赵宇辉. 黑龙江省土地利用变化的碳排放效应研究[J]. *水土保持研究*, 2015, 22(6): 287-292
- Hu G X, Lei G P, Zhou H, Lu C, Zhao Y H. Effects of different land use patterns on carbon emission in Heilongjiang Province[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2015, 22(6): 287-292 (in Chinese)
- [13] 孔蕊. 变化环境下西北地区草地上碳储量演变及驱动力分析[D]. 南京: 南京林业大学, 2020
- Kong R. Analysis on the evolution and driving force of grasslands aboveground biomass carbon in Northwestern China under changing environment [D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2020 (in Chinese)
- [14] Liu H Y, Song Y R. Financial development and carbon emissions in China since the recent world financial crisis: Evidence from a spatial-temporal analysis and a spatial Durbin model[J]. *The Science of the Total Environment*, 2020, 715: 136771
- [15] Yang P G, Liang X, Drohan P J. Using Kaya and LMDI models to analyze carbon emissions from the energy consumption in China [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2020, 27(21): 26495-26501
- [16] Cai L Y, Luo J, Wang M H, Guo J F, Duan J L, Li J T, Li S, Liu L T, Ren D P. Pathways for municipalities to achieve carbon emission peak and carbon neutrality: A study based on the LEAP model[J]. *Energy*, 2023, 262: 125435
- [17] Yi Y C, Qi J, Chen D. Impact of population agglomeration in big cities on carbon emissions[J]. *Environmental Science and Pollution Research International*, 2022, 29(57): 86692-86706
- [18] Begum R A, Raihan A, Said M N M. Dynamic impacts of economic growth and forested area on carbon dioxide emissions in Malaysia [J]. *Sustainability*, 2020, 12(22): 9375
- [19] Ullah A, Raza K, Mehmood U. The impact of economic growth, tourism, natural resources, technological innovation on carbon dioxide emission: Evidence from BRICS countries [J]. *Environmental Science and Pollution Research International*, 2023, 30(32): 78825-78838
- [20] 丁仲礼. 理性预测我国未来碳排放[N]. *中国矿业报*, 2013-10-24(B3)
- Ding Z L. Rational prediction of China's future carbon emissions [N]. *China Mining Daily*, 2013-10-24(B3)(in Chinese)
- [21] Ding S, Dang Y J, Li X M, Wang J J, Zhao K. Forecasting Chinese CO₂ emissions from fuel combustion using a novel grey multivariable model[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 162: 1527-1538
- [22] Sun W, Wang C F, Zhang C C. Factor analysis and forecasting of CO₂ emissions in Hebei, using extreme learning machine based on particle swarm optimization[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 162: 1095-1101
- [23] 曹丽斌, 李明煜, 张立, 蔡博峰. 长三角城市群 CO₂ 排放达峰影响研究[J]. *环境工程*, 2020, 38(11): 33-38, 59
- Cao L B, Li M Y, Zhang L, Cai B F. Research on carbon dioxide emission peaking in the Yangtze River Delta urban agglomeration [J]. *Environmental Engineering*, 2020, 38(11): 33-38, 59 (in Chinese)
- [24] 王勇, 许子易, 张亚新. 中国超大城市碳排放达峰的影响因素及组合情景预测: 基于门限-STIRPAT 模型的研究[J]. *环境科学学报*, 2019, 39(12): 4284-4292
- Wang Y, Xu Z Y, Zhang Y X. Influencing factors and combined scenario prediction of carbon emission peaks in megacities in China: Based on Threshold-STIRPAT model[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2019, 39(12): 4284-4292 (in Chinese)
- [25] Ehrlich P R, Holdren J P. Impact of population growth [J]. *Science*, 1971, 171(3977): 1212-1217
- [26] 朱宇恩, 李丽芬, 贺思思, 李华, 王云. 基于 IPAT 模型和情景分析法的山西省碳排放峰值年预测[J]. *资源科学*, 2016, 38(12): 2316-2325
- Zhu Y E, Li L F, He S S, Li H, Wang Y. Peak year prediction of Shanxi Province's carbon emissions based on IPAT modeling and scenario analysis[J]. *Resources Science*, 2016, 38(12): 2316-2325 (in Chinese)
- [27] 邯郸市统计局. 邯郸统计年鉴, 2009—2020[M]. 北京: 中国统计出版社, 2009-2020
- Handan Bureau of Statistics. *Handan Statistical Yearbook, 2009—2020* [M]. Beijing: China Statistics Press, 2009-2020 (in Chinese)
- [28] 曲周市统计局. 曲周统计年鉴, 2009—2020[M]. 北京: 中国统计出版社, 2009-2020
- Quzhou Bureau of Statistics. *Quzhou Statistical Yearbook, 2009—2020* [M]. Beijing: China Statistics Press, 2009-2020 (in Chinese)
- [29] 牛灵安, 郝晋琨, 张宝忠, 牛新胜, 吕振宇. 长期施肥对华北平原农田土壤呼吸及碳平衡的影响[J]. *生态环境学报*, 2009, 18(3): 1054-1060
- Niu L A, Hao J M, Zhang B Z, Niu X S, Lv Z Y. Soil respiration and carbon balance in farmland ecosystems on North China Plains [J]. *Ecology and Environment*, 2009, 18(3): 1054-1060 (in Chinese)
- [30] 禄兴丽, 廖允成. 不同耕作措施对旱作夏玉米田土壤呼吸及根呼吸的影响[J]. *环境科学*, 2015, 36(6): 2266-2273
- Lu X L, Liao Y C. Effects of tillage on soil respiration and root respiration under rain-fed summer corn field [J]. *Environmental Science*, 2015, 36(6): 2266-2273 (in Chinese)
- [31] 张宇, 张海林, 陈继康, 陈阜. 耕作方式对冬小麦田土壤呼吸及各组分贡献的影响[J]. *中国农业科学*, 2009, 42(9): 3354-3360
- Zhang Y, Zhang H L, Chen J K, Chen F. Tillage effects on soil respiration and contributions of its components in winter wheat field [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2009, 42(9): 3354-3360 (in Chinese)
- [32] 尹钰莹, 郝晋琨, 牛灵安, 陈丽. 河北省曲周县农田生态系统碳循环及碳效率研究[J]. *资源科学*, 2016, 38(5): 918-928
- Yin Y Y, Hao J M, Niu L A, Chen L. Carbon cycle and carbon efficiency of farmland ecosystems in Quzhou, Hebei Province [J]. *Resources Science*, 2016, 38(5): 918-928 (in Chinese)
- [33] West T O, Marland G. A synthesis of carbon sequestration, carbon emissions, and net carbon flux in agriculture: Comparing tillage practices in the United States [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2002, 91(1-3): 217-232
- [34] 伍芬琳, 李琳, 张海林, 陈阜. 保护性耕作对农田生态系统净碳释放量的影响[J]. *生态学杂志*, 2007, 26(12): 2035-2039
- Wu F L, Li L, Zhang H L, Chen F. Effects of conservation tillage on net carbon flux from farmland ecosystems [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2007, 26(12): 2035-2039 (in Chinese)

- [35] 高利伟, 马林, 张卫峰, 王方浩, 马文奇, 张福锁. 中国作物秸秆养分资源数量估算及其利用状况[J]. 农业工程学报, 2009, 25(7): 173-179
Gao L W, Ma L, Zhang W F, Wang F H, Ma W Q, Zhang F S. Estimation of nutrient resource quantity of crop straw and its utilization situation in China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2009, 25(7): 173-179 (in Chinese)
- [36] Streets D G, Yarber K F, Woo J H, Carmichael G R. Biomass burning in Asia: Annual and seasonal estimates and atmospheric emissions [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2003, 17(4): 10-1-10-20
- [37] Chabadová J, Papučík Š, Nosek R. Particle emissions from biomass combustion [C]. In: AIP Conference Proceedings. Liptovský Ján: AIP Publishing LLC, 2014: 67-70
- [38] 冯晓龙, 刘明月, 霍学喜. 碳排放约束下中国苹果全要素生产率研究[J]. 中国农业大学学报, 2017, 22(2): 157-168
Feng X L, Liu M Y, Huo X X. Study on total factor productivity of apple in China under carbon emissions [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2017, 22(2): 157-168 (in Chinese)
- [39] 刘绍辉, 方精云. 土壤呼吸的影响因素及全球尺度下温度的影响[J]. 生态学报, 1997, 17(5): 469-476
Liu S H, Fang J. Effect factors of soil respiration and the temperature's effects on soil respiration in the global scale [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 1997, 17(5): 469-476 (in Chinese)
- [40] 易志刚, 蚊伟民, 周国逸, 周丽霞, 张德强, 丁明懋. 鼎湖山三种主要植被类型土壤碳释放研究[J]. 生态学报, 2003, 23(8): 1673-1678
Yi Z G, Yi W M, Zhou G Y, Zhou L X, Zhang D Q, Ding M M. Soil carbon effluxes of three major vegetation types in Dinghushan Biosphere Reserve [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(8): 1673-1678 (in Chinese)
- [41] 朱强根. 苏北不同杨树人工林经营模式下土壤呼吸及杨树细根研究[D]. 南京: 南京林业大学, 2007
Zhu Q G. Research on soil respiration dynamics and poplar fine root for four hybrid poplar (*Populus*×*Euramericana* cv.) plantation patterns in the northern areas of Jiangsu province [D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2007 (in Chinese)
- [42] 查同刚. 北京大兴杨树人工林生态系统碳平衡的研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2007
Cha T G. Carbon balance of poplar plantation ecosystem in Daxing, Beijing [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2007 (in Chinese)
- [43] 常建国, 刘世荣, 史作民, 陈宝玉, 朱学凌. 北亚热带-南暖温带过渡区典型森林生态系统土壤呼吸及其组分分离[J]. 生态学报, 2007, 27(5): 1791-1802
Chang J G, Liu S R, Shi Z M, Chen B Y, Zhu X L. Soil respiration and its components partitioning in the typical forest ecosystems at the transitional area from the northern subtropics to warm temperate, China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(5): 1791-1802 (in Chinese)
- [44] 陈金磊, 张仕吉, 李雷达, 辜翔, 刘兆丹, 王留芳, 方晰. 亚热带不同植被恢复阶段林地凋落物层现存量 and 养分特征[J]. 生态学报, 2020, 40(12): 4073-4086
Chen J L, Zhang S J, Li L D, Gu X, Liu Z D, Wang L F, Fang X. Stock and nutrient characteristics of litter layer at different vegetation restoration stages in subtropical region, China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(12): 4073-4086 (in Chinese)
- [45] 刘斌, 鲁绍伟, 李少宁, 陈波. 北京西山6种天然纯林枯落物及土壤水文效应[J]. 水土保持学报, 2015, 29(4): 73-78, 137
Liu B, Lu S W, Li S N, Chen B. Hydrological effects of litter and soil of six natural forests in Xishan mountainous area of Beijing [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2015, 29(4): 73-78, 137 (in Chinese)
- [46] 齐特, 李玉婷, 何会宾, 张雪峰, 赵廷宁. 冀北地区丰宁县水源林地水源涵养能力[J]. 中国水土保持科学, 2016, 14(3): 60-67
Qi T, Li Y T, He H B, Zhang X F, Zhao T N. Water conservation capacity of forest lands for water source at Fengning County in the north of Hebei Province [J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2016, 14(3): 60-67 (in Chinese)
- [47] 李铭红, 于明坚, 陈启瑞, 常杰, 潘晓东. 青冈常绿阔叶林的碳素动态[J]. 生态学报, 1996, 16(6): 645-651
Li M H, Yu M J, Chen Q C, Chang J, Pan X. Dynamics of carbon in the evergreen broadleaved forest dominated by *Cyclobalanopsis glauca* in south-east China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 1996, 16(6): 645-651 (in Chinese)
- [48] 崔海, 张亚红. 干旱区荒漠草原土壤呼吸速率日动态特征及影响因子[J]. 核农学报, 2016, 30(8): 1614-1624
Cui H, Zhang Y H. Diurnal variation of soil respiration rate and its influence factors in different weather conditions in desert steppe of arid region [J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2016, 30(8): 1614-1624 (in Chinese)
- [49] 李凌浩, 陈佐忠. 草地生态系统碳循环及其对全球变化的响应 I. 碳循环的分室模型、碳输入与贮量[J]. 植物学通报, 1998(2): 14-22
Li L H, Chen Z. The global carbon cycle in grassland ecosystems and its responses to global change I. Carbon flow compartment model, inputs and storage [J]. *Chinese Bulletin of Botany*, 1998(2): 14-22 (in Chinese)
- [50] 陶在朴. 生态包袱与生态足迹: 可持续发展的重量及面积观念[M]. 北京: 经济科学出版社, 2003
Tao Z P. *Eco-Rucksack and Eco-Footprint* [M]. Beijing: Economic Science Press, 2003 (in Chinese)
- [51] 罗婷文, 欧阳志云, 王效科, 苗鸿, 郑华. 北京城市化进程中家庭食物碳消费动态[J]. 生态学报, 2005, 25(12): 3252-3258
Luo T W, Ouyang Z Y, Wang X K, Miao H, Zheng H. Dynamics of urban food-carbon consumption in Beijing households [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(12): 3252-3258 (in Chinese)
- [52] 于洋, 崔胜辉, 林剑艺, 李飞. 城市废弃物处理温室气体排放研究: 以厦门市为例[J]. 环境科学, 2012, 33(9): 3288-3294
Yu Y, Cui S H, Lin J Y, Li F. Study on greenhouse gas emissions from urban waste disposal system: A case study in Xiamen [J]. *Environmental Science*, 2012, 33(9): 3288-3294 (in Chinese)
- [53] 黄洵, 黄民生, 黄飞萍. 福建省温室气体排放影响因素分析[J]. 热带地理, 2013, 33(6): 674-680, 702
Huang X, Huang M S, Huang F P. Influencing factors analysis of greenhouse gas emissions in Fujian Province [J]. *Tropical Geography*, 2013, 33(6): 674-680, 702 (in Chinese)
- [54] 李文涛, 高庆先, 王立, 马占云, 刘俊蓉, 李崇, 张艳艳. 我国城市生活垃圾处理温室气体排放特征[J]. 环境科学研究, 2015, 28(7): 1031-1038
Li W T, Gao Q X, Wang L, Ma Z Y, Liu J R, Li C, Zhang Y Y. Characteristics of greenhouse gas emissions from municipal solid waste

- disposal in China [J]. *Environmental*, 2015, 28 (7): 1031-1038 (in Chinese)
- [55] 蔡博峰, 高庆先, 李中华, 吴静, 王军霞. 中国污水处理厂甲烷排放研究[J]. *中国环境科学*, 2015, 35(12): 3810-3816
- Cai B F, Gao Q X, Li Z H, Wu J, Wang J X. Estimation of methane emissions of wastewater treatment plants in China [J]. *China Environmental Science*, 2015, 35(12): 3810-3816 (in Chinese)
- [56] Kahn H, Wiener A J. The Year 2000: A Framework for Speculation on the Next Thirty-Three Years[M]. New York: Macmillan, 1967
- [57] Liu X D, Wang X Q, Meng X R. Carbon Emission Scenario Prediction and Peak Path Selection in China[J]. *Energies*, 2023, 16(5): 2276-2276
- [58] 李成, 周宏. 农业技术进步与碳排放强度关系: 不同影响路径下的实证分析[J]. *中国农业大学学报*, 2020, 25(11): 162-171
- Li C L, Zhou H. Relationship between agricultural technology progress and carbon emission intensity: An empirical analysis under different influence paths [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2020, 25(11): 162-171 (in Chinese)

责任编辑: 杨爱东



第一作者简介: 杨蕴琦, 硕士研究生, 研究方向为国土空间规划与土地利用。硕士研究生与本科均就读于中国农业大学土地科学与技术学院土地资源管理专业。硕士期间获得二等学业奖学金、校级“优秀共产党员”, 本科期间获得学习优秀二等、三等奖学金、校级“优秀学生干部”、校级“优秀毕业生”等荣誉称号。先后主持完成北京市级大学生创新项目, 参加河北省邯郸市曲周县综合整治与高效农业空间发展研究、山东农业现代化研究、河北省邯郸市曲周县国土空间规划永久基本农田项目专题等, 曾获第二届全国自然资源资产核算研究生论坛二等奖, 目前共发表三篇专利。



通讯作者简介: 郝晋珉, 中国农业大学土地科学与技术学院教授, 博士生导师, 国家科技支撑计划项目首席科学家, 兼任中国土地学会理事、中国农业工程学会理事、土地规划分会副主任、土地整治分会副主任等。长期从事土地利用规划、土地整治、土地管理和农业农村发展等领域的科研教学工作, 主持完成国家科研项目20余项, 先后获得国家科技进步二等奖等国家和省部级科技奖励8项。获“国务院政府特殊津贴”“全国优秀农业科技工作者”“国家重点科技攻关计划先进个人”“农业部有突出贡献专家”“教育部跨世纪优秀人才”“北京高校优秀共产党员”等荣誉和称号。