DOI: 10.5846/stxb202201120117

许蕊,黄贤金,王佩玉,刘泽淼,梁洁,杨琳,张秀英.黄河流域国土空间碳中和度研究——以内蒙古段为例.生态学报,2022,42(23):9651-9662. Xu R, Huang X J, Wang P Y, Liu Z M, Liang J, Yang L, Zhang X Y.Territorial spatial carbon neutrality realization degree of the Yellow River Basin: A case study of the Inner Mongolia section. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(23):9651-9662.

黄河流域国土空间碳中和度研究

——以内蒙古段为例

许 蕊1,黄贤金1,2,*,王佩玉1,刘泽淼1,梁 洁3,杨 琳1,2,张秀英1

1南京大学地理与海洋科学学院,南京 210023

2 自然资源部碳中和与国土空间优化重点实验室,南京 210023

3 内蒙古自治区国土空间规划院,呼和浩特 010000

摘要:基于全球气候治理背景以及黄河流域在我国生态文明建设中的重要地位,以黄河流域内蒙古段为例,通过情景分析法,建 立改进的 IPAT 模型和集成生态圈模拟器 IBIS,预测不同情景下 2018—2060 年研究区碳排放变化趋势和达峰情况,并结合对碳 汇水平的模拟分析 2060 年碳中和实现进程。结果显示①在基准情景、节能情景、低碳情景和粗放情景下,黄河流域内蒙古段将 分别于 2040 年、2035 年、2030 年和 2050 年实现碳达峰,峰值碳排放量分别为 12209 万 t、11213 万 t、9784 万 t 和 17635 万 t;②在 IPCC RCP2.6 和 RCP6.0 气候变化情景下,黄河流域内蒙古段的陆地生态系统整体分别呈现出碳汇和碳源的不同效应,净初级 生产力分别为 1533 万 t 和-506 万 t;③综合能源消费碳排放和碳汇水平,在 RCP2.6 气候情景下,若碳排放选取基准、节能、低碳 和粗放情景,则 2060 年黄河流域内蒙古段分别可实现碳中和进程的 18.42%、22.37%、34.46%和 9.90%;在 RCP6.0 气候情景下, 由于研究区陆地生态系统呈现出碳源效应,因此难以对碳中和进程的 18.42%、22.37%、34.46%和 9.90%;在 RCP6.0 气候情景下, 由于研究区陆地生态系统呈现出碳源效应,因此难以对碳中和进程的推进做出贡献。可见,对于黄河流域内蒙古段而言,需要 科学制订碳达峰、碳中和目标实现时间,未来要更进一步保护重要碳汇生态系统,提升固碳增汇能力;调整能源消费结构,增加 可再生能源发展规划指标;构建碳排放权交易市场,促进碳指标流动;制定土地利用碳排放标准,优化国土空间格局。 关键词;黄河流域;国土空间;碳达峰;碳中和度;生态过程模拟

Territorial spatial carbon neutrality realization degree of the Yellow River Basin : A case study of the Inner Mongolia section

XU Rui¹, HUANG Xianjin^{1,2,*}, WANG Peiyu¹, LIU Zemiao¹, LIANG Jie³, YANG lin^{1,2}, ZHANG Xiuying¹

1 School of Geography and Ocean Science, Nanjing University, Nanjing 210023, China

2 Key Laboratory of Carbon neutralization and territory space planning, Nanjing 210023, China

3 Inner Mongolia Autonomous Region Territorial Space Planning Institute, Hohhot 010000, China

Abstract: Based on the background of global climate governance and the important position of the Yellow River Basin in the construction of ecological civilization in China, taking the Inner Mongolia section of the Yellow River Basin as an example, this paper uses the improved IPAT model and Integrated Ecosystem Simulator (IBIS) to predict the change trend and peak of carbon emission in the study area from 2018 to 2060 under different scenarios. At the same time, the realization degree of carbon neutrality in the Inner Mongolia section of the Yellow River Basin in 2060 is also analyzed, combined with the simulation of carbon sink capacity. The results show that: (1) under the baseline scenario, energy-saving scenario, low-carbon scenario and extensive scenario, the Inner Mongolia section of the Yellow River Basin will reach the peak of carbon emission in 2040, 2035, 2030 and 2050, with the peak carbon emissions of 122.09 million tons, 112.13 million tons,

收稿日期:2022-01-12; 网络出版日期:2022-07-27

基金项目:国家自然科学基金(71921003);自然资源部研究项目

^{*} 通讯作者 Corresponding author.E-mail: hxj369@ nju.edu.cn

97.84 million tons, and 176.35 million tons, respectively. (2) Under the IPCC RCP2.6 climate change scenario, the terrestrial ecosystem in the Inner Mongolian section of the Yellow River Basin shows a carbon sink effect, with the net primary productivity of 15.33 million tons. While under the RCP6.0 scenario, the terrestrial ecosystem presents a carbon source effect, with the net primary productivity of -5.06 million tons. (3) Considering carbon emission from energy consumption and carbon sink level comprehensively, under the RCP2.6 climate change scenario, the Mongolian section of the Yellow River Basin could achieve 18.42%, 22.37%, 34.46% and 9.90% of the carbon neutrality process in 2060 respectively, if the baseline, energy-saving, low-carbon and extensive scenarios are selected for carbon emission. While under the RCP6.0 climate scenario, it is difficult for the terrestrial ecosystem in the study area to contribute to the advancement of carbon neutrality because it appears as a carbon source. Therefore, for the Inner Mongolia section of the Yellow River Basin, it is necessary to scientifically formulate the time for the realization of peak carbon dioxide emissions and carbon sequestration and carbon sink increase; to adjust energy consumption structure and increase the planning targets of renewable energy development; to establish carbon emission trading market and promote the flow of carbon indicators; to formulate the standards for carbon emissions from land use and improve the patterns of the territorial spatial.

Key Words: the Yellow River Basin; territorial spatial; carbon emissions peak; the degree of carbon neutrality; ecological process simulation

全球气候变化已成为当今世界面临的最大非传统安全挑战^[1],IPCC《全球升温 1.5℃特别报告》指出只有 在 21 世纪中叶实现全球范围内的净零碳排放才有可能将气候变暖控制在 1.5℃以内^[2],因此世界各国陆续提 出了"气候中和"、"碳中和"、"净零碳排放"、"净零排放"等与中和有关的气候治理目标^[3]。作为负责任的大 国,为全球应对气候变化做出更大贡献,2020 年我国政府也明确提出了"力争 2030 年前二氧化碳排放达到峰 值,努力争取 2060 年前实现碳中和"的愿景^[4]。碳中和的内涵涉及碳排放与碳吸收的平衡,即要想实现碳中 和,一方面要从"源"的角度减少人为碳排放,另一方面要从"汇"的角度增强不同生态系统的固碳能力,以在 更大程度上中和人为碳排放^[5-7],推进碳中和的实现进程。

在碳中和影响力不断扩大的背景下,国内外学者对其内涵、国际承诺现状、实现路径和趋势展开了研究。 目前全球已有 136 个国家提出了在 2050 年前后实现净零排放的目标^[8],但不同国家间存在较大差异,以欧盟 为代表的欧洲发达国家对于中和目标年、分阶段目标、目标范围和具体路径等制定相对完善,而发展中国家大 多仅对目标年和目标范围做出承诺^[9],Salvia 等^[10]通过对欧盟 327 个城市地方规划的分析发现约有 78%的城 市均已制定了明确目标的缓解计划。从政策保障上来看,当前英国、丹麦等 14 个国家或经济体已经进行了气 候立法,中国、美国等 30 个国家则通过策略文件来保障碳中和目标的实现,澳大利亚、泰国等部分国家进行了 声明或承诺^[8]。此外,基于市场的手段也是实现碳中和的重要途径,学者们对碳市场、碳排放权交易、碳配 额、碳补偿、碳定价等均展开了大量研究^[1,11-12]。

从碳源的角度来看,通过构建情景模型对碳排放进行预测是当前学者们的研究热点之一。张帆等^[13]探 究了不同共享社会经济路径下我国 2020 年至 2100 年碳排放轨迹及经济代价,Zhou 等^[14]设置了 4 种情景对 我国建筑业碳排放达峰情况进行模拟分析,Yu 等^[15]通过构建一种新的经济-碳排放-就业多目标优化模型预 测我国能源碳排放,潘栋^[16]、朱宇恩^[17]等对我国不同地区或省份的能源消费碳排放未来变化展开情景分析。 同时,为了更好的促进碳减排,学者们在全球^[18]、国际组织^[19—22]、国家^[23—25]等不同尺度上对碳排放的影响因 素或驱动因素展开了大量分析,结果显示可再生能源使用、技术创新或研发、环境税收投入、能源效率提高、产 业结构升级等因素通常能够促进碳减排,不可再生能源使用、人口增长等一般对碳减排起消极作用,而经济增 长在不同国家或经济发展的不同阶段作用不同,贸易开放通常有利于中高收入国家碳排放减少,却导致中低 收入国家碳排放增加^[26]。此外,也有不少学者关注新能源、新材料和新技术的研发利用,在太阳能、风能和水 能等可再生能源应用逐渐成熟后,生物质能源作为新型清洁能源成为关注重点^[27-28];同时为更好的发展碳捕集、利用与封存技术(CCUS),通过光催化^[29]、电化学^[30]等方法对 CO₂进行还原也是当前技术创新的热门。

全球陆地生态系统在 2007—2016 年平均每年从大气中吸收碳高达 36.1 亿吨,相当于人为总碳排放的 33.7%^[31],可见为促进碳中和目标的实现,对于生态系统碳汇的研究也极其重要。当前,学者们已经对全 球^[32]、国家^[33]及区域^[34]等多个尺度的生态系统历史碳汇水平展开了评估,主要运用清查法^[35]、生态系统模 型模拟^[36]、大气反演^[33]等方法进行碳汇量核算。而在碳中和愿景下,对未来碳汇潜力的预测与模拟也必不 可少,当前对此研究仍相对缺乏,学者们最常使用生态系统过程模型,如 CENTURY 模型^[37]、集成生态圈模拟 器 IBIS^[6]、FORCCHN 模型^[38]等。此外,也有部分学者通过地面清查资料^[39]和数学建模^[40]等方法对未来碳 储量进行预测。

黄河流域是我国重要的能源、化工、原材料和基础工业基地,但在资源富裕的背景下长期粗放型的发展模式也使得流域沿线面临着严峻的生态环境问题,2019年9月18日,中共中央确定了将黄河流域生态保护和高质量发展列为重大国家战略^[41],2021年《黄河流域生态保护和高质量发展规划纲要》印发^[42]。内蒙古段地处黄河"几"字弯,是我国北方典型的干旱半干旱区域,不可避免地面临着水沙关系不协调、生态环境承载力不足、矿产资源开发红利和经济高质量发展冲突等问题。当前,虽然已有部分学者对黄河流域的生态保护^[43]、水沙问题^[44]和经济发展^[45]展开了研究,但如何在全球气候治理的背景下,统筹人为碳排放^[46]和生态系统碳汇,开展碳达峰可能阶段、碳中和实现进程及路径研究,目前仍然鲜有成果。为此,本文选取改进的IPAT模型和集成生物圈模拟器(IBIS),分别对黄河流域内蒙古段 2018—2060年能源消费碳排放和 2060年生态系统碳汇水平展开多情景预测,分析不同情景下的碳达峰实现时间以及碳中和程度及路径,并结合研究区实际情况从不同角度提出政策建议,以便为科学制订黄河流域的碳中和目标提供借鉴,对于应对气候变化具有积极意义。

1 研究区概况、研究方法与数据来源

1.1 研究区概况

黄河流域内蒙古段位于黄河流域上中游,流经长度 843.5km,流域面积广阔,地理位置独特,是黄河"几" 字弯的重要组成区域,也是黄河流域生态保护和高质量发展的重要组成部分。考虑到以自然黄河流域范围为 基础、保持地区级行政区划单元的完整性、地区社会经济发展与黄河的直接关联性这三条原则^[47-48],本文界 定的黄河流域内蒙古段包括黄河干支流流经的呼和浩特、鄂尔多斯、包头、巴彦淖尔、乌海、乌兰察布、阿拉善 7 个盟市全域(图1),国土面积约 52.30 万 km²,占内蒙古全区的 44.2%,2020 年 GDP 约 11691 亿元,占全区的 67.3%,常住人口 1237.12 万人,占全区的 49.4%,是人口活动和经济发展的重要区域。2017 年黄河流域内蒙 古段的能源消费总量约为 14247 万 t 标准煤,约占内蒙古全区的 69.8%,根据中国碳核算数据库数据计算得 2017 年研究区能源消费碳排放总量约为 9281 万 t,约占全区的 59.3%,单位 GDP 碳排放量约为 0.83 吨/万 元,高于全国平均水平,实现"双碳"目标面临巨大挑战。

1.2 气候变化情景选择

按照典型浓度路径,IPCC 第五次评估报告将未来气候变化情景分为 RCP2.6、RCP4.5、RCP6.0、RCP8.5 四种^[49]。RCP8.5 情景属于高排放情景,有研究表明仅在现有煤炭使用量提高五倍时才会出现,而伴随着全球煤炭使用量达峰,清洁能源成本持续下降,该情景越来越不可能发生^[50]。RCP2.6 情景属于低排放情景,是四种情景中唯一能满足 2100 年升温低于 2℃的情景,与当前碳中和的目标契合。RCP4.5 情景和 RCP6.0 情景属于中等排放情景,在政府的干预下排放量将得到缓解。基于选取 RCP2.6 的前提,本研究在两种中等排放情景间选取到 2100 年辐射强迫相对较高的中高情景 RCP6.0,以反映碳排放缓解程度较低时研究区的碳汇情况。RCP2.6 和 RCP6.0 与全球碳减排背景下的升温情况接近,在一定程度上可以充分有效地反映气候变化特征。在 RCP2.6 情景下,未来全球将采取大力度的减排措施,CO₂排放量从 2020 年开始下降,辐射强迫在 21

105°

100°



图 1 黄河流域内蒙古段地理分布范围 Fig.1 The geographical distribution of the Inner Mongolia section of the Yellow River Basin

世纪达到顶峰并于 2100 年下降到 2.6 W/m²,有较大可能抑制全球变暖趋势并把升温控制在 2℃之内。在 RCP6.0 情景中,CO₂排放量从 2080 年开始下降,辐射强迫在 2100 年稳定在 6.0 W/m²,在本世纪末不能抑制 全球变暖趋势。

1.3 碳中和度测算

本文基于改进的 IPAT 模型预测不同减排情景下 2018—2060 年黄河流域内蒙古段的能源消费碳排放变 化趋势和碳达峰情况,基于集成生物圈模拟器 IBIS 模拟在 RCP2.6 和 RCP6.0 情景下黄河流域内蒙古段陆地 生态系统的净初级生产力,以预测 2060 年研究区碳汇能力,并根据碳排放量和碳汇水平计算 2060 年黄河流 域内蒙古段陆地生态系统对于中和人为碳排放的贡献率,即国土空间碳中和程度(图 2)。

1.3.1 碳排放预测——改进的 IPAT 模型

当前,人类活动的二氧化碳排放约有 90%以上来源于能源消费^[17],学者们在研究中常将其作为区域碳排 放总量进行测算,本研究也采取相同的方法。IPAT 模型由 Enrlich 等学者在 1971 年提出,以反映人口、经济、 技术对环境压力的影响^[51]。当前,IPAT 模型也被广泛应用于研究碳排放与能源、经济、人口等因素的宏观量 化关系中,但除此之外,产业结构和技术水平因素也与碳排放关系密切。吕炜^[52]研究表明产业结构演变与人 均劳动者报酬直接相关,与产业技术进步间接相关,因此本文参考杜强^[53]的方法引入劳动者报酬率来表征产 业结构演变和产业技术进步(可决系数高达 0.91^[52]),并对 IPAT 模型进行修正,以预测碳排放总量。改进后 的 IPAT 模型表达为:

$$C = P\left(\frac{G}{P}\right)\left(\frac{E}{G}\right)\left(\frac{C}{E}\right) \times (1 - 0.91f) = \text{PAMD} \times k \tag{1}$$

式中, C 为碳排放总量, P 为人口, G 为 GDP, E 为能源消费总量; A 为人均 GDP, M 为能源强度, D 为综合能 源碳排放系数, f 表示劳动力报酬率, k 表示技术进步影响系数。则 t 时期的碳排放总量为:

95°



图 2 黄河流域内蒙古段碳中和度测算研究框架

Fig.2 The research framework for carbon neutrality measurement in Mongolia section of the Yellow River Basin

 $C_{\iota} = P_{\iota} A_{\iota} M_{\iota} D_{\iota} \times k_{\iota} = P_{0} (1 + p)^{\iota} \times A_{0} (1 + a)^{\iota} \times M_{0} (1 + m)^{\iota} \times D_{0} (1 + d)^{\iota} \times k_{\iota}$ (2) 式中, p 表示人口年均变化率, a 表示人均 GDP 年均变化率, m 表示能源强度年均变化率, 即年节能率, d 表示 综合能源碳排放系数变化率, 即低碳能源年替代率。

其中,实际碳排放数据来源于中国碳核算数据库(Carbon Emission Accounts and Datasets, CEADs)提供的中国县级碳排放清单(https://www.ceads.net.cn/),该数据通过建立省级 CO₂排放与夜间灯光数据之间的关系自上而下地估算县域碳排放量,本研究根据县域数据计算得到 2009—2017 年研究区实际碳排放总量^[54],以便与通过改进的 IPAT 模型计算得到的碳排放量作对比,从而确定模型的可行性。2009—2017 年研究区 GDP、常住人口、能源消费量、职工平均工资均来源于历年《内蒙古统计年鉴》、《内蒙古经济社会调查年鉴》和各盟市统计年鉴。为消除物价影响,将 GDP 和职工平均工资均统一到 2009 年基准。由于统计年鉴显示内蒙古在第三次全国经济普查中对能源消费量数据进行了调整,因此本文也根据变化率相应地对 2009—2013 年研究区能源消费量进行调整,以保证数据连续性。数据描述性统计见表1。

Table 1 Descriptive statistics of the main variables							
变量 Variable	单位 Unit	样本数 Sample size	平均值 Mean	标准差 Standard deviation	最小值 Min	最大值 Max	
G	×100 亿元	9	121.06	29.87	75.40	162.10	
Р	×100 万人	9	12.30	0.35	11.50	12.70	
E	×100 万吨标准煤	9	125.70	15.84	92.00	142.50	
W	千元	9	51.62	11.08	34.20	68.90	
С	×100 万 t	9	86.91	10.68	63.70	94.00	
М	t 标准煤/万元	9	1.07	0.15	0.88	1.25	
D	1	9	0.69	0.03	0.65	0.73	

表1 主要变量描述性统计

C: 地区生产总值 Gross domestic product; *P*: 常住人口 Permanent resident population; *E*: 能源消费总量 Total energy consumption; *W*: 职工平 均工资 Average wages; *C*: 实际碳排放总量 Actual total carbon emissions; *M*: 能源强度 Energy intensity; *D*: 综合能源碳排放系数 Comprehensive energy carbon emission coefficient

9655

对 2009—2017 年黄河流域内蒙古段能源消费总量和实际碳排放总量进行拟合得到综合能源碳排放系数,拟合方程为:y=0.6343x+7.2061(R²=0.883),则 2009—2017 年综合能源碳排放系数为 0.6343。对 2009—2017 年黄河流域内蒙古段职工平均工资取对数得到职工平均工资曲线,拟合方程为:y=0.0807x-151.61 (R²=0.970),以职工平均工资变动斜率表征科技变动率,其中劳动力报酬变动系数f为 0.0807,则技术进步值为 0.0734。社会科技从创新到推广一般需要近 5 年的时间,则每 5 年的技术进步值为 7.34%,则技术因素的影响系数为 92.66%,则每年技术因素的影响 k 为 98.53%。

1.3.2 碳汇模拟——生态过程模型

集成生物圈模拟器(Integrated Biosphere Simulator, IBIS)属于新一代动态植被模型。1996年,IBIS由美国威斯康星大学全球环境与可持续发展中心开发,此后得到广泛应用。该模型考虑植被组分和结构对环境变化的响应,将陆表水热过程、陆地生物地球化学循环和植被动态的模拟都涵盖其中,可以分为陆面过程、冠层生理、植被物候、植被动态、土壤地球生物化学等5个模块。在模拟的过程中,模型充分考虑了各圈层之间的能量、动量以及水分的交换;涵盖冠层光合与导度的冠层生理特征;植被物候变化;植被类型之间动态竞争过程,同时将陆地碳循环纳入其中,考虑净初级生产力水平、组织周转、土壤碳和有机质分解^[36,55]。IBIS 模型可在不同的时间尺度上进行模拟,从1小时至1年,将植被发生在不同时间尺度上的生态、生物物理、生理过程有机整合起来^[56]。

本文利用 IBIS 模拟的净初级生产力(NPP)和净生态系统生产力(NEP)表征陆地生态系统的固碳能力。 NPP 即指植被固定的碳,将 NPP 减去土壤异养呼吸,可以得到 NEP。NEP 常用作一个生态系统是从大气中 固定碳还是向大气中排放碳的指标^[7],其为正值时,生态系统为碳汇,反之则为碳源^[57]。参考黄梅玲的研 究^[58],IBIS 模型输入数据及其来源为(1)气象数据:降水、气温、相对湿度、云量因子、风速、气温日较差、月降 水日数、极低气温等数据,依据中国标准气象站点地面气候资料构建。(2) 植被类型数据:依据中国 1:4000000植被数据构建,将原数据较为详细的植被类型分类统一到 IBIS 模型的 15 种植被类型,形成 IBIS 模 型所需要的植被初始化图层。(3)土壤数据:根据中国 1:1000000 数字化土壤数据构建。(4) 地形数据:采用 SRTM version3.0 的 DEM 数据构建。(5)陆面掩膜数据:主要用来表示陆面的水体部分和西北盐壳等没有土 壤属性的区域。

2 不同情景下黄河流域内蒙古段碳达峰和碳中和进程分析

2.1 未来碳排放情景设置

对改进的 IPAT 模型中的人均 GDP 变化率 a、人口变化率 p、年节能率 m 和低碳能源年替代率 d 这四个因 子分别设置高、中、低变化率,如表 2 所示。其中,人均 GDP 和人口变化每 10 年为一个阶段,而能源强度和综 合能源碳排放系数变化则根据碳中和实现路径的阶段设置。结合已有研究^[59-60],碳中和实现路径可分为 4 个阶段,即 2020—2030 年为达峰期,2030—2035 年为平台期,2035—2050 年为快速下降期,2050—2060 年 为深度脱碳期,因此对这 4 个阶段分别设置年节能率和低碳能源年替代率。在 2020—2060 年因子变化率设 置时,人均 GDP 变化率中值参考了内蒙古"十四五"规划和关敏捷^[61]、潘栋^[16]等的研究;人口变化率结合研 究区 2010—2020 年间人口年均变化率历史趋势进行设置;年节能率和低碳能源年替代率的参数中值设置参 考朱宇恩^[17]、潘栋^[16]等的研究,并结合研究区化石能源消费比例大、能源结构调整慢、可再生能源利用率低 的现状对所参考文献中的参数数值进行了下调。在低值和高值中,各因子变化率的设置则基于中值进行相应 的调整。同时为确保数据连续性,将 2018—2020 年各指标变化率设置为与第一阶段相同。

根据各因子的高、中、低 3 种变化率,建立了 4 种情景,分别为基准情景、节能情景、低碳情景和粗放情景, 在各情景下对黄河流域内蒙古段的未来碳排放变化趋势进行预测并分析其达峰情况,表 3 展示了 4 种情景的 因子设置组合。

在基准情景(S1)下,设定各因子变化率均为中值,即基本保持现有的经济社会发展水平和能源消费变化

趋势。在节能情景(S2)下,设定人均 GDP 和人口变化率为中值,而年节能率和低碳能源年替代率为低值,即 在经济社会保持现有发展水平的同时,逐渐开始关注节能减排工作,调整能源消费结构,降低能源强度。在低 碳情景(S3)下,设定各因子变化率均为低值,即改变传统的发展模式,优化升级产业结构,提高资源配置效率 和能源利用效率,通过技术创新降低能源强度,提高清洁能源替代率,建立以绿色、循环为核心的高质量发展。 在粗放情景(S4)下,设定各因子变化率均为高值,即此时经济发展仍然是黄河流域内蒙古段发展的主要目 标,全球气候变化和节能减排工作未得到足够的重视,粗放的经济发展模式使得区域内的能源强度下降率和 低碳能源年替代率均较低。

	8 · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·		8				
指标	时间		变化率设置 Change rate setting/%				
Indicator	Time	低 Low	中 Middle	高 High			
a	2018—2030	4.50	5.50	6.50			
	2030—2040	3.50	4.50	5.50			
	2040—2050	2.50	3.50	4.50			
	2050—2060	1.50	2.50	3.50			
p	2018—2030	0.30	0.34	0.38			
	2030—2040	0.10	0.14	0.18			
	2040—2050	-0.10	-0.06	-0.02			
	2050—2060	-0.30	-0.26	-0.22			
m	2018—2030	-2.40	-2.00	-1.60			
	2030—2035	-2.60	-2.20	-1.80			
	2035—2050	-3.00	-2.60	-2.20			
	2050—2060	-3.40	-3.00	-2.60			
d	2018—2030	-0.18	-0.14	-0.10			
	2030—2035	-0.28	-0.24	-0.20			
	2035—2050	-0.38	-0.34	-0.30			
	2050—2060	-0.48	-0.44	-0.40			

表 2 2018—2020 年黄河流域内蒙古段改进的 IPAT 模型各因子变化率设置/% Table 2 Change rate setting of each factor of the Improved IPAT model in Inner Mongolia section of the Yellow River Basin from 2018 to 2020

(1) IPAT 模型,人口、经济、技术与环境关系模型 Impact = Population×Affluence×Technology; (2) *a*,人均 GDP 变化率 Per capital GDP change rate; *p*,人口变化率 Population change rate; *m*,年节能率 Annual energy saving rate; *d*,低碳能源年替代率 Annual replacement rate of low-carbon energy

表 3	黄河流域内蒙古段碳减排情景设置

Table 3	Scenario setting	of carbon	emission	reduction in	Mongolia	section	of the	Yellow 1	River Bas	in
---------	------------------	-----------	----------	--------------	----------	---------	--------	----------	-----------	----

情景		情景设置 5	Scenario setting	
Scenario	a	р	m	d
S1	中	中	申	中
S2	中	中	低	低
S3	低	低	低	低
S4	声同	青同	声 同	声

S1, 基准情景 Baseline scenario; S2, 节能情景 Energy-saving scenario; S3, 低碳情景 Low-carbon scenario; S4, 粗放情景 Extensive scenario

2.2 不同情景下 2018—2060 年碳排放预测结果及达峰情况

由于通过改进的 IPAT 模型计算得到的 2009—2017 年研究区碳排放量为 6571—9037 万 t,而中国碳核算数据库公布的 2009—2017 年研究区碳排放量约为 6368—9402 万 t,两者平均误差仅为-2.64%,可见模型具有较高可信度,可以进行碳排放情景预测。因此基于情景设置,通过改进的 IPAT 模型计算出黄河流域内蒙古段 2018—2060 年的能源消费碳排放量变化趋势和预计达峰时间(图 3)。

在基准情景下,2030年黄河流域内蒙古段能源消费碳排放总量约为11800万t,随后平稳增长至2040年

离开修 其语批

实现碳达峰,其碳排放总量由 2017 年的 9281 万 t(实际 碳排放量)增长到了 2040 年的 12209 万 t,上升率约为 31.55%,此后碳排放量逐渐下降,到 2060 年碳排放量 将下降到 8321 万 t,较峰值减少 31.85%,较 2017 年减 少 7.93%,此时 2060 年碳排放总量略低于基期的碳排 放量。

在节能情景下,2030年研究区能源消费碳排放总量约为11131万t,缓慢增长至2035年实现碳达峰,峰值约为11213万t,较2017年上升率约为20.81%,此后碳排放量逐渐下降,到2060年碳排放总量将下降到6854万t,较峰值下降38.88%,较2017年下降24.16%。该情景下能源政策的实施在一定程度上促进了碳达峰,并提高了达峰后的碳排放下降率。



Fig.3 Forecast results of carbon emissions under different carbon emission reduction scenarios from 2017 to 2060

在低碳情景下,研究区碳排放总量将于 2030 年达峰,峰值碳排放总量仅为 9784 万 t,较 2017 年实际碳排 放量仅上升 5.42%,此后碳排放呈现快速下降的趋势,到 2060 年碳排放量将下降到 4448 万 t,较 2030 年峰值 减少 54.54%,较 2017 年基期减少 50.78%。该情景下黄河流域内蒙古段的节能减排工作取得了明显成效,能 够按期实现国家碳达峰目标,但对于经济发展模式、社会生产方式、能源消费模式的改变和能源科技创新的要 求均较高。

在粗放情景下,2030年研究区能源消费碳排放总量约为14212万t,随后仍保持较快的速度持续增长,到2050年实现碳达峰,峰值约为17635万t,较2017年实际碳排放增长近一倍,上升率为90.02%,2050年后碳排放开始缓慢减少,但到2060年碳排放总量仍为15491万t,较2030年峰值减少12.16%,而较2017年仍增长71.42%,在该情景下研究区仍将面临着巨大的生态环境压力。

综合对比发现,经济增长仍然是影响黄河流域内蒙古段碳排放总量的重要因素,但单纯地改变经济发展 模式还远远不够,要想促进碳达峰目标尽早实现,必须尽快出台能源规划,并加大能源政策的实施力度,降低 能源强度,推广清洁可再生能源利用。

2.3 2060年黄河流域内蒙古段陆地生态系统碳汇水平及空间分异

在 IPCC RCP2.6 和 RCP6.0 两种情景下,黄河流域内蒙古段陆地生态系统呈现出不同的碳源汇效应,不同土地利用碳汇水平差异较大。在 RCP2.6 情景下,2060 年黄河流域内蒙古段陆地生态系统碳汇水平约为1533 万 t,在此情景下,政府积极参与对全球气候变化的调控,化石燃料使用量减少,可再生能源和碳捕获系统得到广泛推广,整体碳储量增加。在 RCP6.0 情景下,2060 年黄河流域内蒙古段的陆地生态系统碳汇水平约为-506 万 t,在此情景下政府对于气候变化的调控相对较弱,气温升高情况较 RCP2.6 情景下加剧,使得温室气体排放和浓度不断增加,此时草地生态系统土壤通过异养呼吸作用使得微生物分解有机质释放 CO₂^[62-63],即土壤异养呼吸作用大于净初级生产力,成为陆地生态系统中土壤碳的主要净输出途径,而由于黄河流域内蒙古段草地面积较广,因此导致研究区整体呈现为碳源。

2060 年 RCP2.6 情景和 RCP6.0 下黄河流域内蒙古段陆地生态系统的 NEP 空间分布如图 4 和图 5 所示, 两种情景下 NEP 空间分布格局相反。在 RCP2.6 情景下,NEP 总体上呈现由东南向西北降低的格局,其中碳 汇效应较强的 NEP 高值区主要集中在乌兰察布市和呼和浩特市南部及鄂尔多斯市东南部,巴彦淖尔市、包头 市和乌兰察布市北部及阿拉善盟东南部呈现出较弱的碳汇效应,而碳源效应较强的 NEP 负值区主要集中在 阿拉善盟西北部。在 RCP6.0 情景下,升温幅度增高,温室气体排放浓度增加。由于研究区东侧主要为草原 生态系统,土壤中存在着大量草本植物根系,随着气温升高其土壤异养呼吸作用更为强烈^[64],因此基本呈现 出碳源状态。NEP 总体上呈现由西向东降低的格局,其中碳汇效应较强的 NEP 高值区主要集中在研究区西 南的阿拉善盟、乌海市和鄂尔多斯市南部地区,而碳源效应较强的 NEP 负值区主要集中在研究区东部的乌兰 察布市南部、呼和浩特市大部分地区以及鄂尔多斯市东部小部分地区,巴彦淖尔市和包头市也呈现出较弱的 碳源效应。



图 4 RCP2.6 情景下 2060 年黄河流域内蒙古段陆地生态系统碳汇情况

Fig.4 Carbon sink of terrestrial ecosystem in Inner Mongolia section of Yellow River Basin in 2060 under the RCP2.6 scenario



图 5 RCP6.0 情景下 2060 年黄河流域内蒙古段陆地生态系统碳汇情况 Fig.5 Carbon sink of terrestrial ecosystem in Inner Mongolia section of Yellow River Basin in 2060 under the RCP6.0 scenario

2.4 2060年黄河流域内蒙古段国土空间碳中和进程分析

结合多情景下的碳排放情况模拟和碳汇水平预测结果,对陆地生态系统碳汇抵消能源消费碳排放的贡献 率进行计算,分析 2060 年黄河流域内蒙古段国土空间碳中和程度。在 RCP2.6 情景下,由于 2060 年黄河流域 内蒙古段的陆地生态系统整体呈现出碳汇效应,碳汇水平为 1533 万 t,因此若碳排放变化为基准情景,则 2060 年陆地生态系统对于碳中和进程的贡献率约为 18.42%;若为节能情景,则 2060 年国土空间碳中和实现 程度约为 22.37%;若为低碳情景,则 2060 年碳中和实现程度约为 34.46%;若为粗放情景,则实现程度将仅为 9.90%。

但在 RCP6.0 情景下,由于土壤异养呼吸作用导致草原生态系统向外排放碳,使得 2060 年黄河流域内蒙 古段的陆地生态系统整体呈现出碳源效应,NEP 为-506 万 t,则此时研究区内部难以对于实现碳中和做出贡 献。但从内蒙古自治区全区来看,由于区内林草资源分布不均,固碳能力较高的林地等生态系统主要分布在 内蒙古东部,则若能加快推进碳排放交易,可以促进区内碳指标的有效分配和区内流动,有助于推进全区碳中 和的实现进程。

3 结论及政策建议

本文基于改进的 IPAT 模型和集成生物圈模拟器 IBIS 对黄河流域内蒙古段的能源消费碳排放和生态系统碳汇水平进行多情景预测模拟,进而分析其碳达峰情况和碳中和实现进程。对四种碳减排情景分析显示,由于黄河流域内蒙古段前期能源消费和经济发展模式较为粗放,因此在 2030 年实现碳达峰面临着较大的挑战,仅在低碳情景下存在实现的可能,而在基准、节能和粗放情景下碳排放将分别于 2040 年、2035 年和 2050 年达峰。对两种气候变化情景分析显示,不同的升温幅度使得 2060 年研究区生态系统的净初级生产力差异较大,RCP2.6 情景下,研究区呈现出碳汇效应,碳汇水平约为 1533 万 t,而 RCP6.0 情景下,NEP 为-506 万 t, 呈现出碳源效应。综合碳源和碳汇情况,在 RCP2.6 气候情景下,选择不同的减排路径,2060 年陆地生态系统分别可以对黄河流域内蒙古段碳中和做出 9.90%—34.46%的贡献,而在 RCP6.0 气候情景下陆地生态系统难以为碳中和目标的实现做出贡献。

全球气候治理背景下,要想实现碳达峰、碳中和目标,低碳国土空间的开发利用成为黄河流域未来发展的 重点,结合内蒙古段实际情况,从碳增汇、碳减排、碳交易和国土空间规划的角度分别提出以下政策建议。

(1)保护重要碳汇生态系统,提升固碳增汇能力。黄河流域内蒙古段长期以来面临着严峻的生态破坏问题,且重度和中度退化草地面积比重高^[65],因此要重视对林地、耕地、草地等具有高碳汇能力的生态系统的保护和修复^[66],探索不同生态系统的固碳增汇技术,建设固碳增汇示范基地和示范项目。

(2)调整能源消费结构,增加可再生能源发展规划指标。由于黄河流域内蒙古段能源消费较为粗放,因 此尽快实现碳减排是推动碳中和进程的重中之重。要调整能源消费结构,严格控制煤炭消费,大力发展可再 生能源,利用广阔的地理空间优势,在阿拉善、乌兰察布、鄂尔多斯、巴彦淖尔等边境沿线、荒漠地区和矿坑地 区大力发展风电和太阳能光伏产业,在农林等生物质丰富的地区积极推进生物质能源发电。

(3)构建碳排放权交易市场,促进碳指标流动。黄河流域上下游以及内蒙古自治区东西部之间土地利用 方式差异较大,生态系统间的碳源汇效应不同,如内蒙古西部沿黄地区是国家重点能源基地,而东部森林地区 则为国家禁止开发的生态保护区^[67],因此加快建设碳排放权交易市场,促进碳指标在流域内或区内的流动, 进行区域支付转移,是未来低碳发展的重要思路之一。

(4)制定土地利用碳排放标准,优化国土空间格局。在国土空间规划中,制订重要碳汇空间的土地利用 碳排放标准,对不同土地利用活动进行碳配额,对高碳排放用地主体征收碳税,用于补偿生态建设用地主体, 将碳减排与国土空间管制相结合。同时,由于不同陆地生态系统的碳汇能力不同,也要科学合理地调整和优 化国土空间格局,构建低碳型国土空间。

参考文献(References):

- [1] 胡鞍钢. 中国实现 2030 年前碳达峰目标及主要途径. 北京工业大学学报: 社会科学版, 2021, 21(3): 1-15.
- [2] IPCC. Global Warming of 1.5 °C. 2018[2022-03-04]. https://www.ipcc.ch/sr15/.
- [3] 邓旭,谢俊,滕飞.何谓"碳中和"?. 气候变化研究进展, 2021, 17(1): 107-113.
- [4] 习近平. 继往开来,开启全球应对气候变化新征程——在气候雄心峰会上的讲话(2020年12月12日,北京)人民日报, 2020-12-13(2).
- [5] Lai L, Huang X J, Yang H, Chuai X W, Zhang M, Zhong T Y, Chen Z G, Chen Y, Wang X, Thompson J R. Carbon emissions from land-use change and management in China between 1990 and 2010. Science Advances, 2016, 2(11): e1601063.
- [6] 黄贤金, 张秀英, 卢学鹤, 王佩玉, 秦佳遥, 蒋昀辰, 刘泽淼, 汪振, 朱阿兴. 面向碳中和的中国低碳国土开发利用. 自然资源学报, 2021, 36(12): 2995-3006.
- [7] Grant R F, Baldocchi D D, Ma S. Ecological controls on net ecosystem productivity of a seasonally dry annual grassland under current and future climates: modelling with ecosys. Agricultural and Forest Meteorology, 2012, 152: 189-200.
- [8] Energy & Climate Intelligence Unit. NET ZERO EMISSIONS RACE. 2022[2022-03-04]. https://eciu.net/netzerotracker.
- [9] 张雅欣, 罗荟霖, 王灿. 碳中和行动的国际趋势分析. 气候变化研究进展, 2021, 17(1): 88-97.
- [10] Salvia M, Reckien D, Pietrapertosa F, Eckersley P, Spyridaki N A, Krook-Riekkola A, Olazabal M, de Gregorio Hurtado S, Simoes S G,

Geneletti D, Viguié V, Fokaides P A, Ioannou B I, Flamos A, Csete M S, Buzasi A, Orru H, de Boer C, Heidrich O. Will climate mitigation ambitions lead to carbon neutrality? An analysis of the local-level plans of 327 cities in the EU. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2021, 135: 110253.

- [11] 邓明君, 罗文兵, 尹立娟. 国外碳中和理论研究与实践发展述评. 资源科学, 2013, 35(5): 1084-1094.
- [12] 赵荣钦,刘英,李宇翔,丁明磊,张战平,揣小伟,焦士兴.区域碳补偿研究综述:机制、模式及政策建议.地域研究与开发,2015,34 (5):116-120.
- [13] 张帆, 徐宁, 吴锋. 共享社会经济路径下中国 2020-2100 年碳排放预测研究. 生态学报, 2021, 41(24): 9691-9704.
- [14] Zhou N, Khanna N, Feng W, Ke J, Levine M. Scenarios of energy efficiency and CO₂ emissions reduction potential in the buildings sector in China to year 2050. Nature Energy, 2018, 3 (11): 978-984.
- [15] Yu S W, Zheng S H, Li X, Li L X. China can peak its energy-related carbon emissions before 2025: evidence from industry restructuring. Energy Economics, 2018, 73: 91-107.
- [16] 潘栋,李楠,李锋,冯奎双,彭璐璐,王震.基于能源碳排放预测的中国东部地区达峰策略制定.环境科学学报,2021,41(3): 1142-1152.
- [17] 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.资源科学,2016,38(12):2316-2325.
- [18] Sharif A, Raza S A, Ozturk I, Afshan S. The dynamic relationship of renewable and nonrenewable energy consumption with carbon emission: a global study with the application of heterogeneous panel estimations. Renewable Energy, 2019, 133; 685-691.
- [19] Bekun F V, Alola A A, Sarkodie S A. Toward a sustainable environment: Nexus between CO₂ emissions, resource rent, renewable and nonrenewable energy in 16-EU countries. Science of the Total Environment, 2019, 657: 1023-1029.
- [20] Balsalobre-Lorente D, Shahbaz M, Roubaud D, Farhani S. How economic growth, renewable electricity and natural resources contribute to CO₂ emissions? Energy Policy, 2018, 113: 356-367.
- [21] Hashmi R, Alam K. Dynamic relationship among environmental regulation, innovation, CO₂ emissions, population, and economic growth in OECD countries: a panel investigation. Journal of Cleaner Production, 2019, 231: 1100-1109.
- [22] 王杰,李治国,谷继建.金砖国家碳排放与经济增长脱钩弹性及驱动因素——基于 Tapio 脱钩和 LMDI 模型的分析.世界地理研究, 2021, 30(3): 501-508.
- [23] Chen Y L, Wang Z, Zhong Z Q. CO₂ emissions, economic growth, renewable and non-renewable energy production and foreign trade in China. Renewable Energy, 2019, 131: 208-216.
- [24] Shen L Y, Wu Y, Lou Y L, Zeng D H, Shuai C Y, Song X N. What drives the carbon emission in the Chinese cities? —A case of pilot low carbon city of Beijing. Journal of Cleaner Production, 2018, 174: 343-354.
- [25] Wang Q, Su M, Li R R. Toward to economic growth without emission growth: the role of urbanization and industrialization in China and India. Journal of Cleaner Production, 2018, 205: 499-511.
- [26] Wang Q, Zhang F Y. The effects of trade openness on decoupling carbon emissions from economic growth-Evidence from 182 countries. Journal of Cleaner Production, 2021, 279: 123838.
- [27] Tripathi N, Hills C D, Singh R S, Atkinson C J. Biomass waste utilisation in low-carbon products: harnessing a major potential resource. Npj Climate and Atmospheric Science, 2019, 2.
- [28] Dhyani V, Bhaskar T. A comprehensive review on the pyrolysis of lignocellulosic biomass. Renewable Energy, 2018, 129: 695-716.
- [29] Ran J R, Jaroniec M, Qiao S Z. Cocatalysts in semiconductor-based photocatalytic CO₂ reduction: achievements, challenges, and opportunities. Advanced Materials, 2018, 30(7): 1704649.
- [30] Ross M B, de Luna P, Li Y, Dinh C T, Kim D, Yang P, Sargent E H. Designing materials for electrochemical carbon dioxide recycling. Nature Catalysis, 2019, 2 (8): 648-658.
- [31] Keenan T F, Williams C A. The terrestrial carbon sink. Annual Review of Environment and Resources, 2018, 43: 219-243.
- [32] Pan Y D, Birdsey R A, Fang J Y, Houghton R, Kauppi P E, Kurz W A, Phillips O L, Shvidenko A, Lewis S L, Canadell J G, Ciais P, Jackson R B, Pacala S W, McGuire A D, Piao S L, Rautiainen A, Sitch S, Hayes D. A large and persistent carbon sink in the world's forests. Science, 2011, 333(6045): 988-993.
- [33] Wang J, Feng L, Palmer P I, Liu Y, Fang S, Bösch H, O'Dell C W, Tang X, Yang D, Liu L, Xia C. Large Chinese land carbon sink estimated from atmospheric carbon dioxide data. Nature, 2020, 586 (7831): 720-723.
- [34] 义白璐, 韩骥, 周翔, 杨芳, 孟醒, 曹武星, 黄鲁霞, 象伟宁. 区域碳源碳汇的时空格局——以长三角地区为例. 应用生态学报, 2015, 26 (4): 973-980.
- [35] Xu L, Yu G R, He N P. Increased soil organic carbon storage in Chinese terrestrial ecosystems from the 1980s to the 2010s. Journal of Geographical Sciences, 2019, 29(1): 49-66.
- [36] Foley J A, Prentice I C, Ramankutty N, Levis S, Pollard D, Sitch S, Haxeltine A. An integrated biosphere model of land surface processes, terrestrial carbon balance, and vegetation dynamics. Global Biogeochemical Cycles, 1996, 10(4): 603-628.
- [37] Han P F, Lin X H, Zhang W, Wang G C, Wang Y N. Projected changes of alpine grassland carbon dynamics in response to climate change and

elevated CO₂ concentrations under Representative Concentration Pathways (RCP) scenarios. PLoS One, 2019, 14(7): e0215261.

- [38] Zhao J F, Xie H F, Ma J Y, Wang K L. Integrated remote sensing and model approach for impact assessment of future climate change on the carbon budget of global forest ecosystems. Global and Planetary Change, 2021, 203: 103542.
- [39] Qiu Z X, Feng Z K, Song Y N, Li M L, Zhang P P. Carbon sequestration potential of forest vegetation in China from 2003 to 2050: predicting forest vegetation growth based on climate and the environment. Journal of Cleaner Production, 2020, 252: 119715.
- [40] Zhang H Y, Feng Z K, Chen P P, Chen X F. Development of a tree growth difference equation and its application in forecasting the biomass carbon stocks of Chinese forests in 2050. Forests, 2019, 10(7): 582.
- [41] 习近平.在黄河流域生态保护和高质量发展座谈会上的讲话. 2019-09-18[2021-12-24]. http://www.court.gov.cn/zixun-xiangqing-190581. html.
- [42] 中共中央 国务院. 黄河流域生态保护和高质量发展规划纲要. 2021-10-08[2021-12-24]. http://www.gov.cn/zhengce/2021-10/08/content_ 5641438.htm.
- [43] 杨开忠, 董亚宁. 黄河流域生态保护和高质量发展制约因素与对策——基于"要素-空间-时间"三维分析框架. 水利学报, 2020, 51(9): 1038-1047.
- [44] 赵阳, 胡春宏, 张晓明, 王友胜, 成晨, 殷小琳, 谢敏. 近 70 年黄河流域水沙情势及其成因分析. 农业工程学报, 2018, 34(21): 112-119.
- [45] 孟望生, 邵芳琴. 黄河流域环境规制和产业结构对绿色经济增长效率的影响. 水资源保护, 2020, 36(6): 24-30.
- [46] 吕倩, 刘海滨. 基于夜间灯光数据的黄河流域能源消费碳排放时空演变多尺度分析. 经济地理, 2020, 40(12): 12-21.
- [47] 覃成林,李敏纳. 区域经济空间分异机制研究——一个理论分析模型及其在黄河流域的应用. 地理研究, 2010, 29(10): 1780-1792.
- [48] 杜海波,魏伟,张学渊,纪学朋.黄河流域能源消费碳排放时空格局演变及影响因素——基于 DMSP/OLS 与 NPP/VIIRS 夜间灯光数据. 地理研究, 2021, 40(7): 2051-2065.
- [49] IPCC, WG1, Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Working Group 1 (WG1) Contribution to the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) 5th Assessment Report (AR5), Cambridge University Press, 2014.
- [50] Hausfather Z, Peters G P. Emissions: the 'business as usual' story is misleading. Nature, 2020, 577 (7792): 618-620.
- [51] Ehrlich P R, Holdren J P. Impact of population growth. Science, 1971, 171(3977): 1212-1217.
- [52] 吕炜. 美国产业结构演变的动因与机制——基于面板数据的实证分析. 经济学动态, 2010(8): 131-135.
- [53] 杜强, 陈乔, 陆宁. 基于改进 IPAT 模型的中国未来碳排放预测. 环境科学学报, 2012, 32(9): 2294-2302.
- [54] Chen J, Gao M, Cheng S, Hou W, Song M, Liu X, Liu Y, Shan Y. County-level CO₂ emissions and sequestration in China during 1997 2017. Scientific Data, 2020, 7: 391.
- [55] 杨延征,马元丹,江洪,朱求安,刘金勋,彭长辉. 基于 IBIS 模型的 1960—2006 年中国陆地生态系统碳收支格局研究. 生态学报, 2016, 36(13): 3911-3922.
- [56] Kucharik C J, Foley J A, Delire C, Fisher V A, Coe M T, Lenters J D, Young-Molling C, Ramankutty N, Norman J M, Gower S T. Testing the performance of a dynamic global ecosystem model: water balance, carbon balance, and vegetation structure. Global Biogeochemical Cycles, 2000, 14(3): 795-825.
- [57] Tian H Q, Melillo J, Lu C Q, Kicklighter D, Liu M L, Ren W, Xu X F, Chen G S, Zhang C, Pan S F, Liu J Y, Running S. China's terrestrial carbon balance: contributions from multiple global change factors. Global Biogeochemical Cycles, 2011, 25(1): GB1007.
- [58] 黄梅玲. 近 50 年中国亚热带地表紫外辐射时空格局及其对碳收支影响模拟[D]. 南京: 南京大学, 2011.
- [59] 林伯强. 2060年中国"碳中和"目标的路径、机遇与挑战. 2020[2021-12-24]. https://www.yicai.com/news/100843313.html.
- [60] 王灿,张雅欣.碳中和愿景的实现路径与政策体系.中国环境管理,2020,12(6):58-64.
- [61] 关敏捷,袁艳红,冉木希,王子.基于 STIRPAT 模型的山西省能源碳排放影响因素及峰值预测.中国煤炭,2021,47(9):48-55.
- [62] 范月君,侯向阳,石红霄,师尚礼.气候变暖对草地生态系统碳循环的影响.草业学报,2012,21(3):294-302.
- [63] 周嘉, 王钰萱, 刘学荣, 时小翠, 蔡春苗. 基于土地利用变化的中国省域碳排放时空差异及碳补偿研究. 地理科学, 2019, 39(12): 1955-1961.
- [64] 张梅,黄贤金,揣小伟,解宪丽,朱振宇,汪煜.中国净生态系统生产力空间分布及变化趋势研究.地理与地理信息科学,2020,36(2): 69-74.
- [65] 庄洋,赵娜,赵吉.内蒙古草地碳汇潜力估测及其发展对策.草业科学,2013,30(9):1469-1474.
- [66] 翁睿,韩博,孙瑞,金晓斌. 国际生态修复理念与方法对我国新时期国土综合整治的启示. 土地经济研究, 2020(1): 117-140.
- [67] 李长青,苏美玲,杨新吉勒图.内蒙古碳汇资源估算与碳汇产业发展潜力分析.干旱区资源与环境,2012,26(5):162-168.