

DOI: 10.20103/j.stxb.202310122208

成佩洁, 付永辉, 娄珊宁, 赵进韬, 常生华, 侯扶江. 我国东部草业系统碳平衡分析. 生态学报, 2025, 45(9): 4503-4516.

Cheng P J, Fu Y H, Lou S N, Zhao J T, Chang S H, Hou F J. Carbon balance analysis of grassland system in eastern China. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(9): 4503-4516.

我国东部草业系统碳平衡分析

成佩洁, 付永辉, 娄珊宁, 赵进韬, 常生华*, 侯扶江

兰州大学草地农业科技学院, 草种创新与草地农业生态系统全国重点实验室, 农业农村部草牧业创新重点实验室, 兰州 730020

摘要: 草业系统在生产草畜产品的同时也为人类提供生态保障, 碳平衡是其健康管理的重要目标。关于草业系统碳平衡的研究大多聚焦于子系统层面的循环过程及流动机制, 如植被光合固碳、凋落物分解及土壤有机碳库动态等, 而对大尺度空间格局的研究相对匮乏, 这制约了区域碳汇潜力评估与精准管理策略的制定。为此, 以我国东部地区草业系统为研究对象, 沿京哈线和京广线南北方向选取 22 个市、县, 解析其碳平衡时空分布特征及影响因素。结果表明: 1) 我国东部草业系统碳汇量呈现纬度地带性, 东北高、东南低, 纬度每增加 1°, 碳吸收量提升 9.71t/hm²; 碳效率呈东北低、东南高, 且随纬度升高, 县(市)区域草业系统碳效率增加。2) 东部成年型人口结构的市县中, 草地面积的扩大碳汇量呈对数增长, 但其边际固碳效益随面积扩大呈现递减趋势。东部老年型结构地区, 草地面积扩张对碳汇提升尤为显著, 草地面积增加 1hm², 净碳固定提高 16.432t。3) 草业系统碳平衡与年均温、年降雨量显著负相关, 当区域年平均气温超过 5℃ 阈值时, 系统整体呈现碳释放态势, 碳汇功能随之弱化; 与此同时, 人均草地面积与系统碳平衡正相关, 当人均草地面积超过 0.27hm² 时, 碳固存能力达到最大值 341.3t hm⁻² a⁻¹。在碳平衡分析的基础上提出区域异质性优化管理策略, 为实现“双碳”目标提供系统性的解决方案。

关键词: 草业系统; 生产层; 碳输入; 碳输出; 碳效率; 纬向地带性

Carbon balance analysis of grassland system in eastern China

CHENG Peijie, FU Yonghui, LOU Shanning, ZHAO Jintao, CHANG Shenghua*, HOU Fujiang

State Key Laboratory of Herbage Improvement and Grassland Agro-ecosystems, College of Pastoral Agriculture Science and Technology, Lanzhou University, Key Laboratory of Grassland Livestock Industry Innovation, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Lanzhou 730020, China

Abstract: The grassland industry system not only produces grass and livestock products but also offers ecological protection for humans. Achieving carbon balance is a crucial objective in managing its health. Many studies on grassland systems' carbon balance concentrate on subsystem-level cycle processes and flow mechanisms such as vegetation photosynthetic carbon fixation, litter decomposition dynamics, and soil organic carbon pool turnover, research addressing large-scale spatial heterogeneity patterns remains comparatively scarce, thereby constraining the accurate assessment of regional carbon sequestration potential and the development of targeted management strategies. Thus, this study targets the grassland industry system in eastern China, selecting 22 cities and counties along the north-south Beijing-Harbin and Beijing-Guangzhou Lines to examine carbon balance's spatial and temporal distribution characteristics and influencing factors. The findings indicate: 1) The carbon sequestration capacity of grassland systems in eastern China exhibits latitudinal zonality, the eastern prataculture system's carbon sink was greater in the northeast and lesser in the southeast, with carbon uptake rising by 9.71t/hm² per 1° latitude increase; Carbon efficiency was lower in the northeast and higher in the southeast. With the increase of latitude, the carbon efficiency of county (city) pratacultural system increased. 2) In cities with an adult

基金项目: 国家重点研发计划(2021YFD1300504); 国家自然科学基金国际合作项目(32161143028); 国家自然科学基金(U21A20242); 甘肃省草原生态治理修复科技支撑项目(20210691)

收稿日期: 2023-10-12; **网络出版日期:** 2025-03-04

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: cychangsh@lzu.edu.cn

population structure in eastern regions, the expansion of grassland area leads to a logarithmic increase in carbon sequestration, but its marginal carbon fixation benefit diminishes as the area expands. In the eastern senile structure area, the expansion of grassland area has a particularly significant effect on enhancing carbon sequestration, the grassland area increased by 1hm^2 , and the net carbon fixation increased by 16.432t. 3) The carbon balance of grassland system was negatively correlated with the average annual temperature and rainfall, When the annual average temperature of a region exceeds the 5°C threshold, the system as a whole exhibits a trend of carbon emission, leading to a weakening of its carbon sequestration function. Meanwhile, there is a positive correlation between the area of grassland per capita and the system's carbon balance, the per capita grassland area exceeded 0.27hm^2 , and the maximum carbon sequestration reached $341.3\text{ t hm}^{-2}\text{ a}^{-1}$. On the solid foundation of comprehensive carbon balance analysis, we meticulously propose tailored regionally heterogeneous optimization management strategies, which are customized according to the natural, economic, and social characteristics of different regions, in order to address the unique characteristics, challenges, and needs of diverse geographical areas. Alternatively stated, based on carbon balance analysis, this study advocates for regionally specific optimization management strategies, aiming to provide systematic solutions for achieving the “dual carbon” goals of carbon peaking and carbon neutrality.

Key Words: grassland system; production layer; carbon input; carbon output; carbon efficiency; latitudinal zonality

近年来,国家生态文明建设和双碳目标的提出,对草业系统碳平衡管理提出了新的要求。草业系统是以草地生态系统为基础,进行物质生产和能量运转。主要通过前植物生产、植物生产、动物生产和后生物生产四个层次发挥其生产和生态功能,该系统贮存了约 $1/3$ 全球陆地碳储量^[1],同时生产了全球 80% 以上的牛肉和牛奶等物质产品^[2-3]。

我国草地生态系统碳储量 44.09Pg C,占陆地生态系统的 28.3%—58.6%^[4-5]。受草业系统内不同生产层之间能量流动与循环的驱动,碳沿“地境-植物-家畜-人类社会”这一主干双向流动形成碳汇(源)。目前大多研究关注“土-草”、“草-畜”界面的碳固定和碳排放,对草业系统的碳平衡缺乏整体性研究与分析。

草地碳汇(源)的影响因素、草地碳循环动态监测、草业系统碳平衡的计算方法等是当前研究的热点。土壤有机碳固存决定草地生态系统“土-草”界面的碳汇(源)。在区域尺度上,气候因素限制草地生态系统土壤有机碳积累^[6],黄土高原典型草原土壤有机碳随温度降低而增加^[7];阿拉善荒漠草原土壤有机碳含量随温度降低而降低^[8]。在草业系统碳平衡计算方法方面,3 个界面的碳平衡分析方法仅仅明确其空间和数量关系,但难以确定其利用效率。采用多尺度数据整合和模型模拟相结合的手段研究草业系统的固碳动态^[9],主要集中在草业系统的关键生态过程^[10],致使草业系统碳平衡的评估差异较大。因此本文基于草业系统四个生产层,计算草业系统碳平衡,这一方法可定量指示碳的来源和去向,明确碳效率。计算简单且较为概括,适于大尺度的草业碳汇计算^[11]。

我国东部草地碳储量约占全国陆地生态系统碳存量的 5%,由于人口集中、土地利用方式转化频繁、人类活动剧烈等因素,使其成为我国碳贸易战略的重点区域^[12]。为此,本文以东部地区草业系统为研究对象,梳理草业系统碳输入/输出流程,明确县域尺度上草业系统碳平衡及其空间格局,阐明社会、气候、经济等因子对草业系统碳汇(源)的影响,为东部草业系统增碳减排提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

以我国东部草业系统为研究对象,以京哈线和京广线两条经济大动脉为主线,每隔 100—150km 设置调查点,选择具有代表性的 22 个市、县(图 1),调查该行政区域草业经济活动,计算其碳平衡。

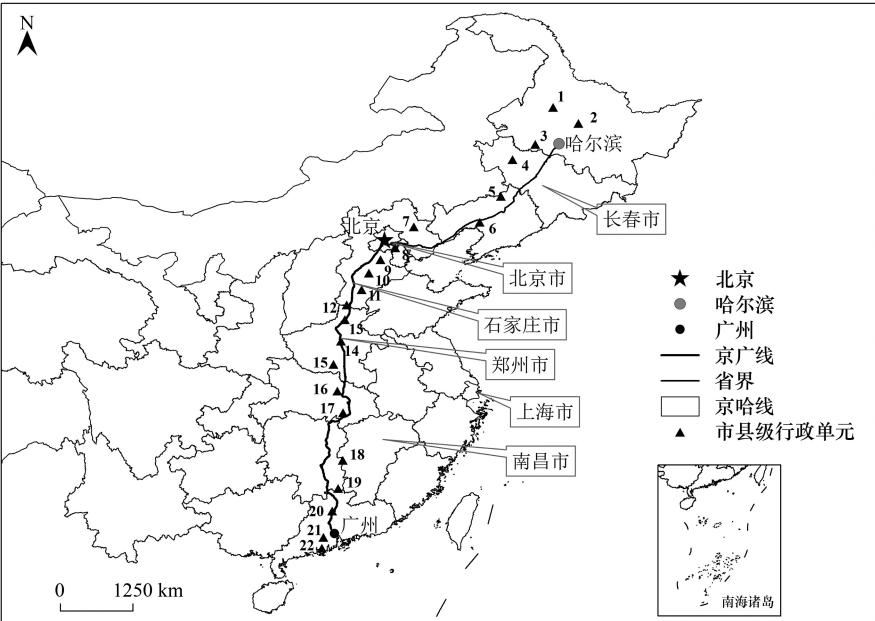


图1 研究区域地理位置

Fig.1 The geographical location of study area

1.2 数据来源

研究区土地利用现状数据来源于全国第二次和第三次土地调查城镇地籍数据库;其他数据来源包括《中国统计年鉴》《中国县域统计年鉴》《中国旅游统计年鉴》《河北省统计年鉴》《黑龙江省统计年鉴》等各个相关省的 2008—2018 年统计年鉴;相关经济数据参考 2008—2018 年《中国县域统计年鉴》,不同生态系统的碳排放系数和碳汇(源)系数通过查阅《IPCC2006 年国家温室气体清单指南 2019 修订版》以及相关文献资料获取。各地区年龄数据来源于《第七次全国人口普查公报》(表 1)。

表 1 研究区基础情况

Table 1 Basic situation of the study area

编号 Number	县 County	纬度 Latitude	年均温 Mean annual temperature/ ℃	年降水 Annual Precipitation/ mm	人口密度 Population density/ (人/km ²)	草地面积 Grassland area/hm ²	草地类型 Grassland type	人均国内 生产总值 GDP per capita/ 万元
1	克东县	47°43'—48°18'	2.4	527	72	9141	寒冷极干寒带荒漠类	479240
2	庆安县	46°30'—47°35'	1.69	577	46	18000	微温极干山地荒漠类	965698
3	肇州县	45°35'—46°16'	3.32	520	123	56667	微温极干温带荒漠类	1155975
4	乾安县	44°37'—45°18'	5.6	426	57	76700	微温极干温带荒漠类	1576268
5	康平县	42°31'—43°02'	6.9	540	121	43000	微温极干温带荒漠类	1323643
6	盘山县	40°45'—41°27'	8.3	623	93	3206	微温极干温带荒漠类	1580795
7	承德县	40°12'—42°37'	7.6	650	132	3090	微温极干温带荒漠类	1253780
8	香河县	39°37'—39°51'	12.4	523	826	435	微温极干温带荒漠类	2516529
9	雄县	38°54'—39°10'	12	600	720	126	微温极干温带荒漠类	732539
10	安平县	38°14'—38°21'	12.4	517	665	226	暖温极干暖温带荒漠类	1435101
11	巨鹿县	37°07'—37°25'	13.5	532	602	9830	暖温极干暖温带荒漠类	800837
12	磁县	36°06'—36°47'	13.8	552	615	7300	暖温极干暖温带荒漠类	864812
13	卫辉市	35°19'—35°42'	13.8	576	556	8906	暖热极干亚热带荒漠类	3685700

续表

编号 Number	县 County	纬度 Latitude	年均温 Mean annual temperature/ ℃	年降水 Annual Precipitation/ mm	人口密度 Population density/ (人/km ²)	草地面积 Grassland area/hm ²	草地类型 Grassland type	人均国内 生产总值 GDP per capita/ 万元
14	长葛市	34°09′—34°20′	14.3	711	1092	3202	暖温极干暖温带荒漠类	6301964
15	泌阳县	32°34′—33°09′	17.0	960	247	2189	暖温极干暖温带荒漠类	2418618
16	安陆市	31°04′—31°29′	16.0	1100	362	9107	暖热极干亚热带荒漠类	2293195
17	嘉鱼县	29°48′—30°17′	17.0	1370	275	243	暖热极干亚热带荒漠类	2563800
18	莲花县	26°57′—27°27′	17.5	1650	198	0	暖热干旱亚热带半荒漠类	615161
19	汝城县	25°19′—25°52′	16.6	1547	142	69	暖热干旱暖温带半荒漠类	652831
20	英德市	23°50′—24°33′	21.1	1900	166	168	亚热带极干亚热带荒漠类	2947644
21	鹤山市	22°28′—22°51′	21.6	1774	489	4.43	亚热带极干亚热带荒漠类	3555185
22	台山市	21°82′—22°42′	21.8	1936	273	0.43	亚热带极干亚热带荒漠类	4325866

草地类型按照综合顺序分类法进行划分,气候数据为 2018 年

1.3 研究方法

基于《IPCC2006 年国家温室气体清单指南 2019 修订版》提供的农业、林业和其他土地利用领域的计算方法^[13],结合草业系统碳平衡特点,考虑草业系统的系统性和四个生产层的耦合,建立输入物质的质量、输出物质的质量和排放物质的质量之间的关系,同时,参考生命周期法^[14],构建草地生态系统碳循环流程(图 2)。

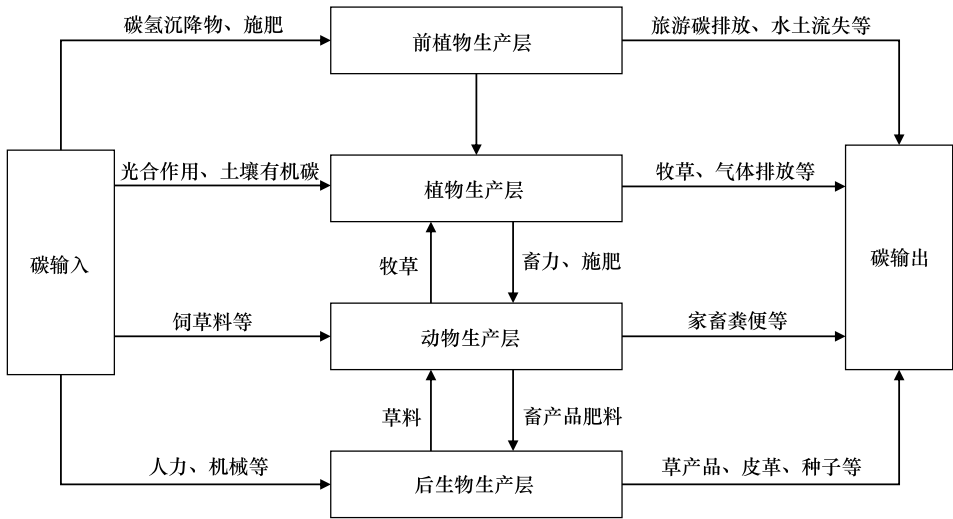


图 2 草业系统 4 个生产层的碳流通

Fig.2 Carbon circulation in four production layers of grassland agroecosystems

根据草业生态系统各生产层的碳流动过程,并且参考已发表的论文^[11],将系统碳过程分为系统外碳输入、系统内碳固定、系统碳排放、系统碳输出,按照不同区域草地农业系统碳流动特征计算并分析其碳汇(源)类型(表 2)。其中碳输入(Carbon Input, CI)包括从草业系统外部输入的化肥、厩肥、机械、种子、畜力等物质,光合作用吸收、同化 CO₂,微生物活动固定的 CH₄和 N₂O,尘降和水土保持积累的碳氮。碳排放(Carbon Emissions, CE)是指人类、家畜消费草畜饲料产品等包括食物、能源、畜力、日用品、厩肥等,在系统内转化为温室气体(Greenhouse Gas, GHG)。碳固定部分(Carbon Fixation, CF)包括牧草、家畜、排泄物等在一定时间内以可贮存形态存在于草业系统内的碳。碳输出(Carbon Output, CO)包括草业系统输出的草畜产品、种子、畜力、厩肥等。

表 2 碳平衡输入/输出
Table 2 Carbon balance input/output

功能部 Section	项目 Items
输入 Carbon input	大气碳沉降、水土保有碳增量、地下有机碳输入(凋落物)、人工碳输入(种子、施肥)、厩肥
固定 Carbon fixation	光合作用、水土保持、土壤有机碳、植物有机碳、生物固氮
排放 Carbon emission	土壤 GHG 排放、家畜 GHG 排放、机械 GHG 排放、人力 GHG 排放、草畜产品加工和贮运、基础设施和设备制造排放、粪便发酵碳排放、旅游碳排放、化肥、农药、运输、家畜消费草畜饲料产品包括食物、能源、畜力、日用品等
输出 Carbon output	淋溶、草畜产品输出、水土流失

草业系统碳平衡的计算公式如下:

$$Cr(\text{Carbonregion}) = CI + CF + CE + CO \quad (1)$$

CI :包括大气碳沉降、人工碳输入、水土保有增量在内的主要系统内的碳输入; CE :旅游碳排放、家畜粪便发酵形成的碳输出、草畜生产工具维持折旧碳输出、人类和家畜消费草畜产品; CF :草业系统内的固定部分; CO :输出的草畜产品、畜力、皮革、种子、厩肥。当 $CI + CF > CE + CO$ 时,草业系统为碳汇,反之为碳源^[15]。某一生产层或某一界面的碳平衡同理计算,初始碳量与碳平衡之和为当前碳量。县域内对应草地,家畜养殖,草畜生产,草业旅游等作为基础组分包括其中。其中对于研究区草业系统内碳输入的主要计算公式如下^[16]:

$$CI = ACE + ACI + CIT \quad (2)$$

公式(2)中 ACE (Atmosphere Carbon Sequestration):大气碳沉降; ACI (Artificial Carbon Input):人工碳输入; CIT (Conservation Increment):水土保有碳增量^[17]。

$$ACE = \sum GA_i \times GSC_i \quad (3)$$

$$ACI = E - (R + TCL) \quad (4)$$

$$CIT = \sum_{i=0}^{i=n} Cr_i \times A_i \quad (5)$$

公式(3)中 GSC (Grassland Sedimentary Carbon):不同类型草地年碳沉积量; GA (Grassland area):当地对应类型草地面积;热带亚热带草原年碳沉积量一般为 $(2.8 \pm 0.75) \text{ Tg}$,高寒草原年沉积量一般为 48.26 Tg ,温性草原年沉积量为 19.88 Tg ^[18]。(1Tg = 10^{12} g)

公式(4)中 E (Emissions):人工活动产生的碳排放量; R (Removals):通过人工措施移除的大气中的碳量; TCL (Total Carbon Intensity):碳排放强度。

公式(5)的计算根据《2006年 IPCC 指南》^[13],草地来源主要是仍为草地的草地和转化为草地的土地,指标包括土壤有机碳、地下生物量、地上生物量、立枯和凋落物^[17-20]。式中 Cr_i :某一地的碳储量密度^[21-23] (kg C/hm^2); A_i :对应某一地的面积(hm^2)。

对于地方上区域内草业系统碳排放的主要计算公式如下^[22-24]:

$$CE = TCO + EFCE + GICE + NIC \quad (6)$$

公式(6)中 $EFCE$ (Excrement Fermentation Carbon Emission):粪便发酵碳排放; $GICE$ (Grass Industry Carbon Emission):草畜生产碳排放; TCO (Travel Carbon Output):旅游等碳排放, NIC (Net Carbon Emissions from Livestock and Poultry Slaughtering and Processing):畜禽屠宰加工等环节产生的二氧化碳。

$$TCO = C_{tr} + C_{lr} + C_{ar} \quad (7)$$

$$EFCE = \sum_{i=1}^n LFC \times N + \sum_{i=1}^n ITFC \times N \quad (8)$$

$$GICE = c \times (I - A)^{-1} \quad (9)$$

$$NIC = \sum_{i=1}^n Q_i \times ef \frac{MJ_i}{en} \quad (10)$$

公式(7)中 TCO :旅游业碳排放; C_{tr} :旅游交通碳源; C_{lr} :旅游住宿碳源; C_{ar} :旅游活动碳源。

公式(8)中 LFC:相应的粪便发酵系数^[25];ITFC:肠道发酵系数^[13];N:对应家畜数量。

公式(9)根据产业周期计算处理^[26],利用投入产出分析法计算各生产环节消费终端产品引起的温室气体排放, c :直接排放系数矩阵; I :单位矩阵; A :产业周期直接消耗系数矩阵。

畜产品加工碳排放:畜禽屠宰加工排放的 CO_2 ,畜禽屠宰加工环节能源消耗所产生的温室气体^[25,27]。

公式(10)中 NIC(Carbon dioxide emissions from processing):畜禽屠宰加工环节产生的 CO_2 排放量; Q_i : i 类畜禽产品年产量,包括禽肉、牛肉、羊肉、猪肉、牛奶和禽蛋; MJ :单位畜禽产品屠宰加工能耗,禽肉、牛肉、羊肉、猪肉、牛奶和禽蛋的屠宰加工耗能系数分别为(3.76、4.37、10.4、2.59、1.12 和 8.16MJ/kg); en 为一度电的热值, $en=3.6\text{MJ}$; ef 为电能消耗的 CO_2 排放因子,参照《2012 中国区域电网基准线排放因子》^[27-28]对 6 大区域电网的 OM 算法值取均值,得 $ef=0.9734\text{tCO}_2/\text{MWh}$ 。

对于研究区内草业系统碳固定计算如下:

$$CF = \text{BFN} + \text{GCF} + \text{LEQ} \quad (11)$$

公式(11)中 LEQ(Livestock Excreta Quantity):该地区总家畜年粪便量;BFN(Biological nitrogen fixation):生物固氮;草地碳固定 GCF:(Glassland Carbon Fixation)。

$$\text{GCF} = R \times A_0 \quad (12)$$

公式(12)中^[29-30] R :单位面积草地固碳系数($\text{t hm}^{-2} \text{a}^{-1}$); A 表示草地的面积。

对于研究区草业系统碳输出计算如下:

$$\text{CO} = \text{GL} + \text{SO} \quad (13)$$

公式(13)中 GL(Grassland leaching):淋溶;SO(Straw product output):草畜产品输出。

$$\text{SO} = \sum_{i=0}^{i=n} C p_i \times N_i \quad (14)$$

$$\text{GL} = A_r \times \text{LC} \quad (15)$$

公式(14)中 $C p_i$:对应草畜产品碳含量系数; N_i :对应的草畜产品数量。

公式(15)中 A_r :对应的草地面积; LC :对应的淋溶系数^[31]。广义的草地氮淋溶系数 $2-7\text{kg/hm}^2$ ^[32],这里取平均系数。

为研究碳平衡在空间尺度上的变化趋势,计算了 2008 年和 2018 年不同年份的碳平衡数据。根据联合国提出的标准^[33],65 岁及以上老年人口占总人口比重的不同,将人口年龄结构类型区分为年轻型、成年型和老年型三类:老年人口占总人口 4% 以下即年轻型,老年人口占总人口 4%—7% 即成年型,老年人口占总人口 7% 以上即老年型。

1.4 数据处理

利用 SPSS 19.0 一般线性模型分析气候、社会、经济指标对碳平衡的影响。采用 CANOCO 5.0 对影响草业系统碳平衡的 12 项指标,包括人口密度、人均草地面积、人均耕地面积、人均土地面积、人均国内生产总值、第一产业增加值、第二产业增加值、第三产业增加值、年均温、年降雨、纬度、年积温等进行主成分排序分析(PCA)。使用 Arcgis 10.4.1 和 Excel 2018 软件制图。

2 结果

2.1 我国东部草业系统碳输入、碳输出、碳效率的空间格局

整体来看,研究区北方市县的碳输入、碳输出高于南方市县(图 3)。纬度 $45^\circ-38^\circ$ (肇州县-雄县)和 $37^\circ-21^\circ$ (巨鹿县-台山市),碳输入随纬度的降低呈下降趋势。纬度 $45^\circ-40^\circ$ (肇州县-承德县),碳输出随纬度降低呈上升趋势。南方市县的碳利用效率总体高于北方市县(图 3b)。

2.2 我国东部草业系统的碳平衡分析

2.2.1 不同人口年龄结构下碳平衡与草地面积的关系

年轻型人口结构市县,随草地面积增加,区域碳汇量逐渐上升(图 4)。草地面积达到 6445hm^2 ,碳吸收量

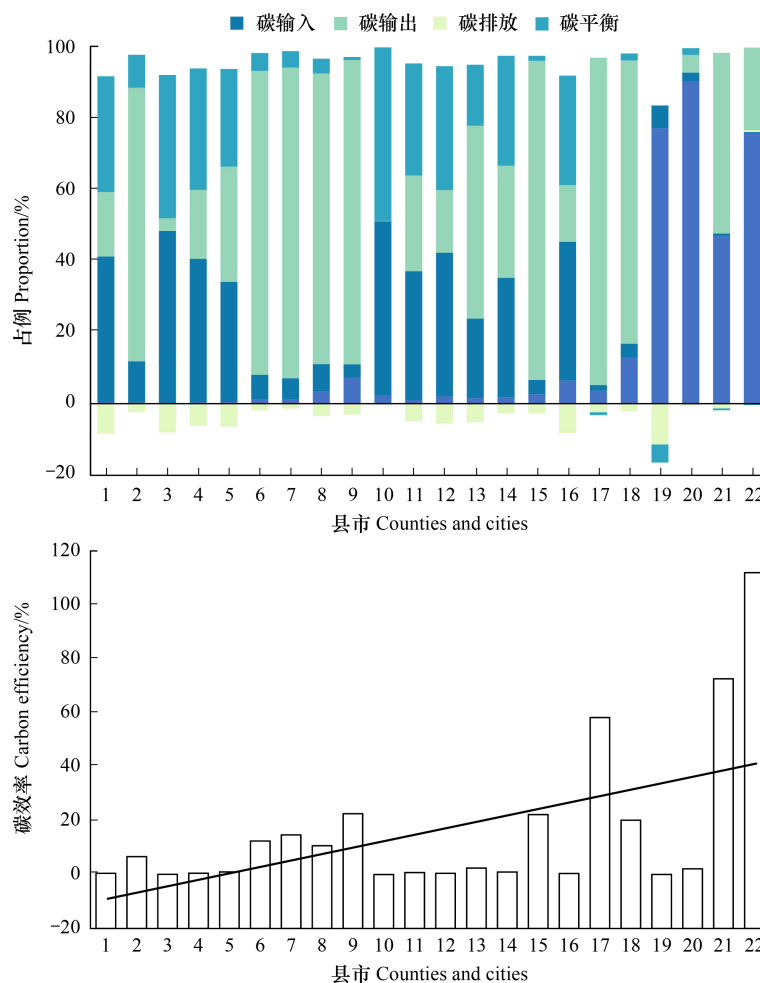


图3 碳输入、碳输出、碳效率的空间格局

Fig.3 The spatial pattern of carbon input, carbon output, and carbon efficiency

1:克东县;2:庆安县;3:肇州县;4:乾安县;5:康平县;6:盘山县;7:承德县;8:香河县;9:雄县;10:安平县;11:巨鹿县;12:磁县;13:卫辉市;14:长葛市;15:泌阳县;16:安陆市;17:嘉鱼县;18:莲花县;19:汝城县;20:英德市;21:鹤山市;22:台山市

开始缓慢下降($P > 0.05$)。成年型人口结构市县,随着草地面积增加,碳汇量呈对数级增长,但增长速率逐渐减小($P < 0.05$)。老年型人口结构市县,草地面积增加与碳汇量之间呈正向关系($P < 0.05$)。每增加 1hm^2 草地面积,区域固碳量增加 $16.432\text{t hm}^{-2} \text{a}^{-1}$ (图4)。

2.2.2 纬度对单位草地面积碳平衡的影响

随纬度降低,22个县域的草业系统碳汇量呈下降趋势(图5)。46°16′—41°27′纬度区间,草地单位面积碳汇能力显著下降($P < 0.05$)。研究区的9个市县草业系统2008年呈净碳排放,而到2018年这9个市县草业系统呈碳汇状态,草地固碳功能得到有效发挥。

2.2.3 气候因素对草业系统碳平衡的影响

研究区草业系统碳输入、碳平衡与年平均气温(Mean annual temperature, MAT)呈显著负相关($P < 0.05$),随年均温的升高,研究区草业系统碳输入与碳输出呈下降趋势。碳平衡与年平均气温呈显著二元负相关($P < 0.05$) (图6),年平均气温超过 5°C ,研究区草业系统趋于碳排放,其碳汇潜力降低。研究区草业系统碳输入、碳平衡与年平均降水(Mean annual precipitation, MAP)呈显著二元负相关($P < 0.05$) (图6)。研究区草业系统的碳输入、碳输出、碳平衡与年积温(Annual accumulated temperature, AAT)无显著相关关系(图6)。

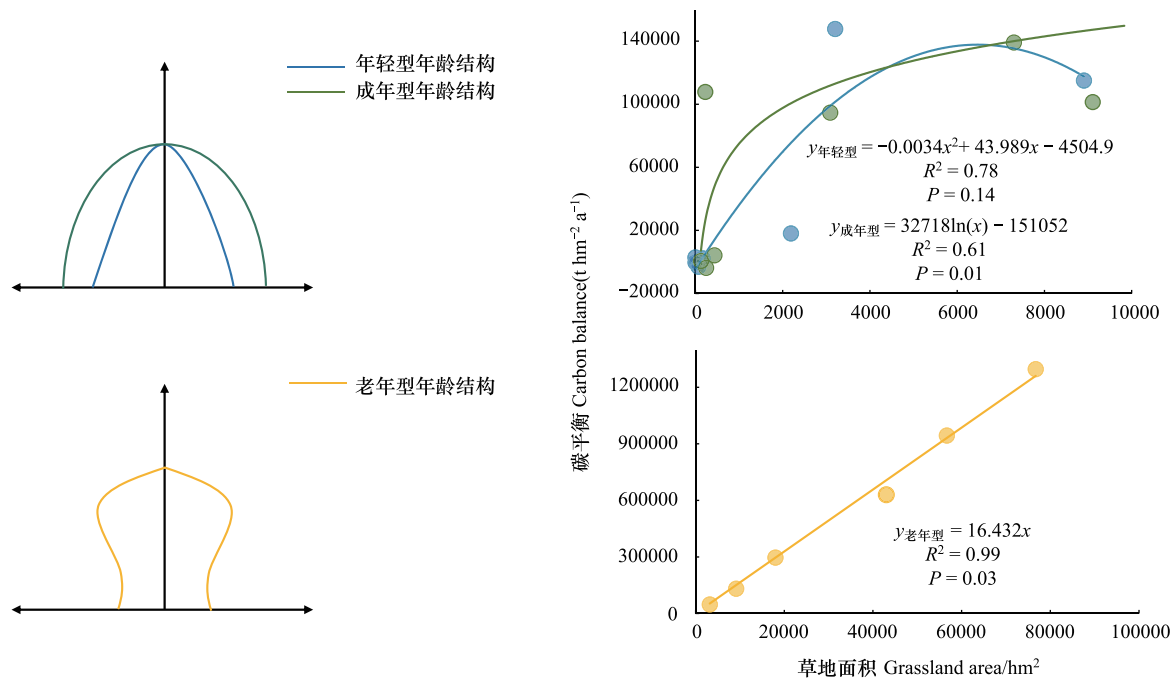


图4 不同年龄结构下碳平衡与草地面积的关系

Fig.4 The relationship between carbon balance and grassland area under different age structures

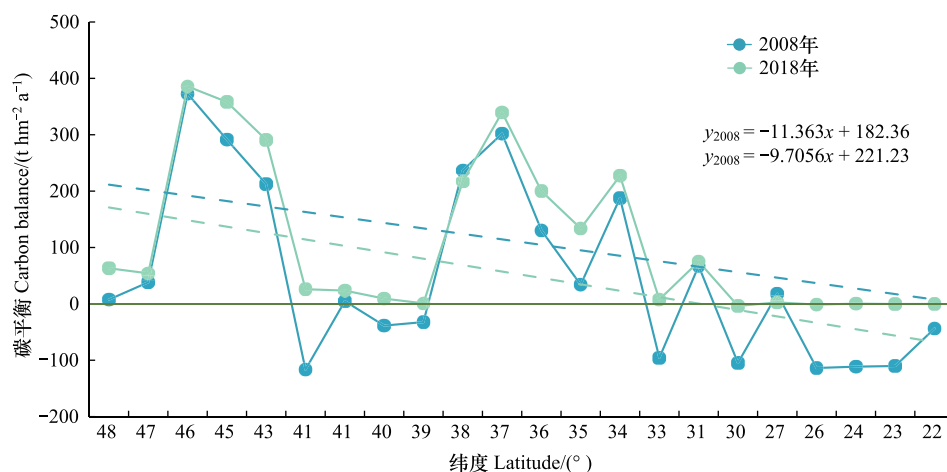


图5 纬度对单位草地面积碳平衡的影响

Fig.5 The effect of latitude on carbon balance per unit grassland area

2.2.4 社会因素对草业系统碳平衡的影响

研究区草业系统碳输入、碳平衡与人均草地面积(Per capita grassland area, PCGA)呈显著正相关($P < 0.05$)(图7),人均草地面积达 0.27hm^2 ,碳固存能力最高。随人均草地面积增大,单位面积草地固碳量升高,固碳速率下降。人口密度(Population density, PD)、人均耕地面积(Per capita cultivated area, PCCA)、人均土地面积(Per capita land area, PCLA)与草业系统碳平衡无显著相关。

2.2.5 经济因素对草业系统碳平衡的影响

研究区草业系统碳输入、碳输出、碳平衡与人均国内生产总值(Per capita GDP, PGDP)、第一产业增加值(Primary Industry Value Added, PIVA)、第二产业增加值(Secondary Industry Value Added, SIVA)、第三产业增加值(Tertiary Industry Value Added, TIVA)均无显著关系(图8)。

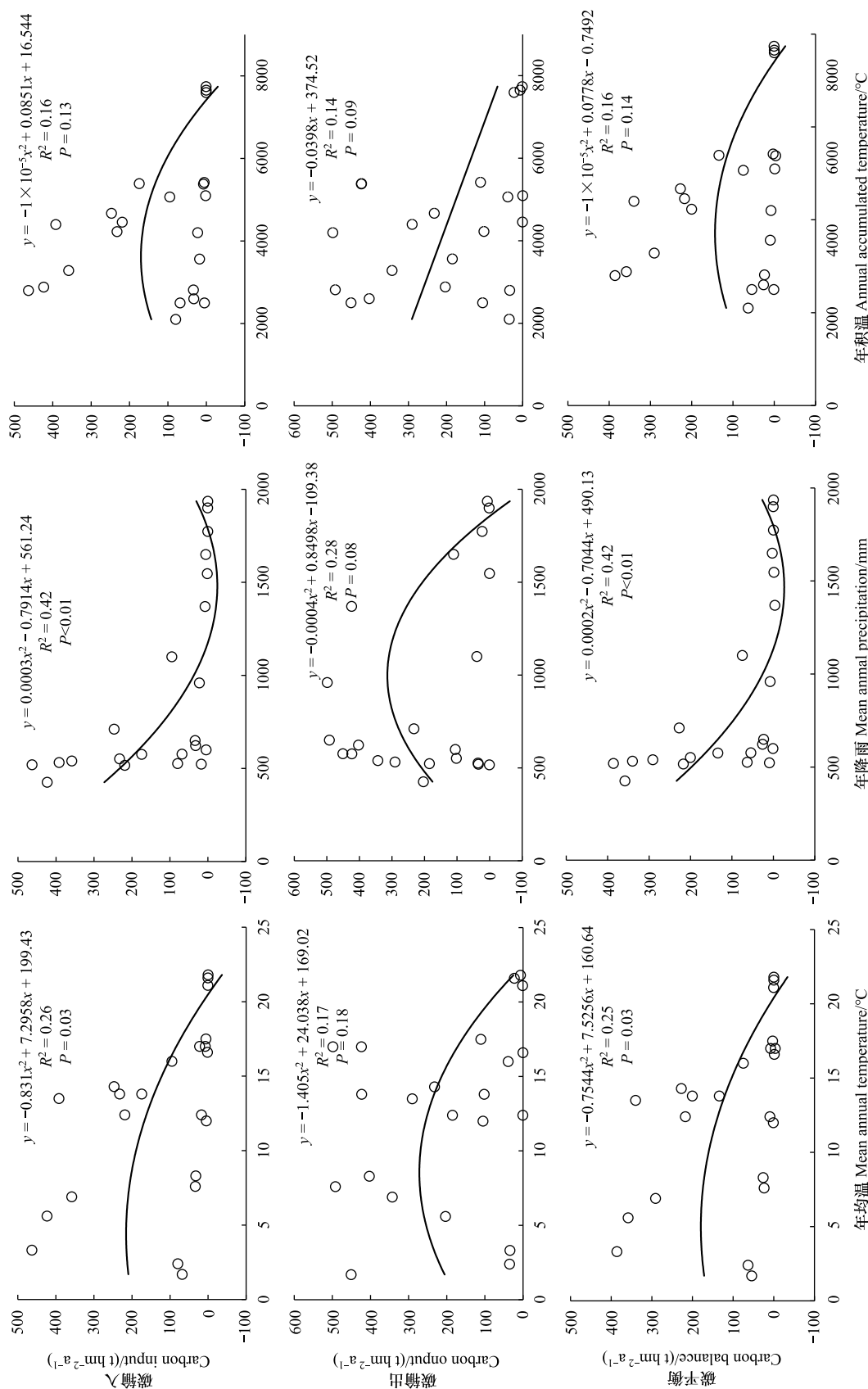


图6 自然因素对单位草地面积碳平衡的影响
Fig. 6 The impact of climate on carbon balance per unit grassland area

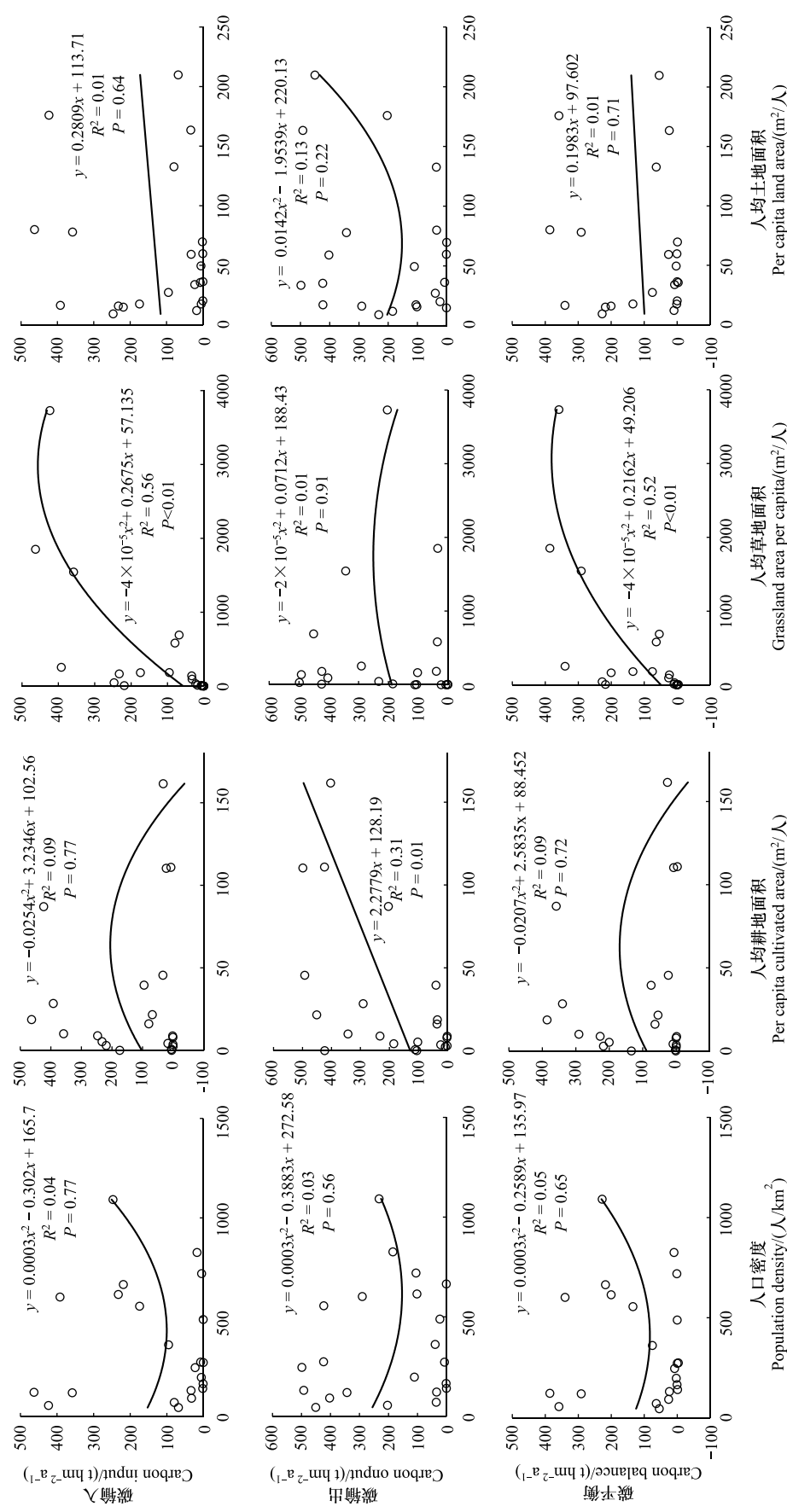


图7 社会因素对单位草地面积碳平衡的影响
Fig. 7 The impact of economy on carbon balance per unit grassland area

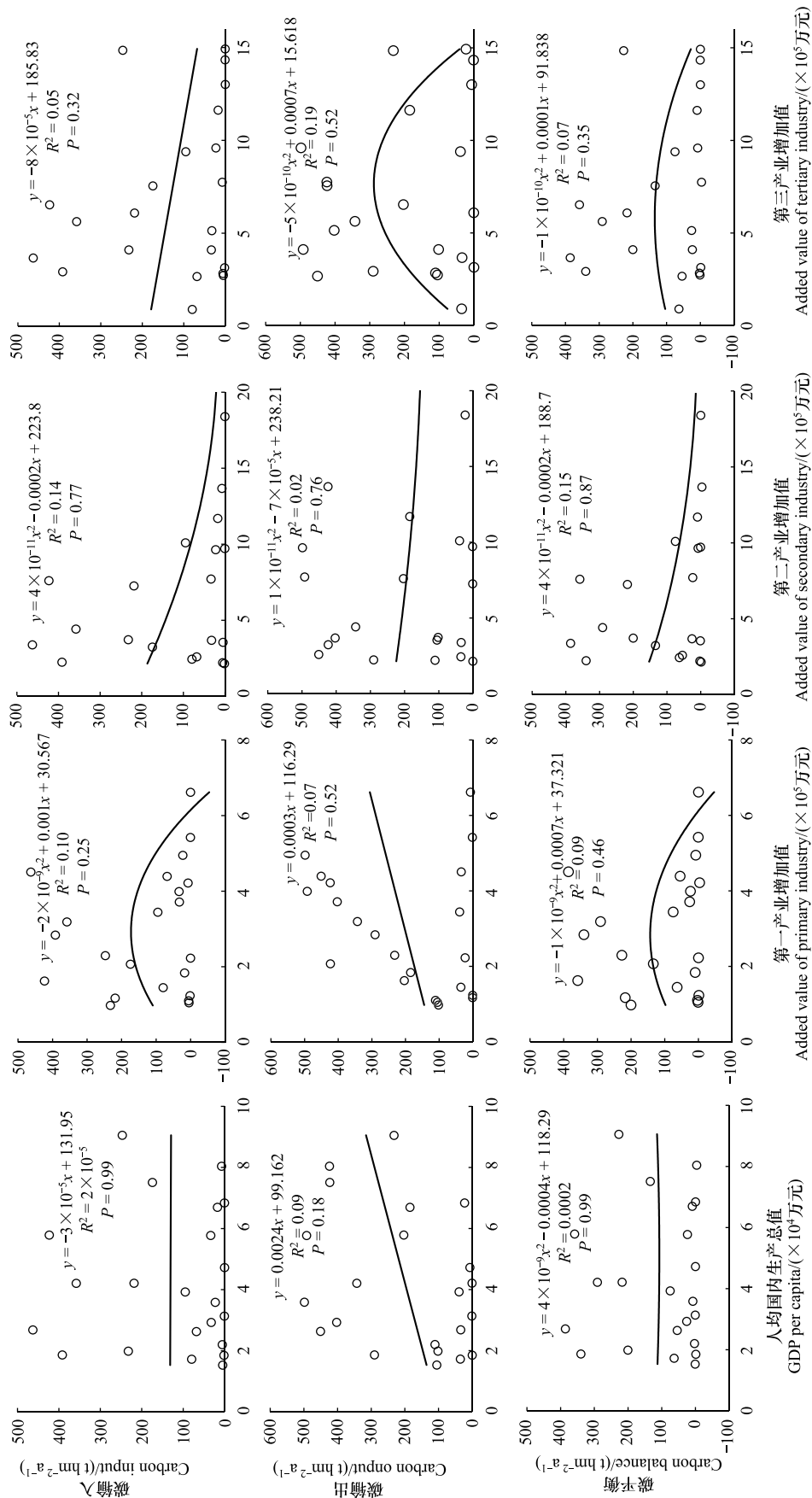


图8 经济对单位草地面积碳平衡的影响
Fig. 8 The impact of the economy on the carbon balance of grassland area per unit of county

2.2.6 气候、经济、社会因素与单位草地面积碳平衡的相关性分析

主成分分析表明,研究区草业系统碳平衡与气候因子、经济因子和社会因子相关性不同(图9)。其中,单位草地面积碳平衡(Carbon balance per unit grassland area, *CB*)与年均温、年降雨呈负相关,与纬度(Latitude, *LA*)呈正相关,即纬度较高的地区更利于碳封存。单位草地面积碳平衡与经济因素中的第二产业增加值和第三产业增加值呈负相关。社会因素中人均草地面积与草业系统碳平衡正相关,人均占有草地面积超过0.27hm²,碳汇能力最强且趋于稳定。气候因素是草业系统碳平衡的主要预测因子。

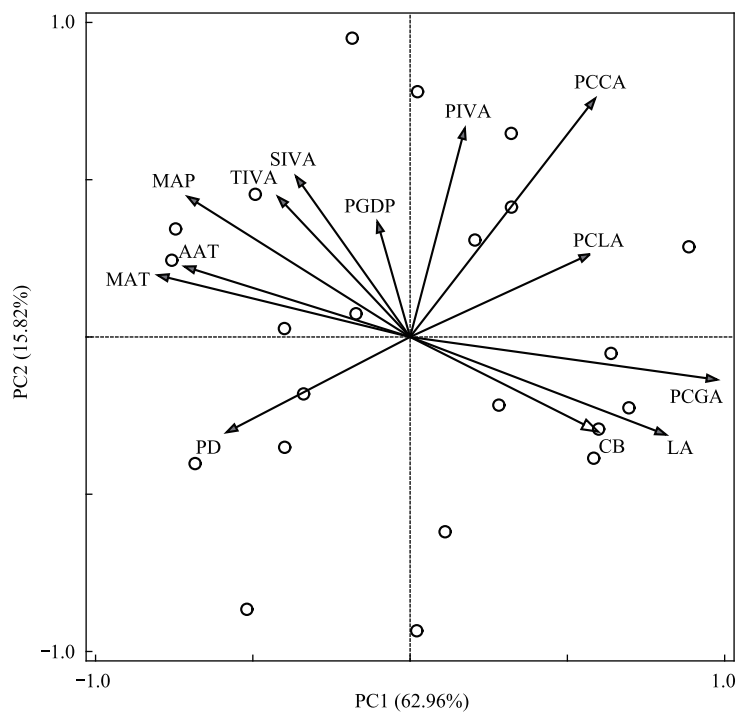


图9 单位草地面积碳平衡的主成分排序分析

Fig.9 Principal component analysis (PCA) of carbon balance per unit grassland area

CB:单位草地面积碳平衡;*LA*:纬度;*PD*:人口密度;*MAT*:年均温;*MAP*:年降水;*AAT*:年积温;*PGDP*:人均国内生产总值;*PIVA*:第一产业增加值;*SIVA*:第二产业增加值;*TIVA*:第三产业增加值;*PCGA*:人均草地面积;*PCCA*:人均耕地面积;*PCLA*:人均土地面积

3 讨论

3.1 我国东部草业系统碳平衡的空间分布特征

基于碳循环过程在空间尺度上的区域异质性,剖析不同地区的碳吸收和碳排放过程的异同和特征,是当前应对气候变化以及县域尺度碳平衡评估与管理的基础。碳平衡的空间分布异质性受到区域人口年龄结构、气候变化、土壤特性和植被类型等多种因素的综合影响^[34]。东部地区的草业系统碳平衡在2008年和2018年均随纬度降低而降低,草业系统碳汇能力不断减弱。随着纬度的升高,草业系统的净碳吸收能力呈逐渐降低趋势,这是因为东部高纬度寒冷地带性气温和较短的生长季限制植物残体分解,减缓土壤呼吸,净碳吸收能力增强^[35]。纬度地带性通常与植被地带性相一致,温度影响植物的光合作用和呼吸作用,从而显著影响陆地生态系统的碳平衡。

人口老龄化是当前不可逆转的人口发展趋势^[36],年龄结构特征变化作为碳排放水平变化的一个关键因素^[37–38],其关系尚不明确。已有研究表明,全球范围内人口增长与二氧化碳排放量的比例增长相匹配^[39],但也有研究认为碳排放量与人口数量变化存在复杂关系。还有研究表明,在中低收入国家,排放量对人口变化的弹性接近2,而在高收入国家则小于1^[40]。因此,衡量区域碳排放要立足区域经济发展、人口分布以及产业

结构等多要素。本研究立足我国东部经济发展较好地区,人口密度较大,老龄化程度高且速度快,土地利用效率高^[41]。综合以上因素分析表明,我国东部地区人口呈老龄化结构的市县草地生产能力和碳汇潜力可观,可有效助力二氧化碳减排。

3.2 东部草业系统碳平衡的驱动因素

草业系统碳平衡在气候和社会各因子之间构建了关键的物质能量循环桥梁,对区域尺度系统间物质能量管理和系统间相互作用关系调控至关重要,是深度解析草业系统碳转化与流动机制的基础。草地土壤是巨大的碳库,约占世界和我国土壤总碳储量的 30% 和 36.5%^[42],其碳收支的微小变化决定草原碳汇(源)的功能^[43],在应对气候变化方面具有举足轻重的作用。土壤有机碳是草业系统碳平衡的主要组分,温度是土壤有机碳动态变化的关键因子之一,温度升高提升土壤微生物活性,加速土壤有机碳的分解^[44]。本研究结果表明,随纬度降低,研究区市县草业系统碳汇量呈下降趋势,也是与温度高低和纬度分布相关。因此,气候因素可用于东部草业系统碳平衡的预测。此外,为发展经济进行的产业结构调整、城镇化扩张等活动也影响着县域水平的碳汇功能^[45-47]。本研究结果表明,研究区二三产业增加值与碳汇负相关,但相关性不显著。主要原因可能是研究区经济发达,草产业在国民生产总值中所占比重较小,且草地面积相对有限,可能在一定程度上削弱了产业增加值与草地碳平衡之间的直接联系。

3.3 对草业系统碳平衡管理的启示

我国草地类型丰富,南北方草地利用方式差异较大,呈现出空间异质性。例如纬度较低的地区,降水量高、生长季长、植物生产力高,碳平衡能力较强。因此,草业系统碳管理应该遵循“分区分类、因地制宜、宜林则林、宜草则草”的原则^[48-49]。与传统农业相比,草业系统生产链长且完整,四个生产层蕴含众多“耦合键”,易与其它产业发生系统耦合,放大草业系统的整体效益。我国东部地区因土地资源稀缺、人口密度集中等客观原因,草业系统碳平衡能力相对较弱。在碳平衡管理中,应站在全国的高度,用大区域系统性的思想入手,借助西北地区草地资源丰富、土地资源充分、人才资源坚实等区域特色^[50]。通过建设“一带一路”优质牧草生产基地等方式优化全国草业系统空间分布,形成东西部能量互补,提高我国碳平衡整体能力,促进草业系统的可持续发展。

4 结论

在空间尺度上,我国东部草业系统碳平衡呈现北高南低的空间格局,具纬向地带性特征。随着纬度降低,草业系统的碳汇能力逐渐降低,纬度每增加 1°,碳吸收量增加 9.71t/hm²。我国东部草业系统碳效率呈北低南高的分布格局。东部人口老年型结构市县,草地面积每增加 1hm²,净碳固定提高 16.432t。人均草地面积达 0.27hm²时,碳固存能力最高,且碳汇量趋于稳定。

参考文献(References):

- [1] Spohn M, Bagchi S, Biederman L A, Borer E T, Bräthen K A, Bugalho M N, Caldeira M C, Catford J A, Collins S L, Eisenhauer N, Hagenah N, Haider S, Hautier Y, Knops J M H, Koerner S E, Laanisto L, Lekberg Y, Martina J P, Martinson H, McCulley R L, Peri P L, Macek P, Power S A, Risch A C, Roscher C, Seabloom E W, Stevens C, Veen G F, Virtanen R, Yahdjian L. The positive effect of plant diversity on soil carbon depends on climate. *Nature Communications*, 2023, 14: 6624.
- [2] 侯扶江, 李岚, 宁娇, 娄珊宁. 基于大食物观的草地农业发展趋势及关键科学问题. *中国科学基金*, 2024, 38(4): 647-657.
- [3] 杨峰, 李建龙, 钱育蓉, 邓蕾. CO₂ 浓度增加对草地生态系统及碳平衡的影响. *中国草地学报*, 2008, 30(6): 99-105.
- [4] 陈先江, 王彦荣, 侯扶江. 草地生态系统温室气体排放机理及影响因素. *草业科学*, 2011, 28(5): 722-728.
- [5] 赵娜, 邵新庆, 吕进英, 王堃. 草地生态系统碳汇浅析. *草原与草坪*, 2011, 31(6): 75-82.
- [6] 方精云, 杨元合, 马文红, 安尼瓦尔·买买提, 沈海花. 中国草地生态系统碳库及其变化. *中国科学: 生命科学*, 2010, 40(7): 566-576.
- [7] 刘伟, 程积民, 高阳, 程杰, 梁万鹏. 黄土高原草地土壤有机碳分布及其影响因素. *土壤学报*, 2012, 49(1): 68-76.
- [8] 傅华, 陈亚明, 王彦荣, 万长贵. 阿拉善主要草地类型土壤有机碳特征及其影响因素. *生态学报*, 2004, 24(3): 469-476.
- [9] 白永飞, 陈世苹. 中国草地生态系统固碳现状、速率和潜力研究. *植物生态学报*, 2018, 42(3): 261-264.
- [10] 马露露, 徐婷, 李泽森, 焦峰. 基于 DNDC 模型分析降水变化对黄土丘陵区草地生物量和土壤有机碳的影响. *草业科学*, 2023, 40(1): 25-36.
- [11] 娄珊宁, 陈先江, 侯扶江. 草地农业生态系统的碳平衡分析方法. *生态学报*, 2017, 37(2): 557-565.

- [12] 张利, 周广胜, 汲玉河, 白永飞. 中国草地碳储量时空动态模拟研究. 中国科学: 地球科学, 2016, 46(10): 1392-1405.
- [13] 蔡博峰, 朱松丽, 于胜民, 董红敏, 张称意, 王长科, 朱建华, 高庆先, 方双喜, 潘学标, 郑循华. 《IPCC2006 年国家温室气体清单指南 2019 修订版》解读. 环境工程, 2019, 37(8): 1-11.
- [14] 任继周. 草地农业生态学. 北京: 中国农业出版社, 1995.
- [15] Joel G, Chapin F S III, Chiariello N R, Thayer S S, Field C B. Species-specific responses of plant communities to altered carbon and nutrient availability. Global Change Biology, 2001, 7(4): 435-450.
- [16] 张峰. 中国草原碳库储量及温室气体排放量估算[D]. 兰州: 兰州大学, 2010.
- [17] 杨龙. 喀斯特石漠化治理生态修复模式下的碳汇效益监测评价[D]. 贵阳: 贵州师范大学, 2016.
- [18] Liu S L, Du Y G, Zhang F W, Lin L, Li Y K, Guo X W, Li Q, Cao G M. Distribution of soil carbon in different grassland types of the Qinghai-Tibetan Plateau. Journal of Mountain Science, 2016, 13(10): 1806-1817.
- [19] 李忠佩, 吴大付. 红壤水稻土有机碳库的平衡值确定及固碳潜力分析. 土壤学报, 2006, 43(1): 46-52.
- [20] 刘瑞刚, 李娜, 苏宏新, 桑卫国. 北京山区 3 种暖温带森林生态系统未来碳平衡的模拟与分析. 植物生态学报, 2009, 33(3): 516-534.
- [21] 陈燕飞, 胡海波. 城市总体规划中的碳氧平衡分析. 城市规划, 2010, 34(B10): 136-140.
- [22] 赵荣钦, 黄贤金, 彭补拙. 南京城市系统碳循环与碳平衡分析. 地理学报, 2012, 67(6): 758-770.
- [23] 岑宇, 王成栋, 张震, 任侠, 刘美珍, 杨帆. 河北省天然草地生物量和碳密度空间分布格局. 植物生态学报, 2018, 42(3): 265-276.
- [24] 邢鹏飞, 李刚, 赵祥, 董宽虎. 山西暖性草地碳密度分布特征及其区域差异. 草地学报, 2019, 27(6): 1667-1676.
- [25] 孟祥海, 程国强, 张俊陵, 王宇波, 周海川. 中国畜牧业全生命周期温室气体排放时空特征分析. 中国环境科学, 2014, 34(8): 2167-2176.
- [26] 余光英, 员开奇. 武汉城市圈土地碳平衡适宜性评价及潜力分析. 水土保持研究, 2013, 20(6): 271-276.
- [27] 王延吉, 张继炎, 张臻. 高压复杂物系化学平衡计算——由合成气制低碳醇的热力学分析. 高校化学工程学报, 1991, 5(4): 347-352.
- [28] 李忠佩, 林心雄, 车玉萍. 中国东部主要农田土壤有机碳库的平衡与趋势分析. 土壤学报, 2002, 39(3): 351-360.
- [29] Davis S C, Parton W J, Dohleman F G, Smith C M, Del Grosso S, Kent A D, DeLucia E H. Comparative biogeochemical cycles of bioenergy crops reveal nitrogen-fixation and low greenhouse gas emissions in a Miscanthus $\times$ giganteus agro-ecosystem. Ecosystems, 2010, 13(1): 144-156.
- [30] 罗祎青, 王雪, 袁希钢. 微藻生物柴油生命周期的能量平衡与碳平衡分析. 清华大学学报: 自然科学版, 2018, 58(3): 324-329.
- [31] Yoo G, Kim H, Chen J J, Kim Y. Effects of biochar addition on nitrogen leaching and soil structure following fertilizer application to rice paddy soil. Soil Science Society of America Journal, 2014, 78(3): 852-860.
- [32] Haberle J, K&S M. Simulation of nitrogen leaching and nitrate concentration in a long-term field experiment. Journal of Central European Agriculture, 2012, 13(3): 416-425.
- [33] United Nations. Department of Economic and Social Affairs.[2023-9-28].<https://population.un.org/wpp/GlossaryOfDemographicTerms/>.
- [34] 李卓娜, 杨洋, 朱晓东. 基于土地利用变化的江苏省碳排放时空差异与碳平衡分区. 环境保护科学: 1-15[2023-10-12].<https://doi.org/10.16803/j.cnki.issn.1004-6216.202212020>.
- [35] Chang X F, Zhu X X, Wang S P, Luo C Y, Zhang Z H, Duan J C, Bai L, Wang W Y. Temperature and moisture effects on soil respiration in alpine grasslands. Soil Science, 2012, 177(9): 554-560.
- [36] Pedroni P. Panel cointegration: asymptotic and finite sample properties of pooled time series tests with an application to the ppp hypothesis. Econometric Theory, 2004, 20(3): 597-625.
- [37] O'Neill B C, Dalton M, Fuchs R, Jiang L W, Pachauri S, Zigova K. Global demographic trends and future carbon emissions. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2010, 107(41): 17521-17526.
- [38] Balsalobre-Lorente D, Sinha A, Driha O M, Mubarik M S. Assessing the impacts of ageing and natural resource extraction on carbon emissions: a proposed policy framework for European economies. Journal of Cleaner Production, 2021, 296: 126470.
- [39] Cole M A, Neumayer E. Examining the impact of demographic factors on air pollution. Population and Environment, 2004, 26(1): 5-21.
- [40] Shi A Q. The impact of population pressure on global carbon dioxide emissions, 1975-1996: evidence from pooled cross-country data. Ecological Economics, 2003, 44(1): 29-42.
- [41] Poumanyong P, Kaneko S. Does urbanization lead to less energy use and lower CO₂ emissions? A cross-country analysis. Ecological Economics, 2010, 70(2): 434-444.
- [42] Tang X L, Zhao X, Bai Y F, Tang Z Y, Wang W T, Zhao Y C, Wan H W, Xie Z Q, Shi X Z, Wu B F, Wang G X, Yan J H, Ma K P, Du S, Li S G, Han S J, Ma Y X, Hu H F, He N P, Yang Y H, Han W X, He H L, Yu G R, Fang J Y, Zhou G Y. Carbon pools in China's terrestrial ecosystems: new estimates based on an intensive field survey. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2018, 115(16): 4021-4026.
- [43] Terrer C, Phillips R P, Hungate B A, Rosende J, Pett-Ridge J, Craig M E, van Groenigen K J, Keenan T F, Sulman B N, Stocker B D, Reich P B, Pellegrini A F A, Pendall E, Zhang H, Evans R D, Carrillo Y, Fisher J B, Van Sundert K, Vicca S, Jackson R B. A trade-off between plant and soil carbon storage under elevated CO₂. Nature, 2021, 591: 599-603.
- [44] Guo H W, Jiang J, Li Y Y, Long X X, Han J. An aging giant at the center of global warming: Population dynamics and its effect on CO₂ emissions in China. Journal of Environmental Management, 2023, 327: 116906.
- [45] Scharlemann J P, Tanner E V, Hiederer R, Kapos V. Global soil carbon: understanding and managing the largest terrestrial carbon pool. Carbon Management, 2014, 5(1): 81-91.
- [46] 张一微. 基于“双碳”战略导向的市级国土空间规划探索. 低碳世界, 2023, 13(3): 76-78.
- [47] 韩方红, 高凡, 何兵, 曹燕, 姚小晨. 1990—2020 年阿克苏河流域土地利用碳排放时空轨迹与影响因素. 环境科学: 1-14[2023-10-12].<https://doi.org/10.13227/j.hjlx.202305243>.
- [48] 张自和. 发挥甘肃草业优势促进草业产业化与可持续发展. 草业科学, 2005, 22(3): 46-49.
- [49] 郝天象, 杨萌, 于贵瑞. 统筹草地生态系统五库功能 构建国家生态安全屏障. 中国科学基金, 2023, 37(4): 603-612.
- [50] 南志标. 关于甘肃草种业发展的思考. 甘肃政协, 2022(2): 61-63.