

基于土地利用变化的安徽省陆地碳排放时空特征及效应

李彦旻^{1,2,3}, 沈育生^{4,5}, 王世航^{1,2,3}

(1.安徽理工大学空间信息与测绘工程学院,安徽 淮南 232001;

2.安徽理工大学矿山采动灾害空天地协同监测与预警安徽普通高校重点实验室,安徽 淮南 232001;

3.安徽理工大学矿区环境与灾害协同监测煤炭行业工程研究中心,安徽 淮南 232001;

4.中国科学院城市环境研究所,中科院城市环境与健康重点实验室,福建 厦门 361021; 5.中国科学院大学,北京 100049)

摘要: 土地利用变化是区域碳排放变化的主要驱动力,揭示土地利用变化对碳排放影响对于碳排放政策的制定具有指导意义。然而,经济快速发展区域中土地利用变化对碳排放影响研究仍有限。以安徽省为对象,基于 2000—2020 年的土地利用变化数据,从碳源/汇角度评估了安徽省净碳排放,分析了碳排放时空特点,从碳足迹、生态承载力和生态赤字 3 个方面阐明了安徽省碳排放效应。结果表明:(1)从 2000—2020 年,安徽省土地利用净碳排放表现为增加趋势,年均增加 503.92 万 t,林地是碳排放的主要碳汇,但其碳汇总量年际变化不大,建设用是碳排放增加的主要碳源,其年均增加 511.37 万 t;(2)2000—2020 年,碳源变化主要分布在安徽省中北部平原地区,碳汇变化主要分布于西南高山和丘陵地区,且安徽中北部地区是碳排放强度随时间变化的最大热点区;(3)由碳源/碳汇变化引起的碳排放效应中,生态承载力 2000—2020 年变化不大,但碳足迹和生态赤字表现为增加趋势,年均增加率分别为 6.2%和 8.7%。因此,安徽省中北部平原地区为碳减排重点控制区域,降低建设用地及增加林地面积可有效调节该地区碳排放效应。

关键词: 碳排放; 碳源和碳汇; 土地利用变化; 时空特征; 安徽省

中图分类号: X171;X32

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2022)01-0182-07

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2022.01.024

Spatio-temporal Characteristics and Effects of Terrestrial Carbon Emissions Based on Land Use Change in Anhui Province

LI Yanmin^{1,2,3}, SHEN Yusheng^{4,5}, WANG Shihang^{1,2,3}

(1.School of Geomatics, Anhui University of Science and Technology, Huainan, Anhui 232001;

2.Key Laboratory of Aviation-aerospace-ground Cooperative Monitoring and Early Warning of Coal

Mining-induced Disasters of Anhui Higher Education Institutes, Anhui University of Science and Technology,

KLAHEI (KLAHEI18015), Huainan, Anhui 232001; 3.Coal Industry Engineering Research Center of

Mining Area Environmental And Disaster Cooperative Monitoring, Anhui University of Science and Technology,

Huainan, Anhui 232001; 4.Key Laboratory of Urban Environment and Health, Institute of Urban Environment,

Chinese Academy of Sciences, Xiamen, Fujian 361021; 5.University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

Abstract: Land use change is the main driving force of regional carbon emissions change, and revealing the impact of land use change on carbon emissions is instructive for the formulation of carbon emission policies. However, research on the impact of land use change on carbon emissions in areas with rapid economic development is still limited. Taking Anhui Province as objective, this study evaluated the net carbon emissions from the perspective of carbon source/sink based on the land use change from 2000 to 2020, analyzed the spatio-temporal characteristics of carbon emissions, and clarified the carbon emission effect from the aspects of carbon footprint, ecological carrying capacity and ecological deficit. The results showed that: (1) During 2000 to 2020, the net carbon emissions from land use in Anhui Province increased, with an average annual increase of 5 039 200 tons. Forest was the main carbon sink, but the amount of carbon sinks varied little from year to year. Construction land was the main carbon source, with an average annual increase of 5 113 700 tons. (2) During 2000 to 2020, the carbon source change area was mainly distributed in the central and

收稿日期:2021-09-01

资助项目:安徽理工大学引进人才科研启动基金项目(13200458);国家自然科学基金项目(31700369);中国科学院国际合作项目(中科院—荷兰科研组织项目)(132C35KYSB20200007)

第一作者:李彦旻(1990—),女,博士,讲师,主要从事生态环境与地理信息研究。E-mail:yanminli@aust.edu.cn

通信作者:王世航(1982—),男,博士,副教授,主要从事地理信息研究。E-mail:wangshihang122@sina.com

northern plain area of Anhui Province, and the carbon sink change area was mainly distributed in the mountainous of southwest. Furthermore, the central and northern area of Anhui Province was the hottest areas of the carbon emission intensity changes. (3) Among the carbon emission effects caused by carbon source/sink changes, the ecological carrying capacity did not change much from 2000 to 2020, but the carbon footprint and ecological deficit increased, with an annual increase rate of 6.2% and 8.7%, respectively. Therefore, the central and northern plain area of Anhui province was the key control area for implementing carbon emission reduction. Meanwhile, reducing the construction land and increasing forest area could effectively adjust the carbon emission effect in study area.

Keywords: carbon emission; carbon source/sink; land use change; spatial-temporal characteristics; Anhui Province

土地利用变化改变人类地表生态系统,进而深刻影响着地球碳循环过程,已成为全球和区域碳排放变化的关键驱动力之一^[1-2]。近年经济的快速发展导致我国的土地利用类型发生剧烈变化,显著增加了我国的碳排放量。据资料^[3]显示,我国碳排放量已越居世界第 2,预计 2030 年之后将成为全球最大的碳排放大国。我国已在国际上承诺力争于 2030 年单位 GDP 碳排放总量比 2005 年下降 60%~65%,碳排放达到峰值,并在 2060 年前实现碳中和。面对如此严峻的挑战和现实需求,开展区域土地利用碳排放研究,对推动中国 2030 年碳达峰和区域制定碳减排策略具有重要意义。

土地利用变化对碳排放影响这一议题已经受国内外学者广泛关注和重视。在国外,20 世纪 90 年代已对区域土地利用变化的碳排放影响进行研究^[4-5],发现不同土地利用类型结构对陆地生态系统碳排放影响存在显著差异,且建设用地的扩张对区域碳排放影响最显著。国内的相关研究虽起步较晚,但至 21 世纪初研究内容逐渐丰富,并取得了诸多成果。在国家尺度上,葛全胜等^[6]发现,过去 300 年间,中国陆地生态系统土地及植被的变化造成碳排放达到 9.54 Pg C。在省级尺度上,西南部四川、重庆,东部江苏、福建等省份土地利用变化对碳排放的影响已受评估^[7-10]。然而,中部地区经济快速发展的省份受关注度不高,从结果上来看,尽管土地利用变化对碳排放的深刻影响已取得共识^[8-12],但不同地区和省份碳排放的时空特征存在较大差异,例如,江苏省碳排放空间特征呈现出北部大于南部的趋势,而四川省碳量则表现为中部地区最大^[7,9]。此外,由于不同省份土地利用变化及经济发展水平的差异,导致区域内碳排放效应也不同^[7-10],这说明基于碳排放时空特征制定减排策略具有明显的地区性。

安徽省作为我国生态建设的重点省份,也是我国重要的农业生产、能源、原材料和加工制造业基地,同时也是近年经济取得快速发展的地区。截至 2019 年底,安徽省城镇化水平达到 55.81%,2020 年地区生

产总值达到 38 680.60 亿元。城市化进程的加快和经济的快速发展使得安徽省土地利用类型发生了巨大转变,显著增加了能源消费量。资料^[13]表明,安徽省各类能源消费总量从 2000 年 19.70 万 t 增加至 2020 年 58.90 万 t,进而影响了区域的碳排放,也使得碳减排压力越来越大。尽管已有研究^[14-15]分析了安徽省土地利用碳排放总量变化及影响因素,但是并没有探讨碳排放空间特征及其效应,限制了碳减排政策的制定。本研究基于 2000—2020 年的安徽省土地利用数据,分析了近 20 年的土地利用变化,利用碳排放系数及空间分析方法,探讨了安徽省碳排放时空特征及效应,以期阐明安徽省碳排放近 20 年的变化特征,并为丰富省级尺度土地利用碳排放研究及安徽省未来低碳调控政策的制定提供依据。

1 研究区域与方法

1.1 研究区概况

安徽省(29°41′00″—34°38′00″N,114°54′00″—119°37′00″E)位于中国中部(图 1),跨长江、淮河中下游,面积 13.96 km²,包括 16 个地市。安徽整体地形表现为西南部高、东北部低,淮河以北,地势平坦广阔,西边群山环绕,东边丘陵密布。依地形可将安徽省分为 5 个自然区域,分别为江陵丘陵、淮北平原、西部大别山区、南部山区和沿江平原。安徽省为亚热带湿润季风气候,四季分明,年降水量 80~1 600 mm,年平均气温 16℃。统计年鉴^[13]显示,近年来由于经济的快速发展,使得安徽省的土地利用类型发生了显著的变化,已显著影响了安徽省总体碳排放。

1.2 数据来源

安徽省 2000 年、2010 年、2015 年和 2020 年土地利用数据,主要来源于 Landsat8 TM/ETM 遥感影像数据(30 m×30 m),数据下载于中国科学院资源环境科学数据中心网站(<http://www.resdc.cn>)。对获取的数据进行人工目视解译,并结合野外调查实证,综合评价精度超过 94%。安徽省社会经济数据及能源数据主要来源于《安徽省统计年鉴 2001—2021 年》^[13]。

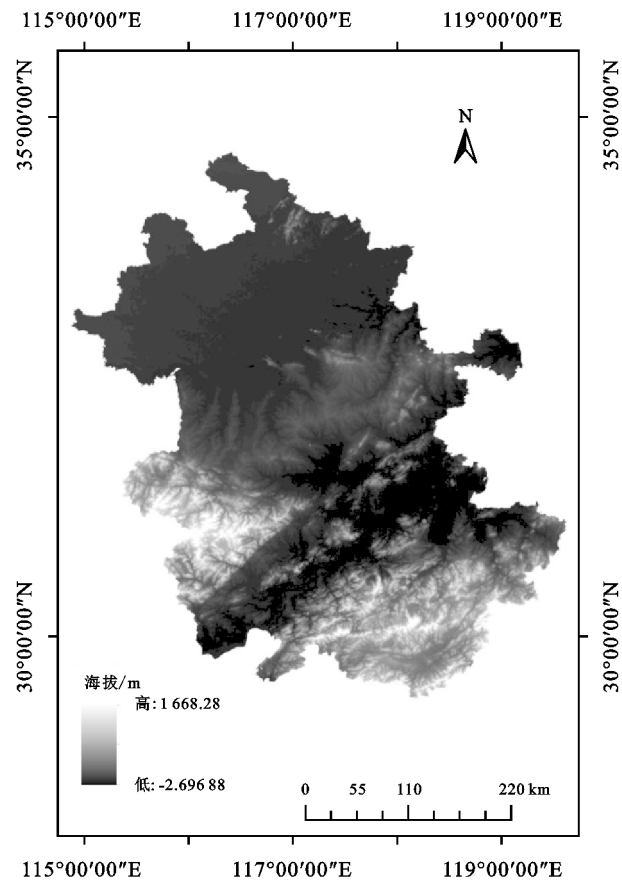


图 1 安徽省位置

1.3 土地利用碳排放估算

碳排放涉及到的土地利用类型主要包括耕地、林

表 2 主要能源碳排放转化系数

指标	原煤	焦炭	原油	燃料油	汽油	柴油	电力
折算标准煤系数/(kgce·t ⁻¹ , kgce·kw ⁻¹ ·h ⁻¹)	714	971.4	1471.4	1471.4	1471.4	1471.4	0.1229
碳排放系数/(t·t ⁻¹)	0.7559	0.8550	0.5538	0.6185	0.5538	0.5921	0.7330

1.4 碳排放效应评估

土地利用碳排放效应是指人类利用土地资源过程中对土地利用格局改变产生的碳排放结果,其反映了碳排放对生态环境影响的程度。本研究主要从碳足迹、生态承载力和生态赤字 3 个主要方面进行反映^[20-21]。

(1)碳足迹。碳足迹最初来源于生态足迹概念和计算模型,后期演化成碳足迹计算模型用以解释吸收人类经济活动排放的二氧化碳所需要的生物生产性土地面积,可衡量人类经济活动对自然界影响^[9,21]。各土地利用类型中,林地、草地和水域具有碳吸收作用,但水域碳吸收量比例极小,因此忽略。本研究中计算林地和草地生态系统的净吸收能力,用生态系统生产力(NEP)来代替区域的碳吸收能力,计算模型为:

$$Cf=\sum m_j\times\beta_j\times\gamma_j\times\left(\frac{P_f}{EP_f}+\frac{P_g}{EP_g}\right)^{[9]} \quad (2)$$

式中:Cf 为碳足迹(hm²);j 为煤炭类、油类和天然气类等化石能源;m_j 为化石能源消费量(t);β_j 为标准煤换

地、建设用地、水域和未利用地。其中,耕地和建设用地表现为碳源,产生碳排放。林地、草地、水域和未利用地为碳汇,在碳循环过程中起到碳吸收作用^[6]。其中,建设用地碳排放根据 IPCC^[16] 清单排放方法计算能源消费碳排放,具体计算方法为:

$$C_e=\sum e_i=\sum_{i=1}^5A_i\times\alpha_i+Cb=\sum_{i=1}^5A_i\times\alpha_i+\sum m_j\times\beta_j\times\gamma_j^{[9]} \quad (1)$$

式中:C_e 为碳排放量(t);e_i 为第 i 种土地利用类型产生的碳排放/吸收总量(t);A_i 为第 i 种土地利用类型(耕地、林地、草地、建设用地等)面积(m²);α_i 为第 i 种土地利用类型的碳排放/吸收系数(t/t)(表 1);Cb 为建设用地的碳排放量(t);m_j 为化石能源消费量(t);j 为煤炭类、油类和天然气类等化石能源;β_j 为标准煤换算系数(kgce/t, kgce/(kw·h));γ_j 为碳排放系数(kg/(m²·a))(表 2)。

表 1 主要土地利用类型碳排放系数

土地利用类型	碳排放系数/(kg·m ⁻² ·a ⁻¹)	参考文献
草地	-0.0205	[17-19]
耕地	0.4595	[17-19]
林地	-0.6125	[17-19]
未利用地	-0.0005	[17-19]
水域	-0.0253	[17-19]

算系数(kgce/t, kgce/(kw·h));γ_j 为碳排放系数(kg/(m²·a))(表 2);P_f 和 P_g 分别为安徽省森林和草地碳吸收比例(%);EP_f 和 EF_g 分别为全球森林和草地碳吸收能力,即 NEP(C/hm²)(表 3)。

(2)碳生态承载力。生态承载力指的是碳生态承载力,即本区域现有的能吸收人类活动排放的二氧化碳所需生物生产性土地面积,主要指林地和草地^[21-22],计算公式为:

$$Ec=Cs\times\left(\frac{P_f}{EP_f}+\frac{P_g}{EP_g}\right)^{[9]} \quad (3)$$

式中:Ec 为生态承载力(hm²);Cs 为不同土地利用方式的碳吸收量(t);P_f 和 P_g 分别为安徽省森林和草地碳吸收比例(%);EP_f 和 EF_g 分别为全球森林和草地碳吸收能力(hm²)(表 3)。

(3)生态赤字。生态赤字是指一个地区的碳生态承载力与碳足迹的差值^[22],当碳生态承载力小于碳足迹时,出现生态赤字。

1.5 灰色关联度分析

为探索安徽省碳排放的影响因素,本文利用灰色

关联度分析方法探索了经济发展程度、产业结构、人口规模、城市化水平及能源结构与安徽省建设用地碳排放的关系,用灰色关联度系数表示两者关系的强度,系数越大,表明关系越强^[23]。在具体分析中,经济发展程度用人均 GDP 表征,产业结构用第二产业增加值占 GDP 比重表征,人口规模用安徽省常住人口表征,城市化水平用城市人口比重表征,能源结构用煤炭消费量占能源消费的比重。

表 3 主要生物生产性土地碳吸收系数		
项目	林地	草地
净生态系统生产量/(t·hm ⁻²)	3.81	0.95
消纳 1 t 碳用地面积/hm ⁻²	0.26	1.05
平均碳吸收量/(10 ⁵ t·hm ⁻²)	101.00	3.54
碳吸收比例/%	96.63	3.37
吸收 1 t CO ₂ 用地面积/hm ²	0.07	0.01

2 结果与分析

2.1 土地利用变化特征

由图 2 可知,2000—2020 年,安徽省各土地利用类型中,耕地的面积最大,其次为林地和建筑用地,但不同土地利用类型随时间变化趋势不一致。具体来说,耕地变化表现为逐步降低趋势,其从 2000 年的 80 757.29 km²下降 2010 年的 78 987.73 km²,到 2020 年进一步下降为 76 254.82 km²。草地面积亦表现为下降趋势,从 2000 年的 8 361.73 km²下降 2010 年的 8 326.21 km²,到 2020 年进一步下降为 8 207.96 km²。相比之下,林地面积变化不大,但建设用地表现为逐步增加趋势,从 2000 年的 11 530.43 km²增加至 2010 年的 13 328.23 km²,再到 2020 年的 15 983.36 km²,近 20 年增加了近 1.4 倍。

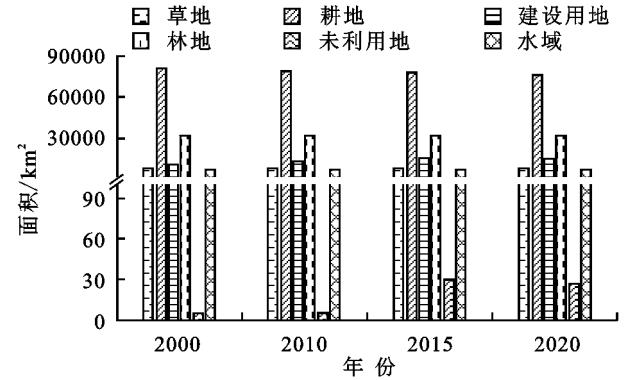


图 2 2000—2020 年安徽省各类土地利用面积总量变化

2.2 碳排放时空特征

2.2.1 碳排放时间变化 由图 3 可知,安徽省净碳排放受碳源和碳汇共同影响。其中,碳源排放表现为增加趋势,其从 2000 年的 8 106.52 万 t 增加到 2010 年的 13 587.12 万 t,再增加至 2020 年的 18 173.13 万 t,年均增加为 4.10%。但碳汇表现为降低趋势,从 2000 年的 2 012.63 万 t,降低至 2010 年的 2 007.96 万 t,

再降低至 2020 年的 2 000.64 万 t,波动幅度较小,年均降低率仅为 0.03%。总体而言,安徽省土地利用净碳排放量呈逐渐增加趋势,从 2000 年的 6 093.89 万 t 增加 2010 年的 11 579.16 万 t,至 2020 年进一步增加为 16 172.48 万 t,年均增加 503.93 万 t,年均增加率为 4.70%。

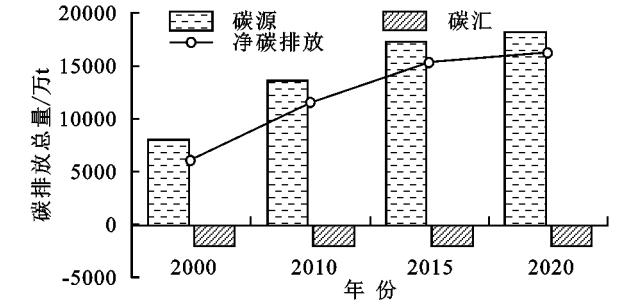
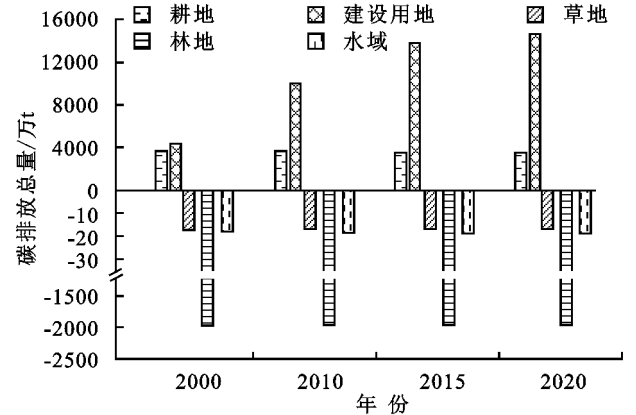


图 3 2000—2020 年安徽省碳源/碳汇及净碳排放特征

由图 4 可知,净碳排放量与各土地利用类型的碳源和碳汇密切相关。其中,林地的碳汇效应最大,占碳汇总量的 90% 以上,林地碳汇总量随着时间推移呈现缓慢降低趋势,波动幅度较小,基本维持在 1 962.14 万~1 977.30 万 t 与碳汇相比,碳源效应大小依次为建设用地>耕地>其他土地利用类型。其中,耕地碳源效应表现为递减趋势,从 2000 年约占碳排放总量的 60% 降低至 2010 年的 22%,再降至 2020 年的 21%。但建设用地的碳源效应表现为增加趋势,其从 2000 年的 4 395.73 万 t 增加到 2010 年的 9 957.63 万 t,到 2020 年进一步增加为 14 623.27 万 t,年均增加 511.37 万 t,增加比例为 232%。建设用地碳排放占全省碳排放总量的比例为 72%~90%。



注:正值为碳源效应,负值为碳汇效应。

图 4 2000—2020 年安徽省各类土地利用碳排放特征

基于上述结果发现,建设用地碳排放对安徽省净碳排放变化具决定性作用,为深入探讨其主要的影响因素,本文利用灰色关联度方法分析建设用地碳排放的驱动因素。由表 4 可知,城市化程度和经济发展水平的灰色相关系数大于其他因素,但城市化程度灰色关联度系数最大,表明其是驱动建设用地碳排放的主要原因。

2.2.2 碳排放空间变化 由图 5 可知,2000 年、2010 年、2015 年和 2020 年安徽省土地利用碳排放呈现显著的空间异质性。就地区而言,碳源排放主要分布在中北部平原地区,尤其是淮北平原和沿江平原。就县市而言,2000—2020 年安徽省碳源主要分布在合肥、蚌埠、马鞍山、芜湖、滁州等地,这些地区碳源排放总量在 8 500~40 000 t,部分地区接近 530 000 t;碳汇主要分布于安徽省西南部高山和丘陵地区,且集中于池州、宣城和六安部分地区。总之,随着时间推移,净碳排放热点在安徽中北部地区的淮北平原和沿江平

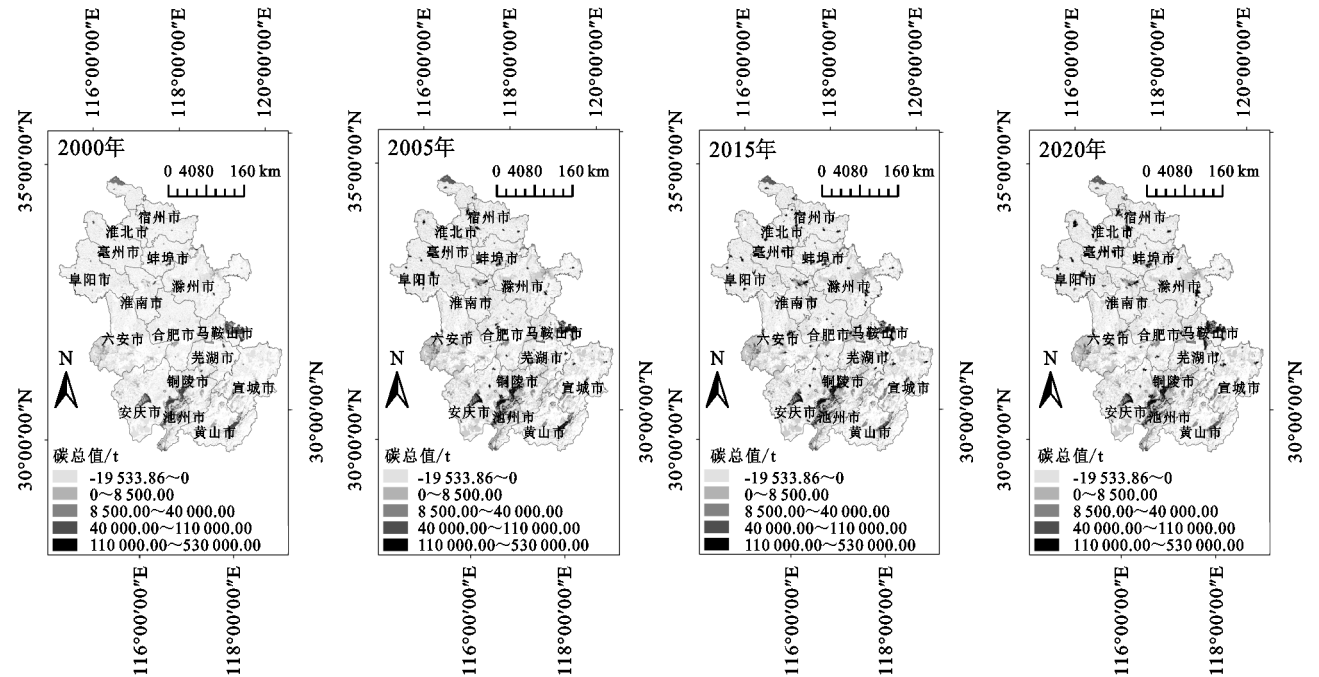


图 5 2000—2020 年安徽省土地利用碳排放空间分布特征

由图 6 可知,2000—2020 年安徽省土地利用净碳排放变化在空间上出现显著空间异质性。其中,安徽中部地区是土地利用净碳排放变化的最大热点区,涉及的城市主要有省会合肥、滁州、淮南、六安以及马鞍山等部分地区;其次是东北部区域。与之相比,南部及西北部分地区为土地利用净碳排放的冷点区域,主要涉及城市有池州、黄山和宣城。热点和冷点区域土地利用碳排放强度变化的图斑均相对集中。

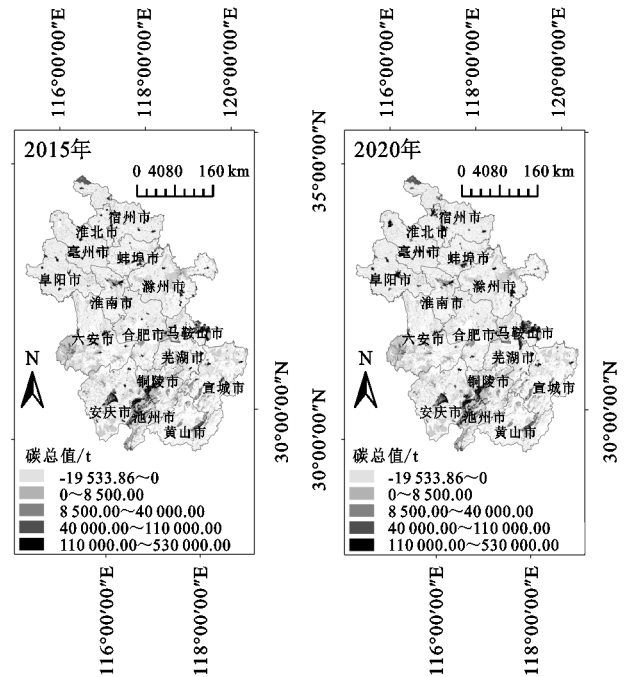
2.3 碳排放效应

碳排放效应从碳足迹、生态承载力和生态赤字 3 个方面反映。由表 5 可知,安徽省能源碳足迹呈迅速增加趋势,从 2000 年的 $1\,094.01\times10^4\text{ hm}^2$ 增加至 2010 年的 $2\,478.27\times10^4\text{ hm}^2$,再增至 2020 年的 $3\,639.46\times10^4\text{ hm}^2$,年均增长率为 6.20%。与之类似,人均碳足迹从 2000 年的 $0.18\times10^4\text{ hm}^2$ 增加 2010 年的 $0.42\times10^4\text{ hm}^2$,再至 2020 年 $0.59\times10^4\text{ hm}^2$,近 20 年增加了 3.3 倍;近 20 年安徽省生态承载力在 $501.20\times10^4\text{ hm}^2\sim497.56\times10^4\text{ hm}^2$ 范围内波

动,总体相对较稳定;然而,生态赤字由 2000 年的 $592.81\times10^4\text{ hm}^2$ 增加到 2010 年的 $1\,978.23\times10^4\text{ hm}^2$,再至 2020 年的 $3\,141.24\times10^4\text{ hm}^2$,表现为增加趋势,年均增加率为 8.7%。由上可知,安徽省碳排放效应整体上表现为碳足迹逐年迅速增长,生态承载力变化缓慢,从而造成生态赤字越来越大,碳减排压力也随之变大。

表 4 安徽省建设用地碳排放影响因素的灰色关联度

指标	灰色关联度系数
经济发展水平	0.63
产业结构	0.51
人口规模	0.52
城市化程度	0.84
能源消费结构	0.51



动,总体相对较稳定;然而,生态赤字由 2000 年的 $592.81\times10^4\text{ hm}^2$ 增加到 2010 年的 $1\,978.23\times10^4\text{ hm}^2$,再至 2020 年的 $3\,141.24\times10^4\text{ hm}^2$,表现为增加趋势,年均增加率为 8.7%。由上可知,安徽省碳排放效应整体上表现为碳足迹逐年迅速增长,生态承载力变化缓慢,从而造成生态赤字越来越大,碳减排压力也随之变大。

3 讨论

本研究基于安徽省 2000—2020 年的土地利用数据,分析了安徽省碳排放时空特征及碳排放效应。本研究表明,安徽省净碳排放呈增长趋势,其中建设用地碳排放增加最为显著,且对净碳排放总量起决定性作用。安徽省城市化程度及经济发展水平是建设用地碳排放的最主要的驱动因素。除此之外,在空间上安徽省碳排放热点区域主要集中在中北部地区。本研究在一定程度上克服了碳排放缺乏空间特征可视化的缺陷,进一步丰富了经济快速发展区域下省级尺度碳排放的研究,并可为安徽省碳减排目标的

实现提供指导。

本研究发现,建设用地碳排放是安徽省最主要的碳源,而林地是最主要的碳汇。随着碳源增长幅度越来越大,最终造成安徽省净碳排放呈增加趋势。与其他省份相比,2000—2010 年安徽省碳排放均值显著大于四川省和湖南省^[9,24],并在 2015 年其建设用地碳排放远大于同期福建省建设用地碳排放总量^[22],造成上述结果的主要原因是安徽省建设用地面积扩张迅速且能源消耗量增加显著^{[[15,25]},尤其是建设用地中交通网络的扩张,也是碳排放量增多的重要原因之一。然而,安徽省林地的碳汇效应与全国年均值相比仍相差甚远^[26]。因此,安徽省节能减排的重点应该放在减少建设用地的能源消耗,以此降低建设用地碳排放,且尽可能保持或增加具有碳汇效应的林地。

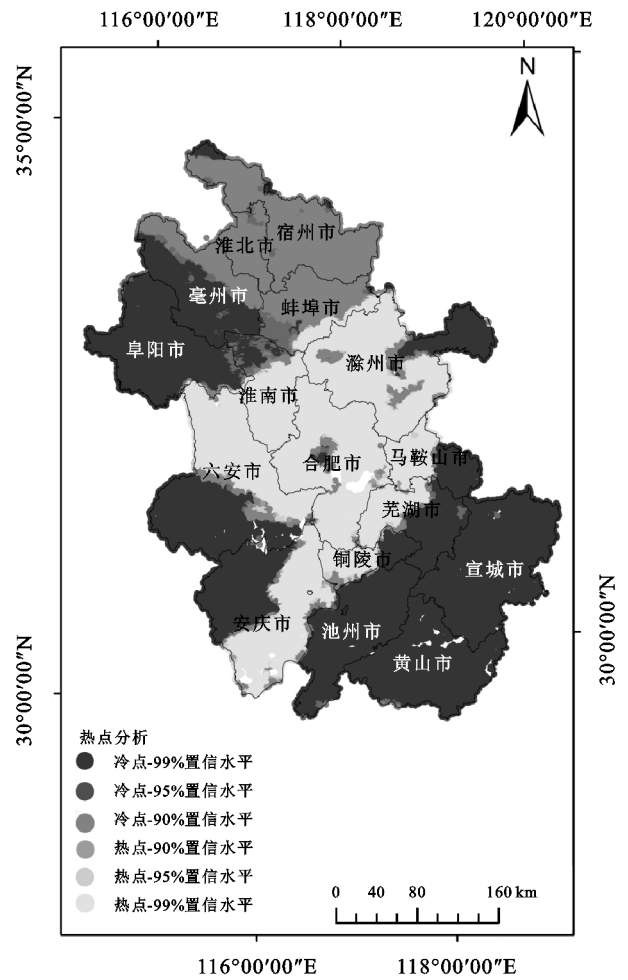


图 6 安徽省 2000—2020 年碳排放热点分析

表 5 2000—2020 年安徽省碳排放效应

单位:10⁴ hm²

年份	碳足迹	生态承载力	生态赤字	人均碳足迹
2000	1094.01	501.20	592.81	0.18
2010	2478.27	500.04	1978.23	0.41
2015	3426.28	497.56	2928.71	0.55
2020	3639.46	498.21	3141.24	0.59

除此之外,本研究发现,安徽省中北部平原地区是碳排放的热点区域。一方面由于安徽省人口、耕地和建设用地大部分集中分布在中北部地区,其中城镇用地比重显著大于南部地区,且增长迅速^[27];另一方面,安徽中北部的淮南、淮北煤矿和火电产业的发展加剧了能源消费碳排放强度。与之相比,西部大别山区、南部山区和江淮丘陵地区由于林地覆盖率高,其中池州和宣城 2019 年森林覆盖率分别达到 60.0%和 59.3%,近年来大力发展旅游业,逐渐减少了对矿业生产的依赖,成为碳排放冷点区域。因此,安徽省中北部地区是未来碳减排重点关注和调控的区域,应适度增加绿化面积,避免建设用地无限制扩张。

与前人^[14-15]研究结果相似,安徽省净碳排放总量呈逐年增加趋势,从而造成人均碳足迹随之增大且高于同时期的四川、福建等省份^[9,22],最终给安徽省碳减排带来巨大压力,深刻影响着安徽省生态建设。进一步探讨其驱动因素发现城市化和经济发展对碳排放影响最显著。因此,未来安徽省在发展经济的同时,应加快转变经济发展方式、大力发展绿色经济和循环经济,促进生态环境可持续发展。

4 结论

(1)在时间上,安徽省 2000—2020 年土地利用变化导致净碳排放呈增长态势,碳排放年均增加 503.33 万 t。与城市化水平和经济发展密切相关的建设用地面积增加是最主要的碳源,并对净碳排放总量起决定性作用。

(2)在空间上安徽省中北部平原地区是碳排放的热点区域,西部大别山区、南部山区和江淮丘陵地区则成为碳排放冷点区域。

(3)2000—2020 年期间安徽省碳足迹迅速增长,生态承载力变化缓慢,生态赤字越来越大,未来伴随着城市化和经济发展对建设用地碳排放影响越来越显著,安徽省低碳发展将面临较大压力。

(4)安徽省的碳减排政策的制定建议重点关注中北部平原地区,控制该地区建设用地面积,增加林地面积可有效调节该地区的碳排放。

参考文献:

[1] 韩骥,周翔,象伟宁.土地利用碳排放效应及其低碳管理研究进展[J].生态学报,2016,36(4):1152-1161.
[2] Yang H, Huang J L, Liu D F. Linking climate change and socioeconomic development to urban land use simulation: Analysis of their concurrent effects on carbon storage [J].Applied Geography,2020,115(1):e102135.
[3] Shi K F, Chen Y, Yu B L, et al. Detecting spatiotemporal dynamics of global electric power consumption using DMSP-OLS nighttime stable light data [J].Applied

- Energy, 2016, 184: 450-463.
- [4] Ishii S, Tabushi S, Aramaki T, et al. Impact of future urban form on the potential to reduce greenhouse gas emissions from residential, commercial and public building in Utsunomiya Japan [J]. Energy Policy, 2010, 38(9): 4888-4896.
- [5] Nijdam D, Rood T, Westhoek H. The price protein: Review of land use and carbon footprints from life cycle assessments of animal food products and their substitutes [J]. Food Policy, 2012, 37(6): 760-700.
- [6] 葛全胜, 戴君虎, 何凡能, 等. 过去 300 年中国土地利用、土地覆被变化与碳循环研究[J]. 中国科学 D 辑(地球科学), 2008, 38(2): 197-210.
- [7] 张秀梅, 李升峰, 黄贤金, 等. 江苏省 1996 年至 2007 年碳排放效应及时空格局分析[J]. 资源科学, 2010, 32(4): 768-775.
- [8] 刘英, 赵荣钦, 焦士兴. 河南省土地利用碳源/汇及其变化分析[J]. 水土保持研究, 2010, 17(5): 154-161.
- [9] 彭文甫, 周介铭, 徐新良, 等. 基于土地利用变化的四川省碳排放与碳足迹效应及时空格局[J]. 生态学报, 2016, 36(22): 7244-7259.
- [10] 王芳. 重庆市土地利用变化及其碳排放效应研究[D]. 重庆: 重庆师范大学, 2017.
- [11] 周嘉, 王钰莹, 刘学荣, 等. 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[J]. 地理科学, 2019, 39(12): 1955-1961.
- [12] 牛亚文, 赵先超, 胡艺觉. 基于 NPP—VIIRS 夜间灯光的长株潭地区县域土地利用碳排放空间分异研究[J]. 环境科学学报, 2021, 41(9): 3847-3856.
- [13] 安徽省统计局. 安徽统计年鉴(1998—2011)[M]. 北京: 中国统计出版社, 1998-2011.
- [14] 路漫其, 许信旺, 汪强. 基于不同土地利用方式的安徽省碳排放效应及时空差异分析[J]. 能源环境保护, 2016, 30(20): 10-13.
- [15] 张乐勤, 陈素平, 王文琴, 等. 安徽省近 15 年建设用地变化对碳排放效应测度及趋势预测: 基于 STIRPAT 模型[J]. 环境科学学报, 2013, 33(3): 950-958.
- [16] Houghton R A. Balancing the global carbon budget[J]. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 2007, 35: 313-347.
- [17] 李颖, 黄贤金, 甄峰. 江苏省区域不同土地利用方式的碳排放效应分析[J]. 农业工程学报, 2008, 24(增刊 2): 102-107.
- [18] 苏雅丽, 张艳芳. 陕西省土地利用变化的碳排放效益研究[J]. 水土保持学报, 2011, 25(1): 152-156.
- [19] 景勇, 左玲丽, 彭文甫. 四川盆地西北部土地利用碳排放时空变化分析: 以绵阳市为例[J]. 环境科学与技术, 2014, 44(6): 172-185.
- [20] 赵荣钦, 黄贤金. 基于能源消费的江苏省土地利用碳排放与碳足迹[J]. 地理研究, 2010, 29(9): 1639-1649.
- [21] 赵东升, 郭彩霞, 郑度, 等. 生态承载力研究进展[J]. 生态学报, 2019, 39(2): 399-410.
- [22] 黄思雅. 福建省土地利用变化碳排放效应研究[D]. 福州: 福建师范大学, 2019.
- [23] 刘思峰, 蔡华, 杨英杰, 等. 灰色关联分析模型研究进展[J]. 系统工程理论与实践, 2013, 33(8): 2041-2046.
- [24] 潘高, 张合平, 潘登. 湖南省 2000—2014 年碳排放效应及时空格局[J]. 生态学杂志, 2017, 36(5): 1382-1389.
- [25] 张乐勤, 陈素平, 李荣富, 等. 基于协整分析的安徽省能源消费碳排放库兹涅茨曲线[J]. 生态学杂志, 2012, 31(7): 1691-1700.
- [26] 宫倩楠, 王莹莹, 童玉芬. 京津冀人口对碳排放的压力: 空间格局及变动分析[J]. 首都经济贸易大学学报, 2020, 22(2): 56-67.
- [27] 袁婷, 曹卫东, 张宇. 安徽省城镇用地时空格局演变研究[J]. 云南地理环境研究, 2019, 31(5): 13-22.