第 8 卷◆第 10 期◆版本 1.0◆2025 年
文章类型：论文|刊号（ISSN）：2630-4678 /（中图刊号）：650GL004

贵州省马铃薯生产碳排放的时空演变特征

祝珊珊　杨梦涵　林玉如　郭先华
重庆三峡学院
DOI:10.12238/as.v8i10.3396

[摘　要] 该研究旨在通过分析贵州省马铃薯种植碳排放的时空变化特征,揭示其演变规律,为制定区域低碳农业发展策略提供科学依据,贵州省作为我国马铃薯种植大省,对其马铃薯生产的碳排放量测算具有重要意义。文章基于生命周期评价理论,构建了涵盖化肥、农药、农膜、翻耕、灌溉及柴油等关键碳源的马铃薯生产碳排放核算框架,分析了2010-2022年贵州省马铃薯生产碳排放的时空演变特征。研究发现：贵州省马铃薯生产碳排放呈现先上升后下降的趋势,2020年碳排放达到最高,其排放量为89.01×10^{4}t,其中生产化肥占比最大；空间上存在明显的区域差异,碳排放呈现“西北高东南低”的梯度分布,毕节市、遵义市因连片种植成为贵州省马铃薯碳排放最高地级市。贵州省在未来减排政策应因地制宜,重点关注高排放集聚区,通过优化化肥农药施用、推广绿色低碳农艺技术、并加强区域联动治理,以实现马铃薯产业的绿色可持续发展。
[关键词] 马铃薯；生命周期评价；碳排放量；时空特征
中图分类号：S532　文献标识码：A

The spatio-temporal evolution characteristics of carbon emissions from potato production in Guizhou Province

Shanshan Zhu　Menghan Yang　Yuru Lin　Xianhua Guo
School of Environmental and Chemical Engineering, Chongqing Three Gorges University

[Abstract] This study aims to analyze the spatio-temporal variation characteristics of carbon emissions from potato cultivation in Guizhou Province, reveal its evolution patterns, and provide a scientific basis for formulating regional low-carbon agricultural development strategies. As a major potato-growing province in China, the calculation of carbon emissions from potato production in Guizhou Province is of great significance. Based on the theory of life cycle assessment, this article constructs a carbon emission accounting framework for potato production covering key carbon sources such as chemical fertilizers, pesticides, agricultural films, ploughing, irrigation and diesel, and analyzes the spatio-temporal evolution characteristics of carbon emissions from potato production in Guizhou Province from 2010 to 2022. The research found that the carbon emissions from potato production in Guizhou Province showed a trend of first rising and then falling. The carbon emissions reached the peak in 2020, with an emission volume of 89.01×104 tons, among which the production of chemical fertilizers accounted for the largest proportion. There are obvious regional differences in space, and the carbon emissions show a gradient distribution of "high in the northwest and low in the southeast". Bijie City and Zunyi City have become the prefecture-level cities with the highest carbon emissions of potatoes in Guizhou Province due to continuous planting. In the future, Guizhou Province's emission reduction policies should be adapted to local conditions, with a focus on high-emission clusters. By optimizing the application of chemical fertilizers and pesticides, promoting green and low-carbon agricultural techniques, and strengthening regional coordinated governance, the green and sustainable development of the potato industry can be achieved.
[Key words] Potato Life cycle assessment Carbon emissions; Spatio-temporal characteristics

引言

CO_2是导致气候变化的主要的温室气体[1]。温室效应会导致很多极端天气,比如热浪(澳大利亚)、干旱(肯尼亚)和严重的水资源匮乏(南非),并对人类生命和大自然构成严重的威胁[2]。在全球气候变化与“双碳”目标的双重压力下,农业生产活动是温室气体排放的重要来源,世界粮食体系的碳排放约占全球人为

碳排放的三分之一[3]。减少碳排放已成为全球学者和政府的重点[4]。为了尽量减少全球气候变化带来的威胁，许多国家通过《巴黎协定》和实施节能减排政策，正在努力减少碳排放增加的有害影响[5]。在追求社会可持续发展的过程中，各国积极探索绿色和低碳发展途径。中国作为全球农业大国，其农业总碳排放由1961年的2.49亿吨上升至2018年的8.7亿吨[6]。马铃薯是中国四大粮食之一，具有很高的营养价值，同时也是重要的食品加工原料。2021年农业农村部印发的《“十四五”全国种植业发展规划》的通知中提出“大力推广高产高干物质品种和脱毒种薯，扩大加工专用马铃薯品种种植”，其生产的过程中碳排放量也会不断产生[7]。根据马铃薯碳排放相关研究表明西南单双季作区的碳减排潜力最大[8]。

贵州省作为中国西南重要的生态屏障与农业大省，农业生产系统呈现出显著的时空异质性[9]。马铃薯作为贵州省第三大粮食作物，其生产活动在保障粮食安全的同时，也因化肥施用、农机使用等因素成为碳排放的重要来源。近年来，随着农业现代化进程的加快，贵州省农业碳排放强度有所下降，但碳排放密度仍然较高，表明农业碳排放经济效率虽有所提高，但环境效率仍显不足[10]。贵州省是马铃薯种植大省，因此明确马铃薯农业生产过程中各环节造成的碳排放对于实现贵州省绿色发展具有重要意义。

现有研究多聚焦于宏观尺度的农业碳排放核算或单一作物的静态分析，主要侧重于水稻、玉米、小麦等农作物的研究，对马铃薯生产碳排放空间演变特征的研究相对较少。因此，从时空视角解析贵州省马铃薯生产碳排放演化规律，对优化农业低碳布局、推动区域碳中和进程具有重要理论与现实意义。研究马铃薯碳排放构成要素并系统探索其减排路径协同优化机制，是破解当前马铃薯产业“减排-增产”协同困境的关键路径。

1 研究区域与数据来源

1.1研究区概况。贵州省位于中国的西南的东南部，介于东经103°36’~109°35’、北纬24°37’~29°13’之间，北接四川省和重庆市，东毗湖南省，南邻广西壮族自治区，西连云南省。贵州省下辖6个地级市（贵阳市、遵义市、六盘水市、安顺市、铜仁市、毕节市）、3个自治州（黔西南布依族苗族自治州、黔东南苗族侗族自治州、黔南布依族苗族自治州），共9个地级行政区。贵州省地处云贵高原，境内地势西高东低，自中部向北、东、南三面倾斜。马铃薯在贵州省的种植分布广泛，海拔300至2400米均有大面积种植，且主要集中在黔中、黔北、黔西北等海拔800米以上的旱作区。贵州省马铃薯的种植面积大，种植面积的扩大可能会导致农资投入品的增加，从而增加碳排放量。因此贵州省马铃薯生产有很大的减排空间。

1.2数据来源。研究选取2010—2022年为研究年限，贵州省马铃薯种植面积、产量、化肥使用量、农膜使用量、农药使用量、农作物播种面积等数据来源于《贵州统计年鉴》、各地级市的统计年鉴。马铃薯生产过程中投入的化肥、农药、农膜、农用柴油等农资投入数据来自于《全国农产品成本收益资料汇编》计算得出。其中缺失值通过各地级市马铃薯种植面积与各地级市的农作物面积加权计算得出。马铃薯生产碳排放系数和能源消耗系数来源于相关文献和报告。

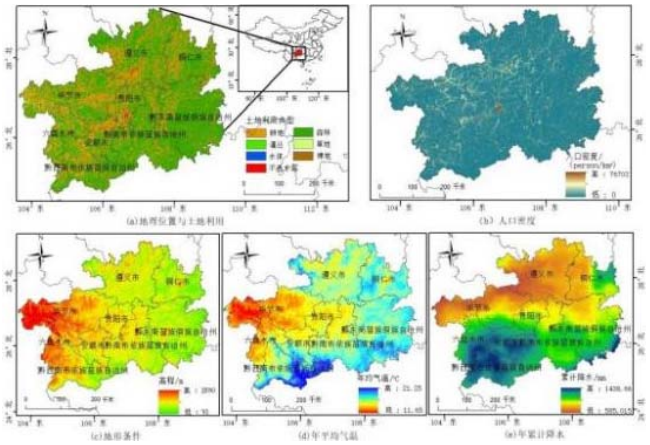

图1　研究区域

2 研究方法

马铃薯生产的碳排放主要由两个方面构成：一是农业生产资料使用所引发的碳排放，比如化肥、农药、农膜、农用柴油等；二是农田中的氮肥施用的N_2O的直接排放和大气沉降与淋溶径流引起的N_2O的间接排放所引发的碳排放。

2.1农业生产资料碳排放。马铃薯生产所使用的生产资料的碳排放主要包括化肥、农药、农膜、农用柴油、土地灌溉和土地翻耕6个方面的碳排放核算。公式如下：

$$CE_1 = \sum_{i=1}^{n} I_i \times E_i \quad (1)$$

式(1)中：i为第i种碳源，即为各种农资投入品；I_i为第i种碳源在马铃薯生产过程中的投入量；E_i为第i种碳源的碳排放系数，碳排放系数如表1所示。

表1　农资投入碳排放系数

分类	碳源	碳排放系数	来源
农用物资投入	化肥	0.8956kgC/kg	美国橡树岭国家实验室(ORNL)[11]
	农药	4.9341kgC/kg	美国橡树岭国家实验室(ORNL)[11]
	农用覆膜	5.1800 kgC/kg	南京农业大学农业资源与生态环境研究所(IREEA)[11]
	农用柴油	0.5927 kgC/kg	联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)[11]
农地利用	土地灌溉	266.48kgC/hm^2	段华平等[12]
	土地翻耕	312.6kgC/hm^2	中国农业大学生物与技术学院[11]

2.2土壤直接碳排放和间接碳排放。农田N_2O排放产生的主要原因是在农田中施用大量的氮肥后，农作物无法完全吸收，导致土壤中积累过量的氮素，微生物对这些氮素的硝化作用（需氧条件）和反硝化作用（缺氧条件）[13]。

文章类型：论文|刊号（ISSN）：2630-4678 /（中图刊号）：650GL004

(1)氮肥施用和秸秆还田所引发的直接碳排放。土壤直接碳排放主要来源于氮肥施用、有机物料还田以及土壤管理措施。本研究中只估算了农田施用氮肥和秸秆还田氮元素转化的碳排放量。公式如下：

$$CE_{2(D)} = (F_{NI} + F_{SR}) \times F_1 \times 81.2727 \quad (2)$$

式(2)中：F_{NI}为马铃薯种植过程中氮肥施用量(t)；F_{SR}为马铃薯秸秆还田中氮的还田量(t)；F_1为氮元素投入旱地的N_2O排放系数，贵州省农田N_2O排放系数为0.0106kg/kg[14]，依照《IPCC 2007指南》第四次评估报告，1tN20所引发的温室效应相当于81.2727tC所产生的温室效应[15]。

马铃薯秸秆还田是指地上秸秆还田氮量。公式如下：

$$F_{SR} = Y \times Z \times G \times F_2 \quad (3)$$

式(3)中：Y为马铃薯的产量(t)，Z为马铃薯的秸秆籽粒比；G为马铃薯的秸秆全氮含量(kg/kg)；F_2为马铃薯秸秆还田比例(%)。马铃薯各还田量参数数值见表2。

表2　马铃薯秸秆还田中氮的还田量参数

参数	数值	参考来源
秸秆籽粒比	0.5	《省级温室气体清单编制指南(试行)》(国家发展改革委,2011)
秸秆全氮量(kg/kg)	0.011	
秸秆还田比例(%)	20	张强等[16]

(2)大气沉降与淋溶径流引发的间接碳排放。农田N_2O间接排放主要有两个方面：一是大气氮沉降，化肥和有机肥中的部分的氮会挥发成NH_3和NO_x，进入大气后经化学反应又以气态氮的形式沉降到土壤，再经过土壤中的硝化作用和反硝化作用，产生N_2O并释放到大气中；二是氮淋溶及流失，在降雨或灌溉等作用下，农田土壤中的氮素会有一部分以硝酸盐等形式淋溶到地下水或流失到地表水体中，再经过微生物的作用，产生N20并释放到大气中。公式如下：

$$CE_{2(I)} = \left(CE_{2(I-S)} + CE_{2(I-R)}\right) \times 81.2727 \quad (4)$$

式(4)中：$CE_{2(I-S)}$为大气沉降所引发的N_2O排放量(10^4t)；$CE2_{I-R}$为淋溶径流所引发的N_2O排放量(10^4t)。

大气沉降所引发的N_2O排放量计算公式如下：

$$CE_{2(I-S)} = F_{NI} \times F_{AS} \times F_3 \quad (5)$$

式(5)中：F_{AS}为大气沉降比例，根据《省级温室气体清单编制指南》(试行)，取值10%；F_3为大气沉降引起的N_2O间接排放因子，排放因子采用《IPCC1996指南》的默认值0.01[17]。

淋溶径流所引发的N_2O排放量计算公式如下：

$$CE_{2(I-R)} = F_{NI} \times F_{LR} \times F_4 \quad (6)$$

式(6)中：F_{LR}为淋溶和径流率，根据《省级温室气体清单编制指南》(试行)，取值20%；F_4为淋溶径流引起的N_2O间接排放因子，排放因子采用《IPCC2006指南》提供的默认值0.0075[18]。

3 结果与分析

3.1碳排放时间变化特征。本文通过核算得到了贵州省2010-2022年间马铃薯生产碳排放量(图2)。整体来看，2010-2022年贵州省马铃薯生产碳排放呈现先增加后减少的趋势，总体呈上升趋势，由2010年52.89×10^4t增加至2022年的71.49×10^4t，年均增长率为2.54%。2010-2020年呈波动上升趋势，由52.89×10^4t上升到2020年的89.01×10^4t，年均增长率为4.43%；2020年为马铃薯碳排放最大年；2021-2022年开始回落，回落至71.49×10^4t，比2020年下降了17.51×10^4t，下降幅度为19.67%。从2021年开始碳排量大幅下降，表明贵州省在马铃薯生产中大力推行碳减排政策。碳排放强度先下降后上升在下降的趋势，说明每一吨产量所产生的碳排放量先下降后上升再下降。

根据各项碳排放源可以得出，农业生产资料碳排放量占碳排放总量的主要部分，其整体碳排放量呈现上升的趋势，其中农业生产资料中化肥碳排放占主要的碳排放，2010年化肥碳排放量为35.84×10^4t，占比为67.76%，2022年化肥碳排放量为42.94×10^4t，占比为60.06%，化肥碳排放量的占比均大于60%；在2020年所有碳源碳排放都处于下降趋势；土壤碳排放量总体呈现下降趋势，期间有部分年份有所上升，由2010年5.99×10^4t下降至2022年4.87×10^4t；随着社会的发展，人工翻耕工作逐渐交给传统农机作业，将人工与农机相结合的翻耕作业，致使翻耕过程中碳排放量不断增加。

图2　2010—2022年贵州省马铃薯碳排放量时序变化

3.2贵州省马铃薯碳排放空间变化特征。本研究基于Arcgis10.8以2010年、2014年、2018年和2022年为代表年对贵州省各地级市马铃薯碳排放总量进行空间分析，如图3所示。2010年—2022年间贵州省碳排放呈现“西北高、东南低”的空间分布格局，其碳排放量最多的城市是遵义市和毕节市。具体来看，2010年毕节市是贵州省马铃薯碳排放的高值区，碳排放总量为17.10×10^4t，占全省碳排放的32.33%，其次是遵义市，碳排放总量为15.18×10^4t，占全省碳排放的28.70%，毕节市和遵义市碳排放之和已经超过了贵州省总碳排放的一半，黔西南布依族苗族自治州是低值区，碳排放总量为0.87×10^4t。2022年毕节市碳排放总量为26.85×10^4t，占全省碳排放的37.56%，遵义市碳排放总量为17.90×10^4t，占全省碳排放的25.04%。总

之，2010-2022年，毕节市一直是贵州省马铃薯碳排放量的高值区域，其占比在逐年增加，其次是毕节市，两个城市的碳排放量之和都超过了全省的一半。因此，毕节市和遵义市是贵州省马铃薯碳减排的高度关注的地区。

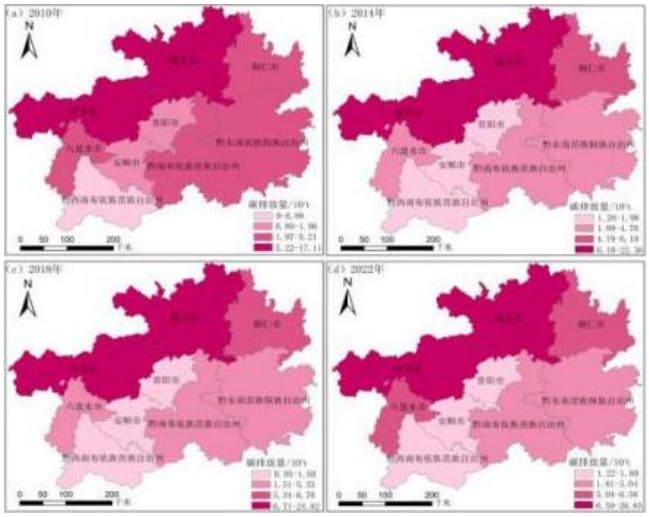

图3　2010—2022年贵州省马铃薯碳排放量空间变化

4 结论与建议

本研究结合马铃薯生产中各品种的碳排放系数，量化了贵州省马铃薯生产碳排放。结果表明，2010-2022年贵州省马铃薯碳排放总量呈现先上升后下降的趋势，表明贵州省在绿色农业发展向好趋势，在2020年碳排放量最大，为89.26×10^4t；碳排放构成中，马铃薯生产肥料所占比例最大，综合占比为60%左右。贵州省各地级市碳排放差异明显，整体呈现“西北高、东南低”的空间分布格局，其排放量靠前的城市是遵义市和毕节市。

基于以上结论，本文提出以下建议。

优化肥料施用管理。推广精准施肥技术，采用测土配方施肥，根据土壤养分含量和马铃薯需肥规律控制氮磷钾用量，避免过度施肥；增加有机肥替代比例，鼓励施用农家肥、绿肥或秸秆还田，部分替代化肥，提升土壤有机碳储存量，实现“固碳减排”；优化施肥方式，推广深度覆土、水肥一体化技术，提高肥料利用率，降低挥发和淋溶损失。

针对区域差异实施分区施策。针对碳排放空间分布差异，对西北部高排放区域如遵义、毕节实施重点管控，强化农业面源污染治理与低碳技术推广；在东南部低排放区推进生态种植模式，打造绿色低碳示范带。结合地方种植习惯与资源禀赋，制定差异化减排路径，提升区域政策精准性与实施效能。

强化田间管理减排。采用少耕、免耕技术，减少农机燃油消耗和土壤有机碳矿化；推广滴灌、喷灌等节水设施，降低抽水能耗；在规模化农场试点太阳能、生物质能替代柴油电力。

政策保障与跨区域协作。对西北高排放区农民提供低碳农资补贴（如有机肥、缓释肥），东南地区奖励生态保护行为；联合高校与企业，培育氮高效利用型马铃薯品种，研发低碳耕作机械；鼓励东南低碳区通过碳交易市场向西北高排放区输送技术收益，促进全省协同减排。

[参考文献]

[1]张昱恒,陈丹.浙江省农业温室气体排放时空特征及驱动因素分析[J].环境工程学报,2025,46(06):1-12.

[2]Ma X,Jiang P,Jiang Q.Research and application of association rule algorithm and an optimized grey model in carbon emissions forecasting[J].Technological Forecasting & Social Change,2020,52(01):158.

[3]Tian Guiliang,Yu Suwan, Wu Zheng,Xia Qing.Study on the Emission Reduction Effect and Spatial Difference of Carbon Emission Trading Policy in China[J].Energies,2022,15(5).

[4]凌再莉,乔立达,王润雨,等.全球农业贸易中隐含碳排放转移及其影响因素分析[J].中国环境科学,2025,45(06):1-14.

[5]范紫月,齐晓波,曾麟岚,等.中国农业系统近40年温室气体排放核算[J].生态学报,2022,42(23):9470-9482.

[6]金书秦,林煜,牛坤玉.以低碳带动农业绿色转型:中国农业碳排放特征及其减排路径[J].改革,2021,(05):29-37.

[7]孙莉莉,陈海生.甘肃省马铃薯产业高质量发展研究[J].中国马铃薯,2022,36(06):565-572.

[8]韩欣怡,韩雪,李廷亮,等.中国马铃薯分省碳足迹核算与减排策略研究——基于生命周期评价法[J].中国农业资源与区划,2024,45(01):11-19.

[9]吴承敏,任海利.基于国土空间格局变化的碳代谢过程及其空间分异特征——以贵州省为例[J].长江流域资源与环境,2025,34(03):627-640.

[10]张再杰,陆品妮.农业碳排放的测度与脱钩弹性研究——以贵州省为例[J].农村经济与科技,2022,33(13):1-3.

[11]李国柱,康冬蕾.河北省农业碳排放的时空分布、脱钩特征及驱动因素研究[J].北方园艺,2025,49(11):1-15.

[12]段华平,张悦,赵建波,等.中国农田生态系统的碳足迹分析[J].水土保持学报,2011,25(05):203-208.

[13]曹文超,宋贺,王娅静,等.农田土壤N2O排放的关键过程及影响因素[J].植物营养与肥料学报,2019,25(10):1781-1798.

[14]严圣吉,尚子吟,邓艾兴,等.我国农田氧化亚氮排放的时空特征及减排途径[J].作物杂志,2022,38(03):1-8.

[15]吴义根,冯开文.中国省际农业碳排放的时空分异特征及关联效应[J].环境科学与技术,2019,42(03):180-190.

[16]张强,巨晓棠,张福锁.应用修正的IPCC2006方法对中国农田N2O排放量重新估算[J].中国生态农业学报,2010,18(1):7-13.

[17]李丹青,王云琦,王震,等.三峡库区N2O时空分布差异及减排潜力分析[J].长江流域资源与环境,2024,33(01):150-162.

[18]韩云芳,韩圣慧,严平.基于区域氮循环模型IAPN的安徽省农用地N2O排放量估算[J].环境科学,2015,36(07):2395-2404.

作者简介：

祝珊珊(2001--),女,汉族,重庆市开州区人,硕士,研究方向:资源与环境。