

四川盆地丘陵区农业源甲烷排放 时空变异特征及驱动因素

李昱菡, 郑子成, 王永东, 李廷轩

(四川农业大学 资源学院, 成都 611130)

摘要:为探讨四川盆地丘陵区农业源 CH_4 排放特征,采用 IPCC 排放因子法估算 2007—2017 年农业源 CH_4 排放量,运用重心模型、Getis-Ord G_i^* 指数检验和 PLS-STIRPAT 模型,探讨区域 CH_4 排放的时空变化特征及驱动因素。结果表明:(1) 2007—2017 年,盆地丘陵区农业源 CH_4 排放量达(32.52~35.93)万 t,其中种植业、畜禽养殖业排放占比分别为 44.54%~48.26%和 51.75%~55.46%,总排放量呈现出随年限增加而降低的趋势,与养殖业 CH_4 排放密切相关。(2) 2007—2017 年,盆地丘陵区农业源 CH_4 排放重心总体向东北方向迁移;高排放聚集区主要位于研究区东北部,呈现出扩张的趋势,低排放聚集区主要位于西南部,与高值聚集区呈现出相反的缩减趋势。(3) 驱动因素中,总人口、农业从业结构和农业产值结构对农业源 CH_4 排放起到正向促进作用,城镇化率、单位面积施肥量、人均耕地占有量、人均 GDP 和农村用电量对农业源 CH_4 排放起控制作用。其中农业产值结构是推动研究区 CH_4 增长的重要因素。综上,盆地丘陵区农业源 CH_4 排放水平较高,时空分布差异变动较小,通过农业生产集约集中规模化可有效降低农业源 CH_4 的排放量。

关键词:甲烷; 时空分布; STIRPAT 模型; 驱动因素

中图分类号:X71; S181

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2022)05-0178-07

Spatiotemporal Variability of Agricultural Methane Emissions in the Hilly Area of Sichuan Basin and Its Driving Factors

LI Yuhan, ZHENG Zicheng, WANG Yongdong, LI Tingxuan

(College of Resources, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130, China)

Abstract: In order to understand the characteristics of CH_4 emission from agricultural sources in hilly areas of Sichuan Basin, the method of IPCC was used to measure agricultural CH_4 emission in hilly areas of Sichuan basin from 2007 to 2017, and barycenter model, Getis-Ord G_i^* , PLS-STIRPAT model were used to analyze the spatiotemporal distribution of methane emissions and its major driving factors. The results show that: (1) the agricultural CH_4 emissions in the hilly area of Sichuan Basin was up to $(3.252 \sim 3.593) \times 10^5$ tons in 2007—2017; the sources of crop farming and livestock and poultry industry accounted for 44.54%~48.26% and 51.75%~55.46%, respectively; the agricultural CH_4 emissions showed a decrease trend, and this may be related to the decrease of CH_4 emissions from the livestock and poultry industry; (2) the barycenter of agricultural CH_4 emission tended to move to the northeast finally along with increasing time; the high CH_4 emission gathering area was mainly located in the northeast, showed an expanding trend, and its high emissions increased significantly over time; on the contrary, the low CH_4 emission gathering area was mainly located in the southwest, showed an opposite trend; (3) the total population, agricultural employment structure, and agricultural output structure played the positive role in agricultural CH_4 emissions; the urbanization rate, fertilization amount per unit area, arable land occupation per capita, GDP per capita, and rural electricity consumption showed the negative effect on agricultural CH_4 emissions; the agricultural output structure was the most important factor that promoted the agricultural CH_4 emissions in the study area. In

收稿日期:2021-04-21

修回日期:2021-08-23

资助项目:四川农业大学学科建设特色创新团队项目“农田养分资源利用及环境效应”(2021-2023)

第一作者:李昱菡(1996—),女,四川南充南部人,硕士研究生,主要从事土壤生态研究。E-mail: yhanli@qq.com

通信作者:郑子成(1976—),男,内蒙古乌兰察布人,博士生导师,教授,主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail: zichengzheng@aliyun.com

summary, the CH₄ emission level of agricultural methane emission in hilly areas of Sichuan basin is relatively high, and the difference of spatio-emporal distribution changes little. The agricultural methane emission can be effectively reduced through the intensive and centralized scale of agricultural production.

Keywords: methane; temporal and spatial distribution; STIRPAT model; driving factors

温室气体浓度的上升往往会造成干旱、高温等极端气候环境问题^[1-3],严重制约着区域农业与经济可持续发展。虽然大气中甲烷(CH₄)的含量要小于二氧化碳(CO₂),但其增温效率却远高于 CO₂。有研究表明,20 a 时间尺度上,CH₄ 单位质量的全球增温潜势是 CO₂ 的 86 倍^[4]。可见,CH₄ 排放对区域气候环境影响深远、持久。然而针对温室气体减排政策方面,多数学者关注能源部门,却忽略了农业源温室气体排放的重要性^[5]。全球频繁的农业活动造成了近 50% CH₄ 的排放^[6],其排放源主要包括水稻种植和畜禽养殖。因此,开展农业源 CH₄ 排放特征及驱动因素研究,不仅有助于缓解我国减排目标的压力,对区域粮食安全生产以及农业持续发展也具有重要的现实意义。

目前就农业源 CH₄ 排放的研究主要集中于 2 个方面:一是基于水稻种植与畜禽养殖排放源,获得省域层面的 CH₄ 排放量及时空分布特征^[7-11];二是多数学者将 CH₄ 并入 CO₂,以 kaya 碳排放恒等式进行影响因素分解为主,不同区域的结构、效率和人口因素对碳排放的驱动作用虽有较大差异,但是普遍认为经济规模是导致碳排放增加的主导因素^[12-14]。若将农业源 CH₄ 并入 CO₂ 进行探讨,难以明晰 CH₄ 排放具体特征。且采用 Kaya 恒等式进行影响因素分析,由于纳入等式因素限制,往往会忽略其他重要的影响因素。此外,由于地形地貌、气候等均是影响农业活动的重要因素,但目前农业源 CH₄ 的研究多集中在省域尺度,开展不同区域 CH₄ 排放研究尤为必要。

四川省是西南重要的农业区,农业碳排放居西南首位^[15],盆地丘陵区作为农业的核心地带,素有“四川粮油产区”称号。盆地丘陵区生猪饲养量占四川省 51.08% (《四川统计年鉴》),也是全省的“生猪产区”,农业活动频繁。鉴于此,本文以盆地丘陵区为研究对象,在估算农业源 CH₄ 排放量的基础上,探讨县域农业源 CH₄ 排放时空分布特征及其驱动因素,以期为制定区域农业源 CH₄ 减排措施和实现农业绿色发展提供理论依据。

1 研究方法 with 数据来源

1.1 研究区概况

研究区位于四川盆地丘陵区,介于 103.88°—108.01°E, 28.45°—32.06°N,主要包括南充、绵阳、内江等 53 个市(区、县),土地面积约 8 万 8 000 km²。

区域内农业人口多,农业活动频繁。耕地面积为 3 万 km²,属于亚热带季风性气候,以种植粮食作物为主(水稻、小麦),是四川主要粮食产区。据统计,2017 年,粮食播种面积为 344 万 1 200 hm²,超过全年农作物播种面积的 65%。养殖业发展受益于区域的种植业,以猪、家禽为主,2017 年,猪和畜禽出栏量分别为 0.22 亿只和 0.20 亿羽,养殖量均超过全省的 50%。

1.2 数据来源

本文水稻播种面积,猪、牛、羊、兔、家禽年末存栏量和年出栏量、城镇化率、总人口、农业从业人员、农村从业人员、化肥施用量、全年农作物总播种面积、农耕地面积、地区生产总值、第一产业产值、农村用电量,均收集于《2008—2018 年四川省统计年鉴》和《2008—2018 年四川年鉴》,生命周期取值参考孟祥海等^[16]。估算水稻种植 CH₄ 排放量的排放系数参考《省级温室气体清单编制指南》,取值 156.2 kg/ hm²;畜禽养殖业估算猪、牛、羊、兔、家禽的 CH₄ 排放量,其主要的排放系数参考《2006 年 IPCC 国家温室气体清单指南》^[17]。

1.3 CH₄ 排放量估算

水稻种植 CH₄ 排放参照徐兴英等^[9]估算公式,依据《省级温室气体清单编制指南》确定稻田 CH₄ 排放因子估算 CH₄ 排放量:

$$R = \sum E \times A \times 10^{-6} \quad (1)$$

式中:R 为稻田 CH₄ 排放总量(Gg);E 为稻田 CH₄ 排放因子(kg/ hm²);A 为水稻播种面积(hm²)。

肠胃发酵 CH₄ 排放参照徐兴英等^[9]方法,依据《2006 年 IPCC 国家温室气体清单指南》确定 CH₄ 排放因子估算 CH₄ 排放量:

$$T = \sum F_i \times P_i \times 10^{-7} \quad (2)$$

式中:T 为动物肠胃 CH₄ 排放总量(10⁴ t CH₄/a);F_i 为第 i 种动物的 CH₄ 排放因子[kg/(头·a)];P_i 为第 i 种动物的数量。

由于饲养量处于动态变化,因此本文参照孟祥海等文献^[16]的方法,年均饲养量将根据该年年出栏量以及年末存栏量进行调整,当年出栏量小于年末存栏量,则年均饲养量利用该年与上一年年末存栏量的平均值来表示,当年出栏量大于年末存栏量,则利用公式(3)进行调整。

$$P_i = D \times \frac{N_i}{365} \quad (3)$$

式中:P_i为 i 类动物年均饲养量(头、只);N_i为 i 类动

物的年出栏量(头、只); D 为生命周期(d)。

粪便管理系统 CH_4 排放参照徐兴英等^[9]方法,依据《2006 年 IPCC 国家温室气体清单指南》确定 CH_4 排放因子估算 CH_4 排放量:

$$M=\sum U_i\times P_i\times 10^{-7}\tag{4}$$

式中: M 为动物粪便管理系统发酵 CH_4 总排放量($10^4\text{ t CH}_4/\text{a}$); U_i 为第 i 种动物粪便管理 CH_4 排放因子 $[\text{kg}/(\text{头}\cdot\text{a})]$; P_i 为第 i 种动物的数量。

1.4 时空分布特征

空间特征分析均基于 ArcGIS 实现,空间关系采用 CONTIGUITY_EDGES_CORNERS。采用重心模型探讨盆地丘陵区 2007—2017 年农业源 CH_4 排放重心的变化趋势,并在重心模型的基础上,选取典型年限,运用局部自相关(Getis-Ord G_i^* 指数检验)分析该年份的农业源 CH_4 排放的空间分布特征。其重力模型的公式如下^[18]:

$$\overline{X}=\frac{\sum_{i=1}^nQ_i\times X_i}{\sum_{i=1}^nQ_i}\tag{5}$$

$$\overline{Y}=\frac{\sum_{i=1}^nQ_i\times Y_i}{\sum_{i=1}^nQ_i}\tag{6}$$

式中: $\overline{X},\overline{Y}$ 分别为区域某要素空间重心横、纵坐标; Q_i 为平面 i 的质量和权重(本研究为 CH_4 排放量); X_i,Y_i 分别为平面 i 点的横、纵坐标。

其中局部自相关的计算公式^[19]:

$$G_i^*=\frac{\sum_{j=1}^nW_{ij}X_j-\overline{X}\sum_{j=1}^nW_{ij}}{\sqrt{\frac{[n\sum_{j=1}^nW_{ij}^2-(\sum_{j=1}^nW_{ij})^2]}{n-1}}}\tag{7}$$

式中: G_i^* 为 Z 值得分; n 表示县级行政区划的个数; X_j 是行政区划单位 j 的属性值; W_{ij} 为空间权重矩阵。

1.5 驱动因素分析

采用扩展后的 STIRPAT 模型进行驱动因素分析,计算公式如下^[20]:

$$I=aP^gA^hT^sG^je_i\tag{8}$$

式中: I 表示 CH_4 排放量; P 表示总人口; A 表示富裕度; T 表示技术水平; G 为农业内部影响因素; a 为模型系数; e_i 为模型误差; g,h,s,i 为弹性系数,表示当 P,A,T,G 每变动 1%,则 I 分别变动 $g\%,h\%,s\%,j\%$ 。

对方程两边同时取底为 e 的对数,则公式(1)则可变为多元线性方程,其公式如下所示:

$$\ln(I)=\ln(a)+g\ln(P)+h\ln(A)+s\ln(T)+j\ln(G)+t\ln(e)\tag{9}$$

为避免自变量之间存在高度共线性干扰模型的准确性,因此本文运用偏最小二乘法进行模型回归分析,考虑纳入模型中的变量以及含义见表 1。

表 1 变量及其描述

变量符号	变量名称	变量说明	单位
Y	甲烷排放量	—	t
X_1	城镇化率	城镇人口/总人口	量纲为一
X_2	总人口	—	人
X_3	农业从业结构	农业从业人员/农村从业人员	量纲为一
X_4	单位面积施肥量	化肥施用量/全年农作物总播种面积	kg/hm ²
X_5	人均耕地占有量	耕地面积/总人口	hm ² /人
X_6	人均 GDP	地区生产总值/总人口	元/人
X_7	农业产值结构	第一产业产值占总产值的比例	量纲为一
X_8	农村用电量	—	10 ⁴ kWh

注:为消除价格带来的影响,表格人均 GDP 以及农业产值结构均调整到以 2007 年为基准的可比价格。

2 结果与分析

2.1 农业源 CH_4 排放量估算

由图 1 可知,2007—2017 年期间盆地丘陵区农业源 CH_4 排放总量达 32.52~35.93 万 t,随着时间的推移,农业源 CH_4 排放总量总体呈降低的趋势。2007—2017 年期间,研究区种植业和畜禽养殖业 CH_4 排放量分别达到 15.50~16.05 万 t 和 19.93~16.83 万 t,分别约占排放总量的 45.9%和 54.1%,表明研究区 CH_4 排放是以畜禽养殖业为主导。研究区畜禽养殖业 CH_4 排放量与 CH_4 排放总量呈相似的变化趋势。种植业 CH_4 排放量在这 11 a 期间呈波动变化趋势,但其占比却呈逐年增加的趋势。

2.2 农业源 CH_4 排放时空变异特征

以县级行政区为单位,采用重心轨迹迁移法分析盆地丘陵区 2007—2017 年期间农业源 CH_4 排放特征,该区域的重心轨迹图见图 2。2007—2017 年期间,盆地丘陵区 CH_4 排放重心迁移方向并非固定的,其向北、东、西南、东北方向分别迁移 1,1,3,3 次,总体随时间推移呈现出向东北方向迁移的趋势。就偏移角度和距离而言,东北部的县(区、市) CH_4 排放量的变化程度要高于西南部。经度上的移动趋势要较纬度明显,说明东西方向上县(区、市)的变化程度较南北方向上明显,2007—2017 年研究区各县(区、市)的 CH_4 排放情况随着时间变化较大。为了更好地探讨研究区各县(区、市) CH_4 排放的时空分布特点,依据重心轨迹图选取了典型的 2007 年、2011 年、2017 年,运用局部自相关分析方法以揭示盆地丘陵区各县(区、市)的时空分布变化规律。

由图 3 可知,2011—2017 年期间,研究区 CH_4 排放量的聚集区总体呈“东北高、西南低”的分布特征,且高值聚集区的辐射范围要远大于低值聚集区。 CH_4 排放量高值聚集区主要包括巴州区、大竹县、达

川区、营山县、平昌县、仪陇县和渠县。 CH_4 排放量低值聚集区包括大安区、贡井区、自流井区和沿滩区。就时间上尺度而言, CH_4 排放量高值聚集区呈扩张的变化趋势,2011 年阆中市进入高值聚集区,且该聚

集区高值随时间推移显著增加; CH_4 排放量低值聚集区却呈相反的变化趋势,随时间推移总体呈显著下降的趋势,到 2017 年,沿滩区低值显著性消失,这也印证了 CH_4 排放重心模型的结果。

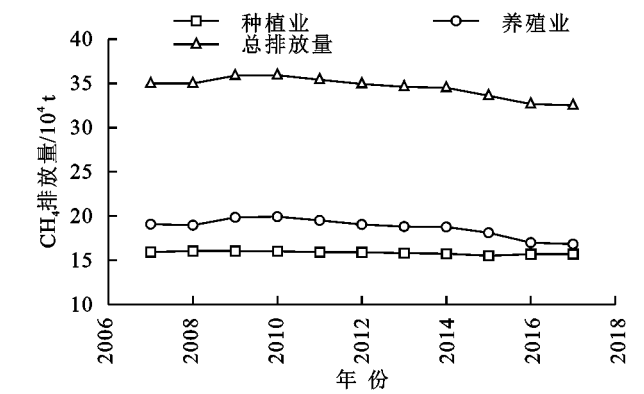


图 1 2007—2017 年盆地丘陵区各排放源 CH_4 排放量及贡献率

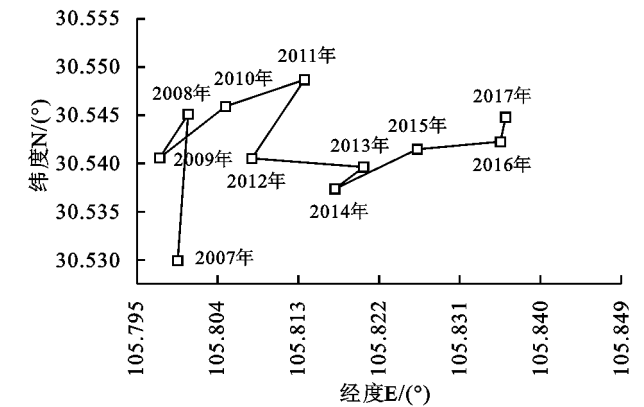
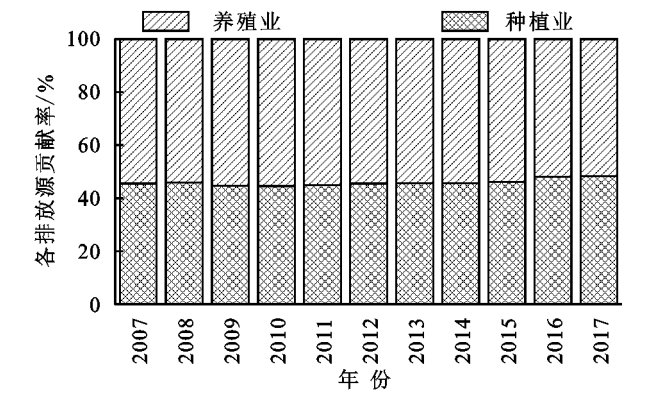


图 2 盆地丘陵区农业源 CH_4 排放重心轨迹

2.3 农业源 CH_4 排放驱动因素结果

高度共线性的数据会导致假拟合现象,不同量纲的变量会产生异方差,因此首先对原始影响因素分析数据取对数处理,消除异方差,并使原始模型方程变为多元线性方程,再运用 R 语言的 VIF 函数对转换后的数据进行多重共线性诊断,结果见表 2。一般认为当 VIF 值大于 10,数据存在多重共线性^[21],由表 2 可知,除施肥量的 VIF 值接近 10 外,其余驱动因素 VIF 值均大于 100,则表明数据存在着严重的多重共线性。

为了避免变量之间的多重共线性扰乱模型,运用偏最小二乘法(PLS)回归 STIRPAT 模型。由表 3 可知,回归模型的拟合优度为 0.685 6,表明总体结果较准确。从回归结果看,城镇化率、单位面积施肥量、人均耕地占有量、人均 GDP 以及农村用电量均对农业源 CH_4 排放起到控制作用,回归系数分别为 0.024 0, 0.000 9, 0.025 9, 0.025 1, 0.011 8;总人口、农业从业结构和农业产值结构对农业源 CH_4 排放起到促进作用,回归系数分别为 0.006 7, 0.002 5, 0.017 0。在各驱动因素中,人均耕地占有量对农业源 CH_4 排放的影响最大。

3 讨论

3.1 农业源 CH_4 排放时空特征分析

四川盆地丘陵区农业源 CH_4 排放水平较高,与福建省 2006—2010 年农业源 CH_4 平均排放量(33.12 万 t)相接近^[6],这与研究区农业布局及人类农业活动密切相关。四川省立足于区域实际,一直致力于农业现代化建设,依据自然资源及农业特色,规范形成“四区四基地”,加快由农业大省向农业强省过渡。研究区耕地面积约占全省总量的 50%,承担着“全国优质粮油产品生产基地”重任,2007—2017 年期间,研究区全年农作物播种面积和水稻播种面积均超过全省 50%。“全国国家商品猪战略保障基地”落户于丘陵区,2007—2017 年期间,生猪和家禽养殖量也超过全省的 50%。但研究区农业源 CH_4 排放总体呈下降的趋势,主要由于(1) 2007 年前,由于粮食价格低下,粮食产量下降,国家通过压缩粮食型畜牧业生产加以调控^[22],导致研究区畜禽养殖量在这 11 a 期间总体上呈现减小的变化趋势,如猪、牛、羊、家禽的养殖量分别下降了 15.69%, 2.37%, 31.41% 和 0.73%,仅兔的养殖量增加 9%,但其不足以抵消反刍类动物养殖量下降所导致的排放量减少;(2) 另一方面,四川省畜禽养殖业的相关减排政策也起到了关键作用。四川省于 2011 年被列入减排试点省,随后陆续出台畜禽养殖业的《污染物减排》和《废弃物资持续利用》等文件,四川省养殖业 CH_4 减排成效显著。11 a 期间,研究区耕地面积的变化虽受国家“退耕还林”等政策的影响,但后续实施“占补平衡”、“永久基本农田划定”等措施^[23-24],且 2005 年后,国家免除农业税政策,调动了农民生产积极性^[25],因此水稻播种面积变幅较小,故种植业 CH_4 排放量较为稳定。

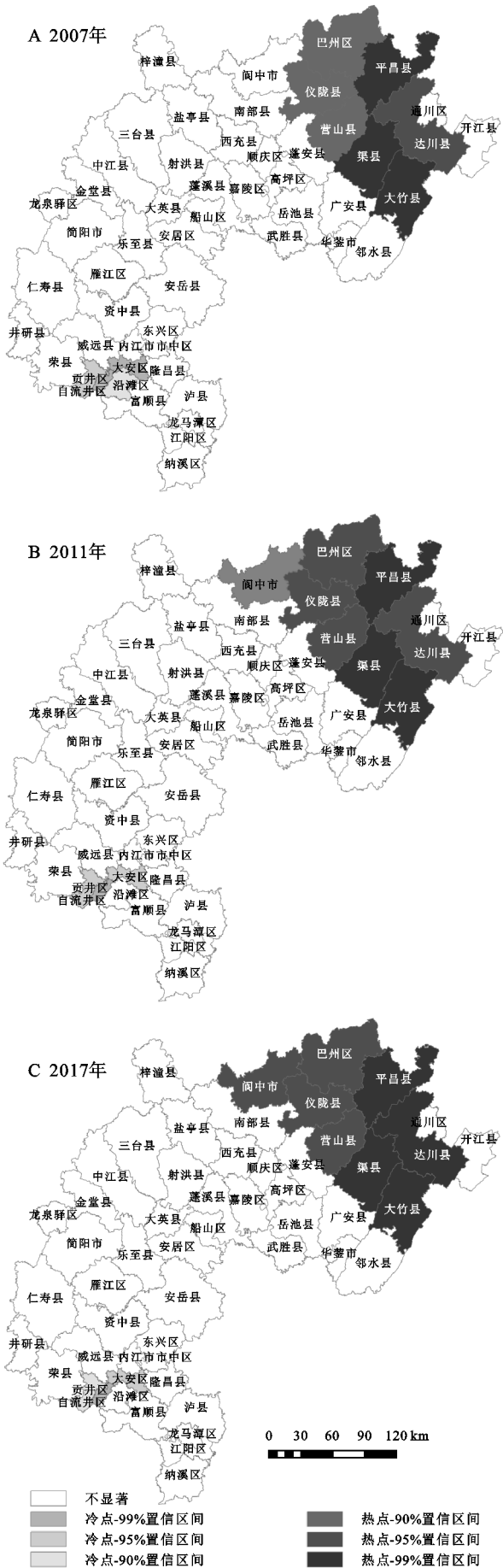


图3 盆地丘陵区农业源CH₄排放量聚集特征演变趋势

表 2 多重共线性诊断结果

变量	$\ln(X_1)$	$\ln(X_2)$	$\ln(X_3)$	$\ln(X_4)$	$\ln(X_5)$	$\ln(X_6)$	$\ln(X_7)$	$\ln(X_8)$
VIF	659.43	148.84	142.7	10.03	118.03	109.96	133.6	163.83

表 3 PLS 回归结果

变量	回归系数	标准误差	T 检验值	p 值	R ²
$\ln(X_1)$	-0.0240	0.0062	-3.8577	0.0032	0.6856
$\ln(X_2)$	0.0067	0.0020	3.3565	0.0073	
$\ln(X_3)$	0.0025	0.0005	4.8652	0.0007	
$\ln(X_4)$	-0.0009	0.0004	-2.5220	0.0302	
$\ln(X_5)$	-0.0259	0.0073	-3.5266	0.0055	
$\ln(X_6)$	-0.0251	0.0049	-5.1152	0.0005	
$\ln(X_7)$	0.0170	0.0033	5.1949	0.0004	
$\ln(X_8)$	-0.0118	0.0023	-5.2409	0.0004	

研究区各县(区、市)CH₄ 排放量表现出一定的空间依赖性^[26], 低值聚集区主要位于自贡市的大安区、贡井区、自流井区和沿滩区, 这些区域主要以农业生产强镇及现代化农业产业园为核心, 以发展观光旅游休闲农业为主攻方向, 促进农业与二、三产业相互融合; 农业生产在一定范围内得到高度集中, 依托当地自然资源优势, 通过降低、交换生产成本, 提升经济规模效益和竞争力。如贡井区形成以“菜—稻”轮作模式为基准的蔬菜产业带, 并已在西南地区形成固定的产销体系; 沿滩区结合种养模式, 建设优质的农牧产品特色产业基地, 形成了有特色的立体、循环农业生产体系。同时自贡市致力于农村科技新技术、新模式的推广, 积极开展农村科普活动, 引导农村科技在区域内充分扩散, 带动技术及资源的空间溢出效应加速释放^[27], 导致低值聚集区的显著性逐年降低。高值聚集区主要包括巴州区、阆中市、仪陇县、营山县、渠县、大竹县、达川区和平昌县区域, 且高值显著性逐年增加。盆地丘陵区素有“四川粮油产区”称号, 2017 年 7 个县(区、市)粮油产量均达到 40~60 万 t, 其中水稻播种总面积占到盆地丘陵区的 8%~22%, 奠定了种植业高 CH₄ 排放基础。由于地理位置相邻, 这些县(区、市)在农业产业化及产业园区建设的同时, 以扩大生产规模为主攻方向, 以“公司”、“合作社”、“专业市场”+“农户”的带动模式, 形成了一定数量的标准化种植业基地、养殖场和种养结合示范园区, 加快了当地特色农业产业的转型, 并带动相邻县(区、市)以这种方式向其靠拢, 使得高排放聚集区显著性增加且出现扩张趋势。

3.2 农业源 CH₄ 排放驱动因素分析

研究区人均耕地占有量、人均 GDP、城镇化率、

农村用电量和单位面积施肥量对研究区 CH_4 排放具有一定控制作用。人均耕地占有量可反映农地规模化集约集中经营的程度,规模化集约集中经营能够科学的管理农业生产中投入品的种类、用量和时间,减少农业生产过程中不必要的投入^[28],进而减少因施肥过量、饲料种类及用量添加不合理等,引起种植业、养殖业 CH_4 排放增多的现象,有利于促进低碳农业经济。人均 GDP 主要通过影响居民生活消费方式和驱动产业结构的转变。有研究表明,随着居民消费水平的提高,人们更加倾向于购买碳排放量更高的商品^[29],这一需求也驱动产业结构的转变,据统计资料可知,研究区第一、二、三产业的 GDP 比例分别从 2007 年的 27.37 : 42.01 : 30.62,转变为 2017 年的 14.93 : 48.58 : 36.49,由于产业结构逐渐调整,产出重心从传统农业耕作,向更高收益的第二、三产业转移,增加了人均 GDP,进而降低了农业源 CH_4 的排放。2007—2017 年期间,研究区平均城镇化率从 22.09% 提升到 47.51%,城镇化发展会使工业、住宅等建设用地扩张,引起人口向城市转移,提高居民及农业从业者的生态保护意识,直接或间接降低农业源 CH_4 的排放^[30]。但也有研究结果表明,城市的发展对碳排放同时存在促进和控制作用^[31]。

2007—2017 年期间,研究区平均农村用电量提升幅度达 59.59%,表明区域农村基础建设为农耕机械以及新型环境友好型技术的运用奠定了坚实基础,农业科技的运用较为普遍,施肥、机械耕作、收割、灌溉、饲料全自动化等机械化技术有助于减少农资的投入量,同时一些区域新型环境友好型农业投入品及设备的使用,均有助于减少农业源的 CH_4 排放,这与戴小文等研究结果一致^[32],但机械化技术的应用,也可能导致能源碳排放量的增加。单位面积施肥量反映施肥强度,化肥施用对农田 CH_4 排放影响的研究结果不尽相同,稻田 CH_4 的排放并不是单一因素控制,同时受土壤性质、自然条件以及人为措施共同调控^[33-34],本文的结果表明了单位面积的施肥量对研究区农业源的 CH_4 排放起着控制作用。第一产业产值、总人口和农村从业结构促进了研究区农业源 CH_4 的排放。其中,农业产值结构对农业源 CH_4 的排放影响最为明显,这与王兴等^[15]研究结果较为一致。为发展农业经济,驱动农业经营规模及发展,进而影响农业 CH_4 排放。而不论是总人口还是从事农业人口数量多少均对研究区的 CH_4 排放起着促进作用,两者均会导致农业经营规模的扩大及发展,前者

通过总人口对农产品的需求,间接作用于农业经营规模,而后者直接作用于农业经营规模,促进农业源 CH_4 的排放。

4 结论

(1) 2007—2017 年期间,盆地丘陵区农业源 CH_4 排放量在 32.52~35.93 万 t,排放水平较高,与四川省农业区布局及含有较多现代农牧业重点建设县有关。排放量总体呈现随年限增加而降低的趋势,与粮食价格低迷和畜禽养殖业减排政策的颁布及实施有着密不可分的关系。

(2) 2007—2017 年期间, CH_4 排放重心随时间推移,总体上呈现向东北方向移动的趋势;空间上呈“东北高,西南低”的分布特征,这与西南区技术空间溢出效应的充分释放,以及东北部农牧规模化产业扩大有着密切的联系。

(3) 除总人口、农业从业结构和农业产值结构对农业源 CH_4 排放起促进作用,城镇化率、人均耕地占有量、单位面积施肥量、人均 GDP 和农村用电量起控制作用,其中农业产值结构仍是导致研究区农业 CH_4 排放增加的主要驱动因素,通过规模化集约集中生产可有效降低农业源 CH_4 排放水平。

参考文献:

- [1] 马鹏里,韩兰英,张旭东,等.气候变暖背景下中国干旱变化的区域特征[J].中国沙漠,2019,39(6):209-215.
- [2] 励汀郁,谭淑豪.干旱冲击下草地租赁对草场退化及牧户生计的影响[J].中国人口·资源与环境,2020,30(3):161-167.
- [3] 张秀云,姚玉璧,杨金虎,等.中国西北气候变暖及其对农业的影响对策[J].生态环境学报,2017,26(9):1514-1520.
- [4] Jackson R. B, Saunio M, Bousquet P, et al. Increasing anthropogenic methane emissions arise equally from agricultural and fossil fuel sources[J]. Environmental Research Letters, 2020,15(7):71002.
- [5] De Cara S, Houzé M, Jayet P A. Methane and nitrous oxide emissions from agriculture in the EU: a spatial assessment of sources and abatement costs[J]. Environmental & Resource Economics, 2005,32(4):551-583.
- [6] 李艳春,王义祥,王成己,等.福建省农业源甲烷排放估算及其特征分析[J].生态环境学报,2013,22(6):942-947.
- [7] 任肇雯,汪家权,胡淑恒,等.江西省农业活动甲烷排放估算[J].合肥工业大学学报:自然科学版,2019,42(11):1551-1556.
- [8] 朱思明,吴群,毛艳玲,等.1980—2011 年福建省农业甲

- 烷排放估算研究[J].河南农业大学学报,2017,51(2):250-257.
- [9] 徐兴英,段华平,张丽,等.江苏省农业源甲烷排放清单研究[J].农业现代化研究,2012,33(4):498-501.
- [10] 王荣,邓近平,王敏,等.基于 IPCC Tier 1 层级的中国反刍家畜胃肠道甲烷排放格局变化分析[J].生态学报,2015,35(8):7244-7254.
- [11] 希尔扎提·巴依孜,巴特儿·巴克,贾宏涛,等.近 20 年新疆养殖业牲畜甲烷排放量分析[J].西南农业学报,2010,23(6):802-805.
- [12] 田云,张俊飏,李波.基于投入角度的农业碳排放时空特征及因素分解研究:以湖北省为例[J].农业现代化研究,2011,32(6):752-755.
- [13] 李波,张俊飏,李海鹏.中国农业碳排放时空特征及影响因素分解[J].中国人口·资源与环境,2011,8(8):80-86.
- [14] 郭旋,张良茂,胡荣桂,等.华中地区种植业生产碳排放驱动因素分析[J].长江流域资源与环境,2016,25(5):695-701.
- [15] 王兴,马守田,濮超,等.西南地区农业碳排放趋势及影响因素研究[J].中国人口·资源与环境,2017,27(11):231-234.
- [16] 孟祥海,程国强,张俊飏,等.中国畜牧业全生命周期温室气体排放时空特征分析[J].中国环境科学,2014,34(8):867-876.
- [17] Change IPO. 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories[R]. Institute for Global Environmental Strategies, Hayama, Kanagawa, Japan, 2006.
- [18] 吴凯,顾晋飴,何宏谋,等.基于重心模型的丘陵山地区耕地利用转换时空特征研究[J].农业工程学报,2019,35(7):247-254.
- [19] 姜建芳,侯丽丽,王鑫龙,等.中国近地面 NO_2 污染分布特征及其社会经济影响因素分析[J].生态环境学报,2019,28(8):1632-1641.
- [20] 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.
- [21] 张庆宇,张雨龙,潘斌斌.改革开放 40 年中国经济增长与碳排放影响因素分析[J].干旱区资源与环境,2019,33(10):9-13.
- [22] 谢婷,张慧,何家军,等.华中地区畜牧业温室气体排放特征分析与预测[J].中国环境科学,2020,40(2):564-572.
- [23] 黄凯.四川丘区耕地数量变化及影响因素研究[D].四川雅安:四川农业大学,2010.
- [24] 陈炜,殷田园,李红兵.1997—2015 年中国种植业碳排放时空特征及与农业发展的关系[J].干旱区资源与环境,2019,33(2):37-44.
- [25] 夏四友,赵媛,许昕,等.1997—2016 年中国农业碳排放率的时空动态与驱动因素[J].生态学报,2019,39(8):7854-7865.
- [26] 李波,王春好,张俊飏.中国农业净碳汇效率动态演进与空间溢出效应[J].中国人口·资源与环境,2019,29(12):68-76.
- [27] 赵桂梅,耿涌,孙华平,等.中国省际碳排放强度的空间效应及其传导机制研究[J].中国人口·资源与环境,2020,30(3):49-55.
- [28] 张小洁,张忠潮.土地规模化经营对农业碳排放的影响机制[J].广东农业科学,2012,39(20):176-179.
- [29] 苏凯,陈毅辉,范水生,等.市域能源碳排放影响因素分析及减碳机制研究:以福建省为例[J].中国环境科学,2019,39(2):859-867.
- [30] 陈操操,刘春兰,汪浩,等.北京市能源消费碳足迹影响因素分析:基于 STIRPAT 模型和偏小二乘模型[J].中国环境科学,2014,34(6):1622-1632.
- [31] 孙昌龙,靳诺,张小雷,等.城市化不同演化阶段对碳排放的影响差异[J].地理科学,2013,33(3):266-272.
- [32] 戴小文,何艳秋,钟秋波.中国农业能源消耗碳排放变化驱动因素及其贡献研究:基于 Kaya 恒等扩展与 LMDI 指数分解方法[J].中国生态农业学报,2015,23(11):1445-1454.
- [33] 马静,徐华,蔡祖聪.施肥对稻田甲烷排放的影响[J].土壤,2010,42(2):153-163.
- [34] 易琼,逢玉万,杨少海,等.施肥对稻田甲烷与氧化亚氮排放的影响[J].生态环境学报,2013,22(8):1432-1437.