

黄昭昶, 陈思明, 毛艳玲, 等. 基于ESDA-R/S的县域农业N₂O排放的空间差异及演化趋势分析[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(12): 2864–2871.
HUANG Zhao-chang, CHEN Si-ming, MAO Yan-ling, et al. Analysis of spatial differences and temporal trends of agricultural N₂O emissions based on ESDA-R/S[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2018, 37(12): 2864–2871.

基于ESDA-R/S的县域农业N₂O排放的空间差异及演化趋势分析

黄昭昶^{1,4}, 陈思明^{2,3,4}, 毛艳玲^{1,4*}, 宋星星¹, 吴群⁵

(1. 福建农林大学资源与环境学院, 福州 350002; 2. 闽江学院海洋学院, 福州 350108; 3. 福建农林大学林学院, 福州 350002; 4. 福建农林大学自然生物资源保育利用福建高校工程研究中心, 福州 350002; 5. 福建农林大学动物科学学院, 福州 350002)

摘要: 了解农业N₂O排放的时空特征, 对于制定农业N₂O减排措施, 缓解全球温室效应具有重要意义。采用探索性空间分析(ESDA)和分形方法(R/S), 对1983—2014年福建省52个县的农业N₂O排放的空间差异与演化趋势进行分析。结果表明: 1983—2014年福建省农业N₂O排放呈现出显著的空间差异性。农业N₂O高排放区主要集聚在南部县域, 其增长趋势呈现出较强的持续性, 所占比例为40.38%, 而农业N₂O低排放区主要分布在西部和东部县域, 其增长趋势呈现出较低的持续性或反持续性, 比例为25%, 未来一段时间内, 福建省农业N₂O排放仍处于较强的持续性。该研究结果可较为全面地反映出福建省县域农业N₂O排放的时空特征, 为福建省县域农业N₂O的减排工作提供数据支撑。

关键词: 农业N₂O排放; ESDA; Hurst指数; 时空特征; 县域

中图分类号: X511 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2018)12-2864-08 doi:10.11654/jaes.2018-0423

Analysis of spatial differences and temporal trends of agricultural N₂O emissions based on ESDA-R/S

HUANG Zhao-chang^{1,4}, CHEN Si-ming^{2,3,4}, MAO Yan-ling^{1,4*}, SONG Xing-xing¹, WU Qun⁵

(1. College of Resources and Environment, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China; 2. Ocean College, Minjiang University, Fuzhou 350108, China; 3. College of Forestry, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China; 4. Fujian Provincial Ornamental Germplasm Resources Innovation & Engineering Application Research Center, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China; 5. College of Animal Science, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China)

Abstract: Investigating the spatial and temporal patterns of agricultural N₂O emissions in Fujian Province is necessary to formulate effective emission reduction measures and help mitigate the global greenhouse effect. Using agricultural data of Fujian Province from 1983 to 2014, Exploratory Spatial Data Analysis and R/S method were employed to analyze the spatial differences and temporal trends of agricultural N₂O emissions in 52 counties across Fujian. The results revealed that there were significant spatial differences in agricultural N₂O emissions among Fujian's counties from 1983 to 2014. Over 40% of counties with high agricultural N₂O emissions were concentrated in the south of the province and continued to exhibit a persistent growth rate, while 25% of counties with low agricultural N₂O emissions were concentrated in the central and northern regions and exhibited a slowing or declining growth rate. In the future, growth trends indicated that there would be an overall increase in agricultural N₂O emissions in Fujian; controlling emissions in the southern region was key to slowing or reversing this trend. Our results provide a more complete picture of the spatial differences and temporal trends of agricultural N₂O emissions at the county level, and provide crucial data support for the establishment of emission reduction measures in Fujian Province.

Keywords: agricultural N₂O emissions; ESDA; Hurst index; spatial and temporal characteristics; county-level

收稿日期: 2018-04-02 录用日期: 2018-07-20

作者简介: 黄昭昶(1993—), 男, 福建宁德人, 研究生, 从事土壤碳组分与环境可持续研究。E-mail: 396538988@qq.com

*通信作者: 毛艳玲 E-mail: fafum@126.com

基金项目: 福建省科技厅高校产学研合作项目(KJb16003A); 国家科技支撑计划项目(2014BAD15B01); 国家自然科学基金项目(30972346)

Project supported: The Science and Technology Plan Key Projects of Fujian Province (KJb16003A); The National Key Technologies R&D Program of China (2014BAD15B01); The National Natural Science Foundation of China (30972346)

全球气候变暖是当今国际社会公认的重要的环境问题,其主要原因在于人类的社会经济活动导致大气中温室气体浓度的不断增加^[1]。氧化亚氮(N₂O)是继CO₂、CH₄之后的第三大温室气体^[2],其对大气的增温效应是CO₂的280~310倍。根据联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)第四次评估报告显示,农田排放的N₂O占人为源总排放的60%,预计到2030年全球农业排放的N₂O将比2005年增加35%~60%^[3]。2008年中国的N₂O排放量达到1.79 Tg(包括台湾、香港、澳门),已成为全球N₂O排放最大的国家,其中农业排放占到70%左右^[4]。因此,深入了解农业N₂O排放的时空特征,对于缓解全球温室效应具有重要意义,目前国内外学者对农业N₂O排放进行了大量的研究。Pochette等^[5]采用IPCC方法估算1990—2005年加拿大农业土壤N₂O的直接排放量,结果表明,农业N₂O排放量平均为58.1 Gg N₂O·N·a⁻¹,其中68%来自土壤的直接排放;蒋光福等^[6]对比1980—2010年中国和印度小麦、玉米和水稻田的N₂O排放量,结果表明中国小麦、玉米、水稻田的单位面积N₂O直接排放量评价价值分别为印度的1.3、2.4、2.0倍;Liang等^[7]估算2007—2009年北京市畜牧业N₂O总排放量为1.04 Gg N₂O·N·a⁻¹。在研究过程中,学者们逐渐关注到农业N₂O排放的空间差异性,也引入空间计量方法对不同区域的农业N₂O排放进行研究。张远等^[8]利用DNDC生态过程模型对水稻田温室气体(CO₂、N₂O和CH₄)排放进行定量估测后,分析其排放的时空动态格局;陈苏等^[9]研究表明中国畜禽温室气体(CH₄和N₂O)排放的区域集中度较高,四川、河南、山东和云南等省排放较高。这些研究成果为农业N₂O的研究提供重要借鉴,但现有的研究主要集中于较大尺度的国家、省市农业N₂O排放和小尺度的农田N₂O排放,对中小尺度的县域研究却相对较少。此外,区域是一个开放的系统,不同区域之间的相互作用会导致区域与区域之间存在相关性^[10],现有的研究也缺乏对农田N₂O排放的空间邻接性的探讨。基于此,本文以1983—2014年县域活动水平数据为依据,拟采用探索性空间分析(ESDA)和R/S分形方法,对福建省52个县的农业N₂O排放的空间差异及演化趋势进行分析,以期为福建省县域农业N₂O减排措施的制定提供基础数据支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

福建省地处中国的东南沿海地区,地理坐标为北

纬23°33'~28°19',东经115°50'~120°43',气候属于亚热带海洋性季风气候,全省70%的区域≥10℃的积温在5000~7600℃之间,年平均气温17~21℃,平均降雨量1400~2000 mm,热量丰富,雨量充沛,光照充足。截止到2014年,福建共有9个地级行政区划单位,85个县级行政区划单位,总面积为12.14万km²。福建省是一个多山的省份,全省89.3%的陆地面积为丘陵地带,主要分布林地、草地等,而仅占总面积10%的平原和台地集中分布耕地、园地和工矿用地等,土地利用地域差异大,省内各县的农业发展不均衡,农业N₂O排放具有明显的区域性特征。由于研究期的时间跨度较大,在数据获取上受到一定限制,本研究仅选取福建省52个县作为研究区(图1)。

1.2 研究方法

1.2.1 ESDA方法

ESDA(Exploratory spatial data analysis)是一系列空间数据分析方法和技术的集合,它以空间关联测度为核心,通过研究对象的空间分布,发现其空间关联模式,揭示空间相互作用机制^[11]。ESDA空间分析方法主要包括全局自相关和局部自相关。全局自相关从区域整体上测度农业N₂O排放量的空间集聚程度,而局部自相关可探索区域内某一单元与邻近单位的农业N₂O排放量的空间相关性^[12]。

全局自相关采用Global Moran's I指数,其公式为:

$$Global\ Moran's\ I = \frac{n \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m W_{ij} (X_i - \bar{X})(X_j - \bar{X})}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m W_{ij} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \quad (1)$$

式中: n 为研究区总数, X_i 、 X_j 分别为地区*i*、*j*的属性值, \bar{X} 为属性*X*的平均值, W_{ij} 为空间权重矩阵。Global Moran's I的取值范围在[-1,1]之间。大于0表示空间正相关,等于0表示不存在空间自相关,小于0表示空间负相关。可用标准化Z值检验Global Moran's I指数的显著性水平,其计算公式如下:

$$Z_{score} = \frac{I - E(I)}{\sqrt{VAR(I)}} \quad (2)$$

式中: $E(I)$ 为*I*的期望, $VAR(I)$ 为*I*的方差。在 $\alpha=0.05$ 的置信水平下, $Z_{score} > 1.96$ 或 $Z_{score} < -1.96$ 时,表明该区域存在显著的空间自相关。

局部自相关采用Local Moran's I指数,其公式为:

$$Local\ Moran's\ I = \frac{n (X_i - \bar{X}) \sum_{i=1}^n W_{ij} (X_j - \bar{X})}{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \quad (3)$$

式中的 X_i 、 X_j 、 \bar{X} 、 W_{ij} 同式(1)。



图1 研究区地理位置

Figure 1 Geographic location of the study area

1.2.2 R/S分形方法

在空间分析,研究对象的观测数据通常具有连续性和相关性,而空间自相关方法虽能较好地反映农业 N_2O 排放量的空间分布特征,但无法将整个时间序列的观测数据作为一组变量分析研究对象的整体演变趋势。因此,研究采用R/S分析(Rescaled range analysis)即标度(尺度)重整分析,其是一种研究自然及社会经济现象在时间序列上演变的非线性的科学数量分析预测方法^[13]。R/S分析是由英国物理学家Hurst最先在尼罗河水文研究中提出的,后经Mandelbrot等学者从时间序列具有自相似角度上进行证明,并加以补充和完善,将之称为Hurst现象^[14]。R/S分析方法的基本原理如下:

设时间序列 $x(t)$, $t=1, 2, 3, \dots, n$, 其中 $\tau \geq 1$, 且为整数,取任意值时:

(1)均值序列:

$$x_\tau = \frac{1}{\tau} \sum_{t=1}^{\tau} x(t), \quad \tau=1, 2, 3, \dots, n \quad (4)$$

(2)累计离差:

$$x(\tau, t) = \sum_{k=1}^t [x(k) - x_\tau], \quad 1 \leq t \leq \tau \quad (5)$$

(3)极差序列:

$$R(\tau) = \max x(t, \tau) - \min x(t, \tau) \quad (6)$$

(4)标准差:

$$s(\tau) = \sqrt{\frac{1}{\tau} \sum_{t=1}^{\tau} [x(t) - x_\tau]^2} \quad (7)$$

如 $R(\tau)/s(\tau) = R/S$, $R/S \propto \tau^H$, 证明时间序列 $x(t)$ 存在Hurst现象, H 称为Hurst指数。根据 H 指数的大小,可以判断时间序列变化趋势是表现为完全随机或存在趋势性,存在趋势性的时间序列是持续性还是反持续性^[15]。若 $0 < H < 0.5$,表示该指标的时间序列数据变化存在反持续性,过去变量与未来趋势变化呈负相关关系, H 值越接近0,负相关越强;若 $H = 0.5$,表示该指标的时间序列是相互独立的,随机变化;若 $0.5 < H < 1$,表示该指标的时间序列具有持续性,过去变量与未来趋势变化呈正相关关系, H 值越接近1,持续性越强^[13]。

Feder等论证旱涝时间序列的分维 D 值与Hurst现象存在关系为^[16]:

$$D = 2 - H \quad (8)$$

Mandelbrot等通过R/S实证分析后,引入分维值

分布式布朗运动的布朗函数 $B_H(t)^{[17]}$:

$$E[B_H(t) - B_H(t_0)] = 0 \quad (9)$$

$$V(t-t_0) = E[B_H(t) - B_H(t_0)]^2 = 2K\tau(|t-t_0|/\tau)^{2H} \sim |t-t_0|^{2H} \quad (10)$$

对于 $0 < H < 1, H \neq 0.5$, 分布式布朗运动模型为:

$$\varepsilon = [B(t) - B(t_0)] / \sqrt{2K\tau} \left(\frac{|t-t_0|}{\tau} \right)^H \quad (11)$$

根据分维 D 值和指数 H 的关系, 可以推论: 如果公式(8)~(11)成立, 则证明时间序列存在分布式的布朗运动现象。因此, H 指数可表明时间序列分布式布朗运动的趋势, 而分维值 D 的大小可判断时间序列分布式布朗运动的不规则或复杂性, D 值越大, 表明运动越不规则, 反之则越有规律。

1.3 数据来源与处理

1.3.1 数据来源

本研究采用的农业活动水平数据主要包括农作物种植面积、禽畜数量、氮肥施用量、农田面积等数据均出自1983—2014年福建省52个县市的农业统计年鉴。农业N₂O排放系数以《2006 IPCC 国家温室气体清单指南》为标准, 同时参照福建省农业N₂O排放的相关研究成果^[18-22]来选取。

1.3.2 数据处理

本研究以2006年IPCC温室气体排放清单核算指南给出的农业N₂O排放的计算方法为标准, 并根据福建省各县农业发展现状、农业生产活动和排放因子等数据的可获得性, 修订IPCC2006年农业N₂O排放量计算方法。此方法将农业N₂O排放的来源分为4个方面。即农田N₂O直接排放(N₂O_{Direct})、农田N₂O间接排放(N₂O_{Indirect})、动物粪便管理系统N₂O排放(N₂O_{Animal-waste})和秸秆燃烧N₂O排放(N₂O_{straw})。

(1) 农田N₂O_{Direct}排放量

农田N₂O_{Direct}排放量主要是农田化肥、有机物质和作物秸秆N的投入量, 其计算公式如下:

$$N_2O_{Direct} = \frac{44}{28} [(N_i + N_j + N_k) \times EF_1 + (N_i + N_j + N_k) \times EF_2] \quad (12)$$

式中: N_i, N_j, N_k 分别为农田化肥N、有机物质N、作物秸秆N的投入量; EF_1 为旱地的排放因子时, 取值为0.023^[18]; EF_1 为水田的排放因子时, 取值为0.0067^[18]; 44/28为N₂O转换系数。

(2) 农田N₂O_{Indirect}排放量

农田N₂O_{Indirect}排放主要是大气沉降、淋溶与径流引起的N₂O排放, 其计算公式下:

$$N_2O_{Indirect} = N_2O_{(1)} + N_2O_{(2)} = \frac{44}{28} \sum [(N_i \times P_1 + N_j \times P_2) \times EF_3] + \frac{44}{28} \sum [(N_i + N_j) \times P_3 \times EF_4] \quad (13)$$

式中: $N_2O_{(1)}, N_2O_{(2)}$ 分别为大气沉降、淋溶与径流引起的N₂O排放总量; N_i 为各类农田施入的氮肥量, N_j 为各类农田施入的动物粪肥量; P_1 为以NH₃和NO_x形式挥发氮肥的比例, 采用IPCC推荐值0.10; P_2 为以NH₃和NO_x形式挥发粪肥的比例, 采用IPCC推荐值0.20; EF_3 为土壤挥发氮沉降的N₂O排放因子, 取值为0.01^[19]; P_3 为通过淋溶与径流产生N排放的比例, 采用IPCC推荐值0.30; EF_4 为淋溶和径流的N₂O排放因子, 取值为0.0075^[20]。

(3) N₂O_{Animal-waste}排放量

N₂O_{Animal-waste}排放主要源自动物粪便中所含氮素发生的硝化和反硝化作用, 排放量大小主要取决于粪便中的氮素含量、储存时间以及管理方法。福建省粪便管理方式与IPCC中阐述的动物粪便管理方式相适应, 因此可以采用IPCC提供的计算方法。

$$N_2O_{Animal-waste} = \frac{44}{28} \sum_{i=1}^m [A_i \times NEX_i \times MS_i \times AWMS_i \times EF_5] \quad (14)$$

式中: A_i 为 i 类型动物的数量; NEX_i 为 i 类型动物粪便排泄系数; MS_i 为 i 类型动物粪便氮排放含量; $AWMS_i$ 为 i 类型动物不同粪便管理方式排泄物处理的比例; EF_5 为不同粪便管理方式下N₂O排放因子^[21]。

(4) N₂O_{straw}排放量

田间秸秆燃烧是农田N₂O排放重要的排放源, 其计算公式如下:

$$N_2O_{straw} = \frac{44}{28} \sum N_{fire} \times EF_6 \quad (15)$$

式中: N_{fire} 为田间燃烧秸秆的含氮量, 主要通过区域内收割的秸秆总氮量和秸秆田间直接焚烧率计算得出, 秸秆田间直接焚烧率取值0.166^[18]; EF_6 为田间秸秆燃烧的N₂O排放因子, 取值为0.007^[22]。

2 结果与分析

2.1 县域农业N₂O排放的空间差异分析

2.1.1 全局空间自相关分析

在Geoda软件下对1983—2014年福建省52个县域的农业N₂O总排放量进行全局自相关分析, 得到历年的Global Moran's I指数, 并进行标准化Z值检验, 见图2。由图2可以看出, 1983—2014年52个县域农业N₂O总排放的Global Moran's I指数均大于0, 模型

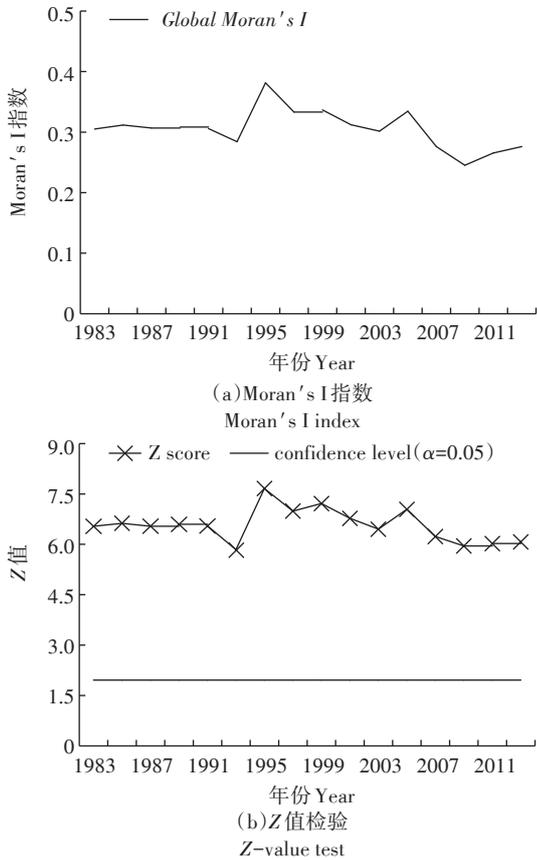


图2 1983—2014年农业 N_2O 排放量的全局Moran's I指数与检验
Figure 2 Global Moran's I and tests for agricultural N_2O emissions from 1983 to 2014

的拟合优度较高,整体通过置信水平($\alpha=0.05$)的显著性检验,这表明1983—2014年福建省52个县域的农业 N_2O 排放具有显著的空间正相关,呈现出聚集分布状态。

2.1.2 局部空间自相关分析

利用Geoda软件对1983—2014年52个县的农业 N_2O 排放进行局部自相关分析,得到局部自相关的LISA聚集图见图3。由图3可以看出1983—2014年52个县的农业 N_2O 排放呈现出明显的空间差异性,具体如下:

(1)“高-高”类型区呈现出不断聚集和扩散的变化趋势。1983年“高-高”类型区主要集中在福建东南沿海的南安市、晋江市、同安区和长泰县等市县,之后不断向福建省的南部聚集和扩散,到2003年“高-高”类型区已覆盖福建省南部的大部分县市区,如安溪、南安市、南靖县、长泰县、武平县等市县。“高-高”类型区向南部区域扩散,这与区位条件、自然条件、农业发展基础等因素有关。福建省南部县域的区位条件较好,且地处漳州平原,地势平坦,土壤肥沃,

原有农业发展程度也较高。

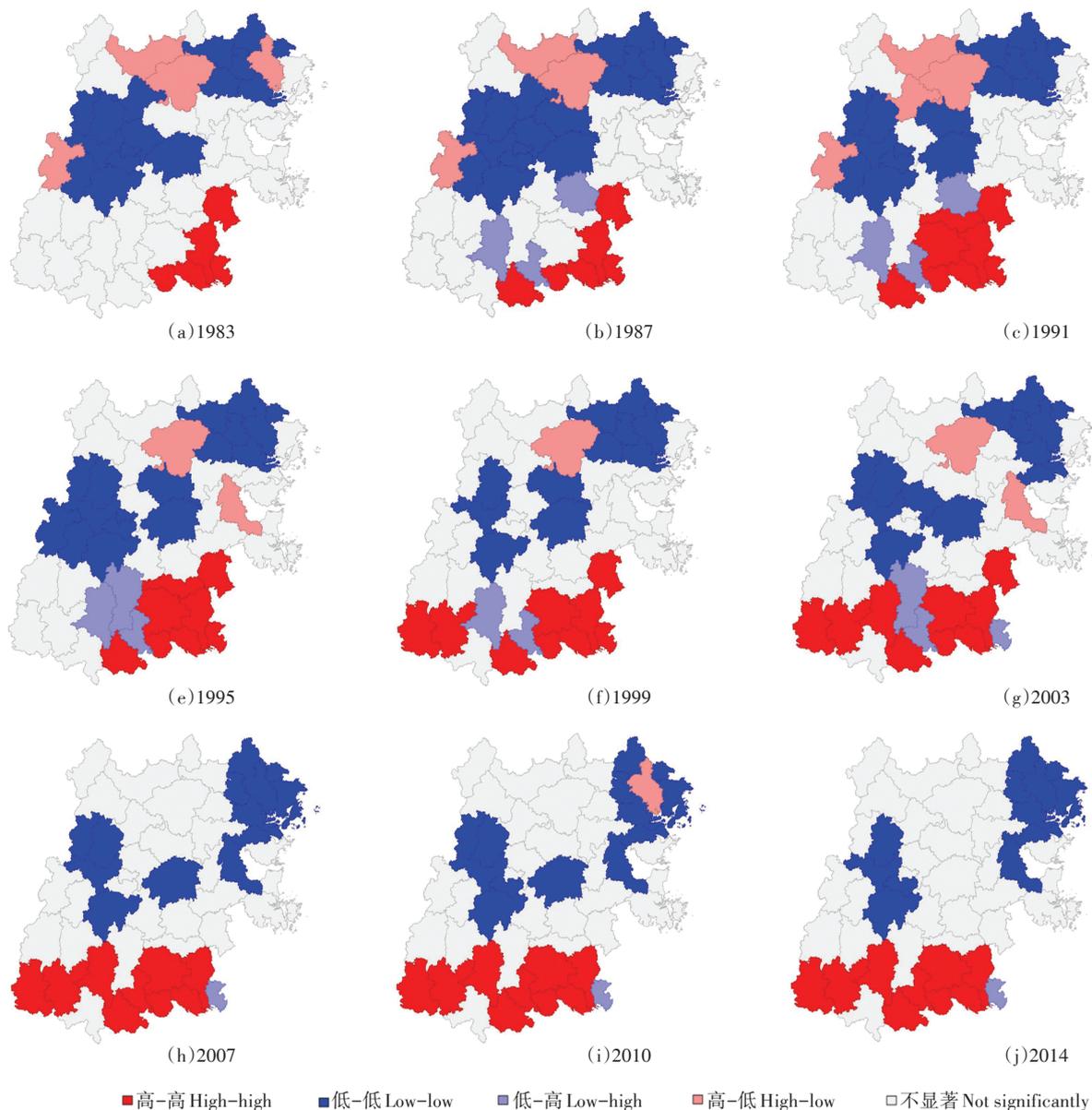
(2)“低-低”类型区呈现出不断缩减的变化趋势。1983年“低-低”类型区主要集中于福建省中部和北部的将乐县、明溪县、寿宁县、周宁县等县,之后不断向福建省西部和东北部缩进,到2014年“低-低”类型区主要分布在福建省西部和东北部的部分县域,如三元区、明溪县、蕉城区、寿宁县、柘荣县等区县。这表明32年间福建省中部和北部地区的农业不断发展,中部和西北部县域的农业 N_2O 排放量不断增加,而福建省西部和东北部的清流县、宁化县、柘荣县、霞浦县等县,原有的农业基础较差,改革开放以来虽然农业得到大力发展,但受到区位条件、自然条件等因素影响,农业发展较慢,农业 N_2O 排放量也相对较少。

(3)“低-高”类型区呈现先聚集后缩减的变化趋势。1983—2003年“低-高”类型区不断向福建省的南部聚集,主要分布于漳平市、新罗区和华安县。2003年之后“低-高”类型区不断缩减,到2014年该类型区仅分布在福建东南沿海的晋江市,成为新的空间异质性的“热点”区域。空间异质性“热点”区域的出现与福建省各县域农业 N_2O 排放量的差异有关。1983—2003年“高-高”类型区不断向南部扩散,但南部各县域的农业 N_2O 排放量不同,导致“低-高”类型区的出现,并不断向福建省南部聚集。2003年之后南部各县域的农业 N_2O 排放量差距逐渐缩小,使得“低-高”类型区不断缩减。

(4)“高-低”类型区呈现出先聚集后缩减的变化趋势。1983—1991年“高-低”类型区不断向福建省的北部和西部聚集,主要分布于建瓯市、建阳市和顺昌县。1991年之后“高-低”类型区不断缩减,到2014年已无该类型区的出现。空间异质性“冷点”区域的出现与福建省各县域农业 N_2O 排放量的差异有关。

2.2 县域农业 N_2O 排放的演变趋势分析

通过空间自相关分析表明52个县的农业 N_2O 排放存在显著的空间自相关,但空间自相关分析缺乏整个时间序列的理论解释力,且空间权重矩阵对全局和局部自相关分析影响较大。因此,本研究融入R/S分形法对1983—2014年各县域农业 N_2O 排放的演变趋势进行分析,通过聚类方法对计算结果的H指数值进行聚类,可将结果分为5类^[23](图4)。第一类,H指数值小于0.5,主要分布在福建省东部沿海的柘荣县、闽侯县、长乐市、平潭县、福清市、永泰县、德化县、晋江市等市县,表明这些县域的农业 N_2O 排放的过去增量与未来趋势呈负相关,增长趋势具有反持续性;第二



高-高表示空间差异较小,与周边县的农业N₂O排放量均较多;低-低表示空间差异较小,与周边县的农业N₂O排放量均较少;低-高表示空间差异较大,农业N₂O排放量较少而周边县较多;高-低表示空间差异较大,农业N₂O排放量较多而周边县较少;不显著表示在0.05显著水平之下。(该图基于福建省标准地图服务网站下载的审图号为闽S[2018]2-55号的标准地图制作,底图无修改)

High-high expresses a little spatial difference, the high-high areas have more agricultural N₂O emissions with the surrounding area; low-low also expresses a little spatial difference, the low-low areas have less agricultural N₂O emissions with the surrounding area; while low-high represents the spatial difference is significant, the agricultural N₂O emissions of surrounding areas are more than the analysis areas; high-low also represents the spatial difference is significant, the agricultural N₂O emissions of surrounding areas are less than the analysis areas; Not significantly areas expresses Local Moran's I below 0.05 significant level

图3 1983—2014年县域农业N₂O排放量的LISA聚集图

Figure 3 LISA cluster map of agricultural N₂O emissions at county level from 1983 to 2014

类, H 指数值在 0.5 ~ 0.6 之间, 主要分布在福建西部和东北部的将乐县、三元区、明溪县、寿宁县、周宁县、福安市等县市区, 这些县域的农业 N₂O 排放的过去增量与未来趋势呈正相关, 但增长趋势具有较弱持续性; 第三类, H 指数值在 0.6 ~ 0.7 之间, 主要分布在福建中部和东北部的尤溪县、顺昌县、光泽县、屏南县等

县, 表明这些县的农业 N₂O 排放的过去增量与未来趋势呈正相关, 但增长趋势具有中等持续性; 第四类, H 指数值大于 0.7 ~ 0.85 之间, 主要分布在福建省西北部和西南部邵武市、建阳市、建瓯市、漳平市、连城、长汀县等市县, 表明这些县的农业 N₂O 排放的过去增量与未来趋势呈正相关, 增长趋势具有较强的持续

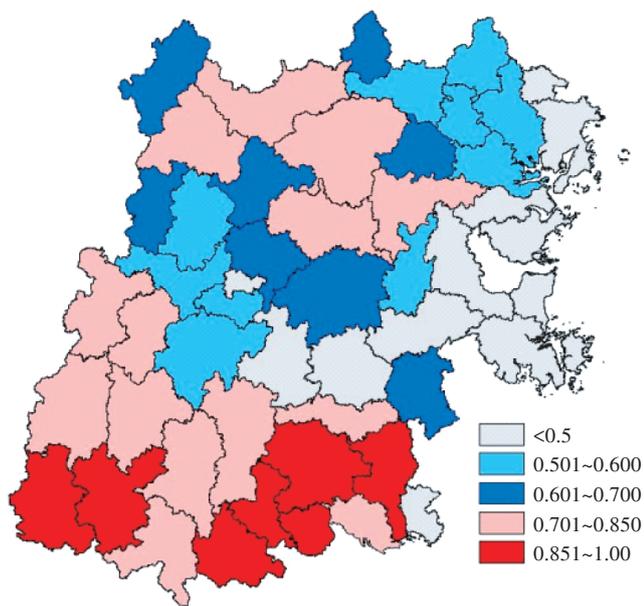


图4 1983—2014年福建省52个县的农业 N_2O 排放演变趋势的 H 指数分布图

Figure 4 The spatial distribution of Hurst index of Agricultural N_2O emissions in 52 countries of Fujian Province from 1983 to 2014

性;第五类, H 指数数值大于0.85~1.0之间,主要分布在福建省南部的安溪县、南靖县、长泰县、华安县、武平县等县,表明这些县的农业 N_2O 排放的过去增量与未来趋势呈正相关,增长趋势具有很强的持续性。由图4进一步分析可知,农业 N_2O 排放量增长趋势具有较强的持续性的县($H>0.7$ 以上)主要分布在福建省的南部以及西北,所占比例为40.38%,而增长趋势具有反持续性的县($H<0.5$)主要分布在福建省的东部沿海,比例为25%。这表明未来一段时间内,福建省的农业 N_2O 排放处于较强的持续性,农业 N_2O 减排工作压力较大。

3 讨论

本研究利用探索性空间分析方法,分析县域尺度下的农业 N_2O 排放量的空间差异,结果显示,1983—2014年福建省52个县的农业 N_2O 的排放量存在显著的空间正相关,空间聚集分布状态呈现出南高北低的分异格局。该研究结果与李艳春等^[20]研究得出的1991—2010年福建省农业生态系统 N_2O 排放的区域分布结论较为一致。但李艳春的研究主要以地级市的尺度进行分析,而本研究则对中小尺度的县域进行探讨,其研究结果更能反映福建省农业 N_2O 排放的空间差异。但是空间自相关模型模拟的结果受到空间

权重矩阵影响较多,存在一定的不确定性和误差。另外,受到实验手段、实验场地等客观因素限制,未能实地观测各县域农田 N_2O 排放通量,使研究结果会存在一定的误差。因此,选取更适宜的排放因子和空间权重矩阵,更准确地反映福建省农业 N_2O 排放演变趋势和空间格局,有待于今后深入研究。

农业 N_2O 排放的演化趋势反映出其在自然资源、区位条件、经济发展及农业基础等多种因素综合作用下的结果。本研究通过R/S分形方法研究福建省县域农业 N_2O 排放的演变趋势,探索更为全面的特征表征方法。该研究结果与已有研究^[21,24]相比,较为直观地反映了整个时间系列的县域农业 N_2O 排放的演变趋势,同时将农业 N_2O 排放的空间特征加入分析中,较全面地分析农业 N_2O 排放趋势,避免在分析过程中过于主观性与随意性。该方法的操作简单,研究结果的可信度较大,可为县域尺度下农业 N_2O 排放的演变分析提供一种思路。

本研究整合ESDA和R/S分析方法的优点,对1984—2014年福建省52个县农业 N_2O 排放空间差异和演变趋势进行分析,直观表现出县域尺度下农业 N_2O 排放的时空格局。即“高-高”或“低-低”空间聚集分布的区域,其增长趋势呈现出较强的持续性或反持续性。根据研究结果表明,福建省农业 N_2O 高排放聚集区主要位于福建省南部,呈持续增长趋势,所占比例达40.38%。这表明未来一段时间内,福建省农业 N_2O 排放仍处于持续增长趋势。因此,在满足农业生产需要的前提下,严格控制福建省南部县域的农业 N_2O 排放,采用测土配方施肥,氮肥混施、深施等措施,减少农田 N_2O 排放。此外,动物粪便也是福建省农业 N_2O 的重要排放源,在不影响福建省西南部养殖业发展的前提下,适当调整养殖结构,依据自然条件选取适宜的粪便管理方式,从而达到减排的目的。

4 结论

(1)1983—2014年福建省农业 N_2O 高排放区主要聚集在南部县域,其增长趋势呈现出较强的持续性,而低排放区主要分布在西部和东部县域,其增长趋势呈现出较低的持续性或反持续性。

(2)ESDA和R/S分析方法能更全面反映县域尺度下农业 N_2O 排放的时空特征,但农业 N_2O 排放是自然条件、社会发展、国家政策等多种因素综合作用下的结果,要做到精细化和量化仍是本研究今后需要进一步探讨的方向。

参考文献:

- [1] 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.
ZHANG Qiang, JU Xiao-tang, ZHANG Fu-suo. Re-estimation of direct nitrous oxide emission from agricultural soils of China via revised IPCC2006 guideline method[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2010, 18(1): 7-13.
- [2] Delgado J A, Mosier A R. Mitigation alternatives to decrease nitrous oxide emission and urea-nitrogen loss and their effect on methane flux[J]. *Journal of Environmental Quality*, 1996, 25(5): 1105-1111.
- [3] IPCC. Climate Change 2007: Mitigation of climate change. Contribution of working group III to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change[M]. Cambridge, United Kingdom/ New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2007.
- [4] Reay D S, Davidson E A, Smith K A, et al. Global agriculture and nitrous oxide emission[J]. *Nature Climate Change*, 2012, 2(6): 410-416.
- [5] Rochette P, Worth D E, Huffman, E C, et al. Estimation from agricultural soils in Canada. II. 1990-2005 inventory[J]. *Canadian Journal of Soil Science*, 2008, 88(5): 655-669.
- [6] 蒋光福, 张稳, 李昕, 等. 1980-2010年中国和印度农田化肥氮源氧化亚氮排放的比较[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(9): 1807-1815.
JIANG Guang-fu, ZHANG Wen, LI Xin, et al. Comparison of synthetic fertilizer N-induced direct nitrous oxide emissions from croplands between China and India during 1980-2010[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35(9): 1807-1815.
- [7] Liang L, Lal R, Du Z L, et al. Estimation of nitrous oxide and methane emission from livestock of urban agriculture in Beijing[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2013, 170: 28-35.
- [8] 张远, 齐家国, 殷鸣放, 等. 辽东湾沿海水稻田温室气体排放的时空动态模拟[J]. 中国农业科学, 2007, 40(10): 2250-2258.
ZHANG Yuan, QI Jia-guo, YIN Ming-fang, et al. Simulating spatial-temporal dynamics of greenhouse gas emission from rice paddy field in Liaodong Coastal Region, China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2007, 40(10): 2250-2258.
- [9] 陈苏, 胡浩. 中国畜禽温室气体排放时空变化及影响因素研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2016, 26(7): 93-100.
CHEN Su, HU Hao. Study on the spatial-temporal changes and influence factors of greenhouse gases emission from livestock and poultry in China[J]. *China Population Resources and Environment*, 2016, 26(7): 93-100.
- [10] 崔功豪, 魏清泉, 陈宗兴. 区域分析与规划[M]. 北京: 高等教育出版社, 1999: 217-244.
CUI Gong-hao, WEI Qing-quan, CHEN Zong-xing. Regional analysis and planning[M]. Beijing: Higher Education Press, 1999: 217-244.
- [11] Anselin L. Interactive techniques and exploratory spatial data[C]// Longley P A, Goodchild M F, Maguire D J, et al. Geographical information systems, principles, technical issues, management issues and applications, John Wiley & Sons, Inc, 1999: 253-266.
- [12] Anselin L. Local indicators of spatial association-LISA[J]. *Geographical Analysis*, 1995, 27(2): 93-115.
- [13] 吴玉鸣. 中国人口发展演变趋势的分形分析[J]. 中国人口科学, 2005, 5(4): 48-53.
WU Yu-ming. Non-linear fractional R/S trend analysis of the China's population evolution[J]. *Chinese Journal of Population Science*, 2005, 5(4): 48-53.
- [14] Mandelbrot B B, Wallis J R. Some long-run properties of geographical records[J]. *Water Resource Research*, 1969, 5(1): 321-340.
- [15] 翟秋敏, 张文佳, 安宁, 等. 基于M-K、小波和R/S方法的豫南地区气候变化的多时间尺度分析[J]. 河南大学学报(自然科学版), 2017, 47(5): 532-543.
ZHAI Qiu-min, ZHANG Wen-jia, AN Ning, et al. Multi-time scales analysis of climate changes based on methods of M-K, wavelet and R/S in Southern Henan Province[J]. *Journal of Henan University (Natural Science)*, 2017, 47(5): 532-543.
- [16] Feder J. Fractals[M]. New York and London: Plenum Press, 1998: 149-199.
- [17] Mandelbrot B B, Van Ness J W. Fractional brownian motion: Fractional noise and application[J]. *SIAM Review*, 1968, 10(4): 422-437.
- [18] 国家气候变化对策协调小组办公室. 国家发展和改革委员会能源研究所. 中国温室气体清单研究[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2007: 97-120.
Office of National Coordination Committee on Climate Change, National Development and Reform Commission. Research on greenhouse gas emissions inventory in China[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2007: 97-120.
- [19] 苏明山, 马翠梅, 杨姗姗, 等. 省级温室气体清单编制指南[M]. 北京: 国家发展改革委应对气候变化司, 2013.
SU Ming-shan, MA Cui-mei, YANG Shan-shan, et al. Guidelines for the preparation of provincial greenhouse gas inventories[M]. Beijing: National Development and Reform Commission Division for Climate Change, 2013.
- [20] 李艳春, 王义祥, 王成己, 等. 福建省农业生态系统氧化亚氮排放量估算及特征分析[J]. 中国生态农业学报, 2014, 22(2): 225-233.
LI Yan-chun, WANG Yi-xiang, WANG Cheng-ji, et al. Analysis of N₂O emissions from the agro-ecosystem in Fujian Province[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2014, 22(2): 225-233.
- [21] 许肃, 高兵, 冯永杰, 等. 福建省N₂O排放清单及其特征分析[J]. 福建农林大学学报(自然科学版), 2013, 45(4): 443-451.
XU Su, GAO Bing, FENG Yong-jie, et al. N₂O emission inventory and characteristic analysis in Fujian Province[J]. *Journal of Fujian Agriculture and Forestry University (Natural Science Edition)*, 2013, 45(4): 443-451.
- [22] 蔡博峰, 刘春兰, 陈操操. 城市温室气体清单研究[M]. 北京: 化学工业出版社, 2009: 153-168.
CAI Bo-feng, LIU Chun-lan, CHEN Cao-cao. A study on city greenhouse gas emissions inventory[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2009: 153-168.
- [23] 张子龙, 刘竹, 陈兴鹏, 等. 基于R/S的中国碳排放演变趋势及其空间差异分析[J]. 经济地理, 2013, 13(8): 20-25.
ZHANG Zi-long, LIU Zhu, CHEN Xing-peng, et al. The evolutionary trend of CO₂ emissions and its spatial differentiation in China: Based on R/S method[J]. *Economic Geography*, 2013, 13(8): 20-25.
- [24] 赵胜男. 福建省温室气体减排途径研究[D]. 厦门: 中国科学院城市环境研究所, 2012.
ZHAO Sheng-nan. Approaches of greenhouse gas mitigation in Fujian Province[D]. Xiamen: Institute of Urban Environment, Chinese Academy of Sciences, 2012.