

基于市域尺度的中国化肥施用与粮食产量的 时空耦合关系

赵雪雁, 刘江华, 王 蓉, 王晓琪

(西北师范大学地理与环境科学学院, 兰州 730070)

摘要: 化肥施用是一把双刃剑, 在促进粮食产量增加、保障粮食安全的同时, 导致了生态环境退化, 当前亟需阐明化肥施用与粮食生产之间的时空耦合关系, 以便为维护粮食安全与生态安全提供有效的对策。以中国 336 个地级行政区为研究单元, 分析 2005-2015 年中国粮食产量与化肥施用量的时空格局变化特征、化肥施用量与粮食产量的时空耦合关系及其动态变化过程。研究发现: (1) 2005-2015 年中国化肥施用量与粮食产量均呈上升趋势, 化肥施用量的区内差异呈“粮食主产区—产销平衡区—粮食主销区”递减态势; 而粮食产量的区域差异总体趋于增大, 且呈“粮食主产区—产销平衡区—粮食主销区”递增态势。(2) 化肥施用量增幅大致呈“东—中—西”阶梯式递增的趋势, 而粮食产量增幅呈明显的南北分异特征。(3) 从空间分布来看, 胡焕庸线以东地区以“双高区”为主, 胡焕庸线以西地区以“双低区”为主, 且“低效施肥区”收缩, “他因素影响区”扩张。(4) 期间, 粮肥耦合关系以“双增型”为主, 其他类型为辅, 粮肥耦合关系主要向“双增型”与“他因素影响型”转变。

关键词: 化肥施用量; 粮食产量; 耦合关系; 时空格局; 中国

粮食安全是国家政治稳定和经济发展的保障, 化肥作为粮食生产的催化剂, 在保障国家粮食安全中发挥着非常重要的作用。联合国粮农组织 (FAO) 的研究表明, 过去 30 年世界粮食产量增加的 50% 是由于化肥施用量增加所导致的^[1]。20 世纪 50 年代以来, 中国的化肥施用量大幅增加, 国家统计局公布的数据显示, 中国农用化肥施用量 (折纯, 下同) 已从 1949 年的 0.6 万 t (纯养分) 增加到 2015 年的 6022.6 万 t, 每公顷耕地化肥施用量从 1952 年的 0.75 kg 增加到 2015 年的 446.4 kg, 目前已达到国际公认化肥施用安全上限 225 kg/hm² 的 1.98 倍; 同期, 中国粮食产量也从 1949 年的 11318.40 万 t 增长到 2015 年的 62143.92 万 t, 增加了 4.49 倍^[2]。然而, 大量的化肥施用在促进粮食产量增加的同时, 也对生态环境造成严重污染, 使其在短期内难以逆转^[3-5]。鉴于此, 2005 年中国开始实施大规模的测土配方施肥补贴项目; 2015 年农业部又颁布了《到 2020 年化肥施用量零增长行动方案》, 提出了 2020 年实现化肥施用量零增长的目标; 十九大报告也强调要“发展绿色农业, 合理用肥, 加快推进农业农村现代化”。当前, 急需阐明化肥施用与粮食生产的时空耦合关系, 为维护粮食安全与生态安全提供借鉴。

农业健康发展及化肥高效利用一直是国内外研究的热点^[6-7]。国外主要关注农作物生产过程中化肥的施用效率, Takeshima 等^[8]提出尼泊尔化肥报酬率的差异与化肥需求价格弹性的差异有关; Xu 等^[9]指出合理分配化肥的施用时间可提高化肥的施用效率; Xin 等^[10]

收稿日期: 2018-12-25; 修订日期: 2019-05-19

基金项目: 中国科学院 A 类战略性先导科技专项 (XDA19040502); 国家自然科学基金项目 (41661115); 中国科学院内陆河流域生态水文重点实验室开放基金 (KLEIRB-2S-16-03)

作者简介: 赵雪雁 (1971-), 女, 甘肃武都人, 教授, 主要从事生态经济研究。E-mail: zhaoxy@nwnu.edu.cn

则提出种植作物类型的转变导致了近年来化肥施用量的增长; Burke等^[11]认为在化肥和玉米价格高的情况下, 较高的施肥率会带来更多的收益。而国内研究重点关注粮食安全的背景下化肥施用量增长的原因分解及趋势预测, 曾希柏等^[12]利用肥料—产量效应函数, 研究了现有施肥及生产技术下全国的粮食增产潜力; 栾江等^[13]指出化肥施用强度的增长是中国化肥施用总量增长的主因; 王珊珊等^[14]则发现化肥施用强度提高是粮食主产区化肥施用量增长的主因, 但2010年以来其贡献率趋于下降, 而种植结构调整的贡献趋于上升; 潘丹^[1]指出农业生产结构调整和化肥利用效率变动共同推动了化肥消费强度的增加, 其中经济发展水平、农业产业结构、人均耕地规模等因素对化肥消费强度产生重要影响; 史常亮等^[15]认为目前中国粮食生产中的化肥施用量已经超过了其经济意义上的最优施用量, 农业劳动力非农转移、自然灾害和上一年粮食价格对农户化肥过量施用具有显著正向影响; 戈大专等^[16]指出1990-2015年粮食生产带来的生态环境压力不断增大, 提出国家粮食生产政策的制定需加强对农户生计保障和生态环境保护的关注。总体来看, 已有研究多以单一年份的截面数据为基础进行化肥施用和粮食生产的静态研究, 对其时空变化态势的研究不充分; 多采用因素分解、重力模型等方法分析影响化肥施用量变化的因素, 缺乏对化肥施用和粮食生产的区域差异、时空格局进行深入分析; 同时, 较少关注化肥施用与粮食产量耦合关系的动态变化。

目前, 中国正面临着粮食供求紧平衡、化肥过度施用等严峻挑战, 如何在降低化肥施用量的同时提高粮食产量, 已成为当前亟需解决的关键问题。基于此, 本研究将2005-2015年作为研究时段, 以中国336个地级行政单位为基本研究单元, 分析2005-2015年化肥施用量及粮食产量的时空格局演变特征、化肥施用量与粮食产量的时空耦合关系及其动态变化过程, 旨在为维护国家粮食安全^[17]与生态安全提供借鉴。

1 研究方法 with 数据来源

1.1 数据来源及处理

以中国336个地级行政区为研究单元(不包括香港、澳门、台湾), 反映全国化肥施用量、粮食产量等数据来自2006-2016年《中国区域经济发展年鉴》、各省(直辖市、自治区)的《统计年鉴》及《农业统计年鉴》。为了更准确地估算粮食生产中的化肥施用量, 采用式(1)将化肥施用量调整为粮食生产化肥施用量:

$$P_m = P \times \frac{S_m}{S} \quad (1)$$

式中: P_m 为剔除其他产业化肥施用量后的粮食生产化肥施用量; P 为化肥施用量; S_m 为粮食播种面积; S 为农作物播种面积。

1.2 研究方法

1.2.1 化肥施用量与粮食产量的区域差异测度方法

Theil指数与变异系数可有效地测度化肥施用量与粮食产量的区域差异, 随着Theil指数与变异系数的增加, 化肥施用量与粮食产量的区域差异增大。

通过分解Theil指数可确定粮食主产区、产销平衡区及主销区^①的化肥施用量与粮食

① 粮食主产区是指具有一定的地理、土壤、气候、技术等比较优势的粮食重点生产区, 包括黑龙江、吉林、辽宁、内蒙古、河北、河南、山东、江苏、安徽、江西、湖北、湖南、四川13个省(自治区)。粮食主销区是指经济相对发达, 但人多地少, 粮食自给率低, 粮食产量和需求缺口较大的粮食消费区, 包括北京、天津、上海、浙江、福建、广东、海南7个省(市)。其余包括山西、宁夏、青海、甘肃、西藏、云南、贵州、重庆、广西、陕西、新疆在内的11个省(自治区)为产销平衡区, 粮食基本能保持自给自足^[18]。

产量的差异, 其计算公式如下:

$$T_{Izd} = \sum_{i=1}^{n_m} T_i \ln \left(n_m \frac{T_i}{T_m} \right) + \sum_{i=1}^{n_b} T_i \ln \left(n_b \frac{T_i}{T_b} \right) + \sum_{i=1}^{n_s} T_i \ln \left(n_s \frac{T_i}{T_s} \right) \quad (2)$$

式中: T_{Izd} 为三大区域内差异; n 为地级行政区数量; n_m 、 n_b 、 n_s 分别为粮食主产区、粮食主销区及产销平衡区中地级行政区的数量; T_i 为地级行政区 i 的化肥施用量 (粮食产量) 与全国总量的比值; T_m 、 T_b 、 T_s 分别为粮食主产区、粮食主销区及产销平衡区化肥施用量 (粮食产量) 与全国总量的比值。

变异系数的计算公式如下:

$$CV_p = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Z_{ip} - \bar{Z}_p)^2} / \bar{Z}_p \quad (3)$$

式中: CV_p 为变异系数; Z_{ip} 为第 i 市的化肥施用量 (粮食产量); \bar{Z}_p 是第 i 市化肥施用量 (粮食产量) 的平均值。

1.2.2 粮肥弹性系数测算方法

利用“粮肥弹性系数”分析化肥施用量和粮食产量之间的耦合关系, 其计算公式为:

$$\eta_t = \frac{\Delta M_t}{\Delta P_t} = \left(\frac{M_t}{M_{t-1}} - 1 \right) / \left(\frac{P_t}{P_{t-1}} - 1 \right) \quad (4)$$

式中: η_t 为粮肥弹性系数; t 为年份; ΔM_t 、 ΔP_t 分别表示地级行政区粮食产量变化率和化肥施用量的变化率; M_t 、 M_{t-1} 分别为 t 时期、 $t-1$ 时期的粮食作物产量; P_t 、 P_{t-1} 分别为 t 时期、 $t-1$ 时期的化肥施用量。

当 $\eta_t > 0$ 时, 化肥施用量与粮食产量同向变化, 若 $\Delta P > 0$, 则化肥施用量增加的同时, 粮食产量也增加, 该区为“双增”区, 表明在该类区域, 化肥施用虽在一定程度上保障了粮食安全, 但可能导致一系列的环境问题; 若 $\Delta P_t < 0$, 则化肥施用量减少的同时, 粮食产量也减少, 该区为“双减”区, 表明在该类区域, 虽然化肥减施政策导致了粮食产量降低, 但有助于生态环境改善。当 $\eta_t < 0$, 化肥施用量与粮食产量反向变化, 若 $\Delta P > 0$, 则化肥施用量增加的同时, 粮食产量减少, 该区称为“低效施肥区”, 表明在该类区域, 存在过量施肥现象, 这无疑会加剧生态环境退化; 若 $\Delta P_t < 0$, 则化肥施用量减少的同时, 粮食产量增加, 称为“他因素影响区”, 表明该类区域粮食增产主要依赖于其他因素 (如技术创新、农业管理等), 实现粮食安全与生态保护的双赢。

1.2.3 粮肥弹性系数的转移矩阵

利用粮肥弹性系数的转移矩阵来揭示 2005-2015 年中国化肥施用量与粮食产量耦合关系的动态变化。其计算公式为:

$$N_{pq} = \begin{pmatrix} N_{11} & \cdots & N_{1n} \\ N_{21} & \cdots & N_{2n} \\ \cdots & \cdots & \cdots \\ N_{n1} & \cdots & N_{nn} \end{pmatrix} \quad (5)$$

式中: n 代表不同时期粮肥耦合关系的种类数; p 、 q ($p, q=1, 2, \dots, n$) 分别表示 tp 、 tq 时期的粮肥耦合关系类型; N_{pq} 表示由 tp 时期的 p 类耦合关系转换为 tq 时期 q 类耦合关系的地级市数量。矩阵中的每一行元素代表 tp 时期 p 类耦合关系的地级市向 tp 时期各类耦合关系的流向信息, 矩阵中的每一列元素代表 tq 时期 q 类耦合关系的地级市从 tp 时期各类耦合关系的来源信息。

2 结果分析

2.1 化肥施用量与粮食产量的区域差异

2005-2015年中国化肥施用量的区域差异波动较小。从粮食主产区、粮食主销区、产销平衡区三大类区域来看,各区的区内差异变化情况存在较大差别(图1a)。其中,2005-2015年间粮食主产区内的化肥施用量差异趋于稳定;粮食主销区内的差异呈波动上升趋势,Theil指数增幅高达56.05%;产销平衡区内的差异小幅增加,Theil指数增幅为21.07%。总体来看,2005-2015年中国化肥施用量的区域差异呈“粮食主产区—产销平衡区—粮食主销区”的递增趋势。可见,粮食产量越高的区域,化肥施用量的区内差异也越小。

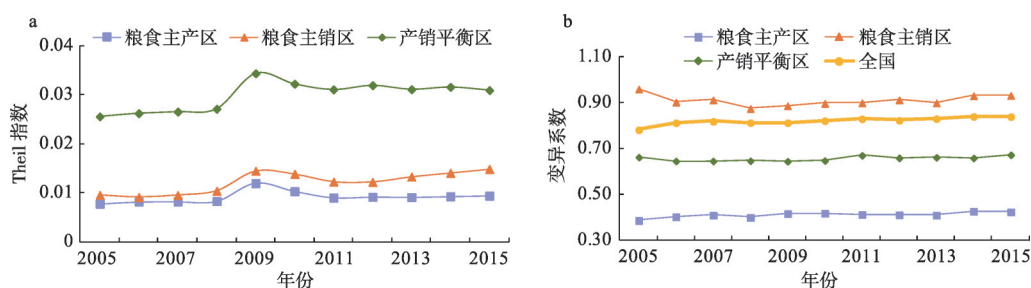


图1 2005-2015年中国化肥施用量和粮食产量的区域差异

Fig. 1 Regional differences in chemical fertilizer application in China from 2005 to 2015

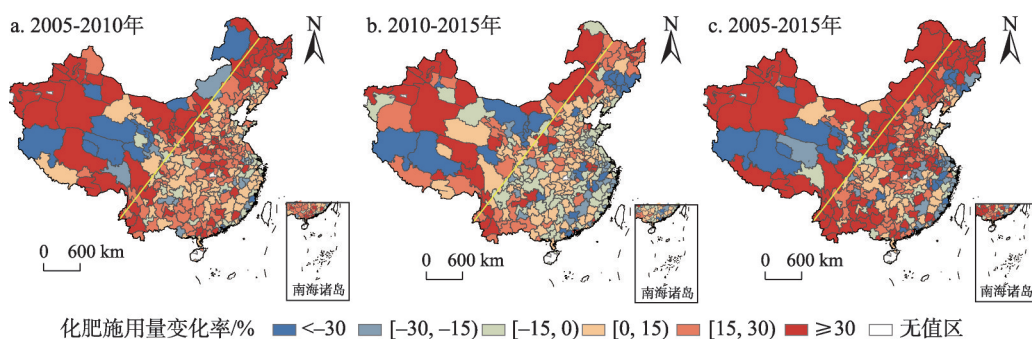
2005-2015年中国粮食产量的区域差异呈小幅上升趋势(图1b),变异系数由0.78上升至0.84,增幅为7.69%。其中,粮食主产区、粮食主销区、产销平衡区粮食产量变异系数变化趋势总体上与全国基本一致,但受到政策、资源、历史等因素影响,三大区域的粮食产量变异系数变化趋势存在差异。2005-2015年间粮食主产区粮食产量变异系数增幅最大,增幅为9.56%,但与其他区域相比,其变异系数最小,说明粮食主产区的粮食产量呈均一化的趋势;粮食主销区的粮食产量变异系数在波动中趋于下降,期间其变异系数降低了2.93%;产销平衡区的粮食产量变异系数在小幅波动中趋于上升,其变异系数增幅仅为1.51%。总体来看,2005-2015年中国粮食产量的区域差异呈“粮食主销区—产销平衡区—粮食主产区”递减的趋势。可见,粮食产量越高的区域,其区内差异也越小。

2.2 化肥施用量与粮食产量的时空格局演变

2.2.1 市域化肥施用量时空格局变化

2005-2015年,从中国化肥施用量变化情况来看,“胡焕庸线”以西地区增速较快,以东地区变幅不大。进一步分析发现:(1)2005-2010年,“胡焕庸线”以东地区变化较小,化肥施用量增加的区域集中在三江平原、松嫩平原、云贵高原等地区,在长江三角洲和浙闽丘陵一带,化肥施用量有所减少;“胡焕庸线”以西地区变化较大,其中,青海高原、阿里高原等地区化肥施用量大幅下降,而在新疆、藏南谷地、川西高原、河套平原、宁夏平原等地区呈大幅上升趋势。(2)2010-2015年,全国化肥施用量增长态势较上一时期有所减弱,“胡焕庸线”以东地区化肥施用量变化幅度较上一时期有所减小,浙闽丘陵一带降幅明显;“胡焕庸线”以西地区变化仍较大,除藏北高原、宁夏平原、河套平原等地区显著下降外,新疆、大兴安岭、滇西南等地区均大幅增加。总体来看,2005-2015年“胡焕庸线”以西地区除青藏高原以外化肥施用量增幅较大,以东地区化肥施用

量增幅较小,如山东半岛、长江三角洲、浙闽丘陵等东部沿海地区。化肥施用量增幅大致呈“东—中—西”递增的趋势(图2)。



注: 本图基于国家测绘地理信息局标准地图服务网站下载审图号为GS(2016)2923的标准地图制作, 底图无修改, 下同。

图2 2005-2015年中国化肥施用量变化趋势

Fig. 2 The trend of chemical fertilizer application in China from 2005 to 2015

2.2.2 市域粮食产量时空格局变化

2005-2015年,中国粮食产量的空间分布变化较大,呈现两极分化的趋势,粮食主产区变化率较大,其他地区相对较小(图3)。(1) 2005-2010年,粮食产量的变化率沿“秦岭—淮河线”一分为二,“秦淮线”以北地区粮食产量增幅明显,大幅增加的地区集中在准噶尔盆地、华北平原^[9]、松嫩平原、三江平原等地;“秦淮线”以南地区粮食产量变幅不大,越往南粮食产量增幅越小,呈现出变化率由低纬向高纬度不断增加的趋势,降幅最明显的区域集中在两广丘陵一带。(2) 2010-2015年,粮食产量变化趋势大致沿“胡焕庸线”一分为二,“胡焕庸线”以东地区粮食产量变幅不大,“胡焕庸线”东西交界地带降幅较小;“胡焕庸线”以西粮食产量增幅较大,如甘肃新疆农业生产区、内蒙古高原以东地区、川西高原以及云贵高原西部,但同时也出现了粮食产量大幅减少的地区,如柴达木盆地。总体来看,2005-2015年中国粮食产量增幅呈明显的南北分异,“秦淮线”以北地区普遍增幅较大,而“秦淮线”以南地区增幅较小,甚至出现减产现象。

2.3 化肥施用量与粮食产量的时空耦合关系

2.3.1 化肥施用量与粮食产量的时空耦合格局

以2005年、2010年、2015年为时间节点,以全国市域化肥施用量分级设色作为底

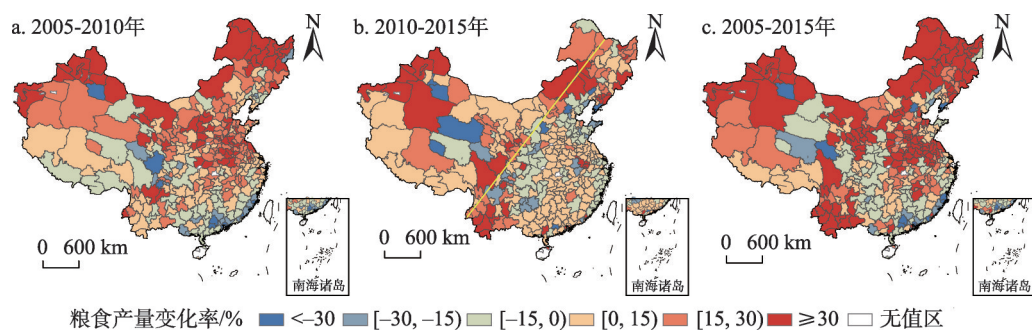


图3 2005-2015年中国粮食产量变化趋势

Fig. 3 China's grain production trend from 2005 to 2015

图，以市域粮食产量作分级显示来反映中国化肥施用量与粮食产量的时空耦合格局。由图4可知，中国粮食产量与化肥施用量空间耦合较为明显，化肥施用量较多的地区，粮食产量也较高。从全国来看，2005-2015年中国粮食产量与化肥施用量的耦合关系以“胡焕庸线”为界，该线以东地区化肥施用量较高，粮食产量也较高，“双高”区域较集中，尤其在东北平原、华北平原、长江中下游平原、四川盆地等区域，二者的耦合程度更高；“胡焕庸线”以西地区化肥施用量普遍偏低，粮食产量不高，“双低”区域较集中，尤其在青藏高原和阿拉善高原等地，二者的耦合程度较高。总体来看，粮食主产区化肥施用量与粮食产量的耦合度最高，其中，粮食主产区中有67.96%的地级市属于“双增区”、仅有5.52%的属于“双减区”，9.94%的属于“过量区”、16.57%的属于“他因素影响区”，表明粮食主产区粮食增加主要依赖于化肥施用，这无疑会加剧生态环境退化；粮食主销区化肥施用量与粮食产量的耦合度最低，其中粮食主销区中有21.74%的地级市属于“双增区”、47.83%的属于“双减区”、21.74%的属于“过量区”、8.70%的属于“他因素影响区”，表明粮食主销区以“双减型”的耦合模式为主，逐渐摆脱了粮食生产的经营模式，有利于保护环境，但不利于促进粮食安全的建设；在产销平衡区，有59.63%的地级市属于“双增区”、11.01%的属于“双减区”、15.60%的属于“过量区”、13.76%的属于“他因素影响区”，表明产销平衡区粮食产量主要依赖于化肥施用，对当地环境质量造成极大威胁。可见，化肥施用量与粮食产量的空间耦合特征同自然条件、自然资源禀赋、人口分布、经济发展水平等关系密切^[20]。

2.3.2 化肥施用量与粮食产量的时空耦合特征

2005-2010年间，全国有268个地级市（占全国地级市的79.76%）化肥施用量在增加，有68个地级市（占全国地级市的20.24%）化肥施用量在减少。其中，化肥施用量与粮食产量“双增区”有209个地级市，占全国地级市的62.20%（图5d），主要分布在东北平原、华北平原、黄土高原、云贵高原以及新疆大部，位于粮食主产区和产销平衡区内；化肥施用量与粮食产量“双减区”有29个地级市，其比例为8.63%（图5a），主要分布在浙闽丘陵和青南高原等地；化肥施用量高而粮食产量低的“低效施肥区”有59个地级市，其比例为17.56%（图5d），主要分布在藏南谷地、两广丘陵、川西高原；化肥施

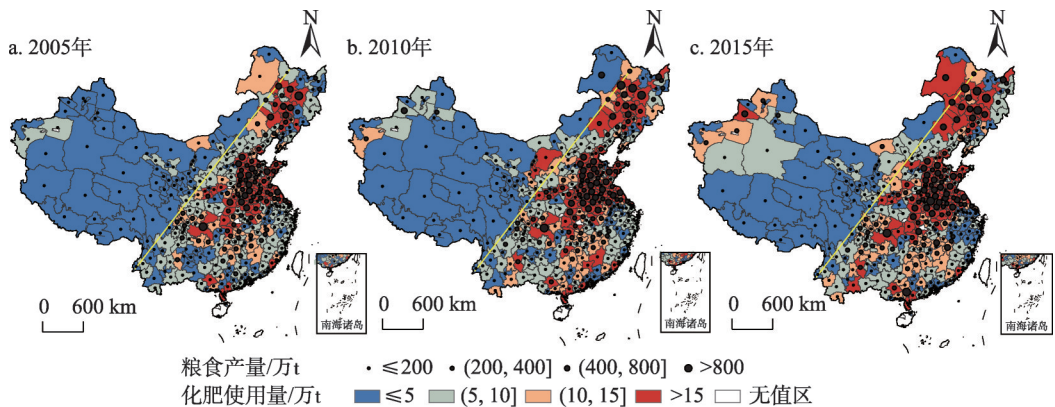


图4 2005-2015年中国市域粮食产量与化肥施用量的时空耦合格局

Fig. 4 Spatiotemporal coupling patterns of grain yield and chemical fertilizer amounts in China's urban areas from 2005 to 2015

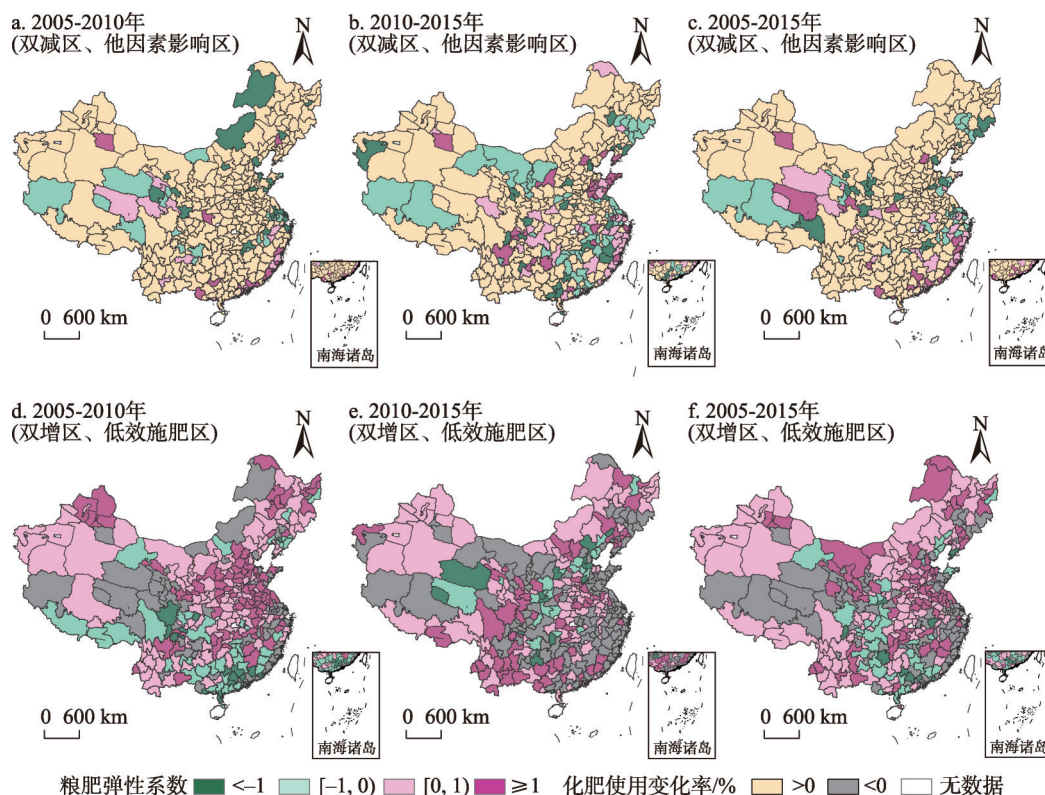


图5 2005-2015年中国市域粮肥弹性系数演变的时空格局

Fig. 5 Spatial-temporal pattern of the evolution of the elastic coefficient of grain fertilizer in China during 2005-2015

用量低而粮食产量高的“他因素影响区”有39个地级市,其比例为11.61% (图5a),主要分布在长江三角洲地区。总体来看,该时期中国化肥施用量与粮食产量的耦合特征以同向关系为主,同向变化区比例高达70.83%,其中尤以“双增区”为主,可见化肥使用在该阶段中国粮食生产中起着非常重要的作用。

2010-2015年间,全国有196个地级市(占全国地级市的58.33%)化肥施用量在增加,有140个地级市(占全国地级市的41.67%)化肥施用量在减少。其中,“双增区”有162个地级市,占全国地级市的48.21% (图5e),主要分布在甘新农产区、内蒙古高原以东、三江平原、藏南谷地、云贵高原;“双减区”有65个地级市,占全国的19.35% (图5b),主要在山东半岛,浙闽丘陵等地形成连片区;“低效施肥区”有34个地级市,其比例为10.12% (图5e),主要分布在柴达木盆地、青南高原、陕北高原等地区;“他因素影响区”有75个地级市,其比例为22.32% (图5b),较上一时期增加了10.71个百分点,主要分布在藏北高原和内蒙古高原以西、江南丘陵等地。在此期间,中国化肥施用量与粮食产量的耦合特征虽仍以同向变化为主,但反向变化强度减弱,同向变化区比例达67.56%,反向变化区(低效施肥区和他因素影响区)比例为32.44%。

总体来看,2005-2015年全国有244个地级市(占全国地级市的72.32%)化肥施用量在增加,有93个地级市(占全国地级市的27.68%)化肥施用量在减少。其中,“双增区”有198个地级市,占全国地级市的58.93% (图5f),主要分布在东北平原、华北平原、云贵高原、四川盆地、藏南高原及新疆大部;“双减区”有44个地级市,其比例为

13.10% (图 5c), 主要分布在浙闽丘陵、柴达木盆地及青南高原。“低效施肥区”有 45 个地级市, 其比例为 13.39% (图 5f), 主要分布在汉水谷地、云贵高原西部; “他因素影响区”有 49 个地级市, 其比例为 14.58% (图 5c), 主要分布在藏北高原、长江三角洲地区。在此期间, 市域化肥施用量和粮食产量变化趋势相同, 正向变化成为粮食产量与化肥施用量变化耦合关系的主要类型。

2.4 化肥施用量与粮食产量耦合关系的动态变化过程

从粮肥弹性系数变化来看, 化肥施用对于粮食产量的促进作用在增强。2005-2015 年中国化肥施用量增加地区 η_i 均值由 0.80 上升到 5.33, 说明化肥施用量增加对部分地区粮食增产的推动作用在大多数地区仍然存在, 但在 2010-2015 年, 粮食产量占当年全国总产量的比例由 2010 年的 61.52% 下降至 2015 年的 50.27%, 说明化肥施用对粮食增产的推动作用有所减弱, 但依旧是中国化肥施用量与粮食产量变化耦合关系的主要类型。而地级市化肥施用量减少地区 η_i 均值由-3.56 下降到-19.95, 说明化肥施用量减少对这类地区粮食增产的作用在加强; 此外, 该类型地级市粮食产量占当年粮食总产量的比例由 2010 年的 38.48% 上升到 2015 年的 49.73%。

2005-2015 年间, 中国农业发展处于转型期, 不同区域化肥施用对粮食产量的影响存在差异, 即二者的耦合关系不同 (表 1)。从全国范围来看, 化肥施用对粮食产量的影响依旧是正向的, 这种“双增”的耦合关系出现在中国大部分的地级市, 尤其是华北平原、东北平原等粮食主产区内, 其粮肥弹性系数较高, 生产规模较大, 生产手段和技术相对先进。但同时, 在两广丘陵等东南沿海快速农业转型区却存在化肥施用量增加而粮食产量减少的现象, 这些地区农业转型迅速, 粮食生产在这些地方的农业生产中逐渐退出^[21], 改为其他的作物种植。

表 1 2005-2015 年中国市域化肥施用量与粮食产量耦合关系

Table 1 The statistical summary of the coupling relationship between fertilizer use and grain yield in China from 2005 to 2015

时间段	2005-2010 年	2010-2015 年	2005-2015 年
双增区	60.20% (209)	48.21% (162)	58.93% (198)
双减区	8.63% (29)	19.35% (65)	13.10% (44)
低效施肥区	17.56% (59)	10.12% (34)	13.39% (45)
他因素影响区	11.61% (39)	22.32% (75)	14.58% (49)

注: 括号内为该类型的地级行政区个数。

通过对比 2005-2010 年和 2010-2015 年两个时期, 全国化肥施用量减少的地市 (包含“双减区”和“他因素影响区”) 增加了 72 个, 比例增加了 21.43%。一方面说明国家从 2005 年开始推行的测土配方技术初见成效, 大型农场以及发达地区的农户通过积极改善耕作技术, 提高耕作效率, 大力推进化肥减量提效, 积极探索产出高效、产品安全、资源节约、环境友好的现代农业发展模式, 实现农业的转型发展, 使得化肥施用量减少而粮食产量增加的城市十年间增加了 36 个; 另一方面由于山东半岛和华中地区的部分地区生产规模较小的农户生产手段和技术相对落后, 政策实施相对困难, 粮食基本处于自给自足或依赖采购的状态, 所以当地农户对于改进化肥施用技术缺乏动力, 加上化肥减施政策的推动, 致使“双减区”的数量增加了 36 个。上述多区域不同耦合关系说明中国在农业转型发展过程中存在区域差异, 化肥施用与粮食生产的多种耦合关系同时存在, 应

当进一步加大化肥减施力度, 通过提高农业生产水平来降低粮食生产对化肥的依赖。

化肥施用量与粮食产量耦合关系的转移矩阵显示 (表2), 2005-2015年间“双增区”向其他区域转移的数量最大, 其次是“低效施肥区”, 二者转移数量分别占该类型转移总量的50.72%、100%, 粮肥耦合关系向“双增型”与“他因素影响型”转变为主。从2005-2010年到2010-2015年间, “双增区”中有49.28%的地级市没有发生变化, 剩下地级市有16.75%转向“双减区”、12.92%转向“低效施肥区”、21.05%转向“他因素影响区”。其中, 处于山东半岛、江南丘陵等区域的“双增区”转为“双减区”; 处于陕北高原、海河平原等区域的“双增区”转为“低效施肥区”; 处于河套平原、藏北高原等区域的“双增区”转为“他因素影响区”。“双减区”以向“双增区”的转移趋势为主, 比例为37.93%, 大致分布在甘南高原一带, 呈现多向转化的趋势。“低效施肥区”主要向“双增区”转移, 向“双增区”转移数量占同期“低效施肥区”地级市数量的57.63%, 主要分布在藏南谷地、四川盆地以及两广丘陵一带; 其次是“他因素影响区”, 比例为30.51%, 主要分布在两广丘陵, 即华南主产区的中部地区, 说明在第二阶段化肥过量施用或者产能较低的区域通过提高生产效率来实现粮食产量的增加。“他因素影响区”中有35.90%的地级市转为“双增区”, 这些地区位于陇中高原以北地区和呼伦贝尔高原等地; 有33.33%的地级行政区转移为“双减区”, 这些地级市大多分布在长江三角洲等地, 原因在于进入第二阶段后, 这些地区开始大力调整产业结构, 减少了化肥和粮食播种的投入, 导致化肥施用量和粮食产量都有所减少。总体来看, 2005-2015年间化肥作为双刃剑的特性开始受到广泛关注, 不少地市开始调整区内生产结构, 粮肥耦合关系开始向更合理更环保的方向转变。

表2 2005-2015年粮肥弹性系数转移矩阵

Table 2 Grain to fertilizer coefficient transfer matrix for 2005-2015 (个)

2005-2010年	2010-2015年				
	双增区	双减区	低效施肥区	他因素影响区	总计
双增区	103	35	27	44	209
双减区	11	10	4	4	29
低效施肥区	34	7	0	18	59
他因素影响区	14	13	3	9	39
总计	162	65	34	75	336

3 结论与讨论

3.1 结论

本文分析了中国2005-2015年化肥施用与粮食产量的时空格局及其耦合关系, 发现:

(1) 2005-2015年中国化肥施用量与粮食产量均呈上升趋势, 化肥施用量的区内差异呈现由“粮食主产区—产销平衡区—粮食主销区”的递增趋势; 而粮食产量的区域差异总体趋于增大, 且由“粮食主产区—产销平衡区—粮食主销区”递增。

(2) 2005-2015年中国“胡焕庸线”以西地区除青藏高原以外化肥施用量增幅较大, 以东地区化肥施用量增幅较小, 化肥施用量增幅大致呈“东—中—西”递增的趋势, 而粮食产量增幅呈现出明显的南北分异特征, “秦淮线”以北地区普遍增幅较大, 而以南地

区增幅较小,甚至出现减产现象。

(3)从空间分布来看,“胡焕庸线”以东地区化肥施用量和粮食产量较高,以“双高区”为主;“胡焕庸线”以西地区化肥施用量与粮食产量相对较少,以“双低区”为主。总体来看,化肥施用量和粮食产量以“双增型”耦合关系为主,其他耦合关系为辅。期间,粮肥耦合关系向“双增型”与“他因素影响型”转变为主。

3.2 讨论

基于上述结论,为保障国家粮食安全和生态安全,重视化肥与粮食之间的耦合关系是现阶段农业生产的关键环节,但化肥减施与粮食增产是一对难以调和的矛盾。因此,在“双增区”,应继续贯彻化肥施用量零增长计划,完善测土配方技术推广体系建设,提高测土配方技术入户率,同时积极采用其他手段促进粮食生产^[22],减少化肥施用对生态环境造成的威胁;在“双减区”,政府应当加强同小规模生产的农户的联系,引进成熟的生产体系改进农户的生产行为,在降低化肥施用量的基础上提高粮食产量^[23-24];在“低效施肥区”,应合理计算每种作物的施肥量,积极引导农户正确规划对不同作物的施肥量,综合经济效益,以小成本换取高回报;在“他因素影响区”,应当将该区改进耕作技术的农户向其他区域的农户推广,树立先进典型,改变其他区域以往的耕作思维。总之,不同地区粮食生产对化肥的依赖程度不同,应重视区域差异性,针对不同的粮肥耦合关系推进现代化农业生产,促进国家粮食安全和生态安全双重保障体系建设。

化肥集约施用已成为低收入国家促进农业增长的一个重要过程^[25],但与此同时,却带来了严重的环境问题。粮肥耦合关系问题已经引起了国际社会的广泛关注。国际肥料工业协会(IFA)组建了农业委员会,力图促进可持续的肥料管理,开展与肥料需求相关的权威市场分析,并监测可能影响当前和未来需求的政策、科学和其他发展来保障粮食安全建设。我国政府编制了第一个粮食安全中长期规划纲要——《国家粮食安全中长期规划纲要(2008-2020年)》,指出提高粮食生产能力,要引导农户科学使用化肥、农药和农膜,大力推广使用有机肥料、生物肥料、生物农药、可降解农膜,保护和改善粮食产地环境。鉴于此,本文分析了化肥施用量及粮食产量时空格局,结合粮肥弹性系数及转移矩阵分析了二者的时空耦合关系及其动态变化。结论与相关研究基本一致^[21,26],均认为粮食增产区集中在“秦淮线”以北的北方地区^[21],化肥施用的地区差异较为明显^[26]。但本文尚未深入分析化肥施用量与粮食产量耦合关系的变化规律及其驱动机制,也未对化肥施用量与粮食产量耦合关系变化产生的经济、社会及环境效应^[27]进行研究。未来还需对化肥施用量与粮食产量耦合关系开展多尺度、多时段综合分析。

参考文献(References):

- [1] 潘丹. 中国化肥消费强度变化驱动效应时空差异与影响因素解析. 经济地理, 2014, 34(3): 121-126. [PAN D. Spatial-temporal difference of driving effects for fertilizer use intensity change and its determinants in China. Economic Geography, 2014, 34(3): 121-126.]
- [2] 张福锁. 中国肥料产业与科学施肥战略研究报告. 北京: 中国农业大学出版社, 2008. [ZHANG F S. China Fertilizer Industry and Scientific Fertilization Strategy Research Report. Beijing: China Agricultural University Press, 2008.]
- [3] NEUMANN K, VERBURG P H, STEHFEST E, et al. The yield gap of global grain production: A spatial analysis. Agricultural Systems, 2010, 103(5): 316-326.
- [4] HANJRA M A, QURESHI M E. Global water crisis and future food security in an era of climate change. Food Policy, 2010, 35(5): 365-377.
- [5] 奚振邦, 王寓群, 杨佩珍. 中国现代农业发展中的有机肥问题. 中国农业科学, 2004, 37(12): 1874-1878. [XI Z B, WANG Y Z, YANG P Z. The issue on organic manure in developing modern agriculture in China. Scientia Agricultura

- Sinica, 2004, 37(12): 1874-1878.]
- [6] 吴玉鸣. 中国区域农业生产要素的投入产出弹性测算: 基于空间计量经济模型的实证. 中国农村经济, 2010, (6): 25-37. [WU Y M. Calculation of input-output elasticity of regional agricultural production factors in China: Empirical evidence from spatial econometric model. Chinese Rural Economy, 2010, (6): 25-37.]
- [7] 周亮, 徐建刚, 蔡北溟, 等. 淮河流域粮食生产与化肥消费时空变化及对水环境影响. 自然资源学报, 2014, 29(6): 1053-1064. [ZHOU L, XU J G, CAI B M, et al. Spatio-temporal changes of grain production and fertilizer consumption in the Huaihe River Basin and its impact on water environment. Journal of Natural Resources, 2014, 29(6): 1053-1064.]
- [8] TAKESHIMA H, ADHIKARI R P, SHIVAKOTI S, et al. Heterogeneous returns to chemical fertilizer at the intensive margins: Insights from Nepal. Food Policy, 2017, 69: 97-109.
- [9] XU Z, GUAN Z, JAYNE T S, et al. Factors influencing the profitability of fertilizer use on maize in Zambia. Agricultural Economics, 2009, 40(4): 437-446.
- [10] XIN L, LI X, TAN M. Temporal and regional variations of China's fertilizer consumption by crops during 1998-2008. Journal of Geographical Sciences, 2012, 22(4): 643-652.
- [11] BURKE W J, JAYNE T S, BLACK R. Factors explaining the low and variable profitability of fertilizer application to maize in Zambia. Agricultural Economics, 2017, 48(1): 115-126.
- [12] 曾希柏, 陈同斌, 林忠辉, 等. 中国粮食生产潜力和化肥增产效率的区域分异. 地理学报, 2002, 57(5): 539-546. [ZENG X B, CHEN T B, LIN Z H, et al. Regional disparities in grain production potential and fertilizer production increase efficiency in China. Acta Geographica Sinica, 2002, 57(5): 539-546.]
- [13] 栾江, 仇焕广, 井月, 等. 我国化肥施用量持续增长的原因分解及趋势预测. 自然资源学报, 2013, 28(11): 1869-1878. [LUAN J, QIU H G, JING Y, et al. Reasons for decomposition and trend forecast of fertilizer application increase in China. Journal of Natural Resources, 2013, 28(11): 1869-1878.]
- [14] 王珊珊, 张广胜, 李秋丹, 等. 中国粮食主产区化肥施用量增长的驱动因素分解. 农业现代化研究, 2017, 38(4): 658-665. [WANG S S, ZHANG G S, LI Q D, et al. Decomposition of driving factors for increasing fertilizer application in main grain-producing areas in China. Research of Agricultural Modernization, 2017, 38(4): 658-665.]
- [15] 史常亮, 郭焱, 朱俊峰. 中国粮食生产中化肥过量施用评价及影响因素研究. 农业现代化研究, 2016, 37(4): 671-679. [SHI C L, GUO Y, ZHU J F. Study on evaluation of fertilizer excessive application and its influencing factors in grain production in China. Research of Agricultural Modernization, 2016, 37(4): 671-679.]
- [16] 戈大专, 龙花楼, 李裕瑞, 等. 城镇化进程中我国粮食生产系统多功能转型时空格局研究: 以黄淮海地区为例. 经济地理, 2018, 38(4): 147-156. [GE D Z, LONG H L, LI Y R, et al. The spatio-temporal pattern of multifunctional transformation of China's grain production system in the process of urbanization: The case of Huang-Huai-Hai Plain. Economic Geography, 2018, 38(4): 147-156.]
- [17] WU W B, TANG H J, YANG P. Scenario-based assessment of future food security. Journal of Geographical Sciences, 2011, 21(1): 3-17.
- [18] 姜会明, 孙雨, 王健, 等. 中国农民收入区域差异及影响因素分析. 地理科学, 2017, 37(10): 1546-1551. [JIANG H M, SUN Y, WANG J, et al. Regional differences of farmers' income in China and analysis of influencing factors. Scientia Geographica Sinica, 2017, 37(10): 1546-1551.]
- [19] 刘东, 封志明, 杨艳昭, 等. 中国粮食生产发展特征及土地资源承载力空间格局现状. 农业工程学报, 2011, 27(7): 1-6. [LIU D, FENG Z M, YANG Y Z, et al. The status quo of China's grain production development and the status quo of land resources carrying capacity. Transactions of the CSAE, 2011, 27(7): 1-6.]
- [20] 刘彦随, 王介勇, 郭丽英. 中国粮食生产与耕地变化的时空动态. 中国农业科学, 2009, 42(12): 4269-4274. [LIU Y S, WANG J Y, GUO L Y. Temporal and spatial dynamics of grain production and cultivated land change in China. Scientia Agricultura Sinica, 2009, 42(12): 4269-4274.]
- [21] 戈大专, 龙花楼, 张英男, 等. 中国县域粮食产量与农业劳动力变化的格局及耦合关系. 地理学报, 2017, 72(6): 1063-1077. [GE D Z, LONG H L, ZHANG Y N, et al. The pattern and coupling relationship of county grain yield and agricultural labor change in China. Acta Geographica Sinica, 2017, 72(6): 1063-1077.]
- [22] 王千, 金晓斌, 阿依吐尔逊·沙木西, 等. 河北省粮食产量空间格局差异变化研究. 自然资源学报, 2010, 25(9): 232-235. [WANG Q, JIN X B, AYITUERXUN S, et al. Space difference research of the grain production in Hebei province. Journal of Natural Resources, 2010, 25(9): 232-235.]
- [23] 宋小青, 欧阳竹. 1999-2007年中国粮食安全的关键影响因素. 地理学报, 2012, 67(6): 793-803. [SONG X Q, OUYANG Z. Key influencing factors of China's food security from 1999 to 2007. Acta Geographica Sinica, 2012, 67(6): 793-803.]
- [24] 王微恒, 朱会义. 现阶段中国农地利用专业化的主要限制因素. 自然资源学报, 2018, 33(3): 361-371. [WANG W H, ZHU H Y. Main limiting factor of the regional specialization of agricultural land use in China. Journal of Natural Re-

sources, 2018, 33(3): 361-371.]

- [25] 刘钦善. 淮河流域化肥施用空间特征及环境风险分析. 生态环境学报, 2015, 24(9): 1512-1518. [LIU Q P. Spatial characteristics and environmental risk analysis of chemical fertilizer application in the Huaihe River Basin. Ecology and Environmental Sciences, 2015, 24(9): 1512-1518.]
- [26] 陈同斌, 曾希柏, 胡清秀. 中国化肥利用率的区域分异. 地理学报, 2002, 57(5): 531-538. [CHEN T B, ZENG X B, HU Q X. Regional distinction of fertilizer utilization in China. Acta Geographica Sinica, 2002, 57(5): 531-538.]
- [27] 赵亚莉, 刘友兆, 龙开胜. 城市土地开发强度变化的生态环境效应. 中国人口·资源与环境, 2014, 24(7): 23-29. [ZHAO Y L, LIU Y Z, LONG K S. Ecological environment effect of urban land development intensity change. China Population, Resources and Environment, 2014, 24(7): 23-29.]

Spatial-temporal coupling relationship between chemical fertilizer application and grain yield in China at city scale

ZHAO Xue-yan, LIU Jiang-hua, WANG Rong, WANG Xiao-qi

(College of Geography and Environment Science, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: Fertilizer application is viewed as a double-edged sword, for it can increase grain production and ensures food security, at the same time, it can lead to degradation of eco-environment. At present, it is urgent to explore the spatial-temporal coupling relationship between fertilizer application and grain production, so as to provide effective measures and references to maintain food security and ecological safety. Selecting 336 administrative regions at the prefecture level as study units, the paper analyzes the changing features of China's grain production and fertilizer application in the spatial-temporal pattern, and the coupling relationship between fertilizer application and grain production as well as its dynamic process from 2005 to 2015. The findings are obtained as follows. (1) Both fertilizer application and grain production showed upward trends from 2005 to 2015, and regional differences in fertilizer application presents a decreasing trend from "main production areas, production-and-sales balancing areas to main sales areas". Meanwhile, the overall trend of grain production among different regions tends to increase from "main production areas, production-and-sales balancing areas to main sales areas". (2) Fertilizer application roughly presents a stepwise increase from "East-Centre-West", while grain production growth apparently shows north-south differential characteristics. (3) From the perspective of spatial distribution, the areas east of Aihui-Tengchong line were featured as "double-high areas" compared with "double-low areas" west of the line; moreover, "inefficiently-fertilized" areas were shrinking and "other-factor-influenced" areas expanding. (4) In the course, the coupling relationship between grain and fertilizer was dominated by "double-increase type" with other types positioning secondarily; and the relationship was mainly transforming towards "double-increase type" and "other-factors-affected type".

Keywords: fertilizer application; grain output; coupling relationship; temporal and spatial pattern; China