粮食安全与农业面源污染
——以农地禀赋对化肥投入强度的影响为例

向　涛，綦　勇
（东北大学 工商管理学院，辽宁 沈阳 110619）

摘　要：随着世界人口的不断增长，传统农业背景下的粮食安全与农业面源污染的冲突越来越激烈。文章利用 2002—2009 年农地禀赋与化肥投入强度的 72 国面板数据，运用动态面板数据方法研究了粮食安全状况对农业面源污染的影响机制。结果表明：(1)农地禀赋既会直接影响化肥投入强度，也会通过农业保护和粮食进口间接地影响化肥投入强度，其中，农地禀赋通过农业保护途径降低了化肥投入强度，而通过粮食进口途径提高了化肥投入强度；(2)发达国家与发展中国家的影响机制存在差别，发达国家的农业保护所产生的间接效应更明显，而发展中国家的农地禀赋所产生的直接效应更明显。文章为我国政府在制定粮食安全政策和农业环境保护政策方面提供了启示和借鉴。

关键词：粮食安全；农业面源污染；农地禀赋；化肥投入强度；农业保护
中图分类号：F303　**文献标识码：**A　**文章编号：**1001-9952(2015)07-0132-13

一、引　言

从 1950 年到 2014 年的 60 多年间，世界人口从 25 亿增长到 72 亿，而到 2050 年将达到 90 亿左右，快速的人口增长使粮食安全成为全球的巨大挑战（Godfray 等，2010）。在全球人均农地资源不断减少的情况下，增加粮食供应则需要农业的深度开发（World Bank，2008），而在传统“石油农业”（王征兵和魏正果，1995）的大背景下则意味着使用更多的化肥和农药，从而存在农业面源污染的风险（Konradsen 等，2003）。

农业面源污染主要指在农业生产活动中氮素和磷素等营养物质、农药及其他有机或无机污染物质通过农田的地表径流和农田渗漏形成的环境污染，主要包括化肥污染、农药污染和畜禽粪便污染等（李秀芬等，2010）。以化肥为例，2013 年我国化肥投入量达5 912万吨，平均每公顷化肥投入量达 328.5 公斤，远高于世界平均水平（120 公斤/公顷），是美国的 2.6 倍与欧盟的 2.5 倍（农业部，2015）。之所以投入如此多的化肥，原因在于中国长期强调粮食自给，而在农地禀赋有限的情况下，只能以更多的化肥投入来弥补农地禀赋的不足。同时，为了提高粮食产量以保障粮食安全，中国政府制定了有利于粮食生产的农业补贴和限制进口等政策，这样做一方面导致了国内要素市场价格扭曲（葛继红和周曙东，2012），另一方面导致了粮食进口减少。在这样的背景下，农户为了提高粮食产量而加大化肥的投入量，使得农业面源污染问题加剧成为必然。过量施肥不仅增加农业生产成本、浪费资源，也造成耕地

收稿日期：2015-03-20
基金项目：国家自然科学基金项目（71103031，71273045）；中央高校基本科研业务费专项资金项目（N120406007）
作者简介：向　涛（1978－），男，重庆合川人，东北大学工商管理学院讲师；
綦　勇（1969－），男，辽宁沈阳人，东北大学工商管理学院教授，博士生导师。

板结、土壤酸化和水体污染。正因为认识到过量施肥的严重负面影响,农业部提出了《到2020年化肥使用量零增长行动方案》(农业部,2015)。

随着世界人口的不断增长,粮食安全保障与农业面源污染之间的冲突似乎越来越激烈,而粮食安全状况与相关的粮食安全政策对农业面源污染的影响机制到底如何,则需要实证研究来提供答案。因此,本文以化肥投入强度代表农业面源污染情况,基于化肥投入强度、农地禀赋、农业保护和粮食进口等变量的跨国面板数据,构建动态面板数据模型并采用广义矩估计(*GMM*)来对粮食安全与农业面源污染的关系进行实证分析。本文的主要创新点在于:第一,将粮食安全状况影响农业面源污染的机制细化为直接效应和间接效应。第二,选择化肥投入强度数据进行实证分析,不仅可验证基于其他农业面源污染指标(如农药使用强度)的研究的可信度,也可能进一步发现新的作用机制。第三,利用面板数据的时序性特点建立了动态面板模型,并运用系统广义距方法进行估计,可以更有效地避免内生性问题。

二、文献评述与理论分析

(一)文献评述

国内外学者对影响农业面源污染的因素做了许多探索。李海鹏和张俊飚(2009)、张晖和胡浩(2009)分别使用分省面板数据和时间序列数据对农业面源污染的环境库兹涅茨曲线进行验证,表明农业面源污染与经济增长之间存在"倒*U*形"关系。饶静等(2011)指出经济发展中农业结构演变、技术进步、农业资源需求、环境质量需求、环境投资、农业经营方式转变和农业面源污染控制政策等是影响农业面源污染的重要原因。华春林等(2013)认为农业教育培训一定程度上能够使农户的化肥投入更加合理,而何浩然等(2006)则认为农业技术培训与农户化肥的投入水平呈正相关关系,因此,农业教育培训项目对农业面源污染的影响还不十分确定。

有的学者注意到了粮食安全状况在影响农业面源污染上的基础性作用。倪国华和郑风田(2012)采用历史分析法研究了粮食安全与农业面源污染之间的关系,他们认为:中国的粮食安全战略过度依赖自给,粮食生产中使用了大量的化肥和农药等化学品,孕育了农业面源污染的系统性风险。曾靖等(2010)则分析了为保障粮食安全而增加化肥投入的必要性,同时也认识到化肥过度投入的弊端,因此强调合理施肥以减少对环境的负面影响。Schreinemachers 和 Tipraqsa(2012)利用农药使用强度跨国面板数据的研究发现,农产品产出每增长1%,农药使用强度会增长1.8%,但增长比率会随着国家的经济发展水平而降低。由于发达国家粮食安全状况优于发展中国家,并且发达国家在粮食安全和环境质量的权衡上更重视环境质量,其农药使用强度会随着经济发展水平的提高而逐渐下降;而发展中国家更注重粮食安全,其农药使用强度会随着经济发展水平的提高而逐渐上升(Carvalho,2006)。

粮食安全政策影响农业面源污染的机制也得到了学界的关注。在农业保护的影响方面,葛继红和周曙东(2012)采用分省面板数据的研究发现,中国对化肥行业的价格管制政策以及国家对农民实施补贴的财政支农政策导致了化肥要素市场扭曲,并对化肥农业面源污染物排放有显著的激发作用。在粮食贸易的影响方面,向涛和綦勇(2014)利用农药使用强度跨国面板数据的研究发现,粮食贸易会减少农药使用强度。上述文献尽管已经注意到相关政策对农业面源污染的影响,但并没有深入分析粮食安全状况通过相关政策对农业面源污染产生作用的机制。

（二）理论分析

粮食安全是指任何人在任何时候既有充足的粮食供应，又能够在物质、社会和经济上获得为了生存和健康所必需的足够食物（FAO，1996）。粮食安全的基础是粮食产量，保障粮食产量则意味着以农地、劳动、化肥等要素投入来生产。其中，农地禀赋是保障粮食安全的根本，是反映粮食安全状况最核心的指标（马永欢和牛文元，2009）。如图 1 所示，理论上，农地禀赋对化肥投入强度的影响既有直接效应，也有间接效应。在农地禀赋程度低的情况下，为了增加粮食产量，就不得不提高化肥等生产要素的投入。这种基于粮食生产函数和本国农地禀赋而形成的对化肥投入强度的直接影响，可定义为直接效应。农地禀赋程度低导致化肥投入强度高，使得直接效应为负。另外，为了保障粮食供给，还可以采取农业保护政策或者促进粮食进口的政策。首先，农地禀赋程度高会减少农业保护水平，而农业保护会提高化肥投入，因此农地禀赋通过农业保护途径会减少化肥投入。其次，农地禀赋程度高会减少粮食进口，而粮食进口会减少化肥投入，农地禀赋通过粮食进口途径会提高化肥投入。这些粮食安全政策所产生的影响是由粮食安全的资源状况间接导致的，因此可定义为间接效应。农地禀赋通过农业保护途径产生的间接效应为负，而通过粮食进口途径产生的间接效应为正，因此间接效应的综合影响并不确定。

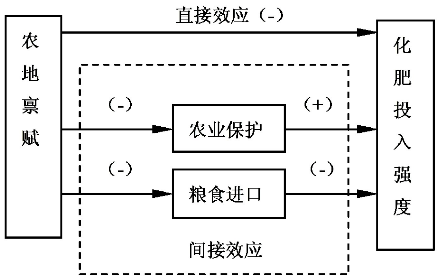

图 1　农地禀赋对化肥投入强度的直接效应和间接效应

三、模型设定与变量解释

（一）模型设定

面板数据的优点是可以对个体的动态行为进行建模，而由于惯性或部分调整，个体当前行为往往受到过去行为的影响。考虑到当期化肥投入强度可能会受前期化肥投入强度的影响，需要在解释变量中包含被解释变量的滞后期。因此，本文采用动态面板数据广义距估计方法。同时，由于误差项中的固定个体特征与解释变量可能相关，或者滞后的被解释变量与误差项可能相关，从而导致内生性问题。在跨国面板数据分析中，这类内生性问题往往难以找到有数据支持的合适的工具变量。本文引入系统广义距估计方法以解释变量自身来做工具变量，从而可以有效地解决内生性问题。相较于差分广义距估计，系统广义距估计具有更好的无偏性（Blundell 和 Bond，1998）。

基本回归模型和传导机制模型分别如式（1）和式（2）所示：

$$\ln(fert)_{it}=\beta_1\ln(fert)_{i,t-1}+\beta_2\ln(land_{it})+\beta_3X_{it}+\beta_4\ln(gni_{it})+\beta_5(\ln(gni_{it}))^2+\beta_6\ln(pop_{it})+c_i+y_t+u_{it} \tag{1}$$

$$X_{it}=\beta_1'X_{i,t-1}+\beta_2'\ln(land_{it})+\beta_3'\ln(gni_{it})+\beta_4'(\ln(gni_{it}))^2+\beta_5'\ln(pop_{it})+c_i+y_t+u_{it} \tag{2}$$

其中，下标 i 代表国家，t 代表年份；c_i 为每个国家的常数项；y_t 为年份虚拟变量，通过该变量可控制全球性经济波动的影响；u_{it} 为残差项；X_{it} 为中介变量，包括 nra_{it} 和 fir_{it}。中介变量在基本模型中为解释变量，在传导机制模型中为被解释变量。为使系数易于解释和减少异常观测值的过度影响，除了以百分比出现或者可取负值的变量之外，本文将其他变量均取对数。由于经济发展水平对化肥投入强度的影响可能呈二次函数形式，因此在模型中增加了人均国民收入的二次项。与文献中关于中介变量模型的标准设定一致（杨莉莉等，2014），本文在传导机制模型中加入了式(1)中的控制变量，但没有加入其他控制变量。这种处理使得中介变量系数的可比性更好。由于系统广义距估计可以有效地解决内生性问题，本文的处理方法不会出现严重的遗漏变量问题，从而能够得到无偏估计系数。因变量和解释变量由表1给出定义。

由于发达国家和发展中国家对粮食安全、农业保护和粮食贸易的相关政策存在系统性差异，上述变量对两类国家的影响机制可能不一样。因此，本文除了对总体样本进行回归之外，还分别对发达国家和发展中国家进行回归，以验证结论的稳健性，并发现两类国家的化肥投入强度影响机制的差异。两类国家的划分基于人均国民收入，人均国民收入高于1.5万美元的国家定义为发达国家。这个定义基本符合联合国开发计划署的标准。

表1　变量定义及描述性统计

变量名称	缩写	定义及说明	单位	均值	标准差	最小值	最大值
化肥投入强度	*fert*	化肥投入量/农地面积	公斤/公顷	91.853	90.734	0.010	521.200
人均农地	*land*	农地面积/人口	公顷/人	0.338	0.344	0.035	2.449
农业保护指数	*nra*	农业转移支付/农业产值×100	%	0.163	0.370	－0.604	2.369
粮食净进口率	*fir*	(粮食进口量－粮食出口量)/国内粮食供应量×100	%	10.463	45.323	－200.905	148.239
人均国民收入	*gni*	总国民收入/人口，使用购买力平价计算。	万美元/人	1.492	1.378	0.048	6.106
人口	*pop*		百万	61.292	141.948	1.033	1 190.138

注：国家数为72个，观测值为554个；数据来自于世界银行(http://data.worldbank.org/indicator)和联合国粮农组织(http://faostat3.fao.org/)。

（二）变量描述

1. 因变量为化肥投入强度(*fert*)。由于化肥施用是农业面源污染的主要来源之一（李秀芬等，2010），而单位土地上的化肥投入量能更好地反应化肥投入所导致的面源污染程度，化肥投入强度指标在农业面源污染研究文献中得到了广泛应用（李海鹏和张俊飚，2009；葛继红和周曙东，2012）。化肥投入强度指标数据来自于联合国粮农组织。这个数据库是目前唯一包含发达国家和发展中国家的化肥投入数据库，但遗憾的是这个数据库并没有包含中国。不过，由于中国人口规模巨大，在模型估计中很可能是一个特异值，排除中国之后的回归可能得到更加稳健的结果。当然，由于中国是发展中国家，因此本文的研究结论对中国具有一定借鉴意义。与文献中的做法一致（如 Schreinemachers 和 Tipraqsa，2012），为了避免特异值的过度影响，一些国家（如科威特，其化肥投入强度大于1 000公斤/公顷）被排除在外。

2. 核心解释变量为农地禀赋及相关政策。农地禀赋指标为人均农地面积(*land*)。[①] 为了和化肥投入强度指标保持一致，计算人均农地所使用的农地也为耕地和永久农作物用地

①由于农地质量指标没有相关数据，因此本文无法在回归分析中引入该变量。但是，由于相对稳定的农地质量指标的影响会反映在滞后期的因变量中，因此其影响也得到了一定程度的控制。

之和。派生于农地禀赋的主要政策包括农业保护和粮食进口。农业保护程度由农业保护指数(nra)度量,指农业转移支付占农业产值的比重(Anderson 和 Valenzuela,2008)。当存在农业补贴大于农业税收时,农业保护指数为正;反之则农业保护指数为负。粮食进口状况由粮食净进口率(fir)来度量,正的净进口率意味着粮食进口大于出口,负的净进口率则意味着粮食进口小于出口。

3. 其他控制变量包括人均国民收入(gni)和人口(pop)。普遍认为,在人均国民收入较低的时候,粮食安全是主要政策目标,因而人均国民收入的提高会导致化肥投入强度的提高,以保障粮食安全;而当人均国民收入较高时,环境质量成为更重要的考虑,人均国民收入的提高会导致化肥投入强度的降低。因此,人均国民收入对化肥投入强度的影响呈"倒U形",需要在回归方程里既包含人均国民收入的一次项,也包含人均国民收入的二次项。由于人口反映出国家规模,会给环境带来压力(葛继红和周曙东,2012),并会影响国家对粮食安全的重视程度,因此将其加入作为控制变量。

四、数据描述

(一)描述性统计

本文选取了72个国家2002—2009年的非平衡面板数据进行分析,数据来自于联合国粮农组织和世界银行的数据库。[①] 表1显示,化肥投入强度平均约为91.853公斤/公顷。平均化肥投入强度排序结果显示,世界排名前十的国家除了部分发达国家外,还包括埃及、智利等中等收入国家。[②] 而排名后十的国家除了哈萨克斯坦外,全部是最不发达的非洲国家。这基本符合化肥投入强度与经济发展水平呈"倒U形"关系的理论预期。化肥投入强度与人均国民收入的散点图(图2)也验证了"倒U形"关系的存在。由于经济发展水平对化肥投入强度存在非线性影响,发达国家与发展中国家之间可能存在系统性差异,需要进一步的描述性分析。

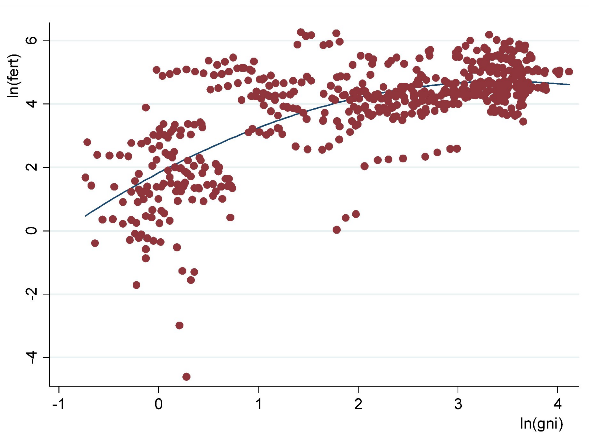

图2 化肥投入强度与人均国民收入关系图

①由于计算粮食净进口率的国内粮食供应量变量只有2009年以前的数据,而化肥投入强度的统计数据在2002年时调整了标准,导致2002年前后数据不可比,因此本文可选取的最大时间范围为2002—2009年。

②化肥投入强度排名前十的国家包括埃及、爱尔兰、韩国、荷兰、智利、日本、英国、斯洛文尼亚、越南和哥伦比亚,排名后十的国家包括尼日利亚、坦桑尼亚、加纳、苏丹、莫桑比克、多哥、贝宁、马达加斯加、哈萨克斯坦和乌干达。

（二）发达国家和发展中国家的差异

图 3(a)、图 3(b)分别描述了发达国家和发展中国家在观测期内按年平均后的化肥投入强度、农地禀赋和农业保护指数的变化趋势，比较两幅图可以发现：首先，两类国家的化肥投入强度水平存在差异，发达国家的平均化肥投入强度在 130 公斤/公顷左右，发展中国家的平均化肥投入强度则在 65 公斤/公顷左右，发达国家平均化肥投入强度差不多是发展中国家化肥投入强度的两倍。其次，发达国家的化肥投入强度在不断降低，从期初的 141.628 公斤/公顷下降到期末的 116.274 公斤/公顷，而发展中国家的化肥投入强度则在不断提高，从 56.592 公斤/公顷上升到 69.265 公斤/公顷。再次，相对于发达国家比较稳定的人均农地，发展中国家的人均农地下降比较显著。最后，发达国家的农业保护指数显著大于发展中国家的农业保护指数，但下降很快，从接近 0.600 下降到 0.200 左右。

图 3 反映出两类国家在影响化肥投入强度的机制方面可能存在显著差异。由于农地禀赋减少会增加化肥投入强度，因此发达国家不断降低的化肥投入强度似乎不能从农地禀赋角度得到解释。而显著降低的农业保护指数似乎更有力地促进了化肥投入强度的降低。对于发展中国家来说，比较稳定的农业保护指数难以解释不断提高的化肥投入强度，而不断减少的人均农地禀赋，则似乎更能解释不断提高的化肥投入强度。当然，到底哪种因素在显著影响两类国家的化肥投入强度，则需要进一步的回归检验。

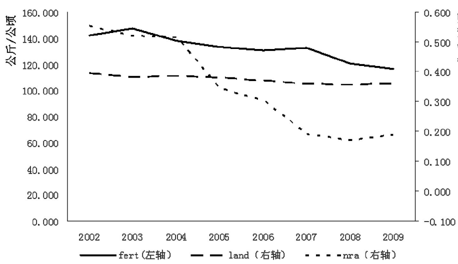

图 3(a)发达国家的发展趋势

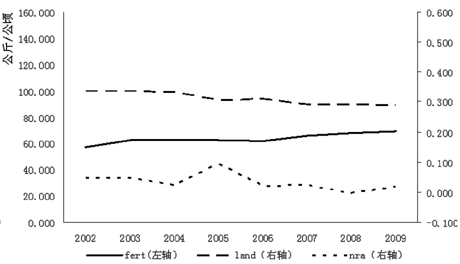

图 3(b)发展中国家的发展趋势

（三）农地禀赋对化肥投入和粮食安全政策的影响

为了进一步发现农地禀赋对化肥投入和粮食安全相关政策的影响，我们按照观测期内人均农地均值的中位数将样本国家分为两组：农地稀缺国和农地丰富国。表 2 显示了各变量在不同组别国家内的样本平均值。农地稀缺国的化肥投入强度显著高于农地丰富国，可能的原因在于：为了保障粮食安全，农地较少的国家只能通过增加化肥投入来提高粮食产量。另外，农地稀缺也导致了更高的农业保护程度和更多的粮食净进口。更高的农业保护程度可能促进化肥投入强度的提高。然而，尽管粮食净进口有可能降低化肥投入强度，但描述性统计显示这种效应还不足以抵消农地稀缺和农业保护的影响。

表 2　农地丰富国和农地稀缺国的差异

变量	(1)农地稀缺国	(2)农地丰富国	(1)－(2)
fert	129.675	52.922	76.753***
	(108.695)	(39.704)	(0.000)
nra	0.559	0.090	0.143***
	(0.546)	(0.210)	(0.000)
fir	30.293	－9.949	40.243***
	(32.643)	(47.485)	(0.000)
观察值	281	273	—

注：前两列数值为组内样本平均值，括号内为标准差；最后一列数值为前两列平均值的差，括号内为均值差 t 检验的 P 值，*** 表示 1%的显著性水平。

五、实证结果

根据 Angrist 和 Pischke(2009)的观点,回归模型中的控制变量可以概括为三类:(1)因核心解释变量(本文为农地禀赋)而引致的变量。因为这类变量是核心解释变量与因变量之间的中介变量,控制这些变量会导致估计的偏误。(2)与核心解释变量基本无关的变量。如人均国民收入,其与农地禀赋变量并无直接联系,控制与否不影响估计结果的无偏性与一致性。(3)同时影响核心解释变量和因变量的因素。如果未能有效控制会出现严重的估计偏误。农业保护和粮食进口变量属于第一类变量,因此在不加入这类变量时,对核心解释变量的系数估计则为核心解释变量对因变量的总体影响;而加入这类变量时,对核心解释变量的估计则是在剥离这些中介变量影响后的净效应。为了既发现农地禀赋对化肥投入强度的总体效应,又发现农地禀赋的直接效应和间接效应,本文分别做了两类回归:表3中模型Ⅰ—模型Ⅲ给出了总体效应的回归结果,模型Ⅳ—模型Ⅵ则给出了效应分解结果。

使用 *Stata* 12.0 软件进行系统广义距估计,有两个重要的诊断统计量(*AR*(1)、*AR*(2))和 *Hansen* 检验,前两项的原假设为"残差项 u_{it} 无自相关",可以通过检验扰动项的差分是否存在一阶与二阶自相关来检验原假设;同时,为了检验工具变量的有效性,需要对其进行过度识别检验,故 *Hansen* 检验的原假设为"所有工具变量均有效"。表3中所展示的由系统广义距估计所得的 *AR*(1)、*AR*(2)和 *Hansen* 检验表明:扰动项的差分不存在二阶自相关,模型工具变量的使用在总体上是有效的。

(一)总体效应

表3中模型Ⅰ—模型Ⅲ没有控制农业保护和粮食进口这类中介变量,因此给出的是同时包含直接效应和间接效应的总体回归结果。模型Ⅰ的结果表明,丰富的农地禀赋会减少化肥投入强度,人均农地每减少1个百分点,化肥投入强度会增加0.250个百分点,并且通过了显著性水平为1%的统计检验。由于农地禀赋丰富意味着粮食生产的资源状况较好,因此较好的粮食安全状况确实能降低化肥投入强度。

表3 基本模型的回归结果

	模型Ⅰ	模型Ⅱ	模型Ⅲ	模型Ⅳ	模型Ⅴ	模型Ⅵ
样本	全部国家	发达国家	发展中国家	全部国家	发达国家	发展中国家
$L.\ln(fert)$	0.739***	0.656***	0.761***	0.754***	1.021***	0.763***
	(128.593)	(5.395)	(50.618)	(70.426)	(6.589)	(22.164)
$\ln(land)$	−0.250***	−1.012**	−1.463***	−0.258***	−0.078	−0.411***
	(−8.222)	(−2.258)	(−3.194)	(−8.563)	(−0.355)	(−5.718)
nra				0.071***	0.183**	0.072
				(2.637)	(2.005)	(0.756)
fir				−0.002***	−0.001*	−0.002***
				(−6.123)	(−1.866)	(−3.882)
$\ln(gni)$	0.528***	0.079	1.357***	0.338***	1.315	0.372***
	(29.716)	(0.104)	(4.013)	(6.918)	(0.413)	(3.834)
$(\ln(gni))^2$	−0.089***	−0.009	−0.075**	−0.043***	−0.204	−0.044
	(−13.911)	(−0.063)	(−2.500)	(−3.436)	(−0.420)	(−1.285)
$\ln(pop)$	0.028	0.160	−0.317	0.028**	0.046	0.027
	(1.006)	(0.727)	(−1.087)	(2.498)	(0.216)	(0.955)
常数项	−0.009	−0.559	−1.662	0.097	−2.456	−0.192
	(−0.176)	(−0.282)	(−1.338)	(1.532)	(−0.441)	(−1.576)
时间效应	是	是	是	是	是	是
AR(1)检验 *P* 值	0.084	0.006	0.089	0.087	0.001	0.094

续表3　基本模型的回归结果

	模型Ⅰ	模型Ⅱ	模型Ⅲ	模型Ⅳ	模型Ⅴ	模型Ⅵ
样本	全部国家	发达国家	发展中国家	全部国家	发达国家	发展中国家
AR(2)检验 *P* 值	0.181	0.682	0.165	0.183	0.356	0.178
Hansen 检验 *P* 值	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
观测值	483	201	282	483	201	282

注:括号中的数字为 t 值;***、** 和 * 分别表示 1%、5%和 10%的显著性水平。由于本文使用的数据为非平衡面板数据,因此样本总体的观测值并不是 72 的倍数。下同。

农地禀赋与化肥投入强度之间的关系不受样本选择的影响,模型Ⅱ和模型Ⅲ的分组回归结果与模型Ⅰ的全部样本回归结果的系数符号基本一致;不过,分组回归结果之间存在一些数值上的差异。相对于发展中国家,发达国家的农地禀赋对化肥投入强度的影响较小,且只在 5%的水平上显著,这说明发达国家的粮食安全状况和农地禀赋的关系较弱。而对于发展中国家来说,农地禀赋对化肥投入强度的影响很大,说明发展中国家的化肥投入强度更多的是受资源约束。

与文献中的结论一致(如张晖和胡浩,2009;Schreinemachers 和 Tipraqsa,2012),人均国民收入对化肥投入强度的影响呈"倒 *U* 形",这对总体样本和发展中国家都成立。① 人口规模对化肥投入强度的影响不显著,其原因主要在于:因变量和农地禀赋变量均为平均数指标,而人口规模为总量指标。相对于平均数指标,总量指标的影响并不显著。如果剔除农地禀赋变量,人口规模对化肥投入强度的影响则变得非常显著。这说明人口规模对化肥投入强度的影响基本取决于农地禀赋状况;并且,相对于人均农地面积,人口规模对化肥投入强度的影响较不显著。

(二)直接效应及相关政策的影响

表 3 中模型Ⅳ—模型Ⅵ是在加入农业保护和粮食进口变量后的估计结果,因此能区别粮食安全状况对化肥投入强度的直接效应和相关政策对化肥投入强度的影响。模型Ⅳ的结果表明,在控制了农业保护和粮食进口等因素后,农地禀赋仍然会减少化肥投入强度,说明农地禀赋对化肥投入强度的直接效应存在。人均农地禀赋每减少 1 个百分点,化肥投入强度会增加 0.258 个百分点,且通过了显著性水平为 1%的统计检验。这个结果与不控制农业保护和粮食进口变量的结果相差不大。

第三行的回归系数表明农业保护会提高化肥投入强度。农业保护往往会导致粮食市场和要素市场朝着有利于粮食生产的方向发展,从而会促进化肥投入强度的提高。这个结论与葛继红和周曙东(2012)利用分省面板数据所得出的结果一致,说明他们的结论适用于跨国面板数据的检验。粮食净进口会显著地降低化肥投入强度,这说明粮食进口补充了国内粮食供给的不足,减少了对粮食生产的依赖,从而最终减少了化肥投入。如果像描述性统计分析所指出的那样,农业保护政策和粮食进口政策的制定受制于粮食安全状况,那么粮食安全状况通过农业保护和粮食贸易影响化肥投入强度的间接效应确实存在。但是,粮食安全状况是否能显著地影响农业保护和粮食进口,则需要进一步检验。

①"倒 *U* 形"关系假说在发达国家并不显著成立,发达国家并没有随着收入增高而显著降低化肥投入强度,其原因可能在于:发达国家使用的化肥质量较好,或者进行了结构控制,对环境的负面影响较小。例如,在欧洲通常规定生态农业不允许使用氮素化肥和农药,对磷素化肥的种类和用量也有严格的限制(张维理等,2004)。当然,分组后的样本较小也可能是系数不显著的技术原因。

模型Ⅴ和模型Ⅵ的分组回归结果进一步揭示了发达国家与发展中国家的粮食安全状况影响化肥投入强度的差异。对于发达国家来说，农业保护的影响系数相较于总体回归和发展中国家来说都更大，说明发达国家的农业保护更明显地影响了化肥投入强度。而农地禀赋对化肥投入强度的直接影响在控制农业保护和粮食进口的影响后已经不显著。因此，对于发达国家来说，农地禀赋对化肥投入强度的影响较小，原因在于发达国家可以利用其他更有力的手段。发达国家更加重视环境质量而降低了农业保护程度，或者通过粮食进口等措施来保障粮食安全，最终降低了化肥投入强度。对于发展中国家来说，农业保护对化肥投入强度的影响系数小于总体回归和发达国家的回归结果，说明发展中国家的农业保护较弱，对化肥投入强度的作用也较小。因此，对于发展中国家来说，以农地禀赋为标志的粮食安全状况的直接效应更明显。

分组回归结果印证了图 3 所显示出的描述性规律，对于发达国家来说，农业保护等政策的间接效应更明显；而对于发展中国家来说，农地禀赋等粮食生产资源状况的直接效应更明显。这说明发达国家由于经济实力较强，有更多的资源投入到经济政策中以促进化肥投入朝着有利于社会福利的方向发展，而发展中国家的化肥投入强度较严重地受制于资源因素，而其他政策的调节功能相对较弱。

（三）传导机制

如果农地禀赋影响化肥投入强度的间接效应存在，则需要农地禀赋对中介变量存在显著影响。尽管表 2 已显示农地禀赋与农业保护和粮食进口之间有很强的相关性，但它们之间是否存在因果关系，则需要实证检验。从表 4 可看出，农地禀赋确实显著地降低了农业保护和粮食进口。不过比较特殊的是，发展中国家的农地禀赋对农业保护的影响为正，但未能通过显著性为 10%的统计检验。一个可能的解释是：农地禀赋程度低的发展中国家尽管希望保护农业，却没有足够的资源用于保护农业，它们甚至依靠农业来提供财政收入。由于农业保护和粮食进口会影响化肥投入强度，而农地禀赋又对农业保护和粮食进口具有影响，因此，农地禀赋通过农业保护和粮食进口间接影响化肥投入强度的机制确实存在。

表 4 传导机制模型的结果回归

	模型Ⅶ	模型Ⅷ	模型Ⅸ	模型Ⅹ	模型Ⅺ	模型Ⅻ
样本	全部国家	发达国家	发展中国家	全部国家	发达国家	发展中国家
因变量	*nra*			*fir*		
L.nra	0.748***	0.801***	0.641***			
	(190.479)	(53.157)	(10.606)			
L.fir				0.851***	0.905***	0.930***
				(125.557)	(17.314)	(117.168)
ln(*land*)	−0.027***	−0.327*	0.188	−8.740***	−8.587***	−4.763***
	(−5.284)	(−1.947)	(0.923)	(−18.551)	(−2.909)	(−7.590)
ln(*gni*)	−0.013	−0.650	−0.067	−4.607***	137.043	0.368
	(−1.367)	(−1.545)	(−0.672)	(−5.618)	(1.134)	(0.274)
$(\ln(gni))^2$	0.008***	0.062	−0.000	0.938***	−23.312	−0.794**
	(2.665)	(0.968)	(−0.027)	(4.575)	(−1.188)	(−1.969)
ln(*pop*)	0.031***	0.075***	−0.036	−0.984**	6.583	−0.826
	(4.608)	(2.610)	(−0.410)	(−2.218)	(1.251)	(−1.309)
常数项	−0.161***	0.845	0.463	−7.773***	−223.679	−3.043
	(−7.082)	(1.139)	(0.800)	(−4.655)	(−1.160)	(−1.445)
时间效应	控制	控制	控制	控制	控制	控制
AR(1)检验 *P* 值	0.000	0.028	0.000	0.092	0.171	0.006

续表4　传导机制模型的结果回归

	模型Ⅶ	模型Ⅷ	模型Ⅸ	模型Ⅹ	模型Ⅺ	模型Ⅻ
样本	全部国家	发达国家	发展中国家	全部国家	发达国家	发展中国家
因变量	*nra*			*fir*		
$AR(2)$检验 P 值	0.466	0.204	0.295	0.955	0.457	0.059
Hansen 检验 P 值	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
观测值	482	200	282	484	201	283

注:由于广义距估计要使用滞后项做工具变量,在非平衡面板数据的情况下,回归方程中变量的差异会导致观测值的数量有一定差异。由于本表的滞后项与表3中的滞后项不同,在非平衡面板数据的情况下,本表的观测值与表3的观测值存在差异。

将表3与表4的回归结果结合起来就可以测算出上述两种传导途径的相对影响程度,并可与直接效应相比较。表5中 β_3 列为表3中模型Ⅳ的三个传导途径的相应系数。Ω为农地禀赋对中介变量的影响系数,农地禀赋本身系数为1,其他中介变量系数为表4中农地禀赋分别与其对应的回归系数。两者的乘积反映了农地禀赋分别通过两种传导途径对化肥投入强度产生的绝对影响程度,[①]最后一列是各效应的相对影响程度。结果显示:直接效应占主导地位;间接效应中,粮食进口的相对影响程度的绝对值更大;国家分组结果中,发展中国家的总体效应(−0.401)的绝对值大于发达国家(−0.051),且发展中国家的直接效应占主导,而发达国家通过农业保护的间接效应占主导。

表5　直接效应与间接效应比较

	效应	β_3	Ω	绝对影响程度($\beta_3\times\Omega$)	相对影响程度(%)
全部国家	直接效应	−0.258	1	−0.258	106.419
	间接效应				
	nra	0.071	−0.027	−0.002	0.791
	fir	−0.002	−8.740	0.017	−7.210
	总计			−0.242	100.000
发达国家	直接效应	不显著	1	不显著	不显著
	间接效应				
	nra	0.183	−0.327	−0.060	116.754
	fir	−0.001	−8.587	0.009	−16.754
	总计			−0.051	100.000
发展中国家	直接效应	−0.411	1	−0.411	102.373
	间接效应				
	nra	不显著	不显著	不显著	不显著
	fir	−0.002	−4.763	0.010	−2.373
	总计			−0.401	100.000

六、结论及政策启示

粮食安全状况不仅会直接影响农业面源污染,而且会通过农业保护和粮食贸易政策间接地影响农业面源污染。本文利用农地禀赋和化肥投入强度的跨国面板数据分析得出如下结论:农地禀赋既会直接影响化肥投入强度,也会通过农业保护和粮食进口间接地影响化肥

①尽管农业保护变量和粮食进口变量的量纲不一致,但由于最终影响为农地禀赋对化肥投入强度的影响,量纲因素在相乘的过程中抵消了,即 $\frac{\partial(\ln(fert))}{\partial X}\times\frac{\partial X}{\partial(\ln(land))}=\frac{\partial(\ln(fert))}{\partial(\ln(land))}$。因此,不同中介变量带来的间接效应之间,以及间接效应和直接效应之间,均具有可比性。

投入强度，其中，农地禀赋通过农业保护途径会降低化肥投入强度，通过粮食进口途径会提高化肥投入强度；人均国民收入对化肥投入强度的影响呈“倒 U 形”。

发达国家和发展中国家在化肥投入强度的影响机制上存在差别。发达国家的农业保护政策对农业面源污染的影响比农地禀赋的影响更显著，而发展中国家的农地禀赋的影响更显著。这说明发达国家粮食安全状况的间接效应更明显，而发展中国家粮食安全状况的直接效应更明显。

本文的结论具有一定的政策启示。首先，粮食安全与环境安全之间的矛盾随着人口的增长而越来越尖锐，如何化解两者之间的矛盾是一个需要长期研究的问题。在发展主义的背景下，人们把解决这一问题的希望寄托在科学技术上。实际上，现在仍有很多人把工业化农业视作以科学技术解决粮食安全问题的成功案例。然而，从历史进程来看，每一次技术进步都是对生态环境破坏能力的升级（倪国华和郑风田，2012）。当前，中国很多地方仍在继续推动借助工业化理念发展农业，形成“一县一业”、“一村一品”的农业格局，这种工业化农业方式如果不加以合理规划，势必会造成生态平衡被打破等环境问题（张忠潮和任格格，2014）。面对工业化农业，发达国家已经开始掀起反对浪潮。以德国为例，从 2011 年开始，德国每年都举行“我们受够了！”游行，反对日益工业化的农业，支持家庭农业（蒋亦凡，2015）。鉴于粮食安全与环境安全之间日益激烈的冲突，联合国粮农组织在其政策性文件《可持续农业生产：对国际农业研究的要求》中指出，农业可持续发展应该是以管理和保护自然资源为基础，以调整技术和机构改革为方向，最终确保有足够的农产品持续地满足当代人和后代人的需要。这种可持续发展不仅能够保护土地、水资源和动植物基因资源，还不会造成自然环境的退化，同时做到在技术上适宜、经济上可行和社会上可接受。

其次，粮食安全和农业面源污染的紧密联系使得政府在考虑相关政策时，必须将两者结合起来，而不能顾此失彼。从粮食安全的视角看待农业面源污染，主要关注点在于粮食的供给是否超出了环境承载能力，导致环境逆向演化，进而影响粮食供给能力的稳定性和可持续性。如果政府为了保障粮食安全而片面强调粮食生产，农业面源污染就难以避免。中国政府已经意识到粮食安全与农业面源污染之间的冲突，因而在 2015 年中央一号文件中明确提出：“走产出高效、产品安全、资源节约、环境友好的现代农业发展道路。”并在《到 2020 年化肥使用量零增长行动方案》中进一步强调：“增加有机肥资源利用，减少不合理化肥投入，加强宣传培训和肥料使用管理，走高产高效、优质环保、可持续发展之路，促进粮食增产、农民增收和生态环境安全。”

再次，粮食安全状况对化肥投入强度的影响既有直接效应，又有间接效应，因此在制定政策时需要综合考虑。丰富的农地禀赋有助于减少化肥投入强度，因此保护农地不仅能保障粮食安全，也能减少化肥投入。而农业保护在保障粮食安全的同时，会促进化肥投入强度的提高，从而提高产生农业面源污染的风险，因此，随着经济实力的提升，在粮食安全基本得到保障的情况下，考虑到农业保护对环境的负面影响，可以适度降低农业保护程度。这与其他文献的建议吻合（如葛继红和周曙东，2012），也是发达国家现阶段普遍采用的措施。粮食进口的增加在改善粮食安全状况的同时，可以降低化肥投入强度，从而成为摆脱“石油农业”困境的有效手段之一。中国目前已经进入工业化中后期，有实力做到两条腿走路，因而 2015 年中央一号文件明确提出：“提高统筹利用国际国内两个市场两种资源的能力”。

最后，粮食安全状况对不同发展水平的国家在影响机制上的差异性决定了在制定政策以减少农业面源污染时要具有针对性和动态性。对于发达国家，农业保护政策的调整能更有效

地减少化肥投入强度;而对于发展中国家,农地资源的保护更有利于减少对化肥的依赖;由于最不发达国家的化肥投入强度极低,可以制定政策促进化肥投入强度的提高以保障粮食安全。随着中国经济发展水平的不断提高,各种粮食安全政策对农业面源污染的影响效果也会变化,因此需要相应地做出政策调整。在经济发展水平较低时,保护耕地会有效地扼制化肥投入的增加;而在经济发展水平较高时,调整农业保护政策会更有效地减少化肥投入。

参考文献:

[1]葛继红,周曙东. 要素市场扭曲是否激发了农业面源污染——以化肥为例[J]. 农业经济问题,2012,(3):92-98.

[2]何浩然,张林秀,李强. 农民施肥行为及农业面源污染研究[J]. 农业技术经济,2006,(6):2-10.

[3]华春林,陆迁,姜雅莉,等. 农业教育培训项目对减少农业面源污染的影响效果研究——基于倾向评分匹配方法[J]. 农业技术经济,2013,(4):83-92.

[4]蒋亦凡. 面对工业化农业,德国人说:"我们受够了!"[EB/OL]. http://www.thepaper.cn/newsDetail_forward_1322831, 2015-05-02/2015-05-20.

[5]李海鹏,张俊飚. 中国农业面源污染与经济发展关系的实证研究[J]. 长江流域资源与环境,2009,(6):585-590.

[6]李秀芬,朱金兆,顾晓君,等. 农业面源污染现状与防治进展[J]. 中国人口·资源与环境,2010,(4):81-84.

[7]马永欢,牛文元. 基于粮食安全的中国粮食需求预测与耕地资源配置研究[J]. 中国软科学,2009,(3):11-16.

[8]倪国华,郑风田. 粮食安全背景下的生态安全与食品安全[J]. 中国农村观察,2012,(4):52-58.

[9]农业部. 农业部关于印发《到2020年化肥使用量零增长行动方案》和《到2020年农药使用量零增长行动方案》的通知[EB/OL]. http://www.moa.gov.cn/zwllm/tzgg/tz/201503/t20150318_4444765.htm, 2015-03-18/2015-05-20.

[10]饶静,许翔宇,纪晓婷. 我国农业面源污染现状、发生机制和对策研究[J].农业经济问题,2011,(8):81-87.

[11]王征兵,魏正果. 中国农业经营方式:精细密集农业[J]. 管理世界,1995,(5):195-200.

[12]向涛,綦勇. 粮食安全、食品安全与贸易——基于农药使用强度的跨国面板数据分析[J]. 国际贸易问题,2014,(7):33-41.

[13]杨莉莉,邵帅,曹建华. 资源产业依赖对中国省域经济增长的影响及其传导机制研究——基于空间面板模型的实证考察[J]. 财经研究,2014,(3):4-16.

[14]曾靖,常春华,王雅鹏. 基于粮食安全的我国化肥投入研究[J]. 农业经济问题,2010,(5):66-70.

[15]张晖,胡浩. 农业面源污染的环境库兹涅茨曲线验证——基于江苏省时序数据的分析[J]. 中国农村经济,2009,(4):48-53.

[16]张维理,冀宏杰,Kolbe H,等. 中国农业面源污染形势估计及控制对策Ⅱ. 欧美国家农业面源污染状况及控制[J]. 中国农业科学,2004,(7):1018-1025.

[17]张忠潮,任格格. "一村一品"战略的环境影响评价及启示[J]. 西北农林科技大学学报(社会科学版),2014,(3):24-27.

[18]Anderson K, Valenzuela E. Estimates of global distortions to agricultural incentives, 1955 to 2007 [R]. World Bank, 2008.

[19]Angrist J D, Pischke J S. Mostly harmless econometrics: An empiricist's companion [M].Princeton: Princeton University Press, 2009.

[20]Blundell R, Bond S. Initial conditions and moment restrictions in dynamic panel data models [J]. Journal of Econometrics, 1998, 87(1): 115-143.

[21]Carvalho F P. Agriculture, pesticides, food security and food safety [J]. Environmental Science & Policy, 2006,9(7－8): 685－692.

[22]Food and Agriculture Organization (FAO).Rome declaration on world food security [EB/OL]. http://www.fao.org/docrep/003/w3613e/w3613e00.htm, 1996-11-17/2015-05-20.

[23]Godfray H C J, Beddington J R, Crute I R,et al. Food security: The challenge of feeding 9 billion people [J]. Science, 2010, 327(5967): 812－818.

[24]Konradsen F, van der Hoek W, Cole D C,et al. Reducing acute poisoning in developing countries－options for restricting the availability of pesticides [J]. Toxicology, 2003, 192(2): 249－261.

[25]Schreinemachers P, Tipraqsa P. Agricultural pesticides and land use intensification in high, middle and low income countries [J]. Food Policy, 2012, 37(6): 616－626.

[26]World Bank.World development report 2008:Agriculture for development[R]. World Bank, 2008.

Food Security and Agricultural Non-point Source Pollution: Taking the Impact of Agricultural Land Endowments on Fertilizer Use Intensity as an Example

Xiang Tao, Qi Yong

(*School of Business Administration, Northeastern University, Shenyang* 110619, *China*)

Abstract: With the constant increase in population in the world, the conflict between food security and agricultural non-point source pollution in the background of traditional agriculture is more and more fierce. Based on the panel data of agricultural land endowments and fertilizer use intensity in 72 countries from 2002 to 2009, this paper uses dynamic estimation to analyze the impact of food security on agricultural non-point source pollution. It arrives at the results as follows: firstly, agricultural land endowments have not only direct impact on fertilizer use intensity, but also indirect impact via agricultural protection and food import; agricultural land endowments lead to the decrease in fertilizer use intensity via agricultural protection and the increase in fertilizer use intensity via net import of food; secondly, the impacts are different between developed and developing countries: the indirect impact resulting from agricultural protection in developed countries is more significant while the direct impact resulting from agricultural land endowments in developing countries is more significant. It provides implications and reference for the formulation of food security policy and agricultural environment protection policy in China.

Key words: food security; agricultural non-point source pollution; agricultural land endowment; fertilizer use intensity; agricultural protection

(责任编辑　景　行)