

中国及欧美主要国家化肥施用强度与综合效率比较研究

刘钦普¹, 孙景荣¹, 濮励杰²

(1. 南京晓庄学院环境科学与工程重点学科组, 南京 211171; 2. 南京大学地理与海洋科学学院, 南京 210093)

摘要: 提出化肥施用相对产出率和综合效率的计算模型, 基于联合国粮农组织数据, 对中国和 7 个欧美主要国家(英国、法国、德国、西班牙、意大利、美国和加拿大)的化肥施用强度和综合效率进行比较研究。结果表明: 1961—2017 年, 中国化肥施用强度呈快速波动增长的趋势, 从 3.1 kg/hm² 增加到 2014 年的高峰值 338.2 kg/hm² 后降低至 315.1 kg/hm²; 欧洲 5 国化肥施用强度都呈现“上升—下降—上升—平稳”的波动变化, 波动幅度按西班牙、意大利、法国、德国、英国依次增大, 各国高峰值依次为 169.0、235.0、438.3、503.4、594.9 kg/hm²; 美国和加拿大呈现小幅度波动上升的变化, 高峰值分别约为 213.7、140.1 kg/hm²。8 个国家的化肥施用强度趋于围绕国际公认的化肥安全施用上限 225 kg/hm², 约在 120~350 kg/hm² 的范围内聚集和稳定。就化肥施用综合效率对比, 西班牙基本上一直为最低水平; 中国和加拿大由最高波动下降至法意德美英 5 国之下; 该 5 国的综合效率 2010 年前皆呈增长趋势, 此后则快速下降至平稳波动; 2010 年以来, 综合效率的大小排序基本上是法国、意大利、德国、美国、英国、中国、西班牙、加拿大, 综合效率平均值分别为 0.88、0.85、0.81、0.71、0.67、0.57、0.54、0.49。法国是化肥施用强度中等、综合效率高、粮食产量高、施肥安全的国家, 可为中国实现化肥施用负增长提供借鉴。

关键词: 农业; 化肥; 化肥施用强度; 相对产出率; 综合效率; 欧美主要国家

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2020.14.002

中图分类号: X592

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2020)-14-0009-08

刘钦普, 孙景荣, 濮励杰. 中国及欧美主要国家化肥施用强度与综合效率比较研究[J]. 农业工程学报, 2020, 36(14): 9-16. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2020.14.002 <http://www.tcsae.org>

Liu Qinpu, Sun Jingrong, Pu Lijie. Comparative study on fertilization intensity and integrated efficiency in China and Euro-American major countries[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2020, 36(14): 9-16. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2020.14.002 <http://www.tcsae.org>

0 引言

近几十年来, 随着世界人口的增加和对粮食的需求, 农业生产化肥用量也越来越大。据不完全统计, 世界化肥农用量 2017 年达到 24 522 万 t (折纯量), 中国化肥施用量达到 5 859 万 t (折纯量)。化肥施用给世界农业带来 33%~66% 的产量增长^[1], 但在中国和其他一些国家的过量施肥, 也带来了严重的农业面源污染问题, 引起了各国政府、机构和专家学者的重视^[2]。美国大部分州都制定了化肥法律, 德国颁布了《施肥令》、《土壤保护法》和《生态农业法案》, 要求农业生产者严格按照要求施用化肥^[3]。法国在 1985 年将“生态农业”写入法律, 后来逐渐建立了一套完整的农业管理体系, 从而推动法国成为欧洲第一生态农业大国。中国 2019 年要求“加大农业面源污染治理力度, 开展农业节肥节药行动, 实现化肥农药使用量负增长”。因此, 合理施用化肥, 提高化肥施用效率, 是世界农业长期以来需要研究解决的现实问题。

国内外用多种指标进行化肥施用效率的研究。如作物边际产量^[4]、作物生产效率^[5]、肥料利用率^[6]、化肥农学效率^[7-8]、化肥技术效率^[9]和化肥偏生产力^[10]等。徐亚新等^[11]主要通过对在中国知网数据库检索到的 2000—2016 年 400 多篇马铃薯田间试验数据分析, 发现中国马铃薯氮(N)、磷(P₂O₅)和钾(K₂O)农学效率平均值分别为 52.2、58.5 和 42.3 kg/kg, 偏生产力平均值分别为 205.7、339.0 和 209.2 kg/kg, 化肥利用率(养分回收率)平均值分别为 36.4%、18.5%和 27.6%。张福锁等^[12]统计中国粮食主产区 2001—2005 年 1 333 个田间试验数据, 计算出水稻、小麦和玉米氮肥的偏生产力分别为 54.2、43.0、51.6 kg/kg, 氮肥利用率分别为 28.3%、28.2%和 26.1%。杨增旭等^[13]采用随机生产函数法测算出中国 1996—2009 年间小麦和玉米化肥施用平均技术效率分别为 0.474 和 0.452, 与张福锁等基于田间试验得出的肥料利用率存在明显差异。杨印生等^[14]基于数据包络分析研究玉米种植施肥效率, 结果表明变量施肥比传统施肥技术效率高, 更容易获得规模收益。国内研究从不同的角度认识不同作物的化肥施用效率, 对农业生产有一定的参考和指导作用, 但多基于国内数据资料或较为复杂的计算, 缺乏与国外发达国家化肥施用强度及效率的系统比较研究。因此, 本文根据联合国粮农组织提供的 1961—2017 年各国化肥施用量和粮食产量等数据, 提出化肥施用相对产

收稿日期: 2020-03-23 修订日期: 2020-06-10

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(41230751); 国家自然科学基金面上项目(41871083); 南京市环境科学与工程重点学科项目(2017-2020)。

作者简介: 刘钦普, 博士, 教授, 主要从事土地资源利用与环境评价研究。

Email: liuqinpu@163.com

出率和综合效率的概念及其较为简单的计算模型, 对中国和英国、法国、德国、西班牙、意大利、美国、加拿大的化肥施用强度和效率进行比较研究, 一方面, 对化肥施用效率测算提供有效方法, 另一方面, 为探讨中国和欧美主要国家化肥施用强度和效率的变化规律及中国化肥施用存在的问题, 促进中国农业化肥施用负增长提供决策依据。

1 方法与数据来源

1.1 模型设定

1.1.1 化肥施用强度

化肥施用强度 (Fertilization Intensity, FI) 是一个常用的概念, 但有 2 种不同的表示方法: 1) 指 1a 内单位耕地面积化肥施用数量^[15]; 2) 指单位作物播种面积化肥施用量, 如 2010 年原国家环保部“关于印发《国家级生态乡镇申报及管理规定 (试行)》的通知”^[16]对化肥施用强度的解释是“指乡镇辖区内实际用于农业生产的化肥施用量 (包括氮肥、磷肥、钾肥和复合肥) 与播种面积之比”。由于中国与欧美国家复种指数差别很大, 为了便于比较各国化肥施用对作物生产的作用, 本研究用第 2 种方法计算化肥施用强度 (折纯量)。计算公式^[16]为

$$FI = M/A \quad (1)$$

式中 FI 表示化肥施用强度, kg/hm^2 ; M 表示化肥施用总量, kg ; A 表示作物播种面积, hm^2 。

按照国际上通用的化肥安全施用上限为 $225 \text{ kg}/\text{hm}^2$ 的标准^[17], 参考张福锁等^[12]对化肥施用强度等级以 100 kg 间隔划分方法, 本研究将化肥施用强度 ≤ 50 、 $>50 \sim 150$ 、 $>150 \sim 250$ 、 $>250 \sim 350$ 、 $>350 \text{ kg}/\text{hm}^2$ 的变化范围, 分为低强度、较低强度、中强度、较高强度、高强度 5 个类型。

1.1.2 化肥施用相对产出率

在众多的表示化肥施用效率的指标中, 被国际农学界常用的是化肥偏生产力^[12], 是指作物籽粒产量与单位面积化肥投入量之间的比值, 又叫化肥产出率 (Fertilizer Output, FO)^[18]。由于化肥产出率是带有量纲的强度相对数, 没有最高上限, 不便做出效率高低的类型划分。为了便于比较不同国家化肥施用效率, 参考测算相对效率的数据包络分析 (Data Envelopment Analysis, DEA) 方法^[14], 提出化肥施用相对产出率 (Fertilization Relative Output, FRO) 的概念, 即某一化肥施用产出率与最大化肥产出率的比值。计算公式如下

$$FRO = FO/FO_{\max} \quad (2)$$

$$FO = Y/FI \quad (3)$$

式中 FRO 表示化肥施用相对产出率或净效率; FO 表示化肥施用产出率, FO_{\max} 表示最大化肥施用产出率, kg/kg ; Y 表示作物产量, kg/hm^2 。

1.1.3 产量规模系数

化肥施用产出率和相对产出率只是表示化肥施用量与作物产量的对比关系以及某一化肥产出率在所有化肥产出率中的位置, 不能反映化肥施用的作物产量规模效应。例如投入 10 kg 化肥产出 300 kg 粮食的产出率

与投入 100 kg 化肥产出 3000 kg 粮食的产出率一样, 其相对产出率也相同, 但他们的产出规模显然不同。农业生产追求高效率的高产出, 而不是高效率的低产出。为了体现化肥产出率的作物产量规模, 提出产量规模系数 (Yield Scale, YS) 的概念, 即作物某一单位播种面积产量与最高单位播种面积产量的比值, 反映作物生产的规模效应。产量规模系数越大, 表示作物产量越高。计算公式为

$$YS = Y/Y_{\max} \quad (4)$$

式中 YS 表示产量规模系数, Y_{\max} 表示最高产量, kg/hm^2 。

1.1.4 化肥施用综合效率

为了体现化肥施用的规模效应, 提出化肥施用综合效率 (Fertilization Integrated Efficiency, FIE) 的概念, 是指作物产量规模系数与化肥施用相对产出率的乘积的开平方, 计算公式为

$$FIE = (YS \cdot FRO)^{1/2} \quad (5)$$

式中 FIE 表示化肥施用综合相对产出率, 即综合效率, 综合效率越大, 说明化肥施用相对产出率和作物产量的综合效应最佳。

化肥施用相对产出率和综合效率的值都在 $0 \sim 1$ 之间。值越接近 1, 则化肥施用效率越高, 反之亦然。按照涂正革等^[19-20]对技术效率的分类, 本研究将化肥施用相对产出率或综合效率取值在 <0.60 、 $0.60 \sim 0.69$ 、 $>0.69 \sim 0.79$ 、 $>0.79 \sim 0.89$ 、 >0.89 的决策单元, 分为低效率、较低效率、中效率、较高效率和高效率 5 个类型。

1.2 数据来源

中国及欧美 7 国 (德、英、法、意大利、西班牙、美国 and 加拿大) 的化肥施用量、粮食产量以及作物播种面积 (或收获面积) 数据主要来源于联合国粮农组织数据库^[21]和《国际统计年鉴》^[22]。粮农组织数据库中各国农用化肥数据分为 2 个类型: 1) 化肥消费档案中 1961—2002 年的农业消费的化肥实物总量; 2) 直接可查询的 2002—2017 年农业消费的氮 (N)、磷 (P_2O_5)、钾肥 (K_2O) 折纯量。2 类化肥数量正好在 2002 年有交叉, 可以算出 2002 年化肥实物量和折纯量的换算系数。根据此换算系数, 把各国 1961—2001 年的农业化肥消费的实物量转换为折纯量。粮农组织数据库中并没有分别给出各种粮食作物的化肥施用量。由于粮食作物是各国的主要农作物, 参照多项研究的做法, 用农作物化肥施用量代替粮食作物化肥施用量^[23-26]计算化肥施用效率。粮食产量是选取各国主要的 3 种粮食作物的产量按收获面积加权平均获得。各国及其主要的粮食作物如下: 1) 中国: 小麦、水稻和玉米; 2) 德国和法国: 小麦、大麦和玉米; 3) 英国: 小麦、大麦和燕麦; 4) 意大利和西班牙: 小麦、大麦和玉米; 5) 美国: 小麦、大豆和玉米; 6) 加拿大: 小麦、大麦和大豆。

2 结果与分析

2.1 中国与欧美发达国家化肥施用强度的动态变化

根据式 (1), 计算中国及欧美共 8 个国家 1961—2017 年的农作物单位收获面积的化肥施用量。结果表明, 中

国及英、德、法、意大利、西班牙、美国和加拿大的化肥施用强度分别从 1961 年的 3.1、407.6、278.0、180.9、68.2、60.9、86.6、10.7 kg/hm² 变化到 2017 年的 315.1、346.7、238.7、219.4、127.2、139.2、206.0、128.7 kg/hm²，分别是原来的 101.6、0.85、0.86、1.2、1.9、2.3、2.4、12.0 倍。由此可见，中国化肥施用强度呈 100 倍巨大变化，加拿大呈 12 倍变化，意大利、西班牙和美国呈约 2 倍变化，德国、法国和英国施肥数量基本不变。中国、英、德、法、意大利、西班牙、美国和加拿大在不同年份达到的高峰值分别是 338.2（2014 年）、594.9（1983 年）、503.4（1988 年）、438.3（1983 年）、235.0（1987 年）、169.0（1998 年）、213.7（1993 年）、140.1（2011 年）kg/hm²。为了更清楚地显示各国化肥施用强度的变化趋势，对原时间序列数据进行 3 a 滑动平均，减少 2 a 数据，形成的时间序列趋势如图 1。

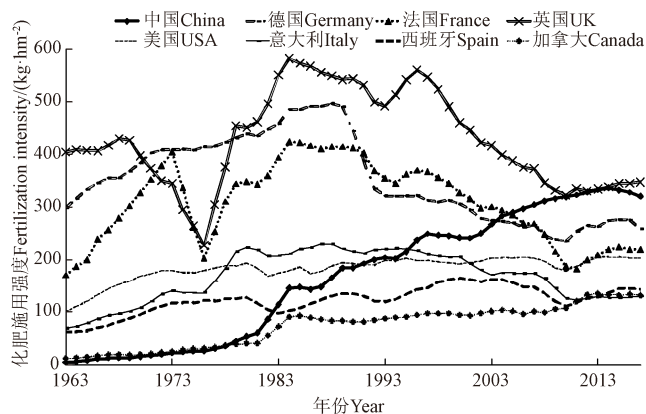


图 1 1961—2017 年中国与欧美 7 国化肥施用强度 3 a 滑动平均的变化趋势

Fig.1 Trends of three-year moving averages of fertilization intensity of China and seven Euro-American countries in 1961—2017

由图 1 可见，从 1963 年到 2017 年，欧美 7 国化肥施用强度的变化有一定的规律性，大致可以分为以下 3 类：

1) 英德法 3 国，其化肥施用在中—高强度的基础上呈现“上升—下降—上升—平稳”的大幅度波动变化（除去英法在 1974 年由于化肥产量锐减，化肥施用强度有短期低谷外），其波动幅度以英国最高，德国次之。即 3 国在 20 世纪 60 年代和 70 年代农业化肥施用强度在约 200~400 kg/hm² 的基础上快速上升，直到 1984 年左右达到最高峰（约 400~600 kg/hm² 的高施肥强度），然后又逐步波动下降到 2010 年前后，施肥强度低于 20 世纪 60 年代初的水平，此后又开始缓慢上升至 2017 年 200~350 kg/hm²，趋于平稳。

2) 意大利和西班牙，这 2 个国家在低强度施肥基础上呈现“上升—下降—上升—平稳”的小幅度波动变化，其波动幅度意大利高于西班牙，即这 2 个国家从起初化肥施用约为 60~70 kg/hm² 的较低强度，分别上升至 20 世纪 80 年代末期和 90 年代末期达到最高峰约 235 和 169 kg/hm² 的中强度，然后分别回落到 2010 年的低谷约 120 和 110 kg/hm²，2013—2017 年都又缓慢上升至约 130 kg/hm² 左右的较低强度，趋于平稳。

3) 美国和加拿大，分别在低和较低强度施肥基础上，呈持续波动上升，即从起初化肥施用强度分别从约 87 和 11 kg/hm² 较快速度上升到上世纪 80 年代的约 194 kg/hm² 和 1985 年的约 90 kg/hm²，后来分别缓慢地波动上升至 2017 年的约 206 和 130 kg/hm²。与以上 3 类相比，中国的化肥施用从 1963 年的约 4 kg/hm² 的低强度快速上升至 2014 年的最高值约 338 kg/hm² 较高强度水平，2015—2017 年持续缓慢下降至约 320 kg/hm²。总之，8 国化肥施用强度由波动发展走向平稳发展，并出现集聚趋势。

8 国化肥施用强度的时空变化规律与各国相应的自然经济和社会条件有着密切的关系。在时间上，自 20 世纪 60 年代以来，西欧 5 国经济迅速发展，对粮食的需求也越来越迫切，农业化肥的施用量也越来越大，英德法 3 国相继过量。随之土壤肥力降低、面源污染严重、农产品质量下降等问题显露。到了 20 世纪 80 年代初期，化肥施用量达到顶峰，农业环境问题更为严峻。各国都制定了严格的环境制度，并大力提高农业施肥技术，化肥的施用量不断降低，并趋于稳定。在空间上，化肥施用量受各国气候条件、人口密度和经济水平差异等的综合影响。由于英国所处的纬度高，气温相对较低，化肥利用率较低，加上英国人口密度在 5 个国家中最大，经济水平高，对粮食的需求更为迫切，所以英国的化肥施用强度是最高的，起伏波动幅度最大，与之相比，西班牙所处纬度较低，气温较高，化肥利用率较高，且人口密度最小，经济发展水平相对较低，对粮食的需求也相对较低，所以化肥施用强度也最低，波动幅度最小。

美国和加拿大的化肥施用量在时间变化上的趋势基本一致的原因是他们都属于移民国家，国土面积广大，土地资源丰富，人口密度小，如美国的人口密度不到西班牙的 2/5，加拿大的人口密度仅为美国的 1/9，粮食压力大为降低。移民国家由于劳动力不足，农业投入优先用于农业机械，化肥投入数量较小^[27]。同时美国农业部自 20 世纪 80 年代初，在化肥施用环境风险凸显的情况下提出了“最佳管理措施（Best Management Practices, BMPs）”，对全国范围内的农业面源污染进行控制，帮助农民控制化肥施用数量，提高效率 and 成效^[28]。在空间上美国的自然和社会经济条件优于加拿大，粮食产量比加拿大高近一倍，因此其化肥施用强度在各个时期都比加拿大高。

中国是世界上人口最多的发展中国家，用全球 7% 的耕地养活 20% 的人口，对粮食需求的压力更大。在 1978 年改革开放以前，农业生产发展缓慢，化肥施用量不足，粮食生产主要靠土壤自然肥力和有机肥。改革开放后，广大农民从事农业生产的积极性高涨，通过化肥、农药等化学品的施用来保证农产品的增产增收，化肥施用量快速提高，但过量及低效率施肥导致了严重、持续性的化肥面源污染^[29]。2015 年初，中国政府提出《到 2020 年化肥使用量零增长行动方案》，有效控制住了化肥用量增长的势头^[25]。和欧美国家相比，中国的化肥施用量目前正处于高峰期，并有下降的趋势。可以相信，随着中国政府和农户的共同努力，化肥用量将会缓慢地下降。

到一个相对稳定的水平。

可以预期,随着施肥技术及管理水平的不断改进,各国在目前化肥施用强度 $120\sim 350\text{ kg/hm}^2$ 的基础上,会围绕国际公认的化肥安全施用上限 225 kg/hm^2 ^[15],进一步在更小的范围内聚集。中国、德国和英国这些高强度施肥的国家会降低化肥的施用,意大利、西班牙和加拿大的化肥施用量会有所提高,美国和法国则继续保持在目前中强度的水平。这种趋势也许成为 225 kg/hm^2 安全指标的统计学根据。

2.2 中国与欧美发达国家化肥施用效率的动态变化

化肥施用效率主要用粮食作物产量来衡量。利用粮农组织网站提供的数据,通过作物收获面积加权平均,计算各国 1961—2017 年间主要的 3 种粮食作物的单位面积产量,并进行 3 年滑动平均形成新的数列(图 2a)。由图 2a 可见,中国和欧美 7 国的粮食产量变化明显呈高中低 3 组波动上升趋势,且高中低 3 组之间的产量差距随着时间的推移明显地拉大。根据各国 2010—2017 年的年均粮食产量数据,分别按 $\leq 5\,000$ 、 $>5\,000\sim 7\,000$ 、 $>7\,000\text{ kg/hm}^2$ 分为低产组、中产组、高产组。因此,加拿大和西班牙为低产组,中国、美国和意大利为中产组,英国、德国和法国为高产组(表 1)。尽管各国的化肥施用强度波动幅度差别很大,但是粮食产量波动的幅度相对一致,皆呈现上升的趋势,将对化肥施用效率有显著影响。根据式(2)和式(3),计算出中国和欧美 7 国 1961—2017 年的化肥施用相对产出率,即净效率,然后进行 3 年滑动平均(图 2b)。

由图 2b 可见,中国、加拿大和意大利 3 国分别在 1963—1989、1990—2001、2002—2017 这 3 个时期为化肥施用相对产出率最大的国家,中国在 2004 年以后成为相对产出率最小的国家,英国除了 2004 年以后比中国稍高并与中国同步降低外,基本上一直是处在最低的位置上向上提升。法国、德国和美国在中间水平呈波动上升的趋势,约在 2010 年前后呈现快速下降,近几年又有所提升。

化肥施用相对产出率的变化是粮食产量和化肥施用量综合作用的结果。中加意 3 国化肥施用相对产出率分别在上述 3 个不同时期最高,主要是因为他们的化肥施用量在相应的时期最低或比较低。中国在 1980 年代末期后相对产出率呈现急速下降,是由于自 1978 年实行改革开放以后化肥施用量大大提升,成为仅稍低于英国的较高强度施肥国家,使得近期化肥相对产出率在各国中最低。近些年随着中国化肥减量增效措施的实施,使得粮食产量继续增加,化肥施用相对产出率稍微提高。西欧国家如德国、英国和法国 20 世纪 80 年代前化肥施用相对产出率的变化主要受粮食产量的影响,此后受环保压力,他们的化肥投入量逐年下降,但其粮食单产不但没有降低,还逐年升高,化肥施用效率快速提高,其关键原因是加强了科学施肥,实现了节肥增效^[30]。

从 8 个国家化肥施用相对产出率变化曲线的位置来看,20 世纪 80 年代以前,由于中国和加拿大化肥施用强度低,化肥产出率数值过大,压缩了其他国家化

肥产出率的差别,随着中国化肥产出率的降低,各国之间化肥相对产出率差距逐渐变大,从 2010 年以后分层比较明显且稳定,从大到小的顺序为:意大利、法国、美国、德国、西班牙、加拿大、英国、中国,其平均值分别为 0.99、0.81、0.67、0.66、0.62、0.62、0.58、0.49、0.41(表 1)。需要说明的是,这里计算出的 8 国化肥相对产出率与用 DEA 软件计算出的化肥技术效率相比,数值完全相同,说明本文计算相对产出率的思路是可行的。

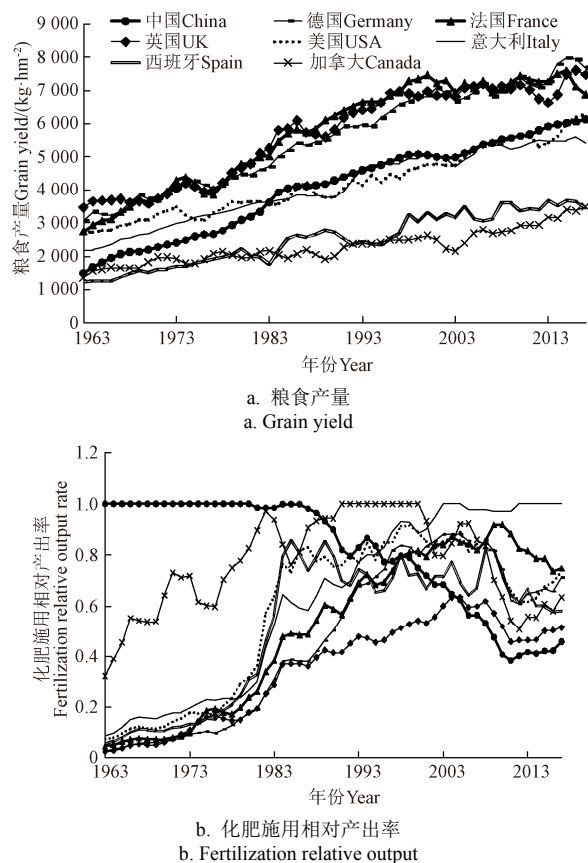


图 2 1961—2017 年中国与欧美 7 国粮食产量及化肥施用相对产出率 3 a 滑动平均的变化趋势

Fig.2 Trends of three-year moving averages of grain yield and fertilization relative output rate of China and seven Euro-American countries in 1961—2017

化肥施用相对产出率仅反映了一个国家净化肥利用率。但是理想的农业生产追求的不仅是高的化肥利用率,还要是高的单位面积产量,即高效率和高产出,这样更能体现化肥投入的意义和作用。表 1 可见,在 2010—2017 年间,意大利的化肥相对产出率虽为高效率,粮食产量却属于中产类型,而法国的粮食单产却比意大利高 34%,属于粮食高产类型,但相对产出率却低于意大利,显然相对产出率没有反映出产量规模。所以,综合考虑化肥相对产出率和粮食产量的综合影响,利用式(4)和式(5)计算出各国各年的化肥施用综合效率(图 3)。由图 3 可见,各国的综合效率值比相对产出率趋于集中,是因为粮食产量相对集中。中国和加拿大综合效率分别波动上升到 1987 年和 1982 年后开始下降,2010 年后有所上升。其余各国的综合效率 1963 年以来总体上不断增加,这与

相关研究结果具有较强的一致性^[31]，2010 年前后开始下降，近几年又有增加。与相对产出率相比，各国的综合效率顺序发生了一些变化，20 世纪 90 年代以来，加拿大由于粮食产量最低，综合效率也最低，法国的粮食产量比意大利高，综合效率高于意大利位居第一。2010 年以

来，化肥施用综合效率从大到小的排序为法国、意大利、德国、美国、英国、中国、西班牙、加拿大，其平均值分别为 0.88、0.85、0.81、0.71、0.67、0.57、0.54、0.49（表 1）。可以说，化肥施用综合效率较好地反映了各国化肥利用的实际情况。

表 1 基于 2010—2017 年多年平均获得的各国化肥施用强度、粮食产量、相对产出率和综合效率
Table 1 Fertilization intensity, grain yield, relative output rate and integrated efficiency of each country based on multi-year average in 2010—2017

国家 Country	化肥 Fertilizer		粮食 Grains		相对产出率 Relative output rate		综合效率 Integrated efficiency	
	施用强度 Fertilization intensity/(kg·hm ⁻²)	类型 Type	产量 Yield/(kg·hm ⁻²)	类型 Type	值 Value	类型 Type	值 Value	类型 Type
中国 China	327	较高强度	5 900	中产	0.41	低效率	0.57	低效率
加拿大 Canada	127	较低强度	3 162	低产	0.58	低效率	0.49	低效率
意大利 Italy	126	较低强度	5 458	中产	0.99	高效率	0.85	较高效率
美国 USA	198	中强度	5 761	中产	0.67	较低效率	0.71	中效率
西班牙 Spain	131	较低强度	3 510	低产	0.62	较低效率	0.54	低效率
法国 France	207	中强度	7 294	高产	0.81	较高效率	0.88	较高效率
德国 Germany	262	较高强度	7 539	高产	0.66	较低效率	0.81	较高效率
英国 UK	337	较高强度	7 119	高产	0.49	低效率	0.67	中效率

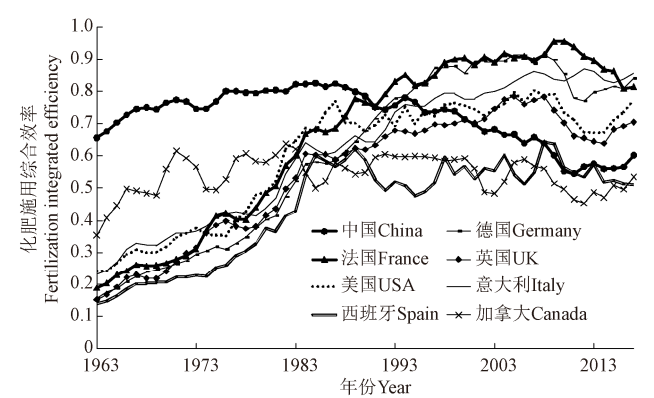


图 3 1961—2017 年中国与欧美 7 国化肥施用综合效率 3 年滑动平均的变化趋势
Fig.3 Trend of three-year moving averages of fertilization integrated efficiency of China and seven Euro-American countries in 1961—2017

需要说明的是，法国不仅化肥施用综合效率高，其化肥施用强度也在化肥安全施用上限 225 kg/hm² 以下。因此，法国的化肥施用在欧美发达国家中较为理想，表现为中等强度投入的高效率，粮食产量高且生态安全，为世界生态农业发展提供了较为成功的范例。

3 讨 论

在历史上，欧美发达国家曾出现为追求农业产量而导致化肥施用过多的面源污染问题，造成地下水硝酸盐污染和地表水中磷的富集。在欧洲由农业面源排放的磷曾为地表水污染总负荷的 24%~71%^[32]，促使欧盟 1980—1991 年，相继出台了《饮用水法令》《硝酸盐法令》和《农业环境条例》等，对各成员国在水环境保护与管理方面提出了统一的目标和要求^[33]。但在实施过程中，各国可根据自身情况，采取不同的防治措施。以法国为例，为了减少化肥面源污染，法国 1980s 就采取多种农业增产

措施以逐渐取代化学化生产方式，例如培育和推广高产、稳产和抗病虫害、抗逆性强的农作物品种，通过土地休耕、轮作等途径恢复并培育土壤肥力，发展生物肥料、生物固氮技术和生物防治病虫害技术等^[34]。法国自 1985 年对“生态农业”立法后，逐渐建立了一套完整的农业管理体系，成为欧洲第一生态农业大国^[35]。法国谷物类粮食总量和人均产量远高于德国和英国，其农业产值占欧盟农业总产值的 22%，农产品出口长期位居欧洲首位，成为世界主要农副产品出口国。可以说法国不仅是欧洲也是全球生态农业的典范。

中国农业现代化进程与欧美国家相比起步较晚，目前化肥施用强度处于高峰期，从 2014 年后出现下降趋势，这将符合发达国家所发生的化肥施用强度先升后降再趋于平稳的变化规律。与欧美多数发达国家化肥投入相比，现在中国的化肥施用强度是处在超量过高的水平，化肥施用综合效率处于低水平。本文是以播种面积计算化肥施用强度，若按照耕地面积计算化肥施用强度，中国的化肥施用强度比欧美发达国家高的更多。因为欧美发达国家的复种指数多为 0.5~0.8，中国约为 1.3，中国南方特别是福建、海南、广东等省份，复种指数甚高，其单位耕地面积的化肥投入量都远高于全国水平。因此，中国节肥增效任重道远。参照目前法国的施肥强度和粮食产量，中国通过技术创新，把化肥施用强度降低约 40% 至化肥安全施用上限 225 kg/hm² 以下，粮食产量仍有上升可能。

中国化肥减量行动要因地制宜，分类指导。一般来说，中国中东部地区人口密度大，农业集约化程度高，化肥施用强度的变化基本上都经历了由低到高、然后下降的类似欧洲发达国家那样的发展历程，而西部和东北一些偏远地区，由于农业开发较晚，化肥施用强度的变化类似于美国和加拿大移民国家那样的发展过程，目前多还不存在化肥施用量过量的问题。因此，中东部地区

是中国化肥减量的重点地区,例如河南、山东、江苏、福建、广东、海南要更多考虑适当降低复种指数和单季化肥施用量,提高化肥施用效率。各地要明确区分出化肥施用过量区、适量区和不足区,有针对性地分区实施减肥增效措施。

欧美发达国家经验表明,化肥减量增效,发展生态农业,离不开法律、政策、技术和教育等综合措施的保障。国家应该出台有关法律制度和政策,对化肥农药等化学物质的使用要有相应的规定和要求,明确防治农业化肥污染的基本原则、管理体制、主要权利和义务、法律责任等。各地要确定化肥合理施用参考标准,完善配方测土施肥政策和技术手段,加强对农户的科学教育和技术培训。技术上可借鉴法国普及卫星管理农业技术“土地之星”的经验,监测农作物生长情况,为农户提供施肥量、施肥时间、灌溉时间和最佳收获季节等,有效地避免滥用化肥农药。学习美国农场农牧结合方法及农田残茬还田和免耕技术,注重养殖业与种植业之间在饲料、肥料等方面的相互促进与相互协调关系,增加土壤有机肥料,走有机无机相结合的道路。

4 结 论

1) 1961—2017 年间,中国化肥施用强度随着经济发展呈快速波动增长的趋势,从起初的 3.1 kg/hm^2 增加到 2014 年的高峰值约 338 kg/hm^2 ,2015 年开始有所下降;欧洲西班牙、意大利、法国、德国、英国化肥施用强度呈现“上升—下降—上升—平稳”的波动变化趋势,波动幅度按上述顺序依次增大,其高峰值依次分别为 169.0、235.0、438.3、503.4、594.9 kg/hm^2 ;美国和加拿大呈现持续小幅度波动上升的变化趋势,高峰值分别约为 213.7、140.1 kg/hm^2 。目前 8 个国家的化肥施用强度趋于围绕国际公认的化肥安全施用上限 225 kg/hm^2 ,在 $120 \sim 350 \text{ kg/hm}^2$ 的范围内聚集和稳定。

2) 中国和加拿大化肥施用综合效率分别从 1961 年波动上升到 1987 年和 1982 年后开始下降,2010 年后有所回升;其余各国总体上不断增加,2010 年前后开始下降,近几年也有回升。20 世纪 90 年代以来,特别是 2010 年以来,化肥施用综合效率从大到小的排序为法国、意大利、德国、美国、英国、中国、西班牙、加拿大,其平均值分别为 0.88、0.85、0.81、0.71、0.67、0.57、0.54、0.49。法国是欧美发达国家中化肥投入既适量又高效、既安全又高产的国家,可为中国节肥增效和生态农业建设提供借鉴。

本研究提出的化肥施用相对产出率,相当于数据包络分析(Data Envelopment Analysis, DEA)中计算的化肥技术效率,对单项化肥投入粮食产出的效率分析来说,2 种计算方法结果完全一样,但本文方法更加简单,更加实用,省去了使用计算机软件的麻烦。本文所设计的化肥施用综合效率模型,既考虑化肥投入产出的相对产出率,又考虑产量基数,便于区分化肥产出率相同而产量规模不同的情况,相当于 DEA 中不仅考虑技术效率,还要考虑规模收益,也类似于超效率 DEA 对传统 DEA 不能有效区分技术效率都等于 1 的多个有效决策单元效率水

平的改进。综合效率模型的计算结果更好地反映了各国化肥利用的实际情况。如何用简单的方法测算中国及发达国家氮磷钾多项化肥投入粮食生产效率是今后研究的重点。

[参 考 文 献]

- [1] Cassman K G, Peng S, Olk D C. Opportunities for increased nitrogen use efficiency from improved resource management in irrigated rice systems[J]. *Field Crops Research*, 1998, 56: 7-38.
- [2] 尹芳, 张无敌, 赵兴玲, 等. 农业面源污染对农业可持续发展影响分析[J]. *灾害学*, 2018, 33(2): 151-153.
Yin Fang, Zhang Wudi, Zhao Xingling, et al. Analysis on impact of non-point source pollution on agricultural sustainable development[J]. *Journal of Catastrophology*, 2018, 33(2): 151-153. (in Chinese with English abstract)
- [3] 李义松, 陈昱晗. 转型背景下我国农业面源水污染防治立法实施路径[J]. *江苏农业科学*, 2015, 43(3): 441-443.
- [4] 林忠辉, 陈同斌, 周立祥. 中国不同区域化肥资源利用特征与合理配置[J]. *资源科学*, 1998, 20(5): 26-31.
Lin Zhonghui, Chen Tongbin, Zhou Lixiang. Characteristics of the application of chemical fertilizers and their rational allocation in China[J]. *Resources Science*, 1998, 20(5): 26-31. (in Chinese with English abstract)
- [5] 孙传范, 曹卫星, 戴廷波. 壤作物系统中氮肥利用率的研究进展[J]. *土壤*, 2001, 33(2): 64-69.
Sun Chuanfan, Cao Weixing, Dai Tingbo. Research progresses in nitrogen use efficiency of soil-plant systems[J]. *Soils*, 2001, 33(2): 64-69. (in Chinese with English abstract)
- [6] 陈同斌, 曾希柏, 胡清秀. 中国化肥利用率的区域分异[J]. *地理学报*, 2002, 57(5): 531-538.
Chen Tongbin, Zeng Xibo, Hu Qingxiu. Utilization efficiency of chemical fertilizers among different counties of China[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2002, 57(5): 531-538. (in Chinese with English abstract)
- [7] Fageria N K, Baligar V C, Bailey B A. Role of cover crops in improving soil and row crop productivity[J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2005, 36: 2733-2757.
- [8] Fageria N K, Baligar V C. Methodology for evaluation of lowland rice genotypes for nitrogen use efficiency[J]. *Journal of Plant Nutrition*, 2003, 26: 1315-1333.
- [9] 史常亮, 朱俊峰, 栾江. 我国小麦化肥投入效率及其影响因素分析: 基于全国 15 个小麦主产省的实证[J]. *农业技术经济*, 2015(11): 69-78.
- [10] 武良, 张卫峰, 陈新平, 等. 中国农田氮肥投入和生产效率[J]. *中国土壤与肥料*, 2016(4): 76-83.
Wu Liang, Zhang Weifeng, Chen Xinping, et al. Nitrogen fertilizer input and nitrogen use efficiency in Chinese farmland[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2016(4): 76-83. (in Chinese with English abstract)
- [11] 徐亚新, 何萍, 仇少君, 等. 我国马铃薯产量和化肥利用率区域特征研究[J]. *植物营养与肥料学报*, 2019, 25(1): 22-35.
Xu Yaxin, He Ping, Qiu Shaojun, et al. Regional variation of yield and fertilizer use efficiency of potato in China[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2019, 25(1): 22-35.

- (in Chinese with English abstract)
- [12] 张福锁, 王激清, 张卫峰, 等. 中国主要粮食作物肥料利用率现状与提高途径[J]. 土壤学报, 2008, 45(5): 915-924. Zhang Fusuo, Wang Jiqing, Zhang Weifeng, et al. Nutrient use efficiencies of major cereal crops in China and measures for improvement[J]. Acta Pedologica Sinica, 2008, 45(5): 915-924. (in Chinese with English abstract)
 - [13] 杨增旭, 韩洪云. 化肥施用技术效率及影响因素: 基于小麦和玉米的实证分析[J]. 中国农业大学学报, 2011, 16(1): 140-147. Yang Zengxu, Han Hongyun. Technical efficiency of fertilizer and its influencing factors: Based on wheat and corn empirical study[J]. Journal of China Agricultural University, 2011, 16(1): 140-147. (in Chinese with English abstract)
 - [14] 杨印生, 吴才聪, 马成林, 等. 基于数据包络分析的变量施肥技术经济分析[J]. 农机化研究, 2004(4): 127-131. Yang Yinsheng, Wu Caicong, Ma Chenglin, et al. Technical & economic analysis of variable-rate fertilization based on data envelopment analysis[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2004(4): 127-131. (in Chinese with English abstract)
 - [15] 刘钦普. 中国化肥投入区域差异及环境风险分析[J]. 中国农业科学, 2014, 47(18): 3596-3605. Liu Qipu. Distribution of fertilizer application and its environmental risk in different provinces of China[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2014, 47(18): 3596-3605. (in Chinese with English abstract)
 - [16] 环境保护部. 关于印发《国家级生态乡镇申报及管理暂行规定(试行)》的通知(环发[2010]75号)[EB/OL]. (2010-06-24) [2020-01-01]. <https://wenku.baidu.com/view/6e1cca631ed9ad51f01df235.htm>. 1.
 - [17] 刘静, 连煜阳. 种植业结构调整对化肥施用量的影响[J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(11): 2544-2552. Liu Jing, Lian Yuyang. Effect of planting structure adjustment on chemical fertilizer applications in China[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2019, 38(11): 2544-2552. (in Chinese with English abstract)
 - [18] 周芳, 金书秦. 产出率视角下的农业化肥利用率国际比较[J]. 世界农业, 2016(4): 35-44.
 - [19] 涂正革. 环境, 资源与工业增长的协调性[J]. 经济研究, 2008, 2(3): 93-105. Tu Zhengge. The coordination of industrial growth with environment and resource[J]. Economic Research Journal, 2008, 2(3): 93-105. (in Chinese with English abstract)
 - [20] 封永刚, 彭珏, 邓宗兵, 等. 面源污染、碳排放双重视角下中国耕地利用效率的时空分异[J]. 中国人口·资源与环境, 2015, 25(8): 18-25. Feng Yonggang, Peng Yu, Deng Zongbing, et al. Spatial-temporal variation of cultivated land's utilization efficiency in China based on the dual perspective of non-point source pollution and carbon emission[J]. China Population, Resources and Environment, 2015, 25(8): 18-25. (in Chinese with English abstract)
 - [21] FAO. FAOSTAT. data[EB/OL]. (2019-12-28) [2020-02-28]. <http://www.fao.org/faostat/en/#data>.
 - [22] 国家统计局. 中国国际统计年鉴[EB/OL]. (2019-12-20) [2019-12-20]. <http://data.stats.gov.cn/>.
 - [23] 曾希柏, 李菊梅. 中国不同地区化肥施用及其对粮食生产的影响[J]. 中国农业科学, 2004, 37(3): 387-392. Zeng Xibai, Li Jumei. Fertilizer application and its effect on grain production in different counties of China[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2004, 37(3): 387-392. (in Chinese with English abstract)
 - [24] 王祖力, 肖海峰. 化肥施用对粮食产量增长的作用分析[J]. 农业经济问题, 2008(8): 65-68.
 - [25] 刘钦普, 濮励杰. 中国粮食主产区化肥施用时空特征及生态经济合理性分析[J]. 农业工程学报, 2019, 35(23): 142-150. Liu Qipu, Pu Lijie. Spatiotemporal variation of fertilizer utilization and its eco-economic rationality in major grain production areas of China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2019, 35(23): 142-150. (in Chinese with English abstract)
 - [26] 刘钦普, 林振山, 濮励杰. 中哈德 3 国化肥施用生态经济合理性动态比较与启示[J]. 中国土壤与肥料, 2019(6): 99-107. Liu Qipu, Lin Zhenshan, Pu Lijie. Comparisons and revelation of eco-economic rationality of fertilizer use in three countries of CHN-KAZ-GER[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2019(6): 99-107. (in Chinese with English abstract)
 - [27] 刘琦, 赵明玉. 农业现代化进程中农业要素使用强度变化规律研究: 基于全球 29 个主要农业国家的国际经验[J]. 农业经济问题, 2018(3): 23-32. Liu Qi, Zhao Mingyu. Theoretical analysis and empirical study on international experience of agricultural modernization: Based on the panel data of 29 major agricultural countries[J]. Issues in Agricultural Economy, 2018(3): 23-32. (in Chinese with English abstract)
 - [28] 刘钦普. 农田氮磷面源污染环境风险研究评述[J]. 土壤通报, 2016, 47(6): 1506-1513. Liu Qipu. Review on environmental risk from non-point source pollution by nitrogen and phosphorus in farmland[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2016, 47(6): 1506-1513. (in Chinese with English abstract)
 - [29] 侯孟阳, 姚顺波. 异质性条件下化肥面源污染排放的 EKC 再检验: 基于面板门槛模型的分组[J]. 农业技术经济, 2019(4): 104-117. Hou Mengyang, Yao Shunbo. EKC retest of fertilizer non-point source pollution emission under heterogeneous conditions: Grouping based on panel threshold model[J]. Journal of Agrotechnical Economics, 2019(4): 104-117. (in Chinese with English abstract)
 - [30] 王激清, 马文奇, 江荣风, 等. 养分资源综合管理与中国粮食安全[J]. 资源科学, 2008, 30(3): 415-422. Wang Jiqing, Ma Wenqi, Jiang Rongfeng, et al. Integrated soil nutrients management and China's food security[J]. Resources Science, 2008, 30(3): 415-422. (in Chinese with English abstract)

- [31] Cassman K G, Dobermann A, Walters D T. Agroecosystems, nitrogen use efficiency, and nitrogen management[J]. *Ambio*, 2002, 31(2): 132-140.
- [32] 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, 37(7): 1018-1025.
Zhang Weili, Ji Hongjie, Kolbe H., et al. Estimation of agricultural non-point source pollution in China and the alleviating strategies: II. status of agricultural non-point source pollution and the alleviating strategies in European and American countries[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2004, 37(7): 1018-1025. (in Chinese with English abstract)
- [33] 王磊, 席运官, 肖兴基, 等. 发展环水有机农业控制农业面源污染的政策与建议[J]. *农业环境科学学报*, 2017, 36(8): 1590-1594.
Wang Lei, Xi Yunguan, Xiao Xingji, et al. Development of organic agriculture in watershed areas to control agricultural nonpoint source pollution[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36(8): 1590-1594. (in Chinese with English abstract)
- [34] 周淑景. 法国农业持续发展的特征与前景[J]. *世界经济*, 1996(11): 56-60.
- [35] 张莉, 张敬毅, 程晓宇, 等. 法国生态农业发展的成效、新措施及启示[J]. *世界农业*, 2019(11): 18-23.

Comparative study on fertilization intensity and integrated efficiency in China and Euro-American major countries

Liu Qinpu¹, Sun Jingrong¹, Pu Lijie²

(1. Research Group of Environmental Science and Engineering, Nanjing Xiaozhuang University, Nanjing 211171, China; 2. School of Geography and Ocean Science, Nanjing University, Nanjing 210093, China)

Abstract: Optimal fertilizer application with sustaining grain yield is a goal of modern agriculture development. Understanding the fertilizer application history of developed countries is helpful to provide lessons for fertilizer application in China. In this study, the concepts and calculation method of Fertilization Relative Output Rate (FRO), Yield Scale Coefficient (YS) and Fertilization Integrated Efficiency (FIE) were proposed to compare Fertilization Intensity (FI) and integrated efficiency of China and Euro-American countries of UK, Germany, France, Italy, Spain, US and Canada based on the data of fertilizer amount and grain yield in 1961—2017 from FAOSTAT. The FI was defined as ratio of fertilizer amount to harvested area. FRO was defined as ratio of Fertilizer Output (FO) to the maximum fertilizer output. FIE was the square root of product of YS and FRO and YS was the ratio of yield to the maximum yield of crops. The results showed that the FI value in China was increased rapidly with small fluctuation from 3.1 kg/hm² in 1961 upon the peak of 338.2 kg/hm² in 2014 and to 315.1 kg/hm² in 2017. The FI values from 1961 to 2017 in five European countries of Spain, Italy, France, Germany and UK were in a similar pattern of “increase-decrease-increase-stable” and the peak values of these countries occurred in 1998 (169.0 kg/hm²), 1987 (235.0 kg/hm²), 1983 (438.3 kg/hm²), 1988 (503.4 kg/hm²), 1983 (594.9 kg/hm²), respectively. The FI values in US and Canada were slowly increased as immigrant countries with small fluctuations and reached peaks of 213.7 kg/hm² in 1993 and 140.1 kg/hm² in 2011, respectively. The FI values of eight countries fluctuated around 225 kg/hm² (the internationally recognized fertilization safety threshold) between the range from 120 kg/hm² to 350 kg/hm². China, Canada and Italy had the highest FRO values respectively in the periods of 1963—1989, 1990—2001, 2002—2017, respectively, but the UK's values of FRO were mostly at the lowest level from 1963 to 2017. The rank of FRO values for eight countries after 2010 from high to low was Italy, France, US, Germany, Spain, Canada, UK and China with the average values of 0.99, 0.81, 0.67, 0.66, 0.62, 0.58, 0.49, 0.41, respectively. The Spain's FIE values were at most time below the other countries and they were rapidly increased before the end of 1980s and then became relatively stable. However, the FIE values of China and Canada were higher than the other countries respectively before 1990 and 1980, afterwards, they went down to the levels lower than that of France, Italy, Germany, US and UK. The FIE values of France, Italy, Germany, US and UK increased rapidly before 1990. They were increased slowly since 1990 but rapidly decreased since 2010. They showed increasing tendency in recent years. The FIE average values of eight countries in 2010—2017 ranked the first for France, then Italy, Germany, US, UK, China, Spain and Canada with average values of 0.88, 0.85, 0.81, 0.71, 0.67, 0.57, 0.54, 0.49, respectively. France was the best country in fertilizer use with high output rate, high grain yield and safety to environment. The average FI and grain yield in France in 2010—2017 was 207 kg/hm² and 7 294 kg/hm² and the FI was less than 225 kg/hm². France could be considered as a good example for China to learn from in decreasing fertilizer use amount while sustaining grain yield in eco-agriculture construction.

Keywords: agriculture; fertilizers; fertilization intensity; relative output rate; integrated efficiency; Euro-American major countries