

考虑面源污染的中国苹果全要素生产率及其空间集聚特征分析

冯晓龙, 霍学喜^{*}

(西北农林科技大学, 西部农村发展研究中心, 杨凌 712100)

摘要: 利用单元调查方法对苹果产业面源污染进行核算, 并将苹果生产带来的面源污染作为苹果的“坏”产出纳入苹果全要素生产率分析框架, 进而运用曼奎斯特-卢恩伯格(Malmquist-Luenberger)生产率指数测算 1994—2013 年环境约束下中国 21 个省份的苹果全要素生产率及其成分分解, 并采用莫兰(Moran's I)指数分析生产率的空间自相关性。结果表明: 环境约束下苹果全要素生产率、技术效率及技术进步率明显小于未考虑环境约束的测算结果, 苹果产业发展已经呈现出以污染环境为代价的粗放式增长; 中西部地区的苹果产业发展与环境不协调, 而东部沿海地区的苹果产业发展与环境较为协调; 中国苹果全要素生产率在全域及局域均表现出显著的正向空间相关性, 但不同省份苹果全要素生产率在样本期内的空间关联类型变化较为明显。该研究可以为促进中国苹果产业实现环境和产业增长相协调的可持续发展提供意见参考。

关键词: 生产率; 污染; 自相关; 单元调查方法

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2015.18.029

中图分类号: F205

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2015)-18-0204-08

冯晓龙, 霍学喜. 考虑面源污染的中国苹果全要素生产率及其空间集聚特征分析[J]. 农业工程学报, 2015, 31(18): 204—211. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2015.18.029 <http://www.tcsae.org>

Feng Xiaolong, Huo Xuexi. Total factor productivity of apple industry in China considering non-point source pollution and its spatial concentration analysis[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(18): 204—211. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2015.18.029 <http://www.tcsae.org>

0 引言

近年来, 苹果产业已经成为中国大部分地区农村经济的支柱产业, 在农业产业结构调整、增加农民收入及出口创汇等方面发挥着重要作用^[1]。但总体来看, 中国苹果产业发展还属于传统的依靠农药、化肥、农膜等高投入的生产方式, 给农民带来较高经济效益的同时也成为农业非点源污染的主要诱因^[2], 这对于资源相对匮乏、人口增长及生态环境压力等多重约束下的中国而言, 无疑加剧了苹果产业发展与生态环境之间的矛盾。因此, 为了实现苹果产业可持续发展, 需要紧密围绕转变苹果产业发展方式, 提高资源利用效率, 有效控制苹果生产活动中所产生的面源污染。而这些目标的实现依赖于苹果全要素生产率对产业增长的贡献, 更需要合理地估算苹果全要素生产率, 及由此引导正确的政策制定^[3-4]。

已有研究主要集中在农业整体的全要素生产率方面, 如 Chen 等^[5]、孟令杰^[6]、李谷成等^[7-8]、朱喜等^[9]、郭萍等^[10]、李卫等^[11]、刘静等^[12]采用不同的方法对中国农业整体的全要素生产率进行了分析和研究。但是这类

研究往往忽略了资源或环境约束对农业全要素生产率的影响, 使得农业发展的真实绩效发生扭曲。为此, 有学者开始关注资源、环境因素影响下农业全要素生产率的测算与分析^[13-15]。潘丹等^[3]将水资源和农业面源污染纳入农业全要素生产率分析框架, 采用 Malmquist-Luenberger 指数测算 1998—2009 年中国 30 个省份的农业全要素生产率及其分解成分, 结果表明, 资源环境约束下农业全要素生产率低于不考虑资源环境约束的测算结果; 韩海彬等^[4]采用同样研究方法测算 1993—2010 年环境约束下中国 29 个省份的农业全要素生产率并检验其收敛性, 认为中国各省份在样本期内的农业全要素生产率有一定的增长, 但农业技术效率出现恶化, 东中西地区的生产率依次递减, 同时省份之间农业全要素生产率存在 σ 收敛、绝对 β 收敛。虽然关于资源、环境约束下农业全要素生产率的研究取得了一定成果, 但是对农业而言, 不同作物品种的技术性质、投入产出过程以及对外部条件的敏感性都会存在较大差异, 这意味着各自的生产函数并不相同^[16], 加总过程使得结论可信度降低, 进而影响结论的实践意义^[8]。因此, 对农业领域中不同产业的区分研究十分必要。目前关于多年生农产品如苹果的全要素生产率研究相对不全面。顾海等^[17]利用 Malmquist 指数测算河南省苹果的全要素生产率, 结果表明, 河南省苹果生产的全要素生产率呈现波动增长, 年均增长为 15.6%; 白秀广等^[18]利用同样的指数测算 1999—2011 年中国苹果主产区苹果全要素生产率, 并分析其影响因素, 结果显示, 苹果全要素生产率年均增长 1.9%, 技术进步是生产率增长的直接动力, 且苹果生产率受到文化程度、农村人均

收稿日期: 2015-06-15 修订日期: 2015-08-15

基金项目: 国家现代农业产业技术体系建设项目“苹果产业经济研究”(编号: CARS-28)

作者简介: 冯晓龙, 男, 陕西白水人, 博士生, 主要从事区域经济发展研究。杨凌 西北农林科技大学西部农村发展研究中心, 712100。

Email: fengxiaolong12@126.com

^{*}通信作者: 霍学喜, 男, 陕西绥德人, 西北农林科技大学教授, 博士生导师, 主要从事农业区域、农业产业经济研究。杨凌 西北农林科技大学西部农村发展研究中心, 712100。Email: xuexihuo@nwsuaf.edu.cn

纯收入、有效灌溉面积比、农村投资比例等显著正向影响；郭亚军等^[19]则利用非参数 HMB 指数方法对中国 10 个苹果主产省份 2001—2009 年苹果生产的全要素生产率进行测算，结果表明，苹果全要素生产率的 HMB 指数出现波动且有小幅增长的趋势，同时技术进步效率指数的影响最大。以上研究虽然具有一定的参考价值，但在测算苹果全要素生产率时忽略了苹果产业发展过程中带来的环境污染，这使得研究结论的科学性和真实性不足，进而严重影响了结论的实践意义；此外，已有关于农业全要素生产率的研究很少关注生产率的空间分布及其所引申的政策含义。

基于此，本文首先对苹果生产过程的面源污染进行核算，之后通过 Malmquist-Luenberger 生产率指数将环境因素纳入苹果全要素生产率分析框架，考察 1994—2013 年环境约束下中国 21 个省份的苹果全要素生产率及其成分分解，并利用 Moran's I 指数分析生产率的空间自相关关系，以期更加准确地评估苹果生产增长绩效，促进中国苹果产业实现环境保护和农民增收相协调的可持续发展。

1 研究方法

基于前人研究^[3-4,13-14]，将苹果生产中获得的正常产出称为“好”产出，将生产过程中不希望获得的农业面源污染称为“坏”产出。为了将“坏”产出纳入到生产率的分析框架中，构建以下生产可能性集（环境技术）。假定苹果生产中使用 N 种投入要素 $\mathbf{x} = (x_1, \dots, x_N) \in R_+^N$ ， R_+^N 中上标表示取值空间，下标“+”表示取值为正数，下同。生产出 M 种“好”产出 $\mathbf{y} = (y_1, \dots, y_M) \in R_+^M$ 和 I 种“坏”产出 $\mathbf{e} = (e_1, \dots, e_I) \in R_+^I$ ，同时假定时期 $t = 1, \dots, T$ ， K 个决策单元，则环境技术可用非参数的数据包络分析（data envelope analyze, DEA）表述为：

$$P^t(\mathbf{x}^t) = \left\{ (\mathbf{y}^t, \mathbf{e}^t) : \begin{cases} \sum_{k=1}^K z_k^t y_{km}^t \geq y_m^t, m=1, \dots, M; \\ \sum_{k=1}^K z_k^t e_{ki}^t = e_i^t, i=1, \dots, I; \\ \sum_{k=1}^K z_k^t x_{kn}^t \leq x_n^t, n=1, \dots, N; \\ z_k^t \geq 0, k=1, \dots, K \end{cases} \right. \quad (1)$$

式中： $P^t(\mathbf{x}^t)$ 为第 t 期投入要素 \mathbf{x} 的生产可能性集； \mathbf{y}^t 为第 t 期的好产出； \mathbf{e}^t 为第 t 期坏产出； z_k^t 为决策单元 $k=1, \dots, K$ 在构造环境技术结构时各自的权重， z_k^t 之和为 1 以及非负表示为可变规模报酬的环境技术，若去掉和为 1 的约束，则表示规模报酬不变； y_{km}^t 为第 t 期第 k 个决策单元产生的第 m 个好产出； e_{ki}^t 为第 t 期第 k 个决策单元产生的第 i 个坏产出； x_{kn}^t 为第 t 期第 k 个决策单元的第 n 个投入要素； x_n^t 为第 t 期第 n 个投入要素总和。因此，环境技术实际是在既定投入 \mathbf{x} 条件下，最大化“好”产

出 \mathbf{y} ，“坏”产出 \mathbf{e} 的集合。在此基础上，可以通过构造方向性距离函数来计算出每个决策单元的相对效率。

方向性距离函数考虑的是在“好”产出增加的同时“坏”产出同比例缩减的可能性大小，因而可以衡量环境约束下的苹果产业全要素生产率。基于产出角度的方向性距离函数的具体形式为：

$$\bar{D}_0^t(\mathbf{x}^t, \mathbf{y}^t, \mathbf{e}^t; \mathbf{g}_y, -\mathbf{g}_e) = \sup \{ \beta : (\mathbf{y}^t + \beta \mathbf{g}_y, \mathbf{e}^t - \beta \mathbf{g}_e) \in P^t(\mathbf{x}^t) \} \quad (2)$$

式中： $(\mathbf{x}^t, \mathbf{y}^t, \mathbf{e}^t)$ 为投入与产出向量； $\mathbf{g} = (\mathbf{g}_y, -\mathbf{g}_e)$ 为产出扩张的方向向量，用于反映了人们对“好”产出和“坏”产出的不同偏好，本文假定“好”产出和“坏”产出按照相同比例扩展或收缩； β 衡量的就是“好”产出 \mathbf{y} 增加和“坏”产出 \mathbf{e} 缩减的最大可能数量。在 t 时期的方向性距离函数可以通过数据包络分析转化为线性规划问题，即 β 可以通过求解式（3）得到：

$$\bar{D}_0^t(\mathbf{x}^t, \mathbf{y}^t, \mathbf{e}^t; \mathbf{y}^t, -\mathbf{e}^t) = \max \beta \quad \text{s.t.} \quad \begin{cases} \sum_{k=1}^K z_k^t y_{km}^t \geq (1+\beta)y_m^t, m=1, \dots, M; \\ \sum_{k=1}^K z_k^t e_{ki}^t = (1-\beta)e_i^t, i=1, \dots, I; \\ \sum_{k=1}^K z_k^t x_{kn}^t \leq x_n^t, n=1, \dots, N; \\ z_k^t \geq 0, k=1, \dots, K \end{cases} \quad (3)$$

在方向性距离函数的基础上可以构造 Malmquist-Luenberger (ML) 生产率。根据 Chung 等^[20]基于产出的跨期 ML 生产率可以通过计算 4 个方向性距离函数获得：

$$ML_t^{t+1} = \left[\frac{1 + \bar{D}_0^t(\mathbf{x}^t, \mathbf{y}^t, \mathbf{e}^t; \mathbf{y}^t, -\mathbf{e}^t)}{1 + \bar{D}_0^{t+1}(\mathbf{x}^{t+1}, \mathbf{y}^{t+1}, \mathbf{e}^{t+1}; \mathbf{y}^t, -\mathbf{e}^t)} \times \frac{1 + \bar{D}_0^{t+1}(\mathbf{x}^t, \mathbf{y}^t, \mathbf{e}^t; \mathbf{y}^t, -\mathbf{e}^t)}{1 + \bar{D}_0^{t+1}(\mathbf{x}^{t+1}, \mathbf{y}^{t+1}, \mathbf{e}^{t+1}; \mathbf{y}^{t+1}, -\mathbf{e}^{t+1})} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

进一步，ML 指数可以分解为技术进步率指数（Malmquist-Luenberger technical change, MLTECH_t^{t+1}）和技术效率变化指数（Malmquist-Luenberger efficiency change, MLEFFCH_t^{t+1}）两个部分：

$$ML_t^{t+1} = MLTECH_t^{t+1} \times MLEFFCH_t^{t+1} \quad (5)$$

$$MLTECH_t^{t+1} = \left[\frac{1 + \bar{D}_0^{t+1}(\mathbf{x}^t, \mathbf{y}^t, \mathbf{e}^t; \mathbf{y}^t, -\mathbf{e}^t)}{1 + \bar{D}_0^t(\mathbf{x}^t, \mathbf{y}^t, \mathbf{e}^t; \mathbf{y}^t, -\mathbf{e}^t)} \times \frac{1 + \bar{D}_0^{t+1}(\mathbf{x}^{t+1}, \mathbf{y}^{t+1}, \mathbf{e}^{t+1}; \mathbf{y}^t, -\mathbf{e}^t)}{1 + \bar{D}_0^t(\mathbf{x}^{t+1}, \mathbf{y}^{t+1}, \mathbf{e}^{t+1}; \mathbf{y}^{t+1}, -\mathbf{e}^{t+1})} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

$$MLEFFCH_t^{t+1} = \left[\frac{1 + \bar{D}_0^t(\mathbf{x}^t, \mathbf{y}^t, \mathbf{e}^t; \mathbf{y}^t, -\mathbf{e}^t)}{1 + \bar{D}_0^{t+1}(\mathbf{x}^{t+1}, \mathbf{y}^{t+1}, \mathbf{e}^{t+1}; \mathbf{y}^t, -\mathbf{e}^t)} \right] \quad (7)$$

其中 MLTECH 度量了技术前沿的进步速度，MLEFFCH 度量了技术落后者追赶技术先进者的速度，反映了生产决策单元向生产前沿面的追赶效应；ML、MLEFFCH 和 MLTECH 大于（小于）1 分别表示全要素

生产率增长（下降）、技术效率改善（恶化）和技术进步（退步）^[4]。

2 指标选取与处理

为了讨论环境约束下中国苹果全要素生产率，本文选择 1994—2013 年中国 21 个生产苹果的省份的跨期面板数据进行分析。这 21 个省份分别为陕西、山东、甘肃、河南、河北、辽宁、山西、北京、天津、黑龙江、吉林、新疆、四川、云南、宁夏、江苏、安徽、内蒙古、贵州、青海及湖北，其中陕西、山东、甘肃、河北、河南、辽宁及山西为中国苹果主要产区^[1]。原始数据均来自于官方统计，主要包括历年的《中国农村统计年鉴》、《中国统计年鉴》。

2.1 苹果投入指标

参考已有研究成果^[3-4]，农业投入指标一般包括土地、劳动力、化肥、农业机械及灌溉等，为此，本文同样选择这 5 个指标作为苹果投入指标。需要说明的是，目前中国统计数据中没有提供与苹果生产相关的劳动力人数、化肥施用量、农业机械及灌溉数据，为此，本文参考已有研究的处理方法对数据进行预处理^[21]。具体来说：①土地投入，以各省份的苹果种植面积为指标计算；②苹果劳动力投入，以苹果种植面积占农作物总播种面积的比例与第一产业就业人数相乘估算得出；③苹果化肥投入，以农用化肥施用量为基础按照相同处理方法估算得出；④苹果机械投入，以农业机械总动力为基础，运用同样处理方法估算得出；⑤苹果灌溉投入，以实际有效灌溉面积为基础，利用相同处理方法估算得出。

2.2 苹果产出指标

在苹果生产过程中既会生产出“好”产出，又会带来苹果生产的污染排放物等“坏”产出，为此，选择 21 个省份的苹果总产量作为“好”产出变量，苹果产业面源污染等标排放量作为苹果产业发展中的“坏”产出变量。

由于农业面源污染具有分散性、隐蔽性以及随机性等特点，这使得农业面源污染通常难以量化和测度^[3]。韩海彬等^[4]、赖斯芸等^[24]认为农业面源污染主要包括农田化肥、畜禽养殖、农田固体废弃物及农村生活。在借鉴以上研究成果的基础上，本文确定与苹果相关的农田化肥和农村生活 2 类产污单元，核算的内容主要包括总氮（total nitrogen, TN）和总磷（total phosphorus, TP）2 类（见表 1）。选择农田化肥与农村生活 2 类产污单元主要基于以下两点：①化肥是苹果生产中投入最多的生产资料，也是苹果生产中最主要的环境污染源。依据国家苹果产业技术体系产业经济研究室的实地调查显示，苹果种植过程中 58.94%的投资来源于化肥（包括氮肥、磷肥及复合肥等），而中国化肥有效利用率低，仅为 30%~40%，在部分地区甚至出现氮磷肥的利用率仅为 10%的现象^[22]。过量施用化肥会引发土壤板结、水体富营养化、空气质量酸化等一系列环境污染和环境质量衰退问题。虽然部分农户认识到果园施用有机肥对生态环境的好

处，但由于化肥的肥效快于有机肥，为了在短期内追求较高产量农户更盲目地大量施用化肥，造成苹果生产环境的严重污染。因此选择化肥投入作为苹果生产的非点源产污单元。②苹果种植户属于专业化农户^[23]，这是因为在果园管理上，除喷药为半机械化外，其他各种管理均为人工，这就造成从事苹果种植的农户很少有时间从事其他职业，兼业化水平低。根据国家苹果产业技术体系产业经济研究室的实地调查结果，从事苹果种植家庭的平均收入 88.64%来源于苹果生产，这说明，苹果种植户无疑是专业化农户的典型代表。因此，本文将苹果种植户的农村生活作为苹果生产的非点源产污单元。

表 1 苹果生产非点源产污单元表

污染元	单元	调查指标	单位
Pollution source	Survey unit	Survey Index	Unit
化肥投入	氮肥、磷肥及复合肥	施用量（折纯）	万 t
农村生活	乡村人口	农村人口	万人

各个污染单元苹果产业的面源污染排放量的计算公式为：

$$E = \sum_{j=1}^n EU_j \rho_j (1 - \eta_j) C_j = \sum_{j=1}^n PE_j (1 - \eta_j) C_j \tag{8}$$

$$PI = E / S \tag{9}$$

式中： E 为苹果生产的面源污染排放量； n 为非点源产污单元总个数； EU_j 为单元 j 的统计数； ρ_j 为单元 j 的产污强度系数； C_j 为单元 j 的排放系数； PE_j 为单元 j 的产污量； η_j 为单元 j 的利用率； PI 为苹果面源污染等标污染排放量， S 为污染物排放评价标准。式中的产污强度、利用系数的相关参数通过文献获得^[3,24-26]。式（9）中污染物排放评价标准采用 GB3838-2002 中的Ⅲ类水质标准，将总氮、总磷的排放量折算为等标排放量进行汇总，其中 TN、TP 污染物排放评价标准分别为 1 和 0.2 mg/L^[3,13]。

3 中国苹果全要素生产率测算及分析

3.1 总体特征分析

根据上述模型选择和相关统计数据，本文测算环境约束下中国苹果 Malmquist-Luenberger 生产率及其分解。同时为了考察环境约束对苹果全要素生产率的影响，本文也计算了不考虑环境约束的传统 Malmquist 生产率指数及其分解，结果如表 2 所示。由于在计算 Malmquist-Luenberger 生产率指数时，河南、新疆、黑龙江三省份对应的混合距离函数没有最优解，因此，本文在分析时剔除这三个省份。

当考虑环境约束时，在 1994—2013 年期间，全国苹果全要素生产率平均增长为 4.9%，其中技术效率为 0.7%，技术进步率为 4.4%；当不考虑环境约束时，全国苹果全要素生产率在 1994—2013 年期间平均增长率为 7.5%，其中技术效率为 1.9%，技术进步率为 5.5%。这说明无论考虑不考虑环境约束，苹果全要素生产率的增长主要由苹果相关的技术进步推动，这与白秀广等^[18]、郭亚军等^[19]观点一致。

考虑环境约束下平均全要素生产率明显小于未考虑环境约束的全要素生产率（见表 2）。根据潘丹等^[3]、Fare 等^[27]研究结论，当考虑环境约束的全要素生产率小于未考虑环境约束的全要素生产率时，说明“好”产出增长率低于“坏”产出减少率。由此说明中国苹果产业发展中“好”产出增长率低于“坏”产出减少率，苹果产业

的发展过程出现以严重破坏生态环境为代价的粗放型增长。同时，由于环境约束下的技术效率与技术进步率均小于未考虑环境约束的技术效率与技术进步率，这说明如果忽视环境约束，苹果产业的技术效率与技术进步率会被较大地高估，从而可能对苹果全要素生产率的增长模式产生误判。

表 2 中国苹果全要素生产率及其分解

Table 2 Apple total factor productivity index and its components

年份 Year	考虑环境约束 Take account of environmental factors			不考虑环境约束 Take no account of environmental factors		
	Malmquist-Luenberger	MLEFFCH	MLTECH	Malmquist	MEFFCH	MTECH
1994—1995	1.082	1.041	1.031	1.134	1.093	1.037
1995—1996	1.109	1.019	0.969	1.118	0.961	1.163
1996—1997	1.063	1.054	1.010	1.113	1.147	0.970
1997—1998	1.118	0.769	1.444	1.071	0.775	1.381
1998—1999	1.021	1.200	0.859	1.099	1.207	0.910
1999—2000	1.010	0.978	1.060	1.047	0.979	1.070
2000—2001	0.997	1.030	0.983	1.014	1.034	0.981
2001—2002	1.040	0.964	1.095	1.076	0.907	1.186
2002—2003	1.027	1.029	1.020	1.077	1.084	0.993
2003—2004	1.123	1.010	1.139	1.118	0.973	1.150
2004—2005	1.016	0.993	1.068	1.097	1.004	1.093
2005—2006	1.017	0.950	1.107	1.029	0.887	1.160
2006—2007	1.028	0.960	1.072	1.060	0.982	1.080
2007—2008	1.019	1.123	0.910	0.920	1.225	0.751
2008—2009	1.037	0.984	1.037	1.123	1.012	1.110
2009—2010	1.013	0.999	0.999	0.998	1.003	0.995
2010—2011	1.026	1.034	0.984	1.051	1.041	1.010
2011—2012	1.038	0.995	1.054	1.063	1.029	1.034
2012—2013	0.971	1.000	1.000	0.996	1.022	0.975
平均值	1.049	1.007	1.044	1.075	1.019	1.055

注：Malmquist-Luenberger、MLEFFCH 及 MLTECH 分别表示考虑环境约束下苹果全要素生产率、技术效率及技术进步率，而 Malmquist、MEFFCH 及 MTECH 分别表示未考虑环境约束的苹果全要素生产率、技术效率及技术进步率；上述指数的数值大于 1（小于 1）表示全要素生产率增长（下降）、技术效率改善（恶化）和技术进步（退步），下同。

Note: Malmquist-Luenberger, MLEFFCH and MLTECH represent Malmquist-Luenberger index, Malmquist-Luenberger efficiency change and Malmquist-Luenberger technical change when take account of environmental factors respectively, and Malmquist, MEFFCH and MTECH represent Malmquist index, Malmquist efficiency change and Malmquist technical change when take no account of environmental factors respectively; when their value is greater than 1 (less than 1) respectively, that means increase (decrease) of total factor productivity, improve (worse) of technical efficiency and progress (retrogress) of technology, the same below.

3.2 省际差异分析

上述关于全国平均意义上的分析无法揭示环境约束下省际苹果产业全要素生产率的具体变化特征。由于苹果全

要素生产率反映的是相对效率的评价状态，因此，本文通过考察 1994—2013 年各省份的苹果全要素生产率排名变化情况来反映环境约束对省际全要素生产率的影响（表 3）。

表 3 1994—2013 年省际苹果 Malmquist 指数和 Malmquist-Luenberger 指数平均值

Table 3 Malmquist index and Malmquist-Luenberger index on apple industry from 1994 to 2013

省份 Province	不考虑环境约束 Take no account of environmental factors		考虑环境约束 Take account of environmental factors		排名变动 Ranking	省份 Province	不考虑环境约束 Take no account of environmental factors		考虑环境约束 Take account of environmental factors		排名变动 Ranking
	Malmquist	排名 Rank	Malmquist-Luenberger	排名 Rank			Malmquist	排名 Rank	Malmquist-Luenberger	排名 Rank	
陕西	1.060	7	1.030	11	-4	四川	1.056	8	1.035	8	0
山东	1.070	4	1.130	1	3	云南	1.037	13	1.012	16	-3
甘肃	1.028	16	1.021	13	3	宁夏	1.077	2	1.051	5	-3
河北	1.067	5	1.031	9	-4	江苏	1.045	11	1.042	7	4
辽宁	1.052	10	1.042	6	4	安徽	1.084	1	1.071	2	-1
山西	1.063	6	1.065	4	2	内蒙古	1.055	9	1.018	14	-5
北京	1.028	15	1.031	10	5	贵州	1.021	16	1.009	17	-4
天津	1.015	17	1.016	15	2	青海	0.982	18	0.992	18	0
吉林	1.074	3	1.069	3	0	湖北	1.043	12	1.023	12	0

从表 3 可以看出：①在不考虑环境污染约束下，1994—2013 年间中国苹果全要素生产率省际间差异明显，其中排名前 3 位的省份依次为安徽（1.084）、宁夏（1.077）及吉林（1.074），排名后 3 位的省份为甘肃（1.028）、天津（1.015）及青海（0.982）。苹果全要素生产率高于全国平均水平以上的有安徽、宁夏等 2 个省份，其余 16 个省份均低于全国平均水平。②在考虑环境污染约束下，1994—2013 年间中国苹果全要素生产率变化区间为 1.130~0.992，省际间差异较大，其中排名前 3 位依次是山东（1.130）、安徽（1.071）及吉林（1.069），排名后 3 位的省份依次为云南（1.012）、贵州（1.009）及青海（0.992）。苹果全要素生产率高于全国平均水平的有山东、安徽、吉林、山西、宁夏等 5 个省份，其余 13 个省份均低于全国平均水平。由此可见，目前中国有 72.22% 的省份苹果全要素生产率处于低水平，这说明苹果产业发展与环境之间存在不协调。③不考虑环境污染与考虑环境污染的苹果全要素生产率排名相比出现了一定的变化。陕西、河北、云南、宁夏、安徽、内蒙古及贵州等省份的苹果全要素生产率排名明显下降，说明这些地区的“好”产出增长幅度低于“坏”产出下降幅度；山东、甘肃、辽宁、山西、北京、天津及江苏等省份的苹果全要素生产率排名明显上升，说明这些地区的“好”产出增长幅度高于“坏”产出下降幅度；吉林、四川、青海及湖北等省份的全要素生产率排名保持不变。

由此可见，中西部地区（陕西、宁夏、云南、贵州等）的苹果生产带来严重的环境污染，苹果产业发展与环境不协调，而东部沿海地区（山东、辽宁、北京、天津等）的苹果产业发展与环境较为协调。

4 苹果全要素生产率空间分析

中国苹果全要素生产率在 1994—2013 年间是否存在集聚现象，需要进一步分析。本文运用 Moran's I 指数分别对环境约束下全要素生产率的全域与局域空间自相关性进行检验^[28-29]。

4.1 苹果全要素生产率全域空间自相关分析

苹果全要素生产率全域空间自相关分析结果见表 4。整体来看，1994—2013 年中国苹果全要素生产率的空间自相关性呈现增强趋势，即从 1994 年的-0.304 增加到 2003 年的-0.018，之后继续增加达到 2012 年的 0.110，这表明苹果全要素生产率的地理集聚现象呈逐步增强态势。具体来说，全要素生产率的空间自相关性在 1994—2013 年间经历了较为平稳的增长趋势：Moran's I 指数由 1994 年的-0.304 变动为 1999 年的 0.155，之后在-0.203~0.160 之间小幅波动；2010—2013 年，Moran's I 指数均为正值，且在 0.073~0.319 之间进行波动，最终达到 2012 年的 0.110，这也说明虽然苹果生产省的生产率的全域 Moran's I 指数在样本期内有小幅波动，但是总体表现出增加趋势。

表 4 苹果全要素生产率的全域 Moran's I 指数检验结果
Table 4 Results of global Moran's I index of apple total factor productivity

年份 Year	Moran's I	Moran's I 标准差 Moran's I standard deviation	Z 值 Z-value	P 值 P-value	年份 Year	Moran's I	Moran's I 标准差 Moran's I standard deviation	Z 值 Z-value	P 值 P-value
1994—1995	-0.304	0.154	-1.596	0.055	2004—2005	-0.018	0.147	-0.280	0.390
1995—1996	0.086	0.143	1.007	0.157	2005—2006	-0.089	0.134	-0.223	0.412
1996—1997	-0.279	0.151	-1.458	0.072	2006—2007	0.160	0.124	1.756	0.040
1997—1998	-0.085	0.151	-0.175	0.431	2007—2008	-0.203	0.133	-1.084	0.139
1998—1999	-0.172	0.128	-0.884	0.188	2008—2009	-0.113	0.145	-0.373	0.355
1999—2000	0.155	0.134	1.593	0.056	2009—2010	-0.029	0.123	-0.243	0.404
2000—2001	-0.050	0.146	0.063	0.475	2010—2011	0.319	0.147	2.577	0.005
2001—2002	-0.189	0.141	-0.92	0.179	2011—2012	0.073	0.145	0.913	0.181
2002—2003	-0.188	0.139	-0.93	0.176	2012—2013	0.110	0.146	1.161	0.123
2003—2004	-0.018	0.138	0.297	0.383					

注：Moran's I 是从空间上刻画苹果全要素生产率的空间集聚特征。
Note: Moran's I show the spatial concentration of apple total factor productivity.

表 4 中的全域 Moran's I 指数显示了各省份苹果全要素生产率表现出较为显著的空间自相关性，但全域 Moran's I 指数无法显示具体哪个区域出现生产率的空间集聚，无法刻画省域间空间自相关关系特征，因此，需要进一步检验苹果全要素生产率的局域空间自相关性。

4.2 苹果全要素生产率局域空间自相关分析

利用 2003—2004、2012—2013 年的 Moran 散点图来揭示省域间苹果全要素生产率的局域空间自相关性，分别找出高-高集聚区（high-high 型，H-H 型）、低-低集聚区（L-L 型）（见表 5）。

在两个代表性年份的中国苹果全要素生产率的空间

关联类型中，多数省份苹果的的全要素生产率在空间上存在差异，且表现出正向的局域空间自相关性。2003—2004 年，在 18 个苹果生产省中位于 Moran 散点图中第 1 象限的省份有山东、江苏及安徽，占 16.67%，其表现为高生产率的省份被高生产率的省份所包围（H-H 型）；位于第 3 象限的省份有甘肃、四川、云南、宁夏、贵州及青海，占 33.33%，其表现为低生产率的省份被低生产率的省份包围（L-L 型）；位于第 2 象限的省份有陕西、辽宁、北京、天津、内蒙古及湖北，占 33.33%，其表现为低生产率的省份被高生产率的省份所包围（L-H 型）；位于第 4 象限的省份有陕西、河北及吉林，占 16.67%，其表现

为高生产率的省份被低生产率的省份包围（H-L 型）。同样地，2012—2013 年，18 个苹果生产省中位于 Moran 散点图的第 1 象限的陕西、山西、甘肃、河北、四川、北京、天津及青海，占 44.44%，这一比例高于 2003—2004 年，其表现为高生产率的省份被高生产率的省份所包围（H-H 型）；位于第 3 象限的省份有安徽、江苏，占 11.11%，低于 2003—2004 年的比例，其表现为低生产率的省份被低生产率的省份包围（L-L 型）；位于第 2 象限的省份有辽宁、宁夏、贵州及内蒙古，占 22.22%，其表现为低生产

率的省份被高生产率的省份所包围（L-H 型）；位于第 4 象限的省份有山东、云南、吉林及湖北，占 22.22%，其表现为高生产率的省份被低生产率的省份包围（H-L 型）。综上分析，18 个省份的苹果全要素生产率的空间关联类型变化显著，2012—2013 年有 55.55% 的省份位于 Moran 散点图的第 1、3 象限，且第 1 象限的省份占到样本省份的 1/3 以上，明显高于 2003—2004 年。这表明，中国苹果生产省的苹果全要素生产率具有明显的空间差异性，呈现出较为显著的正向局域空间自相关性和局域地理集聚特征。

表 5 中国苹果全要素生产率的空间关联类型

Table 5 Spatial correlation types of apple total factor productivity

年份 Year	第 1 象限（高一高集聚） First quadrant (H-H)	第 2 象限（低—高集聚） Second quadrant (L-H)	第 3 象限（低—低集聚） Third quadrant (L-L)	第 4 象限（高—低集聚） Forth quadrant (H-L)
2003—2004	山东、江苏、安徽	山西、辽宁、北京、天津、内蒙古、湖北	甘肃、四川、云南、宁夏、贵州、青海	陕西、河北、吉林
2012—2013	陕西、山西、甘肃、河北、四川、北京、天津、青海	辽宁、宁夏、贵州、内蒙古	安徽、江苏	山东、云南、吉林、湖北

从动态演变来看，中国 18 个苹果生产省的全要素生产率的空间关联类型发生较为明显的变化。其中，山西、北京、天津从 L-H 型变为 H-H 型，甘肃、四川、青海从 L-L 型跃升为 H-H 型，陕西、河北从 H-L 型跃升为 H-H 型，宁夏、贵州从 L-L 型上升为 L-H 型；而山东，江苏、安徽从 H-H 型分别降为 H-L 型、L-L 型，湖北从 L-H 型降为 H-L 型，吉林的空间关联类型未发生变化。这说明，随着各个省份经济发展的不平衡及产业结构调整，所有苹果生产省的全要素生产率的空间相关关系随着时间发生显著变化。

需要特别注意的是，在 6 个苹果主产省中（因河南省的混合距离函数没有最优解，故在此未作解释），辽宁省苹果全要素生产率的空间关联类型保持不变（L-H 型）；4 个省份（陕西、甘肃、河北、山西）的苹果全要素生产率的空间关联类型有所提高，进入 H-H 集聚型；山东的苹果全要素生产率的空间关联类型降低明显。这说明，随着农业基础设施的完善、苹果专业化水平及市场化水平的提高，多数苹果主产省的生产率水平有所提高，呈现以陕西、甘肃、山西等省份为中心的 H-H 集聚的空间分布特征。

5 结论与讨论

5.1 结 论

传统农业全要素生产率测算方法很少考虑到环境对农业经济发展的约束，导致分析结果不合理。基于此，本文将苹果产业的面源污染纳入苹果全要素生产率分析框架，通过 Malmquist-Luenberger 生产率指数考察 1994—2013 年环境约束下中国 21 个省份的苹果全要素生产率及其成分分解，并利用 Moran’s I 指数分析生产率的空间自相关关系，得到结论如下：①考虑环境约束下全要素生产率、技术效率及技术进步率的平均值（1.049、1.007、1.044）明显小于未考虑环境约束的测算结果（1.075、1.019、1.055）。这表明环境污染已经对中国苹果生产率造成明显的负向影响，苹果产业发展已经呈现出以污

染环境为代价的粗放式增长，同时也高估了技术效率与技术进步率对苹果全要素生产率的贡献。②从区域角度来看，中西部地区（陕西、宁夏、云南、贵州等）的苹果生产造成的环境污染较为严重，苹果产业发展与环境不协调，而东部沿海地区（山东、辽宁、北京、天津等）的苹果产业发展与环境较为协调。③环境约束下的中国苹果全要素生产率不管是在全域上还是在局部区域都表现出较为显著的正向空间相关性，但在样本期内不同省份的全要素生产率的空间关联类型变化较为明显；苹果主产省的农业全要素生产率表现出以陕西、甘肃、山西等省份为中心的高生产率的省份被高生产率的省份所包围的空间分布特征。

5.2 讨 论

1) 评价苹果产业的发展绩效需要考虑环境约束。考虑环境约束的苹果全要素生产率明显小于未考虑环境约束的结果，这意味着中国苹果产业发展中“好”产出增长率低于“坏”产出减少率，因此，为了客观地评价苹果产业发展绩效就需要在传统全要素生产率框架内考虑环境因素，使得研究结论更具科学性和真实性、政策建议更具实践价值。

2) 对于环境约束较大、苹果生产率较低的中西部地区应当借鉴东部地区先进的苹果生产技术，在提高化肥、水等利用率的同时减少环境污染，促进苹果产业与环境的协调发展；不同省份之间应当加强苹果生产技术研发、推广方面的合作，充分利用苹果全要素生产率的空间溢出效应，进一步增强苹果全要素生产率高—高集聚区域的带动力和辐射力。

3) 为有效减少苹果生产带来的“坏”产出，还需进一步加大环境友好型技术（如测土配方技术、果园生草等）研发和推广力度，通过技术培训、示范园示范效应等方式提高农户对环境友好型生产技术的认识水平，增加其采用比例。此外，政府应当注重宣传果园农家肥施用和农村生活废弃物回收等相关知识，增强农户施用农家肥和回收生活废弃物的意识，提高其施用农家肥（沼

液)和回收生活废弃物的水平。

4)在核算苹果生产的面源污染时,本文选择化肥投入与农村生活作为两个非点源产污单元,计算其产生的总氮和总磷。但苹果生产过程相对复杂,投入要素较多,对环境造成的污染除总氮和总磷之外还包括诸如碳排放等在内其他污染物,由于条件所限,本文没有关注这部分污染物,这也是下一步需要关注和研究的重点。

参 考 文 献

- [1] 农业部种植业管理司. 中国苹果产业发展报告(1995—2005)[M]. 北京: 中国农业出版社, 2007.
- [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.
He Haoran, Zhang Linxiu, Li Qiang. Research of farmers' fertilizer behavior and agricultural non-point source pollution[J]. Journal of Agrotechnical Economics, 2006(6): 2—10. (in Chinese with English abstract)
- [3] 潘丹, 应瑞瑶. 资源环境约束下的中国农业全要素生产率增长研究[J]. 资源科学, 2013, 35(7): 1329—1338.
Pan Dan, Ying Ruiyao. Agricultural total factor productivity growth in china under the binding of resource and environment[J]. Resource Science, 2013, 35(7): 1329—1338. (in Chinese with English abstract)
- [4] 韩海彬, 赵丽芬. 环境约束下中国农业全要素生产率增长及收敛分析[J]. 中国人口·资源与环境, 2013, 23(3): 70—76.
Han Haibin, Zhao Lifan. Growth and convergence of agricultural total factor productivity in China under environmental regulations[J]. Chinese Journal of Population Resources and Environment, 2013, 23(3): 70—76. (in Chinese with English abstract)
- [5] Chen Pochi, Yu Mingmin, Chang Chingcheng et al. Total factor productivity growth in China's agricultural sector[J]. China Economic Review, 2008, 19(4): 580—593.
- [6] 孟令杰. 中国农业产出技术效率动态研究[J]. 农业技术经济, 2000(5): 1—4.
Meng Lingjie. Research of agricultural production technical efficiency in China[J]. Journal of Agrotechnical Economics, 2000(5): 1—4. (in Chinese with English abstract)
- [7] 李谷成. 技术效率、技术进步与中国农业生产率增长[J]. 经济评论, 2009(1): 60—68.
Li Gucheng. Technical efficiency, technical progress and Chinese agricultural productivity growth[J]. Economic Review, 2009(1): 60—68. (in Chinese with English abstract)
- [8] 李谷成, 冯中朝. 中国农业全要素生产率增长技术推进抑或效率驱动[J]. 农业技术经济, 2010(5): 4—14.
Li Gucheng, Feng Zhongzhao. Agricultural total factor productivity growth: technology or efficiency promotion[J]. Journal of Agrotechnical Economics, 2010(5): 4—14. (in Chinese with English abstract)
- [9] 朱喜, 史清华, 盖庆恩. 要素配置扭曲与农业全要素生产率[J]. 经济研究, 2011(5): 86—98.
Zhu Xi, Shi Qinghua, Gai Qingen. Misallocation and TFP in rural China [J]. Economic Research Journal, 2011(5): 86—98. (in Chinese with English abstract)
- [10] 郭萍, 余康, 黄玉. 中国农业全要素生产率地区差异的变动与分解——基于 Fare-Primont 生产率指数的研究[J]. 经济地理, 2013, 33(2): 141—145.
Guo Ping, Yu Kang, Huang Yu. Changes and decomposition of agricultural TFP regional disparities in China: study of Fare-primont TFP index[J]. Journal of Economic Geography, 2013, 33(2): 141—145. (in Chinese with English abstract)
- [11] 李卫, 薛彩霞, 朱瑞祥, 等. 基于前沿面理论的中国农业机械生产配置效率分析[J]. 农业工程学报, 2012, 28(3): 38—43.
Li Wei, Xue Caixia, Zhu Ruixiang et al. Analysis on production allocative efficiency of agricultural machinery based on frontier theory in China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2012, 28(3): 38—43. (in Chinese with English abstract)
- [12] 刘静, 吴普特, 王玉宝, 等. 基于数据包络分析的河套灌区农业生产效率评价[J]. 农业工程学报, 2014, 30(9): 110—118.
Liu Jing, Wu Pute, Wang Yubao et al. Assessment of agricultural productive efficiency for Hetao Irrigation District based on data envelopment analysis[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2014, 30(9): 110—118. (in Chinese with English abstract)
- [13] 陈怡. 基于环境因素的中国农业生产率增长状况实证研究[D]. 重庆大学, 2011.
Cheng Yi. Empirical Study on China's Agricultural Production Growth under the Binding of Environment[D]. Chongqing: Chongqing University, 2011. (in Chinese with English abstract)
- [14] 刘战伟. 资源环境约束下的中国农业全要素生产率增长与分解[J]. 科技管理研究, 2015(1): 83—87.
Liu Zhanwei. Agricultural total factor productivity growth in China under the binding of resource and environment[J]. Science and Technology Management Research, 2015(1): 83—87. (in Chinese with English abstract)
- [15] 张林, 冉光和, 蓝震森. 碳排放约束与农业全要素生产率增长及分解[J]. 华南农业大学学报社会科学版, 2015, 14(3): 22—32.
Zhang Lin, Ran Guanghe, Lan Zhensen. Growth and decomposition of agricultural total factor productivity in China under carbon emission constraints [J]. Journal of South China Agricultural University (Social Science Edition), 2015, 14(3): 22—32. (in Chinese with English abstract)
- [16] 厄尔·O·黑迪, 约翰·L·狄龙. 农业生产函数[M]. 沈达尊, 朱希刚, 厉为民, 译, 北京: 农业出版社, 1991.
- [17] 顾海, 王艾敏. 基于 Malmquist 指数的河南苹果生产效率评价[J]. 农业技术经济, 2007(2): 99—104.
Gu Hai, Wang Aimin. Evaluation of apple TFP in Henan Province based on Malmquist index[J]. Journal of Agrotechnical Economics, 2007(2): 99—104. (in Chinese with English abstract)
- [18] 白秀园, 霍学喜. 中国苹果全要素生产率及影响因素研究[J]. 北方园艺, 2013(21): 195—200.
Bai Xiuguang, Huo Xuexi. Research on the technical efficiency, technical progress, total factors productivity and its influence factors on apple industry in China[J]. Northern Horticulture, 2013(21): 195—200. (in Chinese with English abstract)
- [19] 郭亚军, 姚顺波, 霍学喜. 中国苹果主产区全要素生产率研究——基于 HMB 指数的分析[J]. 农业技术经济, 2011(10): 78—86.
Guo Yajun, Yao Shunbo, Huo Xuexi. Research of apple TFP in China based on HMB index[J]. Journal of Agrotechnical Economics, 2011(10): 78—86. (in Chinese with English abstract)
- [20] Chung Y H, Fare R, Grosskopf S. Productivity and undesirable outputs: a directional distance function approach[J]. Journal of Environmental Management, 1997, 51(3): 229—240.
- [21] 刘天军, 范英. 中国苹果主产区生产布局变迁及影响因素分析[J]. 农业经济问题, 2012(10): 36—42.
Liu Tianjun, Fan Ying. Layout change and its influencing factors on apple production in China[J]. Issues in Agricultural Economy, 2012(10): 36—42. (in Chinese with English abstract)
- [22] 刘桂平, 周永春, 方炎, 等. 中国农业污染的现状与建议[J]. 国际技术经济研究, 2006, 9(4): 18—20.
Liu Guiping, Zhou Yongchun, Fang Yan et al. The current situation of agricultural pollution and the advice in our country[J]. Studies in International Technology and Economy, 2006, 9(4): 18—20. (in Chinese with English abstract)
- [23] 张晓山. 走中国特色农业现代化道路——关于农村土地资源利用的几个问题[J]. 学术研究, 2008(1): 75—79.
Zhang Xiaoshan. On some problems concerning the utility of rural land resources[J]. Academic Research, 2008(1): 75—79.

- (in Chinese with English abstract)
- [24] 赖斯芸, 杜鹏飞, 陈吉宁. 基于单元分析的非点源污染调查评估方法[J]. 清华大学学报自然科学版, 2004, 44(9): 1184—1187.
Lai Siyun, Du Pengfei, Chen Jining. Evaluation on nonpoint source pollution based on unit analysis[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology Edition), 2004, 44(9): 1184—1187. (in Chinese with English abstract)
- [25] 梁流涛. 农村生态环境时空特征及其演变规律研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2009.
Liang Liutao. Study on the Temporal and Spatial Evolution of Rural Ecological Environment[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2009. (in Chinese with English abstract)
- [26] 朱梅. 海河流域农业非点源污染负荷估算与评价研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2011.
Zhu Mei. Study on Agricultural NPS Loads of Haihe Basin and Assessment on Its Environmental Impact[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2011. (in Chinese with English abstract)
- [27] Fare R, Grosskopf S, Pasurka Jr C A. Accounting for air pollution emissions in measures of state manufacturing productivity growth[J]. Journal of Regional Science, 2001, 41(3): 381—409.
- [28] 陆文聪, 梅燕. 中国粮食生产区域格局变化及其成因实证分析——基于空间计量经济学模型[J]. 中国农业大学学报社会科学版, 2007, 24(3): 140—152.
Lu Wencong, Mei Yan. Empirical studies on the variation and contributing factors of regional grain production structure in China based on spatial econometrics models[J]. China Agricultural University Journal of Social Sciences Edition, 2007, 24(3): 140—152. (in Chinese with English abstract)
- [29] 龙小宁, 朱艳丽, 蔡伟贤, 等. 基于空间计量模型的中国县级政府间税收竞争的实证分析[J]. 经济研究, 2014(8): 41—53.
Long Xiaoning, Zhu Yanli, Cai Weixian, Li Shaomin. An empirical analysis of spatial tax competition among Chinese counties based on spatial econometric models[J]. Economic Research Journal, 2014(8): 41—53. (in Chinese with English abstract)

Total factor productivity of apple industry in China considering non-point source pollution and its spatial concentration analysis

Feng Xiaolong, Huo Xuexi^{*}

(Center of Western Rural Development, Northwest A&F University, Yangling 712100, China)

Abstract: Apple industry has become a major industry of rural economy in most of the north region in China, which plays an important role on the adjustment of agricultural structure, the increase of farmer's income and the export. But overall, the development of apple industry still has belonged to the traditional production style depending on fertilizer and pesticide; on one side it has brought high economic benefits for farmers, and on the other side it has been the main reason to agricultural non-point source pollution. There is no doubt that this production style has exacerbated the contradiction between the development of apple industry and the ecological environment in China. Therefore, in order to achieve the sustainable development of apple industry, the transformation of the development mode of apple industry, the improvement of resource use efficiency and the effective control of non-point source pollution in apple production should be taken into account urgently. And to achieve these goals are closely dependent on the contribution of apple total factor productivity to industry development, the reasonable estimation of apple total factor productivity, and thus the guide of the correct policy. Using the unit investigation and evaluation model, this paper calculates the non-point source pollution from apple industry, which is taken as non-ideal output and integrated into the model of total factor productivity, then analyzes the total factor productivity of apple industry under the constraint of environment of 21 provinces in China from 1994 to 2013 by applying the Malmquist-Luenberger productivity index, and finally tests the spatial autocorrelation of total factor productivity of apple industry by using Moran's index. The results show as follows: 1) Apple total factor productivity index under the constraint of environment is lower than that without this constraint, implying that environment pollution has obvious negative effects on apple productivity in China, and the development of apple industry presents extensive growth at the expense of polluting environment; at the same time the Malmquist index overestimates the contribution of technical efficiency and technical progress rate to apple total factor productivity. 2) Apple total factor productivities in different regions have obvious difference. Specifically, the growth rate of "good" output in Shaanxi, Ningxia, Yunnan and Guizhou is lower than the decreasing rate of "bad" output, and conversely the growth rate of "good" output in Shandong, Liaoning, Beijing and Tianjin is higher than the decreasing rate of "bad" output, which means the development of apple industry in the central and western China does not coordinate with environment, and conversely the development of apple industry in eastern region is in harmony with the environment. 3) Apple total factor productivity under the constraint of environment shows the significantly positive spatial correlation in both global and local level, but spatial association types of total factor productivity in different provinces during the sample period change obviously. Apple total factor productivity in specific provinces presents the spatial distribution characteristics of high-high aggregation, which takes Shaanxi, Gansu and Shanxi as the center. These results suggest that the government should strengthen the research and promote the environmentally-friendly technology related to apple production like soil-testing formula technology; the governments of different provinces should formulate the environmental management policy related to apple industry based on local conditions, and promote the development of apple industry in harmony with the environment. For instance, the western regions should draw lessons from the eastern coastal areas about apple's advanced production technology, improve the utilization rate of fertilizer, and reduce the gap between regions; different apple production provinces should strengthen the cooperation, pay more attention to and use the spatial spillover effect of apple total factor productivity, and then enhance driving force and radial force of apple total factor productivity of high-high aggregation areas.

Key words: productivity; pollution; autocorrelation; unit investigation and evaluation method