灌溉水资源效率、空间溢出与影响因素

张雄化，钟若愚

（深圳大学 中国经济特区研究中心，深圳 518060）

摘　要：选取 2004—2013 年全国和 31 个省市区的劳动力、资本、农用物质、灌溉水吸收量、生态包袱、污染排放量和粮食产量，分别运用 MFA、SFA 和 DEA 方法测量粮食生产灌溉水资源的资源生产率、技术效率和全要素资源效率，运用 Moran's I 指数检验 3 种水资源效率的空间溢出效应，并采用 Panel Data 模型对影响 3 种水资源效率的因素进行实证分析。结果显示：全国粮食生产的水资源生产率稳步提高，灌溉条件改善中技术效率提高缓慢，全要素水资源效率中经济效率明显高于生态效率和环境效率；区域粮食生产的灌溉水资源效率分化明显；全局性的灌溉水资源效率空间溢出效应不明显；人均用水量与灌溉水资源效率间存在显著正向关系，农业用水比例与灌溉水资源效率间存在显著负向关系。因此，必须实行水资源效率细分与综合管理，特别是对效率落后地区实行重点整治；通过制度创新促进效率外溢，并加强效率影响因素的动态监测。

关键词：灌溉用水；水资源效率；空间溢出效率；粮食安全

中图分类号：F323.213　　**文献标识码：**A　　**文章编号：**1672－0202(2015)04－0020－09

一、引　言

水土稀缺、人口增长引发人们对粮食安全的高度关注。全球范围内，占全球 17% 的农业用地，生产出占全球 40% 的食物，而粮食作物灌溉用水需要消耗总水量的 65% ～70%[1-2]。我国用占世界 7% 的耕地，养活占世界 22% 的人口，在此过程中，农业需要消耗全国总水量的 60% ～65%。这要求我国水、土、人、粮必须高度协调均衡发展。目前，我国人口多与耕地少的状况短期内难以改变，而水资源利用改变相对容易，通过短期的加强行政管理和逐步实施工程技术，就可以使水资源利用效率提升。改善水资源利用效率能达到增加粮食产量和提高粮食质量的目的，对维护粮食安全具有重要的现实意义。

水资源利用及其效率的重要性日益凸显。从理论上考察，国际资源效率研究进展及其演化趋势反映水资源等战略稀缺资源日益受到学界关注[3]；从实践上观察，欧盟水框架指令与共同农业政策的改革，特别注重水资源生产率与水资源效率双层目标[4-5]。纵观国内外的研究成果，关于 3 种水资源效率的相关研究成果丰富，主要表现在以下方面：

关于 MFA 框架下的水资源生产率研究。物质流分析（Material Flow Analysis，MFA）是定量测度经济系统运行中物质使用量的基本工具。Fischer[6] 首次基于经济学观点尝试国家层次的物质流分析。欧盟统计局 2007 年开始发布主要成员国的国家层次物质流分析数据。国内学者借鉴国

收稿日期：2015－06－24　　**DOI：**10.7671/j.issn.1672－0202.2015.04.003

基金项目：教育部人文社科重点研究基地重大项目（10JJDZONGHE019）；中国博士后科学基金第 57 批面上资助项目（2015M572346）；湖北省教育厅科学技术研究计划青年人才项目（Q20151305）

作者简介：张雄化（1982—），男，湖北荆州人，深圳大学中国经济特区研究中心博士后，长江大学经济学院讲师，主要研究方向为能源、资源及农业经济。E－mail：190301781@qq.com

外的国家物质流分析框架，并把物质流分析推演到区域物质流分析和省市物质流分析。尤其，Huang 等[7]分析中国常州地区物质投入产出时，用 MFA 方法分析水资源投入趋势及在农业中利用情况。MFA 方法测量的水资源生产率属于单要素生产率，该方法忽略其他要素对水效率的影响，但利用资源生产率指标测算效率较为方便。

运用 SFA 方法的灌溉用水技术效率研究。借助随机前沿分析（Stochastic Frontier Analysis，SFA），Battese 和 Coelli[8]建立了基于面板数据的随机前沿函数，Kaneko 等[9]建立了农业用水效率的随机前沿生产函数，并依据 Kopp“农业用水效率等于技术上可行的最小水资源使用量与实际使用量的比值”[10]测定农业用水效率。王学渊[11]依据 Battese 和 Coelli 的 SFA 方法，研究中国农业生产技术效率和灌溉用水效率。另外，粮食生产用水包括蓝水和绿水，蓝水利用效率的 SFA 研究表明，我国蓝水利用效率普遍较低，不同省份动态效率出现“高者愈高，低者愈低”的局面[12]。SFA 方法的灌溉技术效率属于全要素效率，考虑了其他要素对水效率的影响，但忽略非期望产出及其对水效率的影响，该方法依据生产函数模型测量效率稍显复杂。

运用 DEA 方法的全要素水资源效率研究。Charnes 和 Cooper[13]提出传统的评价决策单元相对效率的数据包络分析方法（Data Envelopment Analysis，DEA）。Tone[14]提出基于非径向的包含非期望产出的 DEA 扩展模型。Ali 等[15]基于 DEA 及 MALQUIST 全要素生产率指数，估计加拿大南部灌溉区域的水资源利用效率和生产率。Sun 等[16]基于水足迹和灰水足迹的省际面板数据，结合期望产出和非期望产出的 DEA 模型与空间杜宾计量模型分析中国区域水资源利用效率及空间溢出效应。DEA 方法的全要素水资源效率也属于全要素效率，考虑了非期望产出和其他要素对水效率的影响，该方法借助规划模型测算效率也稍显复杂。

以上研究成果对于提高水资源利用效率具有重大意义，但对水资源利用效率的细分及其测量尚未涉及；对于水资源效率空间溢出效应的研究也较为少见；对于影响水资源效率因素的研究也较为缺乏。本文利用 MFA、SFA 和 DEA 方法对粮食生产过程中的水资源利用效率进行细分及测量，并对其进行实证比较研究，以丰富水资源效率理论，推动粮食生产中科学的水资源利用。

二、研究方法与理论模型

（一）MFA、SFA 与 DEA 方法

运用 MFA 方法测量水资源生产率与污染强度。选取典型物质流的分析指标，包括物质输入指标（DMA）、物质输出指标（DPO）、污染排放指标（DPOI）和物质效率指标（MP）。其中，DMA、DPO、DPOI 和 MP 分别用直接物质投入量、生产过程排放量、污染排放强度和资源生产率衡量。以粮食生产用水为例，DMA 为粮食生产的水资源消耗量；DPO 为污水排放量；DPOI 为粮食生产的污水排放量与相应粮食产量的比值；MP 即水资源生产率等于粮食产量与相应灌溉水资源消耗量的比值。

运用 SFA 方法测量灌溉技术效率。借鉴 Kaneko 等[9]农业生产用水的随机生产前沿函数模型建立新模型：

$$\ln Y = \beta_0 + \beta_1 \ln K + \beta_2 \ln L + \beta_3 \ln P + \beta_4 \ln F + \beta_5 \ln W + v - u \tag{1}$$

其中，β 为系数，Y 表示粮食产量，K 表示农业机械总动力，L 表示劳动力投入量，P 表示农药投入量，F 表示化肥施用量，W 表示实际灌溉用水量，误差项被分解为随机效应误差项 v 和产品生产技术无效率项 u。假设出最小水资源量，此时 Kaneko 形式的用水效率生产前沿函数模型中不存在无效率项，最小水资源投入得到的有效的粮食产量与实际用水投入量对应得到的粮食产量理论上应该相等。依照实际用水的 Kaneko 模型式（含技术无效项）与最小可行用水的 Kaneko 模型式（不含技术无效项）相等即可计算出 Kopp 定义的用水效率。

运用 DEA 方法测量全要素水资源效率。粮食安全生产的水资源利用效率是指单位水资源带来的经济、环境和生态效益。粮食生产的全要素水资源利用效率可用经济效率、环境效率和生态效率表示。基于非期望产出的运用投入导向规模报酬可变的 DEA 测度效率,经济效率投入指标是真实水吸收量、水资源生态包袱、人力资源、资本资源和农用物质,产出指标是粮食产量;生态效率投入指标是生态包袱,产出指标是粮食产量和污染排放;环境效率投入指标是真实水吸收量、水资源生态包袱、人力资源、资本资源和农用物质,产出指标是污染排放。

(二) Moran's I 指数检验

Moran's I 统计量是空间临近单元值的比较,通过空间自相关指数检验判断单元值是否存在稳健的空间溢出效应。如果临近单元具有相似的值,统计量指标存在正的空间自相关;如果临近单元具有非相似的值,统计量指标存在强的负相关。自相关指数定义式为:

$$I = [n\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}W_{ij}(x_i-\bar{x})(x_j-\bar{x})]/[\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}W_{ij}\sum_{i=1}^{n}(x_i-\bar{x})^2] \quad (2)$$

其中,I 即为相关指数,x 为观察单元的值,$\bar{x}$ 为所有单元均值,W 为邻接矩阵,i 和 j 代表不同的单元。Moran's I 值的范围为(-1,1),如单元空间过程不相关,则 I 值接近于 0;I 取正负值时,分别代表单元空间过程存在正负相关。以上相关性是否可采信用 Z-Score 判断,如果 Z 分值小于 -1.96 或者大于 1.96,则相关性是可采信的,正相关表示分布状态为集聚,负相关表示分布状态为发散;Z 分值的其他值情况反映相关性不可采信,进而说明单元值是随机分布的。

(三)面板数据模型

如若效率存在空间溢出效应,则采用空间计量模型来分析效率影响因素;如若效率不存在空间溢出效应,则采用 Panel Data 模型来分析效率影响因素。假设粮食生产的灌溉水资源效率影响因素的 Panel Data 模型如下:

$$y_{it}=\alpha_i+x_{it}\beta_i+\mu_{it},i=1,2,\cdots,30,t=2004,\cdots,2013 \quad (3)$$

其中,y 代表灌溉水资源效率,x 代表需要检验的 6 个解释变量:第一产业产值比重、农业用水比重、人均用水量、水利设施建设、有效灌溉面积和人口文化素质,β 代表相应解释变量的系数。在此,第一产业比重用第一产业产值与 GDP 比值表示;农业用水比例采用农业用水量与总用水量的比值表示;人均用水量采用水资源拥有量与人口量的比值表示;水利设施建设利用水利设施和除涝面积中的水库总库容量衡量;地区人口文化素质利用受过高中及其以上学历教育的人口占总教育人口的比率衡量,其中,总教育人口数为 6 岁及其以上年龄的接受过不同教育(小学、初中、高中、大专及以上学历)的总人口。

三、数据来源及处理

数据指标选取 2004—2013 年全国和 31 个省市区的劳动力、资本、农用物质、灌溉水吸收量、生态包袱和污染排放量。所有数据均来自《中国农村统计年鉴》、《中国统计年鉴》、《中国环境统计年鉴》和国家水利局网站。具体数据指标处理如下:

粮食产量和劳动力:包括由稻谷、小麦、玉米、大豆和薯类组成的粮食产量,劳动力人数用乡村从业人员中的第一产业就业人员数替代。

资本和农用物质投入:主要指农田作业中投入及沉没的固定资产,由于农业资本存量估算的复杂性,本文把农业机械总动力作为资本来替代;农用物质投入量 = 农药投入量 + 化肥施用量。

灌溉用水、吸收量与生态包袱:灌溉用水量约占农业用水总量的 90%,则灌溉用水量为粮食安全生产的最大用水量,灌溉用水量 = 农业用水量 ×90%。国外研究表明,农田灌溉用水最终被作

物吸收的比率约为47%[17]，则灌溉水的47%为真正的灌溉水利用量，灌溉用水的53%没被粮食生产所用。依据魏茨舍克(Weizsaecke)提出的生态包袱概念，指人类为获得有用物质而获得的附加压力，视53%的灌溉用水为生态包袱。则总灌溉水吸收量＝农业用水×90%×47%，总生态包袱＝农业用水×90%×53%。

污染排放量：采用农业的化学需氧量和氨氮排放量之和表示。农业中化学需氧量排放量约占总排放量的47.5%；氨氮排放量约占总排放量的11.5%。则农业污染排放量为粮食安全生产的最大污染排放量，总污染排放量＝化学需氧量×47.5%＋氨氮排放量×11.5%。

四、实证结果分析

(一)全国范围内，水资源生产率上升，灌溉技术效率平稳，全要素水资源效率差异明显

MFA 框架下，粮食生产的水资源生产率稳步提高，污染强度呈下降趋势。表 1 显示，2004 年 1 亿立方水资源消耗最低可生产 14.55 万吨粮食，2013 年最低可生产 17.06 万吨粮食，10 年间的水资源生产率年均增长率为 1.73%。与此同时，粮食生产的污染排放强度呈倒 U 曲线形态，2004 年 1 万吨粮食产出排放 139 吨污染，2011 年达到峰值 222 吨污染，之后每万吨粮食产量的排污量开始回落，10 年间的污染排放强度均值为 153.2 吨/万吨。

SFA 方法下，粮食生产灌溉用水技术效率改善不甚明显。表 1 显示，2004 年的灌溉用水技术效率值为 0.686，2009 年技术效率达到峰值为 0.724，2013 年技术效率回落为 0.577，整体看来 10 年间的灌溉用水效率在 60% 的及格线上下徘徊。

DEA 方法下，粮食生产的全要素水资源效率从高到低排列依次是经济效率、环境效率和生态效率。表 1 显示，10 年间，粮食生产的经济效率为有效值 1 的年份有 6 年，平均效率值为 0.995；粮食生产的环境效率为有效值的年份仅有 3 年，平均效率为 0.991；粮食生产的生态效率为有效值的年份仅有 1 年，平均效率为 0.930。

表 1　全国层面的效率比较

年份	MFA(考虑期望、非期望产出)		SFA(不考虑非期望产出)	DEA(考虑非期望产出)		
	MP 下限值 ($wt/10^8$)	DPOI 上限值 (t/wt)	灌溉技术效率	经济效率	生态效率	环境效率
2004	14.55	139	0.686	1	0.848	1
2005	15.02	142	0.673	1	0.876	0.997
2006	15.10	139	0.680	1	0.881	0.994
2007	15.48	134	0.717	0.988	0.903	1
2008	16.04	121	0.668	1	0.935	0.971
2009	15.84	117	0.724	0.984	0.924	0.993
2010	16.46	110	0.689	0.988	0.960	0.992
2011	16.95	222	0.702	1	0.989	0.985
2012	16.88	209	0.697	0.989	0.984	0.978
2013	17.06	199	0.577	1	1	1
均值	15.94	153.2	0.681	0.995	0.93	0.991

(二) 区域范围内，水资源效率分化明显，重点区域的水资源效率均处于较低水平

水资源生产率区域分化明显。水资源生产率前三甲依次为西北、华南和华北，1 亿立方水耗依次生产的粮食量为 29.47 万吨、25.79 万吨和 24.81 万吨；水资源生产率较差的地区是西南和黄淮

海地区,1 亿立方水耗的粮食产量仅为 6.41 万吨和 8.20 万吨。与此同时,粮食生产污染排放强度较低的地区依次为西北、东北和华南,1 万吨粮食产量的排污量依次为 106.06 吨、107.14 吨和 112.03 吨;粮食生产污染排放强度较高的地区为黄淮海和长江中下游地区,1 万吨粮食产量的排污量约为 418.82 吨和 375.75 吨。

灌溉技术效率区域分化也明显。灌溉用水技术效率最高的地区是东北,其次是西南和黄淮海地区,效率分别是 0.833、0.674 和 0.696。灌溉用水技术效率较低的地区是东南和华南,效率分别为 0.393 和 0.271。灌溉技术效率最高区域约为最低区域效率值的 3 倍。

全要素水资源效率区域差异也较大。经济效率为有效值 1 的地区只有东北和西北,经济效率稍高的地区是华南和华北,效率值分别为 0.989 和 0.908,经济效率最低的地区是黄淮海、西南和长江中下游地区,效率值分别为 0.405、0.532 和 0.539。生态效率为有效值 1 的地区仅有西北,生态效率稍高的地区是华北和华南,效率值分别为 0.903 和 0.826,生态效率较差的地区是西南、长江中下游地区和黄淮海,效率值分别为 0.182、0.265 和 0.285。环境效率为有效值 1 的地区是华北,其他地区环境效率普遍较差,环境效率最差的地区是东南和西北,效率值分别为 0.057 和 0.024。

表 2 2013 年区域层面的效率比较

区域划分	MP 下限值(wt/10^8)	DPOI 上限值(t/wt)	技术效率	经济效率	生态效率	环境效率
华北	24.81	249.23	0.509	0.908	0.903	1
东北	22.74	107.14	0.833	1	0.746	0.113
黄淮海	8.20	418.82	0.696	0.405	0.285	0.504
西北	29.47	106.06	0.569	1	1	0.024
东南	14.58	154.44	0.393	0.686	0.545	0.057
华南	25.79	112.03	0.271	0.989	0.826	0.210
西南	6.41	164.37	0.674	0.532	0.182	0.317
长江中下游	7.015	375.75	0.512	0.539	0.265	0.212

注:华北:北京、天津、山西;东北:内蒙古、辽宁、吉林、黑龙江;黄淮海:河北、河南、山东、安徽;西北:陕西、甘肃、青海、宁夏、新疆;东南:上海、浙江、福建;长江中下游地区:江苏、湖北、湖南、江西;华南:广东、广西、海南;西南:重庆、四川、贵州、云南、西藏。

(三)空间范围内,水资源效率仅存在局部溢出效应,不存在全局溢出效应

表 3,Moran's I 指数和 Z 分值显示,2004 年除灌溉用水技术效率外,其他效率值空间分布不存在全局自相关,空间效应表现为随机分布;仅 2004 年的灌溉用水技术效率空间分布全局自相关,空间效应表现为集聚。2013 年的全部水资源效率空间分布均不存在全局自相关,空间效应均表现为随机分布。总体看来,粮食生产的水资源效率不存在全局性的空间溢出效应。

图 1 显示 2004 年与 2013 年的水资源效率局部自相关的高高集聚(HH)、低低集聚(LL)、高低集聚(HL)和低高集聚(LH)情况。水资源生产率中,山西、河南和贵州为高高集聚,西藏为低低集聚;水资源生产率污染排放强度中,北京和天津为高高集聚,河北为低高集聚;灌溉用水技术效率中,黑龙江为高高集聚,北京、天津和海南为低低集聚;全要素水资源经济效率中,黑龙江为低高集聚;全要素水资源生态效率中,新疆、西藏呈现过高低、低高和高高集聚,安徽和广东分别呈现过高低和低低集聚;全要素水资源环境效率中,西藏、新疆和宁夏均呈现出高高集聚,内蒙古呈现出高低集聚。总体看来,粮食生产的水资源效率只较少的地区呈现出局部自相关,水资源效率仅存在少许的局部溢出效应。

表 3　31 省市区效率的全局自相关性检验

指标	2004 年			2013 年		
	Moran's I	Z	敛散性	Moran's I	Z	敛散性
资源生产率	0.0923	0.5387	随机分布	0.0353	0.2864	随机分布
污染强度	0.0064	0.5756	随机分布	0.1816	0.9252	随机分布
灌溉效率	0.6044	2.6203	集聚	0.0683	0.4188	随机分布
经济效率	0.0029	0.1490	随机分布	-0.1003	0.0964	随机分布
生态效率	0.0851	0.5049	随机分布	-0.0418	-0.0354	随机分布
环境效率	-0.0366	-0.0157	随机分布	-0.1388	-0.4714	随机分布



图1(a) 生产率局部自相关



图1(b) 污染强度局部自相关



图1(c) 灌溉效率局部自相关



图1(d) 经济效率局部自相关

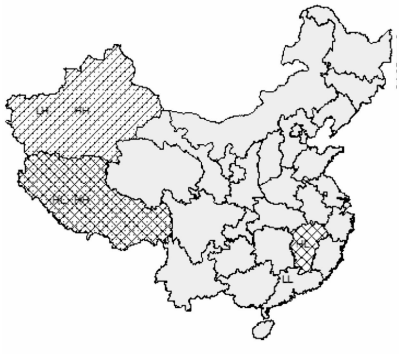


图1(e) 生态效率局部自相关

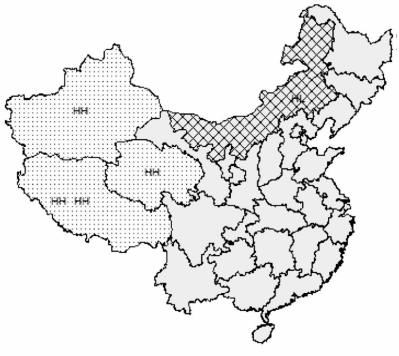


图1(f) 环境效率局部自相关

图 1　2004 年和 2013 年水资源效率局部自相关的集聚形态

（四）水资源效率影响因素中农业用水比例、人均用水量和人们文化素质为特殊影响因子

Hausman 检验表明，粮食生产的水资源生产率、灌溉技术效率和全要素水资源效率均适合采用随机效应模型。水资源生产率影响因素中，农业用水通过5%的显著水平检验，农业用水比例每增加1%，水资源生产率将下降约26%，其他因素对水资源生产率影响不显著。灌溉用水技术效率影响因素中，水利设施建设和农用水比重对效率产生负向影响，影响系数分别约为 -0.0001 和 -0.4334，分别通过15%和1%的显著性水平检验；农业产值比重、有效灌溉面积、人均用水量对效率产生正向影响，影响系数分别为0.6883、0.00004 和3.4100，分别通过1%、5%和1%的显著性水平检验；教育文化素质对效率影响不显著。粮食生产全要素水资源效率中的经济效率方面，水利设施建设和农业用水对效率产生负向影响，系数分别为 -0.0001 和 -0.4336，分别通过15%和1%的显著性水平检验；农业产值比重、有效灌溉面积和人均用水量对效率产生正向影响，系数分别为0.6883、0.00001 和0.6968，分别通过1%、5%和1%的显著性水平检验；文化素质对经济效率影响不显著。粮食生产全要素水资源效率中的生态效率方面，农业用水对效率产生负向影响，系数为 -0.2929，通过15%的显著性水平检验；教育文化素质和人均用水量对效率产生正向影响，系数分别为0.7389 和5.2200，均通过1%的显著性水平检验；其余因素对生态效率影响不显著。粮食生产中的环境效率方面，有效灌溉面积对效率产生负向影响，人均用水量对效率产生正影响，系数分别为 -0.00002 和5.4600，分别通过10%和1%的显著性水平检验；其他因素对环境效率影响不显著。

总体看来，农业用水比例对粮食生产的水资源效率均产生负影响，人均用水量均对水资源效率产生正影响，遏制农业用水比例和提高人均用水量将对水资源效率提高产生综合效应；水利设施建设对灌溉用水效率和经济效率已表现出微弱的负向影响，评估新建水利设施项目对粮食生产的影响大有必要；另外，人们文化素质提升能明显提高粮食生产用水的生态效率。

表4 效率影响因素的实证估计结果

检验因子	水资源生产率	灌溉技术效率	经济效率	生态效率	环境效率
	RE	RE	RE	RE	RE
水利设施建设	-0.0017	-0.0001*	-0.0001*	-0.0010	-0.0001
	(0.0059)	(0.0001)	(0.0001)	(0.001)	(0.0001)
农业产值比重	9.2420	0.6878****	0.6883****	0.0803	-0.1581
	(14.1402)	(0.2034)	(0.2034)	(0.2379)	(0.1626)
农业用水比例	-26.0036***	-0.4334****	-0.4336****	-0.2929*	-0.1438
	(10.2053)	(0.1578)	(0.1578)	(0.1793)	(0.1197)
有效灌溉面积	0.0012	0.00004***	0.00001***	7.5700	-0.00002**
	(0.0012)	(0.00002)	(0.00001)	(0.0001)	(0.00001)
人口文化素质	1.0813	-0.0868	-0.0864	0.7389****	0.1268
	(11.4572)	(0.1636)	(0.0001)	(0.1920)	(0.1318)
人均用水量	-0.00002	3.4100****	0.6968****	5.2200****	5.4600****
	(0.0001)	(1.800)	(0.1076)	(1.300)	(8.4600)

注：常数项略，括号里面的值表示标准误差；****、***、**、*分别表示1%、5%、10%和15%的显著性水平；RE代表随机效应模型，Hausman检验过程略。

五、结论及政策建议

基于MFA、SFA和DEA方法的三层水资源效率比较研究，可以得出如下基本结论：

第一，全国范围内，粮食生产的水资源生产率稳步提高，污染强度呈下降的趋势，灌溉技术效率有所提高且速度较为缓慢，全要素水资源效率中的经济效率明显好于生态效率和环境效率；

第二，区域范围内，粮食生产的水资源效率分化明显。尤其，黄淮海、东南、西南和长江中下游地区与其他区域相比，水资源生产率、灌溉技术效率、全要素水资源效率的经济效率、生态和环境效率均处于较低水平；

第三，空间范围内，灌溉水资源效率局部溢出效应明显，全局性溢出效应不明显；

第四，粮食生产过程中的人均用水量增加，并能显著拉升水资源三层效率，农业用水比例增加也能显著拉低三层效率，大众文化素质的提高对水资源的生态效率有较明显改善作用。

依据以上结论提出改善水资源效率的如下政策建议：

第一，水资源效率管理需进行细分与综合。综合管理灌溉水资源效率，细分管理水资源生产率、灌溉技术效率和全要素水资源效率。效率管理的目标是同步提升水细分效率，并最终实现效率的综合提高。借鉴西方管理经验，设定水资源三层效率量化标杆管理，对效率高的区域进行奖励，对效率低的区域实施项目及技术扶持，利用财税金融优惠政策补贴效率改进实践，对农业经营主体进行水资源效率管理培训，促成微观主体科学利用水资源。

第二，水资源效率落后地区需进行重点整治。基于水资源利用及其效率与农业产值及粮食增产具有正相关关系，如果粮食主产区在水土一定的条件下，粮食增产的可能性会减弱。为此，为了保持全国粮食产量不断提升，必须对水效率落后地区进行整治。特别是要对黄淮海、东南、西南和长江中下游地区等水资源利用效率低下的地区进行重点整治，以提高水资源利用效率。

第三，水资源效率外溢需进行制度创新。水资源效率提高可以通过先进技术的外溢和管理方式的转变得到实现。在技术层面上，应当学习西方经验，健全水产权、水市场、水价格机制，充分利用市场机制配置水资源，并在全国水利项目中推广已有的先进节水用水技术，如滴灌、喷灌、精准配方灌溉；在管理层面上，鼓励学习借鉴西方的流域管理经验，整合流域管理与粮食产区水资源管理并实施综合协调管理，发挥资源管理效率带动资源利用效率的重要作用。

第四，水资源效率影响因素需要进行动态监测。评估影响粮食安全的水资源效率指标，包括人均水资源拥有量、农业用水比率、人口文化水平等。应当在全国范围内，对这些指标进行动态监测，达到优化对水资源效率有益的指标、管控对水资源效率不利指标的目的。最终实现提高粮食生产水资源利用效率，促进粮食生产和粮食安全。

参考文献：

[1]ABDULLAH K B. Use of Water and Land for Food Security And Environmental Sustainability [J]. Irrigation Drainage, 2006, (55): 219 – 222.

[2]GENEVA STARR, JANA LEVISON. Identification of Crop Groundwater and Surface Water Consumption Using Blue and Green Virtual Water Contents at a Subwatershed Scale [J]. Environment Process, 2014, (1): 497 – 515.

[3]王晓玲，于惊涛，武春友. 国际资源效率研究进展与演化趋势评述[J]. 管理学报，2013，(10)：1553 – 1560.

[4]MARK OELMANN, CHRISTOPH CZICHY. The Regulation of Water Services in The EU: Water Service Provision as a Natural Monopoly [J]. ZBW – Leibniz Information Center for Economics: Intereconomics, 2013, 48(3): 145 – 150.

[5]MONICA ALESSI, SEBASTIEN TREYER. The Regulation of Water Services in The EU: Economic Models and Water Pricing Towards Water Efficiency [J]. ZBW – Leibniz Information Center for Economics: Intereconomics, 2013, 48 (3): 150 – 155.

[6]FISCHER-KOWALSKI M. Society's Metabolism, the Intellectual History of Materials Flow Analysis, Part I: 1860 – 1970 [J]. Journal of Industrial Ecology, 1998, 2(1): 61 – 78.

[7]HUANG He-ping. Material Flow Analysis (MFA) of an Eco-Economic System: A Case Study of Wujin District, Changzhou, China [J]. Frontiers of Biology in China, 2008, 3(3): 1-8.
[8]BATTESE G E, COELLI T J. Frontier Production Functions, Technical Efficiency and Panel Data: With Application to Paddy Farmers in India [J]. Journal of Productivity Analysis, 1992, 3: 153-169.
[9]KANEKO S, TANAKA K, TOYOTA T. Water Efficiency of Agricultural Production in China: Regional Comparison from 1999 to 2002 [J]. International Journal of Agricultural Resources, Governance and Ecology, 2004, 3(3): 231-251.
[10]KOPP R J. The Measurement of Productive Efficiency: Reconsideration [J]. Quarterly Journal of Economics, 1981, 96(3): 44-60.
[11]王学渊,赵连阁.中国农业用水效率及影响因素——基于1997—2006年省区面板数据的SFA分析[J].农业经济问题, 2008,(3):10-18.
[12]张雄化.水资源利用效率与虚拟水国际贸易关系分析——基于粮食安全的视角[J].云南社会科学,2015,(1):66-70.
[13]CHARNES A,COOPER W W, RHODES E. Measuring the Efficiency of Decision Making Units[J]. European Journal of Operational Research,1978,2(6):429-444.
[14]TONE K. A Slacks-Based Measure of Efficiency in Data Envelopment Analysis [J]. European Journal of Operational Research, 2001, 130(3): 498-509.
[15]ALI M K, KLEIN K K. Water Use Efficiency and Productivity of The Irrigation Districts in Southern Alberta [J]. Water Resource Management, 2014, 28(10): 2751-2766.
[16]SUN Cai-zhi. Water Resource Utilization Efficiency and Spatial Spillover Effects in China [J]. Journal Geography Science, 2014, 24(5): 771-778.
[17]KHATER A, KITAMURA Y. Quantitative Analysis of Reusing Agricultural Water to Compensate for Water Supply Deficiencies in The Nile Delta Irrigation Network [J]. Paddy and Water Environment, 2015, 13(4): 367-378.

Empirical Research on the Efficiency, Spatial Spillover and Impact Factors of Irrigation Water

ZHANG Xiong-hua, ZHONG Ruo-yu
(*Center for China SEZ Research, Shenzhen University, Shenzhen* 518060, *China*)

Abstract: The subdivided efficiency such as water productivity, irrigation water technical efficiency and water resource total factor efficiency were comprehensively studied in food production while maintaining food security. Meanwhile, the spillover effect of the subdivided efficiency was tested by Moran's I index and the impact factors of the subdivided efficiency were analyzed using the Panel Data model. The results showed: Firstly, water productivity efficiency improved steadily, water technical efficiency increased smoothly, for the total facter efficiency, economic efficiency was better than eco-efficiency and environmental efficiency. Secondly, considering the subdivided efficiency, there were big gaps between different areas. However, there was no obvious spatial spillover effect of water efficiency. Thirdly, water efficiency was significantly positively correlated with per capita water consumption, but significantly negatively correlated with agricultural water consumption. Finally in order to maintain food security we propose that water resources need intensive and integrated management, efficiency spillover needs system innovation especially in those lower efficiency areas, and the factors affecting water efficiency should be better monitored.

Key Words: irrigation water; water resource efficiency; spatial spillover efficiency; food security