

doi: 10.7621/cjarrp.1005-9121.20210110

• 农业生态 •

基于灰水足迹的粮食主产区农业环境效率 与水环境可持续性测度与评估*

付永虎^{1,2}, 刘铁¹, 刘俊青^{1,3*}, 胡晗¹, 魏范青¹

(1. 江苏海洋大学法律与公共管理学院, 连云港 222005; 2. 香港中文大学地理与资源管理学系, 香港 999077;
3. 湘潭大学公共管理学院, 湖南湘潭 411105)

摘要 [目的] 为实现粮食主产区农业水环境的可持续发展。[方法] 文章应用灰水足迹理论, 选取我国粮食主产区洞庭湖区34个县(市)为案例研究区, 采用非期望产出的SBM窗式分析模型, 系统解析农业环境效率的时空演变特征。通过构建农业资源节约与灰水足迹减排潜力、缩减规模和水环境压力降低潜势模型, 进行农业环境效率与水环境可持续性测度与评估研究。[结果] (1) 1994—2014年水环境污染约束条件下洞庭湖区农业环境效率相对较低, 总体呈波动增长的态势; 21年来灰水足迹具有较高的减排潜力。(2) 洞庭湖区农业环境效率分布呈较大的空间差异特征, 高效率区主要集中于环洞庭湖区与远离湖区的南部地区; 农业环境效率相对有效的地区呈逐渐增加的态势, 且分布趋于均衡。(3) 湘阴县与华容县农业生产的灰水足迹减排潜力较高; 湘阴县灰水足迹具有较高的潜在缩减规模和水环境压力降低潜势, 应成为农业面源污染的重点防控区域。[结论] 通过农业结构优化、测土配方施肥等多途径与措施, 减少灰水足迹排放, 以缓解当地水环境压力。研究成果可为粮食主产区水环境调控与农业可持续发展提供理论与方法依据。

关键词 灰水足迹 农业环境效率 SBM窗式分析 水环境压力降低潜势 洞庭湖区

中图分类号: F301.2, X82 **文献标识码**: A **文章编号**: 1005-9121[2021]01-0077-11

0 引言

农业是人类赖以生存和发展的基础, 是人类文明得以维持的先决条件。农业生产在保障人类粮食安全的同时, 也与资源和生态安全休戚相关, 其环境效率状况不仅直接影响到农村人居环境质量, 同时也直接决定农业生产对资源的消耗水平和耕地保护政策的绩效。自改革开放40年来, 随着我国农业集约化、规模化的逐步推进, 农业生产取得巨大成就, 农产品产量显著提高。然而, 在取得巨大成就的同时, 集约化农业生产所带来的环境污染问题特别是水环境问题日益严重。农业生产导致的水体污染已成为影响区域水环境质量的关键因素^[1]。因此, 探讨水环境约束下如何提高农业环境效率已成为当前农业可持续发展领域的重要研究课题。

目前有关农业环境效率的研究, 主要集中于环境效率评估^[2-3]与影响因素分析^[4-6]、环境规制^[7-8]与减排潜力^[9-11]等方面。如Marthin等以澳大利亚农业部门为例, 在可持续发展背景下进行农业生产力、土壤侵蚀对环境的影响研究, 研究指出考虑环境因素的生产率研究是可持续发展研究中重要的生产率测度方法^[12]。Falavigna等以意大利农业生产为例, 通过研究意大利农业环境效率和全要素生产率得出环境政策薄弱条件下应采用强处置性方向距离函数进行效率测度^[13]。针对研究方法而言, 目前主要采用随机前沿分析(Sto-

收稿日期: 2019-05-07

作者简介: 付永虎(1982—), 男, 山东兖州人, 博士、副教授。研究方向: 土地资源可持续利用研究

※通讯作者: 刘俊青(1984—), 女, 山东昌乐人, 讲师。研究方向: 农业资源与环境研究。Email: pinle533@163.com

* 资助项目: 江苏高校哲学社会科学研究基金项目“环境约束下江苏城市土地利用结构评价及其优化路径研究”(2018SJA1694); 江苏海洋大学科研基金资助项目“基于物质流设计理论的高集约化农区可持续土地利用模式研究”(S2016005)

chastic Frontier Analysis, SFA)^[14-15]与数据包络分析(Data Envelopment Analysis, DEA)^[16-17] 2 种。如 Reinhard 等以荷兰奶牛牧场为例, 采用 SFA 方法, 将氮、磷等排放量纳入环境效率分析模型, 测算集约化牧场与普通牧场的环境效率^[14]。宋勇祥等从区域尺度, 将 DEA 与 Malmquist 指数相结合, 进行我国 30 个省区生态效率空间特征研究。结果表明, 在考虑环境污染物输出和资源消耗约束下, 中国东部地区生态效率高于西部^[18]。Tone 提出了基于投入、产出松弛变量的效率评价模型 (Slack-Based Measure, SBM), 此后他进一步提出了 SBM 拓展模型^[19], 不仅解决了投入和产出松弛的问题, 同时解决了非期望产出存在下的环境效率评价问题, 已成为效率研究方法的主流工具^[20-22]。如王宝义等基于 1996—2015 年我国 31 个省 (市、区) 面板数据, 采用非期望产出的 SBM 模型测度了我国农业生态效率的省际差异和影响因素^[23]。

作为当前生态经济学和可持续发展研究领域的热点和前沿课题, 灰水足迹 (Grey Water Footprint, GWF) 理论的提出, 为评估农业生产对水环境的影响提供了新的理念和途径^[24]。灰水足迹是指以自然本底浓度和现有的环境水质标准为基准, 将一定的污染物负荷吸收同化所需的淡水体积^[25]。灰水足迹从稀释水量的角度评价水污染的总体程度, 直观地反映了粮食生产导致的养分流失对区域水环境的负面影响^[26]。将灰水足迹指标纳入非期望产出的 SBM, 可使水环境约束下农业环境效率评估更为精确; 并为缓解地区水环境压力提供科学直观的判断标准^[27]。

洞庭湖区是我国著名的粮食主产区, 素有“鱼米之乡”“洞庭粮仓”之称。近年来, 为保障粮食安全, 高投入高产出的农业生产模式引发的环境污染问题日益严重。已有研究表明, 影响洞庭湖水质的主要污染物来源于氮、磷排放, 农业生产对区域总氮排放的贡献率达 70%, 已成为当前洞庭湖总氮超标的首要原因^[28]。鉴于此, 文章选取洞庭湖区 34 个县 (市) 作为案例研究区, 将灰水足迹理论与 SBM-Undesirable 模型的窗式分析方法相结合, 进行农业环境效率与水环境可持续测度与评估研究, 以期对洞庭湖区面源污染控制提供参考。

1 研究方法 with 数据来源

1.1 研究区概况

洞庭湖区位于湖南省北部、长江中游荆江南岸, 处在东南季风与西南季风交错地带, 总流域面积为 25.72 万 km²。境内雨水充沛, 河网密集, 年平均降雨量 1 200~1 450 mm, 是我国重要的淡水资源储备基地。洞庭湖区承担着长江流域生态安全与国家粮食安全的重大责任。辖区耕地面积比重高, 是我国重要的粮食生产基地, 其主产粮食作物有水稻、玉米等。

1.2 指标体系

将灰水足迹指标纳入非期望产出的 SBM 分析模型, 可使水环境约束下农业环境效率评估更为精确; 并为缓解地区水环境压力提供科学直观地判断标准。该文选取影响农业生产的关键投入和产出指标, 依据付永虎等相关的研究成果^[26-27], 构建水环境约束条件下粮食主产区农业环境效率指标体系 (表 1)。数据采集 1994—2014 年洞庭湖区 34 个县 (市) 行政辖区的农业生产数据。投入指标选取劳动力、地膜、机械化程度与化肥 4 个二级指标。期望产出指标为种植业产值 (以 1994 年不



图1 研究区位置

变价折算), 非期望产出指标为农业面源污染灰水足迹。

表 1 水环境约束条件下农业环境效率评价指标体系

一级指标	二级指标	变量	数据来源或公式
投入	劳动力	劳动力投入总量(万人)	农林牧渔从业人员×种植业产值占农林牧渔总产值比重
	地膜	地膜使用总量(t)	《湖南省统计年鉴》(1994—2014年)、湖南省农村统计年鉴(1994—2014年)和各地市级统计年鉴(1994—2014年)
	机械化程度	农用机械总动力投入(kW)	
	化肥	化肥折纯量(t)	
产出	期望产出	种植业产值(万元)(以 1994 年不变价折算)	
	非期望产出	面源污染灰水足迹(m ³)	$GWF = \frac{\alpha \times Appl}{C_{\max} - C_{nat}}$ GWF*: 面源污染的灰水足迹; α : 淋溶、径流损失率; Appl: 化肥折纯量; $C_{\max}$: 环境允许的最大浓度; C_{nat} : 污染物的自然本底浓度

注: *针对 GWF 的取值问题, 该研究参考了付永虎等人的研究成果; α : 依据李高明在洞庭湖区 5 个试验点的平均值计算, 洞庭湖区的氮肥流失率占常规施肥量的 7.49% ~ 22.50%, 稻田平均流失率为 9.37%, 旱地流失率为 19.77%, 具体县域尺度总流失率的计算根据水稻播种面积与旱地粮食播种面积的比值确定^[26]。 $C_{\max}$ 采用 EPA 标准取值为 0.01g/L^[29]; C_{nat} : 取值一般为 0^[25]

1.3 SBM-Undesirable 模型的窗式分析方法

假设生产系统中有 n 个决策单元(DMU, Decision Making Units), DMU_j , $j \in (1, 2, \dots, n)$, 每个决策单元均有 m 种投入, $i \in (1, 2, \dots, m)$, S_1 为期望产出, S_2 为非期望产出, 向量表示为: $X \in R_m$, $Y^e \in R_{s_1}$, $Y^b \in R_{s_2}$, 定义矩阵 $X = [x_1, x_2, \dots, x_n] \in R_{m \times n}$, $Y^e = [y_1^e, \dots, y_n^e] \in R^{s_1 \times n}$, $Y^b = [y_1^b, \dots, y_n^b] \in R^{s_2 \times n}$, 其中 $X_i > 0$, $Y_i^e > 0$, $Y_i^b > 0$ 。设 $p = \{x \geq X\lambda, y^e \leq Y\lambda, y^b \geq Y\lambda, \lambda \geq 0\}$, p 为生产可能性集合, 即为第 n 中投入要素所产生的期望产出和非期望产出的所有组合。

根据 Tone 定义, 构建 SBM 模型为:

$$\rho^* = \frac{1 - \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \frac{S_i^-}{X_{i0}}}{1 + \frac{1}{S_1 + S_2} \left(\sum_{r=1}^{S_1} \frac{S_r^e}{y_{r0}^e} + \sum_{r=1}^{S_2} \frac{S_r^b}{y_{r0}^b} \right)} \quad (1)$$

$$s.t. \ x_0 = X\lambda + s^-, \sum_{j=1}^j s_j = Y^e \lambda - s^e, \sum_{j=1}^j s_j = Y^b \lambda + s^b$$

$$s^- \geq 0, s^e \geq 0, s^b \geq 0, \lambda \geq 0$$

式 (1) 中, ρ^* 为待计算的农业环境效率值; m 、 s_1 和 s_2 分别为投入、期望产出和非期望产出的个数; $s = (s^-, s^e, s^b)$ 为投入、期望产出和非期望产出的松弛量; x 、 y^e 和 y^b 为投入、期望产出和非期望产出, λ 为权重向量, $\lambda \in R^n$, $\lambda \geq 0$ 表示规模报酬可变 (Variable Return to Scale, VRS); 模型中 “0” 为被评价单元, X , Y^e 和 Y^b 分别为投入、期望产出和非期望产出构成的矩阵。目标函数 ρ^* 关于 s^- , s^e , s^b 严格单调递减, 且 $0 < \rho^* \leq 1$ 。对于特定的被评价单元, 当且仅当 $\rho^* = 1$ 时, 即 $s^- = 0$, $s^e = 0$, $s^b = 0$ 时, 决策单元 (Decision Making Unit, DMU) 完全有效。若 $\rho^* < 1$, 说明决策单元存在效率损失, 可以通过优化投入量、期望产出与非期望产出来改善效率。

窗式分析是以特定时间段作为窗口宽度构建生产前沿面, 随时间移动过程中窗口新数据与旧数据交替进出, 有效规避了生产前沿面不连续和跨期分析过程中生产前沿面相同的问题。假设有 T 个时期 ($t = 1, \dots, T$), 若窗口的宽度为 d ($d \leq t$) 则窗口数量为 $n = (t - d + 1)$, 基于已有研究, 该文将窗口宽度设为 $d = 3$ ^[30]。

1.4 农业资源节约与灰水足迹减排潜力模型、缩减规模模型

根据 SBM 模型中的松弛变量, 构建农业资源节约与灰水足迹减排潜力 EJQ_j 及缩减规模 SIP_j 模型, 用

以综合评估环境效率的改善途径。计算公式为：

$$EJQ_j = \frac{S_j}{AP_j} \quad (2)$$

$$SIP_j = \frac{S_j}{\sum_{j=1}^j S_j} \quad (3)$$

式(2)中, EJQ_j 代表第 j 个DMU的某一投入指标节约潜力或灰水足迹的减排潜力, S_j 代表第 j 个DMU的资源要素投入或非期望产出的松弛变量, AP_j 代表第 j 个DMU的实际投入或产出量。 EJQ_j 代表DMU某一指标投入冗余或非期望产出冗余的松弛变量与实际投入或产出量的比值, 反映了农业生产过程中某一投入指标或非期望产出指标的节约或减排的改善空间。式(3)中, SIP_j 代表第 j 个DMU的某一投入指标或非期望产出的缩减规模, 是第 j 个DMU的某一指标投入冗余或非期望产出冗余的松弛变量与该指标所有DMU投入冗余或非期望产出冗余的松弛变量总和的比值, 反映了农业生产某一投入指标或者非期望产出指标对研究区该指标节约或减排的潜在规模的贡献和影响程度。 S_j 代表第 j 个DMU的投入或非期望产出的松弛变量, 代表该指标所有DMU的松弛变量总和。

1.5 水环境压力降低潜力

水环境压力(Water Environmental Pressure, WEP)是指区域农业生产过程所排放的灰水足迹与可容纳污染物径流量的比值^[26], 可用于评估农业生产对当地水环境的影响程度。该文为进一步探究农业面源污染减排对当地水环境压力的实际影响, 依据SBM模型中的灰水足迹松弛变量, 构建水环境压力降低潜势指标。水环境压力降低潜势是指农业生产的灰水足迹减排量(灰水足迹松弛变量)与当地地表多年平均径流量的比值。计算公式为:

$$P_{WEPj} = \frac{S_{GWFj}}{R_{actk}} \quad (4)$$

式(4)中, P_{WEPj} 代表第 j 个DMU水环境压力减排潜力, 无量纲; S_{GWFj} 为 j 个DMU的SBM模型中灰水足迹松弛变量, m^3 ; R_{actk} 为第 k 个县(市)多年平均实际径流量, m^3 。其中多年平均径流量数据来源于《湖南省水资源公报》(2013—2016年)及各地级市水资源公报, 部分县(市、区)缺少多年平均径流量数据, 通过《湖南省水资源公报》(2013—2016年)和各县(市、区)集水面积进行估算^[26]。

2 结果分析

该文应用SBM-Undesirable模型的窗式分析方法, 基于规模报酬可变(报酬可变, 简称VRS)假设, 计算洞庭湖区农业环境效率与投入、非期望值产出(灰水足迹)的松弛量, 并结合式(2)与式(3)求出各项指标降低潜力与缩减规模。

2.1 年际变化

2.1.1 洞庭湖区农业环境效率的年际变化

除1996年外, 1994—2014年环境效率呈波动增长的趋势。1994—2014年效率值在0.49~0.76, 21年间平均效率值为0.61, 这意味着如果把当前生产潜力全部发挥出来, 可使农业环境效率值提升39%。1994—2000年洞庭湖区遭受了3次特大洪涝灾害, 湖区受灾面积较大, 农产品产量下降; 农民从事农业生产的积极性不高, 耕地撂荒现象普遍, 农作物播种面积萎缩, 进而导致了农业环境效率低下, 7年间年均农业环境效率仅为0.58。2000年湖南省农业工作以实施十二大农业工程为轴心, 推进全省农业产业结构的调整和优化, 实施以农业新技术革命为重点的科技兴农战略, 农业环境效率逐步提高。2005年以来湖南省先后实行全面取消农业税、制定促进农业生产的八条政策等措施, 极大减轻了农民负担, 提高了农民的农业生产积极性, 农业环境效率呈波动增长的态势。

2.1.2 洞庭湖区农业资源节约与灰水足迹减排潜力的年际变化

1994—2014年劳动力、化肥、农业机械动力与地膜节约潜力呈波动变化,无明显趋势,21年均值分别为0.239、0.449、0.235和0.289(图2)。21年间灰水足迹减排潜力在0.350~0.614波动,其21年均值为0.456。农业生产面临的环境风险降低潜势较大。2006年以来湖南省推行测土配方施肥,普及科学的水肥运筹与调控技术,使得各投入项节约潜力与GWF减排潜力均有不同程度的下降。

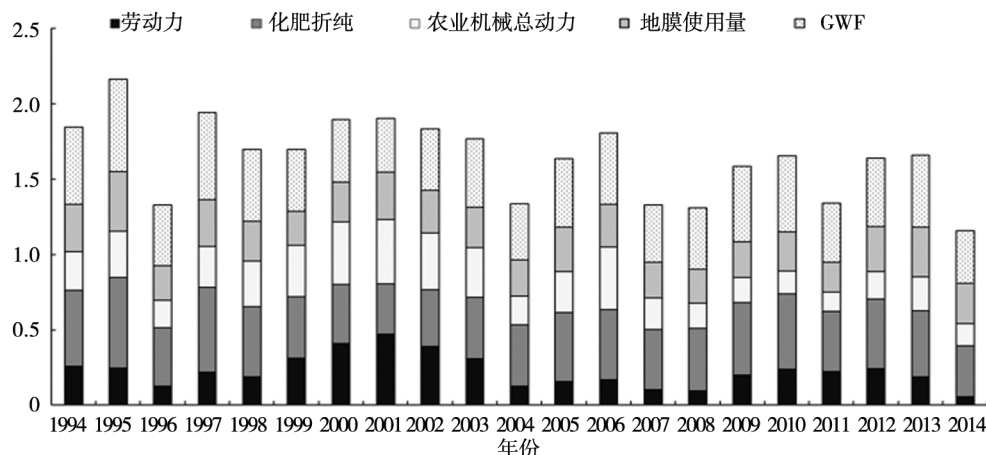


图2 1994—2014年洞庭湖区农业资源节约潜力与GWF减排潜力的年际变化

2.2 空间分析

2.2.1 农业环境效率的空间分布

参照以往研究,依次将各县(市)化分为低效率区(0, 0.6],较低效率区(0.6, 0.7],中等效率区(0.7, 0.8],较高效率区(0.8, 0.9],高效率区(0.9, 1]^[27](图3)。总体上,洞庭湖区34县(市)以农业环境低效率为主,低效率的DMU数量为17个,占总数的50%,农业环境效率提升潜力巨大。高效率区主要分布于环洞庭湖区的南县、安乡县、津市市,北部的临湘市以及南部的韶山市和茶陵县,占DMU总数的17.65%。中等效率区的DMU数量最少,中等效率区个数占DMU总数的6%以下,仅澧县和株洲市辖区属于中等效率区。

2.2.2 农业资源节约潜力与灰水足迹减排潜力的空间分布

总体上洞庭湖区34县(市)农业资源节约潜力与GWF减排潜力较高(图4)。投入项与GWF降低潜力较低的DMU个数为5个,仅占总数的14.71%,分别位于环湖区的安乡县、南县,洞庭湖北部的临湘市与南部的韶山市、炎陵县。投入项中位于洞庭湖西部且远离洞庭湖的安化县劳动力与农业机械总动力的节约潜力较其他县(市)最高,该县劳动力投入过剩,农业生产基础设施较为薄弱。位于洞庭湖东部的平江县地膜节约潜力最高,当地地膜投入量过大且使用方式不当导致地膜利用效率低下。非期望产出中,位于洞庭湖南部的湘阴县GWF减排潜力最高,达92.19%,该

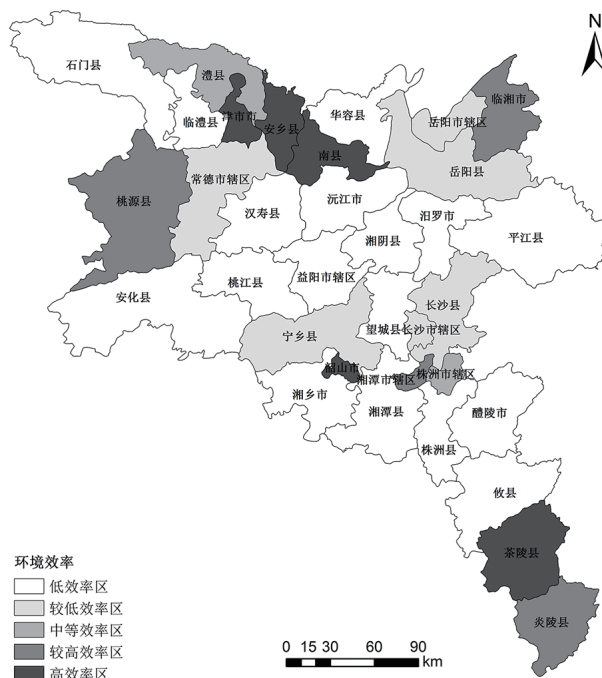


图3 1994—2014年洞庭湖区农业环境效率年均值的空间分布

县农业化肥有效利用率低下, 导致氮肥流失严重, 区域水环境质量具有较大的改善空间。

2.2.3 空间演变特征

为进一步探究洞庭湖区农业环境效率、资源节约潜力与GWF减排潜力的空间演变特征, 该文选取1994年、2000年、2007年和2014年34县(市)的截面数据, 依据式(2)得到各县(市)4期空间分布图(图5)。1994年洞庭湖区农业环境效率值以低效率为主, 低效率的DMU数量为22个, 占全区总数的64.71%。安化县、湘潭县、湘乡市、益阳市辖区的劳动力、农业机械总动力与地膜节约潜力皆较高, 农业产业结构相对不合理。湘阴县、望城县GWF减排潜力较高, 化肥养分利用率低, 化肥无效投入较为严重。高效率县(市)占了总数的26.47%, 主要分布在远离洞庭湖的东北与东南区域。2000年洞庭湖区低效率的DMU占61.76%, 整体较于1994年并无太大变化, 其中汨罗市农业环境效率值较1994年下降66%, 投入项中化肥与农业机械总动力的节约潜力分别提高76.06%和74.59%, 当地农业生产投入过于粗放, 资源有效利用率较低。位于环湖区的南县、安乡县、津门市、澧县上升至农业环境高效率区, 占了高效率DMU总数的50%。2006年湖南省推进测土配方施肥技术, 农业化肥有效利用率得到显著提高, 2007年洞庭湖区化肥节约潜力较于2000年下降16%, 农业环境效率值增长21.8%, 低效率的DMU数量较2000年下降32.84%, 岳阳市辖区和平江县的地膜节约潜力较高, 分别为109.22%和103.84%, 当地农业生产过程中地膜无效投入较为严重。高效率的DMU数量相比2000年增长49.98%, 长沙市辖区农业环境效率值较于2000年增长67%, 投入项中化肥节约潜力下降最为显著, 达66.68%, 可见当地有效改进了农业施肥方式, 提高了化肥使用效率。2014年洞庭湖区农业环境效率值达到0.72, 为4年中环境效率值最高的年份。低效率的DMU数量仅占总数35.29%, 均位于远离洞庭湖区域, 高效率的DMU较2007年增长25%, 并占湖区总DMU的44.12%, 其中高效率的DMU中有73.33%实现环境效率完全有效, 且投入项与GWF减排潜力皆为0。

综合4期数据来看, 洞庭湖区34县(市)农业环境效率值呈缓慢增长的态势, 低效率的DMU逐渐减少, 且分布离洞庭湖较远。高效率的DMU逐渐增多, 并分布趋于均衡。投入项中化肥与劳动力节约潜力下降明显, 分别下降36.07%和59.87%, 农业化肥施用有显著改善, 劳动力资源得到合理配置。安乡县、津门市、南县、韶山市和湘潭市辖区4期平均农业环境效率值均达到完全有效, 当地农业资源投入较为合理有效, 农业GWF排放得到较好控制。而位于环湖区的湘阴县与华容县的农业环境效率值仅为0.35, 湘阴县是“长株潭”地区沿湘江、过洞庭湖、经长江出海的必经通道, 其水环境质量对于长江及其支流湘江的生态安全至关重要。华容县则为我国重要的农产品生产基地, 农产品和农业生产总值均进入全国“百强县”行列, 然而该县农业集约化生产导致的环境效率低下, 农业环境污染严重, 农业生产方式转型迫在眉睫。根据2县4期非期望产出减排潜力来看, 湘阴县和华容县的GWF减排潜力较高, 分别为92%和73%, 2县面临着化肥投入量过高, 化肥利用效率低下和农业面源污染严重等问题。加强水环境保护与农业面源污染控制应成为两县农业、环保等部门工作的重点方向。

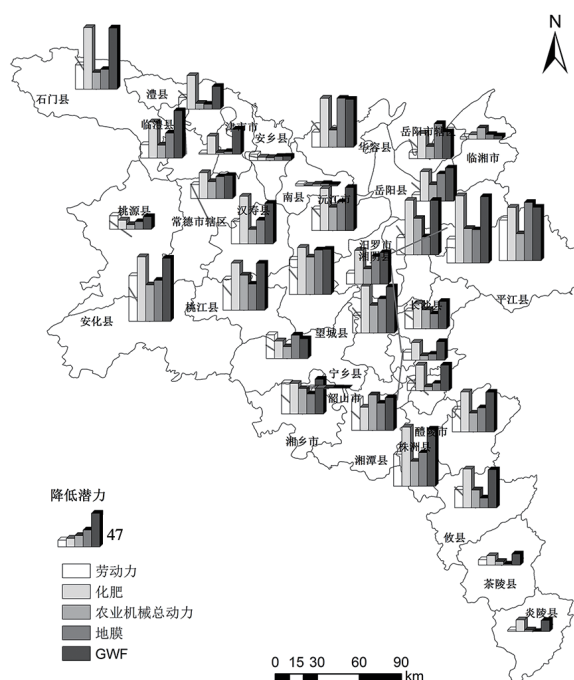


图4 洞庭湖区农业生产资源节约与GWF减排潜力的空间分布



图5 洞庭湖区农业环境效率与降低潜力的空间演变

2.2.4 农业资源与GWF缩减规模的空间分析

化肥与灰水足迹缩减规模较大的地区主要位于环湖区以及洞庭湖北部和西部地区,如安化县、湘阴县以及石门县,位于环湖区的华容县和洞庭湖东部地区的平江县地膜缩减规模较高(图6)。湘阴县的化肥与灰水足迹缩减规模最高,分别占缩减总量的24.96%与24.86%,湘阴县对洞庭湖区化肥节约与灰水足迹减排的贡献最大。湘阴县种植业涵盖了多种粮食作物、经济作物与水生经济作物,化肥施用量较高,农业灰水足迹排放较大,当地水环境承受着农业生产的巨大压力,应将湘阴县列为面源污染重点防控区;华容县地膜缩减规模对洞庭湖区地膜投入减量具有最大影响,占洞庭湖区地膜缩减总量的27%,地膜无效投入、使用效率低下的现象较为严重,应在当地适时开展可降解地膜实验示范,并将部分大型农场纳入重点试验区。

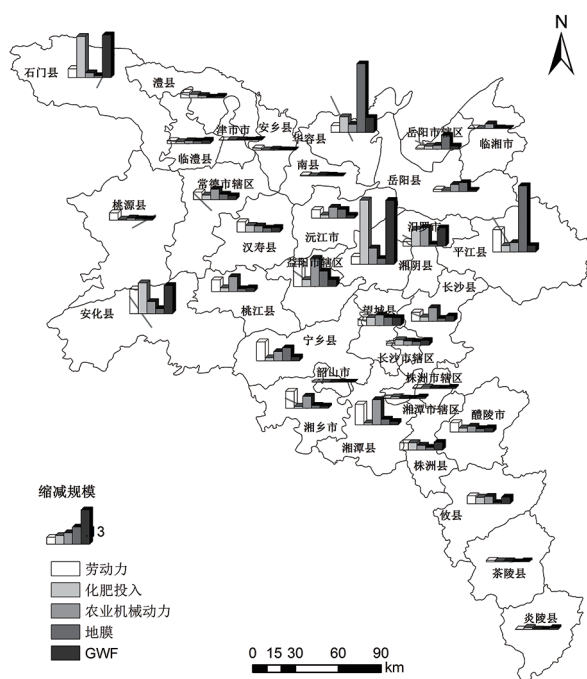


图6 洞庭湖区21年平均缩减规模的空间分布

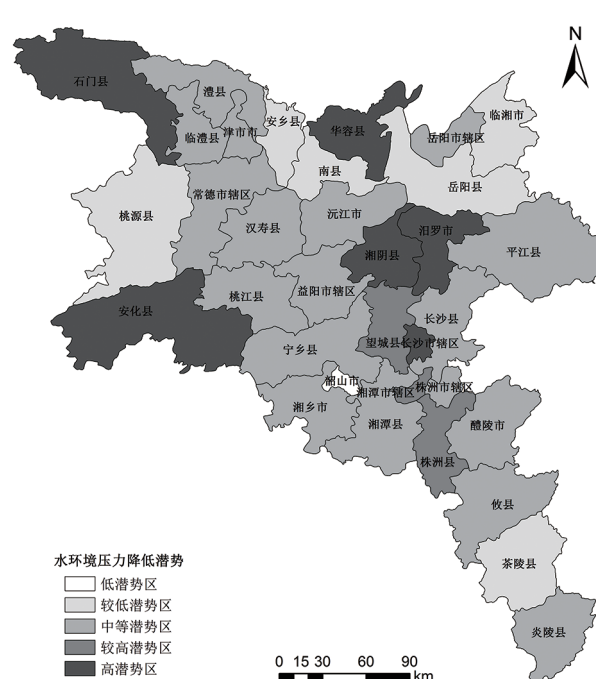


图7 洞庭湖区水环境压力降低潜势的空间分布

2.2.5 水环境压力降低潜势的空间分布

在上述分析的基础上,根据式(4)构建研究区34县(市)农业生产的水环境压力降低潜势。为更直观地分析农业灰水足迹减排潜力对缓解当地水环境压力的影响程度,依据水环境压力降低潜势的平均值加减半个标准差的分类方法,将34县(市)分为低潜势区(0, 0.000 4]、较低潜势区(0.000 4, 0.020 6]、中潜势区(0.020 6, 0.170 6]、较高潜势区(0.170 6, 0.320 6]和高潜势区(0.320 6, 1.616] (图7)。

整体来看农业生产导致的区域水环境压力降低潜势跨度较大。水环境压力高潜势区主要为靠近洞庭湖的湘阴县、汨罗市、华容县和远离洞庭湖的石门县、安化县和长沙市辖区。其中水环境压力减排潜力最高的为湘阴县,达1.616。正如前文所述,湘阴县农业环境效率较低,灰水足迹减排潜力巨大,缩减规模占研究区的24.86%,其水环境质量具有较大改善空间,且其环境效率的提升对于洞庭湖水体质量的改善具有重要意义,是湖区面源污染的重点防控区域。需通过加大农技服务推广,采用脲酶抑制剂、硝化抑制剂,测土配方施肥、精细养分管理,推广有机肥和专用肥等多种途径,降低灰水足迹排放量。采取多种政策措施,促进农户环境友好型技术的推广,以提高农业环境效率,缓解区域水环境压力,降低农业面源污染风险。处于中等潜势区的县(市)数量最多,达18个,占总数的52.94%。该类区域应重点推进高标准农田建设,巩固和提高粮食生产能力,同时注重化肥减量化施用策略的实施,以提高农业环境效率。处于低潜势区与较低潜势区的县(市)数量为6个,占总体的20.59%,该类区域通过降低灰水足迹排放量来缓解水环境压力的实际意义不大,这与该类区域本身的自然条件与农业生产条件等因素有关,该类区域农业环境效率较高,地区农业生产的资源配置较为合理,灰水足迹排放较小,且年均径流量较大使得可稀释污染物的淡水量充足。该类区域应关注农业结构调整,发展生态循环农业,创建农业绿色发展先行区,推进优质粮食工程,促进农业转型升级。

3 讨论

自党的十九大以来,在全面实施乡村振兴战略背景下,2019年1月中共中央发布了《国务院关于坚持

农业农村优先发展做好“三农”工作的若干意见》(中央一号文件),明确提出了发挥粮食主产区优势,保障重要农产品的有效供给。同时,加大农业面源污染治理力度,开展农业节肥行动,实现化肥农药使用量负增长,推进农村水环境治理^[31]。提高农业环境效率,控制无效投入和污染物排放意义重大。该文基于灰水足迹理论,选取中国粮食主产区洞庭湖区为案例研究区,采用非期望产出的SBM窗式分析模型进行农业环境效率与水环境可持续性测度与评估研究。研究结果表明,SBM窗式分析方法能很好地克服农业生产中投入产出松弛问题,使得环境效率分析更为准确、客观。同时可依据SBM分析结果中松弛变量,量化农业资源投入与污染物减量态势。此外,将灰水足迹纳入SBM窗式分析模型,可准确量化水环境约束条件下农业环境效率值、资源投入与面源污染降低潜力、缩减规模;通过非期望产出(灰水足迹)的松弛向量与当地多年平均径流量,构建区域水环境压力降低潜势模型,可精准测度研究区水环境压力降低潜势的空间分布特征。研究结果可为控制农业面源污染、提升环境效率提供理论与方法支撑。然而,在现实农业生产过程中,部分投入、期望产出与非期望产出指标之间具有不可分离特性,该文鉴于所获数据有限,未能充分考虑这一点。此外,该文针对农业环境污染仅选择灰水足迹,在今后研究中,可将氮足迹、灰水足迹与生态足迹等环境类足迹相整合,并结合效率分析模型,在充分考虑投入产出相互关系的基础上,综合评估农业投入与非期望产出的降低潜力、缩减规模与压力减排潜力,进而为提高农业环境效率,保障农业可持续发展提供更为全面有效地支撑。

4 结论与建议

农业生产导致的水体面源污染已成为影响区域水环境质量的关键因素,探讨水环境约束下如何提高农业环境效率已成为当前农业可持续发展领域的重要研究课题。作为当前生态经济学和可持续发展研究领域的热点之一,灰水足迹为农业环境效率评价提供全新的定量化指标。该文基于灰水足迹理论,选取中国粮食主产区洞庭湖区为案例研究区,采用非期望产出的SBM窗式分析模型进行农业环境效率与水环境可持续性测度与评估研究。主要结论与建议如下。

(1) 1994—2014年洞庭湖区水环境约束条件下农业环境效率相对较低,总体呈波动增长的态势;年均效率值仅为0.61,这意味着如果把当前生产潜力全部发挥出来,可使农业环境效率值提升39%。1994—2014年劳动力、化肥、农业机械动力与地膜节约潜力呈波动变化,无明显趋势;其中灰水足迹减排潜力较高,年均值为0.456,灰水足迹的排放具有较大的改善空间。减少灰水足迹排放应成为洞庭区农业环境治理的首要问题。通过构建灰水足迹调控的理论、技术与政策体系,采取多尺度、一系列的途径和措施实现。例如,区域实施肥料投入总量控制,修正不合理的农业投入行为和生产管理方式,降低肥料流失率,从源头上减少灰水足迹。

(2) 洞庭湖区34县(市)以农业环境低效率为主,低效率的DMU数量占总数的50%,农业环境效率提升潜力巨大。从空间分布看,洞庭湖区农业环境效率分布呈较大的空间差异特征,高效率区主要集中于环洞庭湖区及南部地区。洞庭湖区34县(市)农业资源节约潜力与GWF减排潜力较高,其中位于洞庭湖南部的湘阴县GWF减排潜力最高,达92.19%,该县农业化肥有效利用率低下,导致氮肥流失严重,区域水环境质量具有较大的改善空间。通过增加技术投入,大力推广测土配方施肥技术、优化和平衡施肥、研制和推广新型肥料等途径提高肥料利用率;优化农业资源配置、产业结构空间布局,促进肥料的循环利用,提高农业环境效率。从演化趋势上看,洞庭湖区34县(市)农业环境效率值呈缓慢增长的态势,低效率的DMU逐渐减少,且分布离洞庭湖较远;高效率的DMU逐渐增多,并分布趋于均衡。

(3) 洞庭湖区34县(市)化肥与灰水足迹缩减规模较大的地区主要位于环湖区以及洞庭湖北部和西部地区。湘阴县具有最高的化肥与灰水足迹缩减规模,对洞庭湖区化肥节约与灰水足迹减排的贡献最大;华容县地膜缩减规模对洞庭湖区地膜投入减量具有最大影响。

(4) 洞庭湖区34县(市)农业生产导致的区域水环境压力降低潜势跨度较大,52.94%的县(市)处

于水环境压力中等潜势区。处于低潜势区与较低潜势区的县(市)数量为6个,通过降低灰水足迹排放量来缓解水环境压力的实际意义不大。水环境压力高潜势区主要为靠近洞庭湖的湘阴县、汨罗市、华容县和远离洞庭湖的石门县、安化县和长沙市辖区等。其中水环境压力减排潜力最高的为湘阴县,达1.616,水环境压力可通过降低灰水足迹排放量得到有效地改善。该县可从生态工程设计的角度,设置生态缓冲带与隔离沟等措施,以有效降低灰水足迹对环境的负面影响。

参考文献

- [1] 麻德明,石洪华,丰爱平.基于流域单元的海湾农业非点源污染负荷估算——以莱州湾为例.生态学报,2014,8(1):173-181.
- [2] 王宝义,张卫国.中国农业生态效率测度及时空差异研究.中国人口·资源与环境,2016,26(6):11-19.
- [3] 王迪,王明新,钱中平,等.基于超效率SBM和BRT的农业生态文明建设效率分析.中国农业资源与区划,2017,38(11):94-101.
- [4] 韩海彬.中国农业环境技术效率及其影响因素分析.经济与管理研究,2013(9):61-68.
- [5] 田旭,王善高.中国粮食生产环境效率及其影响因素分析.资源科学,2016,38(11):2106-2116.
- [6] 刘渝,宋阳.基于超效率SBM的中国农业水资源环境效率评价及影响因素分析.中国农村水利水电,2019(1):22-24.
- [7] 李谷成,范丽霞,闵锐.资源、环境与农业发展的协调性——基于环境规制的省级农业环境效率排名.数量经济技术经济研究,2011,28(10):21-36.
- [8] 陈红,关博,孙文娇.我国粮食主产区不同环境规制下农业生产效率研究.商业研究,2017(3):45-46.
- [9] 杨志海,王亚鹏.中国农业环境技术效率与污染减排成本分析.统计与信息论坛,2015,30(7):71-76.
- [10] 李南洁,肖新成,曹国勇,等.面源污染下三峡库区农业生态环境效率及影子价格测算.农业工程学报,2017,33(11):211-218.
- [11] 朱宁,曹博,秦富.基于化肥削减潜力及碳减排的小麦生产效率.中国环境科学,2018,38(2):34-35.
- [12] Marthin N, Iain F, Ali Q, et al. Environmentally adjusted productivity measurement: An Australian case study. Journal of Environmental Management, 2007, 85(2): 350-362.
- [13] Falavigna G, Manello A, Pavone S. Environmental efficiency, productivity and public funds: The case of the Italian agricultural industry. Agricultural Systems, 2013, 121(4): 73-80.
- [14] Reinhard S, Lovell C K, Thijssen G. Econometric estimation of technical and environmental efficiency: An application to Dutch dairy farms. American Journal of Agricultural Economics, 1999, 81(1): 44-60.
- [15] 全炯振.中国农业全要素生产率增长的实证分析:1978—2007年——基于随机前沿分析(SFA)方法.中国农村经济,2009(9):36-47.
- [16] 匡兵,卢新海,韩琛,等.考虑碳排放的粮食主产区耕地利用效率区域差异与变化.农业工程学报,2018,34(11):9-16.
- [17] 侯孟阳,姚顺波.1978—2016年中国农业生态效率时空演变及趋势预测.地理学报,2018,73(11):120-135.
- [18] 宋勇祥,姜圣华,姜玮,等.基于DEA-Malmquist指数的中国区域生态效率研究.资源开发与市场,2015,31(2):172-174.
- [19] Tone K. Dealing with undesirable outputs in DEA: Aslacks-based measure (SBM) approach//Tokyo: The Operations Research Society of Japan, 2004.
- [20] 潘丹,应瑞瑶.中国农业生态效率评价方法与实证——基于非期望产出的SBM模型分析.生态学报,2013,33(12):3837-3845.
- [21] 杨清可,段学军,叶磊,等.基于SBM-Undesirable模型的城市土地利用效率评价——以长三角地区16城市为例.资源科学,2014,36(4):712-721.
- [22] 王雪莹,方兰.基于非期望产出的农业环境效率研究——以陕西省为例.环境与发展,2018,30(7):15-18,21.
- [23] 王宝义,张卫国.中国农业生态效率的省际差异和影响因素——基于1996—2015年31个省份的面板数据分析.中国农村经济,2018(1):46-62.
- [24] Hoekstra A Y, Chapagain A K. Globalization of water: Sharing the planet's freshwater resources. Oxford: Blackwell Publishing, 2008.
- [25] Hoekstra A Y, Chapagain A K, Aldaya M M, et al. The water footprint assessment manual: Setting the global standard. London, U K: Earthscan, 2011.
- [26] 付永虎,刘黎明,起晓星,等.基于灰水足迹的洞庭湖区粮食生产环境效应评价.农业工程学报,2015,31(10):152-160.
- [27] 付永虎,刘黎明,王加升,等.高集约化农区投入减量化与环境风险降低潜势的时空分异特征.农业工程学报,2017,33(2):266-275.
- [28] 秦迪岚,罗岳平,黄哲,等.洞庭湖水环境污染状况与来源分析.环境科学与技术,2012,35(8):199-204.
- [29] EPA. List of drinking water contaminants: Ground water and drinking water. Washington, DC: US Environmental Protection Agency, 2005.
- [30] Halkos G E, Tzeremes N G. Exploring the existence of Kuznets curve in countries' environmental efficiency using DEA window analysis. Ecological Economics, 2009, 68(7): 2168-2176.
- [31] 中共中央,国务院.中共中央、国务院关于坚持农业农村优先发展做好“三农”工作的若干意见.(2019-02-19) [2019-02-25]. www.gov.cn/zhengce/2019-02/19/content_5366917.htm.

MEASUREMENT AND EVALUATION OF AGRICULTURAL ENVIRONMENTAL EFFICIENCY AND ENVIRONMENTAL SUSTAINABILITY FOR WATER IN THE MAJOR GRAIN-PRODUCING AREA BASED ON GREY WATER FOOTPRINT*

Fu Yonghu^{1,2}, Liu Tie¹, Liu Junqing^{1,3*}, Hu Han¹, Wei Fanqing¹

(1. School of Law and Public Administration, Jiangsu Ocean University, Lianyungang 222005, Jiangsu, China;

2. The Chinese University of Hong Kong, Hong Kong 999077, China;

3. School of Public Administration, Xiangtan University, Xiangtan 411105, Hunan, China)

Abstract The non-point source pollution caused by agricultural production has been a key factor affecting the quality of the regional water environment. It is an important research topic to improve the efficiency of agricultural environment under the constraints of water environment in the field of sustainable agricultural development. Under the concept of green development, it is necessary for making quantitative measurement and evaluation for water environment status and resource utilization in major grain-producing area. Based on grey water footprint, this research took 34 major grain-producing counties in Dongting lake area as the research objects, analyzed spatial and temporal evolution characteristics of agricultural environmental efficiency, and evaluated the environmental sustainability based on the panel data of major grain-producing area from 1994–2014, then measured the environmental efficiency of agricultural production by using the Slacks-Based Measure (SBM)–Undesirable window analysis. In addition, the potential models of agricultural resource saving and grey water footprint reduction, scale reduction and water environment pressure reduction were established for analyzing water environment status and resource utilization. The research were showed as follows. (1) Taking Grey water footprint (GWF) as the undesirable output in this SBM model, the environmental efficiency of Dongting lake areas was relatively lower, and the GWF had a higher reduction potential form 1994 to 2014. (2) From the perspective of spatial distribution, the distribution of agricultural environmental efficiency was characterized by large spatial differences. The high environmental efficiency of DMU was mainly located around Dongting lake and far from the lake area. The DMU with environmental efficiency value of 1 was increasing year by year, and the distribution tended to be balance. (3) The grey water footprint reduction potential of agricultural production were higher than other counties in Xiangyin and Huarong. It had a higher potential to reduce scale and water environmental pressure in Xiangyin, it should be the key area for prevention and control of agricultural non-point source pollution. In summary, It should adjust the industrial structure of agriculture, soil testing and formula fertilization way and measures such as reducing emissions and grey water footprint to alleviate the local water environment pressure. The research results can provide theoretical and method basis for water environment regulation and sustainable development of grain producing areas.

Keywords grey water footprint; agricultural environmental efficiency; SBM–Undesirable window analysis; potential of water environmental pressure reduction; Dongting lake area