

基于化肥削减潜力及碳减排的小麦生产效率

朱 宁,曹 博,秦 富* (中国农业科学院农业经济与发展研究所,北京 100081)

摘要: 基于 2004~2015 年中国小麦主产省份的小麦生产投入产出数据,分析了中国小麦生产的化肥削减及碳减排潜力,并利用 SBM 模型和 ML 指数分别测算了小麦生产的环境效率和环境全要素生产率。结果显示:科学施肥条件下,主产省份小麦生产的化肥削减及碳减排潜力分别为 51.66%、37.41%;化肥削减及碳减排条件下,小麦生产环境效率未降低,2004~2015 年间平均的小麦生产环境效率为 0.970,北方地区的小麦生产环境效率要低于南方地区,小麦生产的 MLEFFCH 指数、MLTECH 指数、ML 指数超过了 1,大于化肥未削减、全碳排放条件下的 MLEFFCH 指数、MLTECH 指数、ML 指数,化肥削减及碳减排利于实际生产向最大产出逼近,以达到生产的帕累托最优状态。

关键词: 化肥削减; 碳减排; 小麦; 环境效率; 环境全要素生产率

中图分类号: X32 文献标识码: A 文章编号: 1000-6923(2018)02-0784-08

Research of wheat production efficiency based on fertilizer reduction potential and carbon emission reduction.

ZHU Ning, CAO Bo, QIN Fu* (Institute of Agricultural Economics and Development, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China). *China Environmental Science*, 2018,38(2): 784~791

Abstract: Based on input-output data of wheat in main wheat-producing provinces of China from 2004 to 2015, the potential of chemical fertilizer reduction and carbon emission reduction in wheat production in China was analyzed and the environmental efficiency and environment of wheat production were estimated using SBM model and ML index respectively in this paper. The results showed that: under the condition of scientific fertilization, the potential of reducing chemical fertilizers and reducing carbon emissions from wheat production in major producing provinces were 51.66% and 37.41% respectively. Under the conditions of fertilizer reduction and carbon emission reduction, the efficiency of wheat production environment was not reduced, the average efficiency of wheat production environment was 0.970 from 2004 to 2015, and the efficiency of wheat production environment in the north was lower than that in the south; the MLEFFCH index, MLTECH Index, the ML index of wheat production exceeded 1, which was larger than that of the chemical fertilizers. Fertilizer reduction and carbon reduction should benefit the actual production approaching to the maximum production output, in order to achieve the optimal Pareto production.

Key words: fertilizer reduction; carbon emission reduction; wheat; environmental efficiency; environmental total factor productivity

自 20 世纪 80 年代以来,中国粮食生产的化肥投入量持续增加,已超过粮食产量的增长速度。单位面积施肥水平已经超过了世界平均水平的 2 倍多,约 35%的化肥有效利用率也低于发达国家 65%的水平^[1],造成了资源的浪费。长期过量及元素不平衡施用化肥后,破坏了土壤结构^[2-3],造成地力下降、土壤酸化及粮食生产水平降低等问题^[4],而生产者为保证粮食高产不断增加施肥量,导致化肥过量施用问题愈发严重^[5-7],尤其是碳排放问题^[1]。据测算,粮食作物化肥碳排放量约占农作物生产碳排放总量的 60%,其中,小麦生产要

占 85%以上,而且小麦的化肥及碳排放的削减潜力要大于水稻和玉米^[8-9]。因此,以小麦为例具有代表性,开展粮食种植过程中化肥削减潜力的分析,并以此分析碳减排背景下粮食生产效率,对提升化肥施用效率、实现碳减排以及粮食可持续生产均具有重要意义。

就已有研究来看,学者们利用 DEA(data

收稿日期: 2017-06-23

基金项目: 中国农业科学院科技创新工程资助项目(ASTIP-IAED-2018-04);农业部软科学研究课题(K201719-3)

* 责任作者,教授, qinfu@caas.cn

envelopment analysis)方法或随机前沿生产函数从耕地细碎化、农村劳动力资源变迁、城镇化、贫困等多个角度研究了粮食生产效率^[10-13],但缺乏从环境角度探究粮食生产的环境效率和环境全要素生产率.若从环境角度探究粮食生产效率,就有必要考量粮食生产过程中化肥过量施用问题.中国粮食生产的化肥利用效率较低,影响了粮食生产效率的提升^[14-16],还增加了碳排放^[17-20].有学者研究发现在保障当前粮食产量水平下,采用测土配方施肥,小麦、玉米、水稻主产区的化肥投入可削减 814 万 t/a,并可实现碳减排 1046 万 t/a^[9].可见,中国粮食生产过程中的化肥削减以及碳减排潜力非常大,但削减化肥用量以及减少碳排放后,是否会影响粮食作物的环境效率及环境全要素生产率,未见深入开展相关研究.

本文以小麦为例,采用考虑非期望产出(碳排放)的 SBM 模型(Slack-based Measure)和 ML(Malmquist-Luenberger)指数,利用小麦生产投入产出数据,结合历年小麦生产测土配方施肥标准,测算小麦生产的化肥削减和碳减排潜力,从而对小麦生产的环境效率及环境全要素生产率进行分析,为提出提升化肥利用率、减少碳排放以及提高小麦生产水平的对策建议提供依据.

1 研究方法

生产效率测算过程中引入环境因素,则生产效率包括环境效率和环境全要素生产率,其中,环境效率是决策单元通过最少的资源和能源消耗以及最小的环境影响,生产出最多的产品;环境全要素生产率的实质是计算环境效率的跨期动态增长变化.本文选用 SBM 模型和 ML 指数的组合方法测算基于化肥削减潜力及碳减排的小麦生产效率,SBM 模型用于测算小麦生产的环境效率,ML 指数是在 SBM 模型的基础上测算得到的效率值,用于测算小麦生产的环境全要素生产率.

1.1 SBM 模型

SBM 模型是基于投入、产出松弛变量的环境效率评价模型^[21-22].SBM 模型应用于本研究的优点:一是 SBM 模型可以测算产出最大化条件下碳排放作为非期望产出的小麦生产环境效率;

二是 SBM 模型克服了小麦生产投入产出实际数据与最优数据偏差所造成的结果不理想的问题;三是非径向、非角度的 SBM 模型能够避免小麦投入产出指标由于计量单位的不同,而造成的结果偏差问题^[23].

假设生产过程中有 n 个决策单元,每个决策单元均有 3 个向量,即投入、期望产出和非期望产出,这 3 个向量分别为 $\mathbf{x} \in \mathbf{R}^m$ 、 $\mathbf{y}^g \in \mathbf{R}^{s_1}$ 、 $\mathbf{y}^b \in \mathbf{R}^{s_2}$ ($\mathbf{R}$ 为向量矩阵的替代符号),可定义矩阵 $\mathbf{X}$ 、 $\mathbf{Y}^g$ 、 $\mathbf{Y}^b$ 如下^[24-25]

$$\mathbf{X} = [\mathbf{x}_1, \dots, \mathbf{x}_n] \in \mathbf{R}^{m \times n} > 0 \quad (1)$$

$$\mathbf{Y}^g = [\mathbf{y}_1^g, \dots, \mathbf{y}_n^g] \in \mathbf{R}^{s_1 \times n} > 0 \quad (2)$$

$$\mathbf{Y}^b = [\mathbf{y}_1^b, \dots, \mathbf{y}_n^b] \in \mathbf{R}^{s_2 \times n} > 0 \quad (3)$$

那么生产可能集 P 可定义为:

$$P = \{(\mathbf{x}, \mathbf{y}^g, \mathbf{y}^b) | \mathbf{x} \geq \mathbf{X} \cdot \boldsymbol{\lambda}, \mathbf{y}^g \leq \mathbf{Y}^g \cdot \boldsymbol{\lambda}, \mathbf{y}^b \leq \mathbf{Y}^b \cdot \boldsymbol{\lambda}, \boldsymbol{\lambda} \geq 0\} \quad (4)$$

引入非期望产出的 SBM 模型的分式为

$$\overline{D}_0'(x, y^g, y^b) = \rho = \min \frac{1 - \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \frac{s_i^-}{x_{i0}}}{1 + \frac{1}{s_1 + s_2} \left(\sum_{r=1}^{s_1} \frac{s_r^g}{y_{r0}^g} + \sum_{i=1}^{s_2} \frac{s_i^b}{y_{i0}^b} \right)} \quad (5)$$

$$\text{s.t. } \mathbf{x}_0 = \mathbf{X} \cdot \boldsymbol{\lambda} + \mathbf{s}^-,$$

$$\mathbf{y}_0^g = \mathbf{Y}^g \cdot \boldsymbol{\lambda} - \mathbf{s}^g, \mathbf{y}_0^b = \mathbf{Y}^b \cdot \boldsymbol{\lambda} + \mathbf{s}^b$$

$$\sum_{i=1}^n \lambda_i = 1, \mathbf{s}^- \geq 0, \mathbf{s}^g \geq 0, \mathbf{s}^b \geq 0, \boldsymbol{\lambda} \geq 0$$

公式(5)中, $\overline{D}_0'(x, y^g, y^b)$ 、 ρ 为环境效率, ρ 为 $\overline{D}_0'(x, y^g, y^b)$ 的替代符号; $\mathbf{x}$ 、 $\mathbf{y}^g$ (含 $\mathbf{y}_{r0}^g$) 和 $\mathbf{y}^b$ (含 $\mathbf{y}_{i0}^b$) 分别为投入(种子、化肥、用工、机械、灌溉、农药、农家肥)、期望产出(小麦产量)和非期望产出(碳排放);向量 $\mathbf{s}^-$ 、 $\mathbf{s}^g$ (含 $\mathbf{s}_r^g$) 和 $\mathbf{s}^b$ (含 $\mathbf{s}_i^b$) 分别为投入、期望产出和非期望产出的松弛量; i 为生产单位的个数(比如省份的个数); $\boldsymbol{\lambda}$ 为权重向量; s.t. 为约束条件(Subject to, 简称为 s.t.).模型中下标“0”表示被评价决策单元. ρ 关于 $\mathbf{s}^-$ 、 $\mathbf{s}^g$ 和 $\mathbf{s}^b$ 严格单调递减,且满足 $0 \leq \rho \leq 1$.就特定决策单元而言,当且仅当 $\rho = 1$ 且 $\mathbf{s}^-$ 、 $\mathbf{s}^g$ 和 $\mathbf{s}_i^b$ 均为 0 时,该决策单元为有效.若 $\rho < 1$,则说明被评价决策单元无效,有必要在投入产出上作相应改进.

1.2 ML 指数

ML 指数可以分析每个 DMU(决策单元)向

生产边界移动的情况和与生产边界的相对位置,可分解为 MLTECH 指数(技术进步指数)和 MLEFFCH 指数(效率改进指数),前者反映生产可能性边界向外扩张的动态变化,后者反映技术落后者追赶先进者的速度^[26-28]。基于 SBM 模型,可定义 t 期到 $t+1$ 期的 ML 指数, t 为时期

$$ML_t^{t+1} = \left[\frac{1 + \overrightarrow{D}_0^t(x^t, y^{g^t}, y^{b^t})}{1 + \overrightarrow{D}_0^{t+1}(x^{t+1}, y^{g^{t+1}}, y^{b^{t+1}})} \cdot \frac{1 + \overrightarrow{D}_0^{t+1}(x^t, y^{g^t}, y^{b^t})}{1 + \overrightarrow{D}_0^{t+1}(x^{t+1}, y^{g^{t+1}}, y^{b^{t+1}})} \right]^{1/2} \quad (6)$$

利用公式(6)可以把 ML 指数分解为技术进步指数 ($MLTECH_t^{t+1}$) 和效率改进指数 ($MLEFFCH_t^{t+1}$)

$$ML_t^{t+1} = MLTECH_t^{t+1} \cdot MLEFFCH_t^{t+1} \quad (7)$$

$$MLTECH_t^{t+1} = \left[\frac{1 + \overrightarrow{D}_0^{t+1}(x^t, y^{g^t}, y^{b^t})}{1 + \overrightarrow{D}_0^t(x^t, y^{g^t}, y^{b^t})} \cdot \frac{1 + \overrightarrow{D}_0^{t+1}(x^{t+1}, y^{g^{t+1}}, y^{b^{t+1}})}{1 + \overrightarrow{D}_0^{t+1}(x^t, y^{g^{t+1}}, y^{b^{t+1}})} \right]^{1/2} \quad (8)$$

$$MLEFFCH_t^{t+1} = \frac{1 + \overrightarrow{D}_0^t(x^t, y^{g^t}, y^{b^t})}{1 + \overrightarrow{D}_0^{t+1}(x^{t+1}, y^{g^{t+1}}, y^{b^{t+1}})} \quad (9)$$

2 小麦生产过程中的化肥削减潜力及碳排放

小麦生产过程中的化肥削减潜力将利用国

家公布的科学施肥量以及化肥实际施用量进行测算,并依据化肥(含氮肥、磷肥及钾肥)施用量和化肥削减量,采用符合中国粮食生产情况的氮磷钾的温室气体排放系数,测算小麦种植的碳排放量及碳减排量。

2.1 数据来源及指标说明

数据来源于国家发展和改革委员会价格司编制的 2005~2016 年《全国农产品成本收益资料汇编》中小麦种植的投入产出数据,并结合国家统计局编制的 2005~2016 年《中国统计年鉴》中各省份小麦年度总产量,获取了前 10 位小麦主产省份 2004~2015 年的数据(包括河南省、山东省、安徽省、河北省、江苏省、四川省、新疆维吾尔自治区、陕西省、湖北省、甘肃省,以上省份 2015 年的小麦产量占全国总产量的 93.25%)。参考以往学者测算粮食生产效率的指标选择^[11-12,14-17,29],选取了每公顷小麦产量作为期望产出指标,投入指标选取了每公顷小麦生产所投入的种子、化肥、用工、机械、灌溉、农药、农家肥等生产要素的投入量或金额,具体情况如表 1 所示。

表 1 主产省份 2004~2015 年小麦生产平均投入产出
Table 1 Average input and output in major provinces for wheat production from 2004 to 2015

省份	产量 (kg/hm ²)	种子 (kg/hm ²)	化肥 (kg/hm ²)	用工 (工日/hm ²)	机械 (元/hm ²)	灌溉 (元/hm ²)	农药 (元/hm ²)	农家肥 (元/hm ²)
河南	6274.05	191.60	529.14	78.84	1403.23	233.04	226.51	81.31
山东	6329.73	183.63	613.20	93.78	1639.32	529.46	156.66	222.05
安徽	5905.66	226.81	547.55	64.37	1329.31	87.35	196.23	82.30
河北	6184.14	264.93	628.68	87.21	1499.07	877.47	154.91	218.90
江苏	5856.39	244.56	504.76	63.47	1383.84	100.90	350.72	91.12
四川	3620.09	166.01	257.15	154.52	501.86	94.26	180.95	197.27
新疆	5854.47	348.35	532.75	71.56	1258.50	717.76	103.60	439.00
陕西	5459.91	175.66	544.27	115.24	1521.21	711.35	139.18	69.25
湖北	4794.90	206.78	345.18	65.34	1112.43	21.14	184.78	97.02
甘肃	4723.07	324.28	411.92	152.56	1274.21	437.27	132.59	219.78

2.2 化肥削减潜力

对于化肥削减潜力的测算,将利用历年农业部种植业管理司、全国农业技术推广服务中心、农业部测土配方施肥技术专家组共同发布的“小麦科学施肥指导意见”(简称为“意见”),该“意见”

是结合小麦施肥特点以及各地区小麦种植土壤情况,运用研究成果、试验数据,综合制定的指导各地小麦生产的合理施肥量和科学施肥方法。利用“意见”中对各地小麦生产的科学施肥量(氮肥、磷肥、钾肥的科学施肥量),并结合小麦生产

实际的化肥投入量,测算出了各省小麦生产的化肥削减潜力.如表 2 所示,小麦化肥削减潜力较大,削减量占到实际施用量的 51.66%.就不同的养分元素来看,钾肥削减潜力最大,超过 75%,其次是磷肥和氮肥,依此,建议小麦生产者参考科学施肥的指导意见,切实实现测土配方施肥,尤其注意减少钾肥和磷肥的施用;就不同区域来看,北方地区的小麦种植化肥削减潜力均超过 50%,而南方地区的小麦种植化肥削减潜力均未超过 50%,这与各地区的种植习惯、土壤、气候等因素有关.依此,建议各地因地制宜,践行小麦科学施肥指导意见、引导小麦种植户科学合理施肥.

表 2 主产省份 2004~2015 年小麦生产化肥平均施用量及削减潜力

省份	化肥实际施用量			化肥科学施用量			化肥削减潜力			
	(kg/hm ²)			(kg/hm ²)			(%)			
	氮肥	磷肥	钾肥	氮肥	磷肥	钾肥	氮肥	磷肥	钾肥	总计
河南	197.19	149.09	201.39	158.40	72.75	41.55	19.67	51.20	79.37	50.21
山东	207.60	176.70	259.50	143.70	70.65	44.55	30.78	60.02	82.83	59.79
安徽	215.65	147.65	209.75	149.85	66.30	38.55	30.51	55.10	81.62	55.55
河北	287.91	164.51	208.11	158.40	73.35	42.30	44.98	55.41	79.67	58.51
江苏	257.68	103.88	158.08	169.80	64.65	62.10	34.10	37.77	60.72	42.93
四川	129.25	77.95	60.45	123.00	59.70	24.45	4.84	23.41	59.55	22.60
新疆	250.58	123.08	172.18	146.55	63.15	12.45	41.52	48.69	92.77	59.30
陕西	263.18	153.68	150.08	142.05	61.05	11.55	46.02	60.27	92.30	62.14
湖北	168.38	84.58	103.48	158.10	60.00	55.65	6.10	29.06	46.22	23.20
甘肃	204.43	123.93	95.13	123.60	55.20	14.70	39.54	55.46	84.55	54.31
均值	218.18	130.58	161.78	147.35	64.68	34.79	32.47	50.47	78.50	51.66

2.3 化肥碳排放

借鉴陈舜等^[30]研究得出的符合中国情况的氮肥、磷肥、钾肥的温室气体排放系数(排放系数为每单位重量的化肥可排放的温室气体的重量),分别为 2.116、0.636 和 0.180(以碳当量计),测算了氮肥、磷肥、钾肥的碳排放量,限于 SBM 模型和 ML 指数仅能引入 1 个非期望产出变量,将对氮肥、磷肥、钾肥的碳排放量进行加总处理.

如表 3 所示,就实际化肥施用所导致的碳排放来看,小麦主产省份的化肥碳排放量平均达到了 573.84kg/hm²,其中,河北省的碳排放量最大.就科学施肥碳排放量来看,小麦主产省份的化肥碳排放量平均达到了 359.18kg/hm²,其中,江苏省的碳排放量最大.以上 2 种情况比较来看,若参考小麦科学施肥的指导意见,则主产省份小麦种植的化肥碳减排量平均约为 214.66kg/hm²,碳减排的比例约为 37.41%.总的来看,小麦种植主产省份的化肥碳减排的潜力较大,应该提倡和引导科学

施肥,提高生产者对小麦生产碳排放造成环境问题的重视程度以及科学施肥的意识,以减少碳排放以及缓解化肥过量施用导致的环境污染问题.

表 3 主产省份 2004~2015 年小麦生产化肥碳排放

Table 3 Chemical fertilizer carbon emission in major provinces for wheat production from 2004 to 2015				
省份	化肥碳排放量 (kg/hm ²)	科学施肥碳排 放量(kg/hm ²)	碳减 排量(kg/hm ²)	碳减排比例 (%)
河南	548.32	388.92	159.40	29.07
山东	598.37	357.02	241.35	40.33
安徽	587.98	366.19	221.79	37.72
河北	751.29	389.44	361.85	48.16
江苏	639.77	411.59	228.18	35.67
四川	333.95	302.64	31.31	9.38
新疆	639.51	352.50	287.01	44.88
陕西	681.63	341.48	340.15	49.90
湖北	428.70	382.72	45.98	10.73
甘肃	528.51	299.29	229.22	43.37
均值	573.84	359.18	214.66	37.41

3 小麦生产的环境效率与环境全要素生产率

利用 MaxDEA 6.7 软件测算了主产省份小麦生产的环境效率和环境全要素生产率.

3.1 环境效率

小麦环境效率主要从全碳排放(即未削减化肥施用量测算的碳排放量)测算得出的小麦生产环境效率以及利用碳减排(即削减化肥施用量后测算的碳排放量)测算得出的小麦生产环境效率进行对比分析.

3.1.1 总体角度 利用全碳排放测算得出的小麦生产环境效率以及利用碳减排测算得出的小麦生产环境效率相差不大,2004~2015 年间平均的小麦生产环境效率均 0.970,而且从年度间的差异来看,虽然变化趋势均是先下降后上升的变动趋势,但碳减排测算得到的小麦生产环境效率变动趋势更加平缓(图 1).之所以出现了年度间的趋势变化,不仅与土壤、气候等自然因素有关,还与农村劳动力流转、土地流转以及城镇化等社会因素有关^[12,19,32].以上结果表明,虽然化肥施用量削减了,但未降低小麦生产效率及水平,依此,应该积极倡导小麦种植主体合理、科学施肥,以减少化肥施用量、碳排放量.

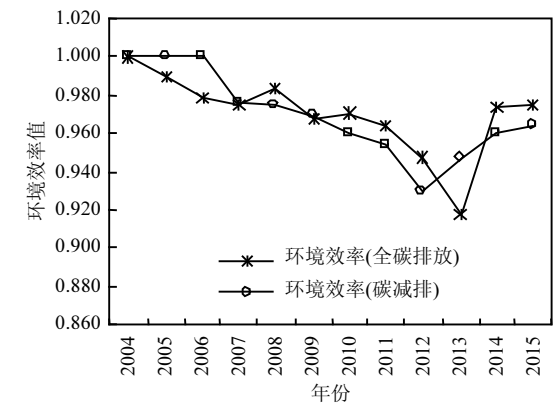


图1 主产省份 2004~2015 年小麦环境效率趋势
Fig.1 Trend of environmental efficiency in major provinces for wheat production from 2004 to 2015

3.1.2 地区角度 主产省份小麦生产碳减排与否并未影响到环境效率,其中河南等 5 个省份的小麦生产由于化肥的削减以及碳减排使得环境

效率有所提升(表 4).此外,小麦生产排名第 1、第 6 及第 10 位的省份的环境效率相对较低,但均超过了 0.800,说明这几个省份的小麦生产水平还有潜力可被挖掘.以上结果表明引入非期望产出的小麦环境效率保持了高水平,但还有潜力可被挖掘.更为重要的是,通过化肥削减,达到了资源的节约、碳排放的减少,依此,应该在小麦生产过程中削减化肥施用量,以实现化肥使用量“零增长”目标以及践行“藏粮于地”发展理念.

表 4 主产省份 2004~2015 年小麦平均生产环境效率
Table 4 Average environmental efficiency in major provinces for wheat production from 2004 to 2015

省份/地区	环境效率	
	全碳排放	碳减排
河南	0.974	0.979
山东	0.990	0.984
安徽	0.996	0.987
河北	1.000	0.973
江苏	1.000	0.980
四川	0.941	0.974
新疆	1.000	0.999
陕西	0.981	0.995
湖北	0.993	0.999
甘肃	0.846	0.851
北方地区	0.969	0.967
南方地区	0.978	0.984
东部地区	0.997	0.979
中部地区	0.988	0.988
西部地区	0.942	0.955
黄淮海麦区	0.988	0.979
长江中下游麦区	0.983	0.985
西北麦区	0.942	0.948

从南北方地区的角度来看,北方地区的小麦生产环境效率要低于南方地区,主要是因为甘肃、陕西等西北地区的小麦生产水平较低有关.从东中西部的角度来看,西部地区的小麦生产环境效率最低,其次是中部地区和东部地区.从小麦主产区角度来看,与东中西部小麦生产环境效率的分布情况一致,西北麦区的小麦生产环境效率最低,其次是长江中下游麦区以及黄淮海麦区.需要说明的是,作为主产区的东部地区和黄淮海麦区的小麦生产环境效率在化肥削减以后略有

降低,这可能与东部地区和黄淮海麦区的小麦种植过程中化肥的施用过量程度更高有关,鉴于此,应该提高东部地区以及黄淮海麦区小麦种植过程中的化肥减量施用问题,结合绿色发展理念,改良肥料施用结构。

3.2 环境全要素生产率

小麦环境全要素生产率将从 MLEFFCH 指数、MLTECH 指数以及 ML 指数等 3 个环境全要素生产率指数进行具体分析。

3.2.1 总体角度 中国小麦主产省份的 MLEFFCH 指数一直处于较高水平(表 5),即小麦的实际生产水平与生产可能最高水平之间的差距较小,而且化肥削减、碳减排前后的小麦 MLEFFCH 指数相差不大,尤其是化肥削减、碳减排后的 MLEFFCH 指数均值超过了 1,说明生产要素合理投入后,小麦生产效率有所改善。

表 5 主产省份 2004~2015 年小麦生产 MLEFFCH、MLTECH、ML 指数统计表

Table 5 Index of MLEFFCH, MLTECH and ML in major provinces for wheat production from 2004 to 2015

年份	MLEFFCH 指数		MLTECH 指数		ML 指数	
	全碳排放	碳减排	全碳排放	碳减排	全碳排放	碳减排
2004~2005	0.990	1.000	0.991	0.977	0.981	0.977
2005~2006	0.990	1.000	1.005	1.004	0.995	1.004
2006~2007	0.996	0.978	0.984	1.002	0.980	0.980
2007~2008	1.009	0.999	1.012	1.006	1.021	1.005
2008~2009	0.984	0.995	0.999	1.017	0.983	1.012
2009~2010	1.004	0.988	1.014	0.989	1.018	0.977
2010~2011	0.995	1.064	0.986	0.963	0.981	1.025
2011~2012	0.986	0.982	0.953	1.014	0.940	0.996
2012~2013	0.972	1.017	1.023	1.016	0.994	1.033
2013~2014	1.026	1.014	1.032	1.023	1.059	1.037
2014~2015	1.034	1.016	1.041	1.025	1.076	1.041

中国小麦主产省份的 MLTECH 指数的变动趋势在 2004~2011 年间相对比较平稳、2011~2015 年间增长较快(表 5),说明中国小麦生产技术的进步态势比较明显,而且化肥削减、碳减排前后的小麦生产 MLTECH 指数差异较小,2004~2015 年年均超过了 1,表明中国小麦生产可能性

边界向外扩张的概率较大.总体来看,化肥削减后的小麦生产水平并未降低,应该推行粮食生产过程中化肥削减的科学行为。

中国小麦主产省份的 ML 指数的变动幅度较小(表 5),其中,化肥削减、碳减排的小麦生产的 ML 指数相对更加平缓,且年间均值为 1.008,大于化肥未削减、全碳排放的小麦生产 ML 指数 1.003.总得来看,主产省份小麦的环境全要素生产率在 2004~2015 年间是增长的,而且化肥削减以后,主产省份小麦的 ML 指数仍然保持高水平.以上结果表明小麦种植过程中的化肥削减在技术上是可行的,建议提倡化肥的削减以及结合测土配方进行科学施肥。

表 6 主产省份 2004~2015 年小麦生产环境全要素生产率分地区统计表

Table 6 Production rate of environmental total factors by region in major provinces for wheat production from 2004 to 2015

省份或地区	全碳排放			碳减排		
	MLEFFCH 指数	MLTECH 指数	ML 指数	MLEFFCH 指数	MLTECH 指数	ML 指数
河南	1.002	1.006	1.014	1.002	1.001	1.004
山东	1.000	1.005	1.008	1.005	1.002	1.006
安徽	1.000	1.000	1.000	1.002	1.000	1.002
河北	1.000	1.003	1.003	0.991	1.001	0.994
江苏	1.000	1.004	1.004	1.007	1.003	1.006
四川	0.987	1.000	0.987	1.003	1.000	1.003
新疆	1.000	1.002	1.002	1.002	1.004	1.006
陕西	1.003	1.002	1.007	1.000	1.001	1.001
湖北	1.001	1.003	1.002	1.001	1.003	1.003
甘肃	0.994	1.003	0.996	0.976	1.002	0.975
北方地区	1.000	1.003	1.004	0.997	1.002	0.998
南方地区	0.996	1.002	0.998	1.003	1.002	1.004
东部地区	1.000	1.003	1.004	1.001	1.002	1.002
中部地区	1.002	1.005	1.008	1.001	1.002	1.003
西部地区	0.996	1.002	0.998	0.995	1.002	0.996
黄淮海麦区	1.001	1.003	1.006	1.000	1.001	1.002
长江中下游麦区	0.996	1.002	0.998	1.003	1.002	1.004
西北麦区	0.999	1.003	1.002	0.993	1.002	0.994

3.2.2 地区角度 主产省份小麦生产的 MLEFFCH 指数、MLTECH 指数以及 ML 指数大都超过了 1.000(表 6),仅有甘肃省、四川省以

及河北省的小麦种植 ML 指数未能超过 1.000。就碳排放的角度来看,化肥削减、碳减排后的小麦环境全要素生产率相对更好。总得来看,主产省份小麦生产的技术均比较先进,各主产省份小麦生产效率大都呈现增长态势。

对比南北方地区(表 6),北方地区全碳排放下的小麦环境全要素生产率要高于南方地区,而南方地区碳减排下的小麦环境全要素生产率要高于北方地区,主要是因为北方地区的化肥施用过量程度相对较高;对比东中西部地区,西部地区的小麦环境全要素生产率要比东部地区和中部地区的低,尤其是碳减排的条件下,该结果说明西部地区的小麦种植水平还需进一步提升;从小麦主产区角度来看,黄淮海麦区的小麦生产的 MLEFFCH 指数、MLTECH 指数以及 ML 指数均超过 1.000,说明该地区的小麦种植水平较高,代表了中国小麦种植水平。而西北麦区的 MLEFFCH 指数以及 ML 指数均未超过了 1.000,说明该区域的小麦种植水平提升的潜力还有待进一步挖掘。总的来看,中国小麦的种植技术具有先进性,但进一步扩张小麦种植的可能性边界仍需在生产效率提升方面做努力。

4 结论

4.1 科学施肥前提下,主产省份小麦生产过程中的化肥削减潜力较大,削减量占到实际施用量的 51.66%,其中,钾肥削减潜力最大,超过 75%。小麦主产省份的化肥碳排放量平均达到了 $573.84\text{kg}/\text{hm}^2$,科学施肥后,主产省份小麦种植的化肥碳减排量平均约为 $214.66\text{kg}/\text{hm}^2$,碳减排的潜力较大。

4.2 碳减排以后,小麦生产环境效率均未减少,2004–2015 年间平均的小麦生产环境效率为 0.970,虽然化肥减少了,但小麦的生产水平并没有降低。河南、四川、湖北、陕西、甘肃 5 个省份的小麦生产由于化肥的削减以及碳减排使得环境效率有所提升,北方地区的小麦生产环境效率要低于南方地区。

4.3 化肥削减、碳减排前后的小麦生产 MLEFFCH 指数、MLTECH 指数差异较小,以上

两个指数在化肥削减、碳减排条件下的结果超过了 1,改善了小麦生产效率,增大了中国小麦生产可能性边界向外扩张的概率。化肥削减、碳减排的小麦生产的 ML 指数相对更加平缓,且年间均值为 1.008,大于化肥未削减、全碳排放的小麦生产 ML 指数,能够支撑实际生产向最大产出逼近,以达到生产的帕累托最优状态。

参考文献:

- [1] 蔡 荣. 农业化学品投入状况及其对环境的影响 [J]. 中国人口·资源与环境, 2010,20(3):107–110.
- [2] Vitousek P M, Naylor R, Crews T, et al. Nutrient imbalances in agricultural development [J]. Science, 2009,324(19):1519–1520.
- [3] Guo J H, Liu X J, Zhang Y, et al. Significant acidification in major Chinese croplands [J]. Science, 2010,327(19):1008–1010.
- [4] 陆文聪,刘 聪. 化肥污染对粮食作物生产的环境惩罚效应 [J]. 中国环境科学, 2017,37(5):1988–1994.
- [5] Ongley, E D, Zhang X, Xu T. Current status of agricultural and rural non-point source pollution assessment in China [J]. Environmental Pollution, 2010,158(5):1159–1168.
- [6] 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.
- [7] 张维理,徐爱国,冀宏杰,等. 中国农业面源污染形势估计及控制对策 III. 中国农业面源污染控制中存在问题分析 [J]. 中国农业科学, 2004,37(7):1026–1033.
- [8] 李 波,张俊飏,李海鹏. 中国农业碳排放时空特征及影响因素分解 [J]. 中国人口·资源与环境, 2011,21(8):80–86.
- [9] 张灿强,王 莉,华春林,等. 中国主要粮食生产的化肥削减潜力及其碳减排效应 [J]. 资源科学, 2016,38(4):790–797.
- [10] 张海鑫,杨钢桥. 耕地细碎化及其对粮食生产技术效率的影响——基于超越对数随机前沿生产函数与农户微观数据 [J]. 资源科学, 2012,34(5):903–910.
- [11] 马林静,欧阳金琼,王雅鹏. 农村劳动力资源变迁对粮食生产效率影响研究 [J]. 中国人口·资源与环境, 2014,24(9):103–109.
- [12] 赵丽平,侯德林,王雅鹏,等. 城镇化对粮食生产环境技术效率影响研究 [J]. 中国人口·资源与环境, 2016,26(3):153–162.
- [13] 高 鸣,马 玲. 贫困视角下粮食生产技术效率及其影响因素——基于 EBM-Goprobit 二步法模型的实证分析 [J]. 中国农村观察, 2015,36(4):49–60.
- [14] 李 静,李晶瑜. 中国粮食生产的化肥利用效率及决定因素研究 [J]. 农业现代化研究, 2011,32(5):565–568.
- [15] 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.
- [16] 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, 2015,36(11):69-78.
- [17] 田 云,张俊飏,李 波.中国粮食主产区农业碳排强度估算及其分析 [J]. 地理科学进展, 2012,31(11):1546-1551.
- [18] 田 云.中国低碳农业发展:生产效率、空间差异与影响因素研究 [D]. 武汉:华中农业大学, 2015.
- [19] 杨璐嘉.低碳视角下粮食主产区农业全要素生产率比较——基于中国 13 省 2002-2011 年数据的分析 [J]. 湖南农业大学学报(社会科学版), 2013,14(6):27-32.
- [20] 邓明君,邓俊杰,刘佳宇.中国粮食作物化肥施用的碳排放时空演变与减排潜力 [J]. 资源科学, 2016,38(3):534-544.
- [21] 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 [J]. 生态学报, 2013,33(12):3837-3845.
- [22] 田 伟,杨璐嘉,姜 静.低碳视角下中国农业环境效率的测算与分析——基于非期望产出的 SBM 模型 [J]. 中国农村观察, 2014,35(5):59-71.
- [23] 胡达沙,李 杨.环境效率评价及其影响因素的区域差异 [J]. 财经科学, 2012,44(4):116-124.
- [24] 涂正革,刘磊珂.考虑能源、环境因素的中国工业效率评价——基于 SBM 模型的省级数据分析 [J]. 经济评论, 2011,32(2):55-65.
- [25] 王 兵,杨 华,朱 宁.中国各省份农业效率和全要素生产率增长——基于 SBM 方向性距离函数的实证分析 [J]. 南方经济, 2011,30(10):12-25.
- [26] 吴传清,董 旭.环境约束下长江经济带全要素能源效率的时空分异研究——基于超效率 DEA 模型和 ML 指数法 [J]. 长江流域资源与环境, 2015,24(10):1646-1653.
- [27] 王维国,范 丹.中国区域全要素能源效率收敛性及影响因素分析——基于 Malmquist-Luenberger 指数法 [J]. 资源科学, 2012,34(10):1816-1824.
- [28] 王 兵,吴延瑞,颜鹏飞.中国区域环境效率与环境全要素生产率增长 [J]. 经济研究, 2010,45(5):95-109.
- [29] 郝晓燕,韩一军,李 雪,等.小麦技术效率的地区差异及门槛效应[J]. 农业技术经济, 2016,36(10):84-94.
- [30] 陈 舜,逯 非,王效科.中国氮磷钾肥制造温室气体排放系数的估算 [J]. 生态学报, 2015,35(19):6371-6383.

作者简介：朱 宁(1987-),男,山东泰安人,助理研究员,博士,主要从事农业资源与环境经济研究.发表论文 40 余篇.

《中国环境科学》再次获评“RCCSE 中国权威学术期刊(A+)”,位列学科榜首

《中国环境科学》在武汉大学中国科学评价研究中心发布的第四届中国学术期刊评价中获评“RCCSE 中国权威学术期刊(A+)”.中国学术期刊评价按照各期刊的期刊学术质量和影响力指标综合得分排名,将排序期刊分为 A+、A、A-、B+、B、C 6 个等级,评价的 6201 种中文学术期刊中有 316 种学术期刊获评权威期刊(A+),A+为得分排名前 5%的期刊.此次获得“RCCSE 中国权威学术期刊(A+)”称号的环境类期刊有 3 种,《中国环境科学》在环境科学技术与资源科学技术学科内荣登榜首.