

吴亚楠,魏 强,孙晶华. 基于 DNDC 模型的小麦生命周期资源环境影响评价[J]. 江苏农业科学,2018,46(6):258-262.  
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2018.06.067

# 基于 DNDC 模型的小麦生命周期资源环境影响评价

吴亚楠,魏 强,孙晶华

(山西农业大学资源环境学院,山西晋中 030801)

**摘要:**以山西省主产小麦的晋中市、运城市、临汾市、吕梁市、长治市、晋城市 6 市为例,应用生命周期评价方法(LCA),运用 DNDC 模型模拟小麦种植环节的污染物排放,比较了不同区域小麦生产过程中与施肥有关的资源环境影响潜力。结果表明,6 市环境影响综合指数从小到大依次为晋中市 0.259 4、吕梁市 0.311 0、长治市 0.311 4、临汾市 0.349 5、晋城市 0.386 3、运城市 0.388 1。几种资源环境影响潜力从高到低依次是富营养化、环境酸化、土地利用、气候变化和能源耗竭。其中  $\text{NH}_3$  挥发是富营养化的主要原因,若将施肥方式由表施改为穴施可以有效降低  $\text{NH}_3$  的挥发,6 市的环境影响综合指数也能降低 26.6%~43.7%。

**关键词:**生命周期评价;DNDC 模型;环境影响;评价;清单分析

**中图分类号:** X820.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2018)06-0258-05

目前我国农业生产面临环境污染和粮食安全的双重压力<sup>[1]</sup>,如何在保证粮食产量的同时减少环境污染成为我国农业生产亟需解决的问题。小麦是我国主要粮食作物之一,探讨小麦的产量和环境排放对我国农业生产具有重要意义。我国集约化农业生产过程中,农民在“投入多、收获多”错误理念的引导下,在农作物种植阶段施用过量化肥。化肥的大量施用造成了资源浪费和环境污染,也带动了上游化肥生产的资源消耗和环境污染<sup>[2]</sup>。国内学者对农业生产中的环境污染进行了广泛研究<sup>[3-4]</sup>,但大多数研究方法单一、片面,忽视

了农产品生产上下游环节的环境影响。因此,需要建立一个科学、合理、综合的评价方法来评估农业生产。生命周期评价(life cycle assessment, LCA)是一个产品、工艺或活动“从摇篮到坟墓”的整个过程,起源于 20 世纪 60 年代的美国<sup>[5]</sup>,经过半个多世纪的发展,如今作为新兴的环境管理工具成为环境科学领域研究的热点,被广泛应用于多个领域的环境影响评价。在农业领域,也有学者开展了农产品或农艺措施的生命周期研究<sup>[6-7]</sup>。但这些研究多数为大尺度区域的研究,过于笼统。本研究以山西省小麦主产区为研究对象,精确到农户尺度进行小麦生产资源环境影响评价,旨在为制定引导农户科学合理施肥的政策提供指导。

收稿日期:2016-10-08

基金项目:山西省科技攻关项目(编号:20130311008-5);公益性行业(农业)科研专项(编号:201303104)。

作者简介:吴亚楠(1992—),女,河北保定人,硕士研究生,研究方向为土地信息技术。E-mail: nnyjq123@163.com。

将通过比较基因组学、蛋白质组学及代谢组学技术,从 DNA 和蛋白质水平分析这些菌株抗茶树精油的机制,从而可以补充和完善茶树精油抑制真菌机制理论,为更高效地利用茶树精油提供理论依据<sup>[10]</sup>。

## 参考文献:

- [1] Nisa H, Kamili A N, Nawchoo I A, et al. Fungal endophytes as prolific source of phytochemicals and other bioactive natural products: a review[J]. Microbial Pathogenesis, 2015, 82: 50-59.
- [2] 傅科鹤,章初龙,刘树蓬,等. 南方红豆杉内生真菌的抗菌活性[J]. 植物保护学报, 2006, 33(3): 268-272.
- [3] Janssen A M, Scheffer J J C, Svendsen A B. Antimicrobial activities of essential oils[J]. Pharmaceutisch Weekblad, 1987, 9(4): 193-197.
- [4] Thomsen N A, Hammer K A, Riley T V, et al. Effect of habituation to tea tree (*Melaleuca alternifolia*) oil on the subsequent susceptibility of *Staphylococcus* spp. to antimicrobials, triclosan, tea tree oil, terpinen-4-ol and carvacrol[J]. International Journal of

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区域与数据来源

数据来源于 2014 年对山西省小麦主产区 6 个市 260 个

Antimicrobial Agents, 2013, 41(4): 343-351.

- [5] Rodney J, Sahari J, Kamal M S M, et al. Thermochemical and mechanical properties of tea tree (*Melaleuca alternifolia*) fibre reinforced tapioca starch composites[J]. E - Polymers, 2015, 15(6): 401-409.
- [6] Cox S D, Mann C M, Markham J L, et al. Determining the antimicrobial actions of tea tree oil[J]. Molecules, 2001, 6(2): 87-91.
- [7] Chami N, Bennis S, Chami F, et al. Study of anticandidal activity of carvacrol and eugenol *in vitro* and *in vivo* [J]. Molecular Oral Microbiology, 2005, 20(2): 106-111.
- [8] Harman G E. *Trichoderma*—Not just for biocontrol anymore[J]. Phytoparasitica, 2011, 39(2): 103-108.
- [9] Deshmukh S K, Verekar S A, Bhav S V. Endophytic fungi: a reservoir of antibacterials[J]. Frontiers in Microbiology, 2015, 5: 715.
- [10] Ramadass M, Thiagarajan P. A review on *Melaleuca alternifolia* (tea tree) oil[J]. International Journal of Pharma and Bio Sciences, 2015, 6(4): 655-661.

乡镇 500 个农户的实地问卷调查,回收有效调查问卷 427 份。抽样方法为随机等间距方法<sup>[8]</sup>。调查结果显示,小麦主要施肥种类有尿素、复合肥、磷酸二铵、碳酸氢铵等。各调查地区养分投入及产量见表 1。

表 1 山西省 6 市小麦生产中肥料投入量与小麦产量

地区	N 投入量 (kg/hm <sup>2</sup> )	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> 投入量 (kg/hm <sup>2</sup> )	K <sub>2</sub> O 投入量 (kg/hm <sup>2</sup> )	小麦产量 (kg/hm <sup>2</sup> )	样本量 (个)
晋中市	259.96	80.34	51.21	6 187.79	21
运城市	320.84	79.55	45.72	5 817.87	173
临汾市	288.53	85.11	52.07	5 697.94	124
吕梁市	253.89	65.56	39.92	5 335.62	7
长治市	275.04	79.60	36.90	5 277.15	19
晋城市	300.21	82.06	45.31	5 080.66	83

1.2 DNDC 模型简介及验证

DNDC 模型是描述农业生态系统中碳、氮的生物地球化学过程的计算机模拟模型,可以模拟农作物产量、土壤固碳作用、硝态氮淋失和 NH<sub>3</sub> 挥发等。模型运作需要输入土壤、气候、农作物及农田管理等参数(表 2)。DNDC 模型是目前农业生产中应用最广泛、模拟结果较准确的模型之一<sup>[9]</sup>。国内学者对其从多个方面进行了验证<sup>[10-11]</sup>,结果表明, DNDC 模型完全适用于我国农田污染物排放模拟。本研究通过对小麦调查产量和模拟产量进行对比,其相对误差范围在 3.6% ~ 8.1%,说明 DNDC 模型在研究区域内模拟较为准确。本研究

表 2 DNDC 模型的输入参数与来源

输入项	模型输入参数	数据来源
气候参数	最高气温、最低气温、降水量、日平均风速	中国气象数据共享网 2014 年逐日气象数据
土壤参数	土壤利用类型、土壤密度、有机质含量、酸碱度	山西省全国测土配方施肥采样点数据
作物	农作物种类、轮作制度、播种和收获日期	小麦种植农户调查问卷
耕作措施	化肥施用次数、施肥方法,化肥种类和用量;犁地次数、时间、方式;灌溉次数、时间、灌溉量;除草次数、时间	

1.3.2 清单分析 生命周期的清单分析是对所研究系统的整个生命周期内的资源消耗和环境排放进行量化计算的过程。本研究中,将整个生命周期分为 3 个阶段,分别为原料阶段、农资阶段、农作阶段。原料阶段主要考虑化肥生产所用原料的开采和运输过程中的资源消耗和环境影响;农资阶段主要考虑化肥生产和运输过程中的资源消耗和环境影响;农作阶段仅考虑化肥施用对资源和环境的影响,其数据来自于 DNDC 模型模拟。原料阶段和农资阶段的能耗等技术指标来自《中国能源统计年鉴》(2014 年)、《中国统计年鉴》(2009—2014 年)、《中国农业统计年鉴》(2012—2014 年)等。CO<sub>2</sub>、SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub> 等污染物的排放系数来自国内相关文献研究<sup>[13-14]</sup>。

1.3.3 影响评价 环境影响评价建立在清单分析的基础之上,按照富营养化、环境酸化、温室效应分类评价对环境影响的严重程度,分特征化、标准化、加权评估 3 个步骤进行环境影响评价。

1.3.3.1 特征化 本研究将小麦生产系统生命周期特征化为能源耗竭、土地利用、环境酸化、富营养化、气候变化 5 种环境影响类型。不同性质的生态影响因子可以对同一种生态影响类型产生影响,但产生影响的贡献率不同,为了方便计算,研究者通常采用当量系数法进行汇总,即将生态影响类型中的其中一种影响因子视为参照物,其影响潜力为 1,将其他生

态影响因子与其比较得出其他生态影响因子的相对环境影响潜力的大小。引起各类环境污染的污染物及其当量系数见表 3、表 4、表 5。能源消耗是生产 1 t 小麦籽粒所消耗的能源,以消耗的标准煤为评价标准,其中电力折标准煤的系数为 0.123<sup>[15]</sup>,1 kg 标准煤的发热量为 29.271 MJ/kg<sup>[16]</sup>。各类污染物转化为相对环境影响潜力的当量系数来自国内相关文献研究<sup>[17]</sup>。

1.3 评价方法

生命周期评价方法的基本理论依据是能量守恒和物质不灭定律。通过对一个产品、工艺或生产活动的能源和原材料的消耗以及废气、废水、废渣的排放量来评估其对环境的影响。1997 年 SETAC 颁布的原理与框架标准将生命周期评价描述为互相联系、不断重复进行的 4 个步骤,即目标与范围确定、清单分析、影响评价和改进评价<sup>[12]</sup>。

1.3.1 目标定义与范围确定 确定研究目标与范围是生命周期评价的前提,决定了其后续阶段的进行与评价结果的精度。本研究以与小麦生产农业活动有关的原材料生产(矿石、能源开采、土地利用等)为起始系统边界,到小麦收获时所输出的农产品和污染物为系统的终止边界。以生产 1 t 小麦籽粒为评价的基本功能单位,来测算不同种植区域被调查的农户生产 1 t 小麦籽粒与施肥有关的资源消耗和环境排放。资源消耗主要分析了土地资源的利用和农资阶段化肥生产所消耗的各种能源和矿产资源。环境排放主要分析了系统各阶段(原料阶段、农资阶段、农作阶段)排放的气体(如 CO<sub>2</sub>、SO<sub>2</sub>、N<sub>2</sub>O、NH<sub>3</sub>、NO<sub>x</sub>)以及由于淋溶所产生的养分损失(包括磷和氮的损失)。因数据缺乏,小麦生产生命周期各阶段需要的设备设施和交通运输工具生产的资源环境影响不予考虑。

表 3 引起全球气候变暖折算成 CO<sub>2</sub> 时的权重系数

酸化气体	权重系数(kg/kg) (以 SO <sub>2</sub> 为当量表示)
SO <sub>2</sub>	1.00
NO <sub>x</sub>	0.70
NH <sub>3</sub>	1.88

表 4 引起环境酸化折算成 SO<sub>2</sub> 时的权重系数

温室气体	权重系数(kg/kg) (以 CO <sub>2</sub> 为当量表示)
CO <sub>2</sub>	1
CO	2
NO <sub>2</sub>	310
CH <sub>4</sub>	21

1.3.3.2 标准化 标准化是为了消除各单项评价指标在量纲和级数上的差异,为各种环境影响类型建立一个可以相互比较的标准。本研究采用 2000 年世界人均环境影响潜力作为环境影响基准进行标准化处理<sup>[18]</sup>(表 5)。

$$R_x = E_{p(x)} / S_{(2000)}$$

式中: $R_x$  是指第  $x$  种潜在环境影类型标准化结果, $p(x)$  是指系统对第  $x$  种环境影响类型潜值即特征化结果, $S_{(2000)}$  是指选定 2000 年的基准值。

表 5 引起富营养化折算成  $PO_4^{3-}$  时的权重系数

富营养化	权重系数(kg/kg)(以 $PO_4^{3-}$ 为当量表示)
$PO_4^{3-}$	1.00
$NO_x$	0.13
$NO_3^- - N$	0.42
$NH_3$	0.35
$NH_4^+ - N$	0.33
TN	0.42
TP	3.06

1.3.3.3 加权评估 加权评估是对各种环境影响类型合并处理,设置每种环境影响类型的权重(表 6)。各环境影响类型的权重设置来自国内相关研究结果<sup>[19]</sup>。权重计算公式如下:

$$EI = \sum W_x R_x$$

式中: $EI$  是指环境影响潜值, $W_x$  是指第  $x$  种潜在影响因子的权重, $R_x$  是指第  $x$  种潜在影响因子标准化结果。

表 6 环境影响基准值和权重

环境影响类型	单位	标准化基准值	权重
能源消耗	MJ	56 877.88	0.15
全球变暖	kg $CO_2 - eq$	6 869.00	0.20
环境酸化	kg $SO_2 - eq$	56.14	0.20
富营养化	kg $PO_4^{3-} - eq$	10.70	0.30
土地占用	$m^2/t$	5 423.00	0.15

1.3.4 评价改进 评价改进是总结经验,提出建议的阶段。即归纳综合清单分析和影响评价的结果识别、评价,并提出减少小麦生产生命周期内资源消耗与污染物释放建议的过程。本研究选择改变小麦追肥方式来进行评价。

表 7 山西省 6 个小麦种植市小麦生命周期资源消耗清单

区域	资源消耗		能源消耗		土地利用 ( $m^2/t$ )
	磷矿(kg/t)	钾矿(kg/t)	煤(kg/t)	电力(kW·h/t)	
晋中市	43.28±5.89	21.78±6.26	98.07±0.051	65.17±9.24	1 616.09±244.32
运城市	45.58±10.23	20.68±7.52	118.85±0.015	78.98±10.92	1 718.84±206.04
临汾市	49.79±7.43	24.05±7.08	115.81±0.041	76.96±9.51	1 755.02±197.98
吕梁市	40.96±6.21	19.69±8.12	104.40±0.049	69.38±12.28	1 874.20±216.65
长治市	50.28±9.49	18.40±5.26	115.00±0.025	76.42±9.32	1 894.96±223.33
晋城市	53.84±9.81	23.47±8.33	130.45±0.042	86.69±10.32	1 965.95±168.91

表 8 山西省 6 个小麦种植市小麦生命周期排放清单

区域	排放量(kg/t)					
	$CO_2$	$N_2O$	$NO_x$	$SO_2$	$NH_3$	$NO_3$
晋中市	601.13±119	0.44±0.29	3.68±0.89	7.36±1.84	5.08±5.64	5.75±3.38
运城市	584.11±109	0.40±0.31	4.46±0.67	8.91±0.98	10.56±6.43	7.18±2.87
临汾市	541.72±112	0.45±0.33	4.34±0.63	8.69±1.26	9.22±6.74	6.73±3.51
吕梁市	641.89±113	0.41±0.35	3.92±0.94	7.83±1.91	7.36±4.74	5.24±3.49
长治市	611.68±126	0.52±0.25	4.31±0.83	8.63±1.56	6.33±5.74	8.18±3.75
晋城市	685.43±89	0.58±0.11	4.89±0.59	9.78±1.24	10.13±7.06	7.04±4.74

1.4 数据处理

数据来自 2014 年对山西省种植小麦的 6 个主要市小麦种植农户的实地调查问卷,剔除了异常数据,筛选出客观有效的基础数据。

2 结果与分析

2.1 资源消耗和环境排放

表 7、表 8 给出了山西省 6 个小麦种植市小麦生产系统生命周期的资源消耗和环境排放清单。由表 7 可知,山西省 6 个小麦种植市生产功能单位的小麦籽粒的土地利用在 1 616.09~1 965.95  $m^2/t$  之间。晋中市土地利用情况最优。在磷矿消耗方面,山西省 6 个小麦种植市为 40.96~53.84 kg/t 之间;吕梁市最低,为 40.96 kg/t;晋城市最高,为 53.84 kg/t,约是晋中市的 1.24 倍。在钾矿消耗方面,山西省 6 个小麦种植市在 18.40~24.05 kg/t 之间,长治市消耗钾矿最低,临汾市消耗钾矿最高,各市钾矿消耗差别不大。能源消耗主要考虑了煤和电力的消耗。煤的消耗折算成标准煤计算,晋中市最低,为 98.07 kg/t;晋城市最高,为 130.45 kg/t。 $N_2O$ 、 $NH_3$ 、 $NO_3^-$  主要在系统农作阶段排放,与种植期的氮肥使用量和施用方式密切相关,由 DNDC 模型根据输入的参数模拟得出。其中  $N_2O$  的排放量大小依次是晋城市>长治市>临汾市>晋中市>吕梁市>运城市。 $NH_3$  的排放量大小依次是运城市>晋城市>临汾市>吕梁市>长治市>晋中市。 $NO_3^-$  的损失量为长治市最高,吕梁市最低。 $CO_2$ 、 $SO_2$ 、 $NO_x$  主要在系统原料阶段和农资阶段排放。

2.2 资源环境影响评价

2.2.1 特征化 山西省 6 市小麦生产过程中的土地利用、能源消耗、环境酸化、富营养化以及气候变化(即温室效应)5 种环境影响类型的潜力见图 1 至图 6。由图 1 可以看出,6 市生产 1 t 小麦消耗能源最多的是晋城市,为 4 130.51 MJ;晋中市最低,为 3 105.24 MJ,主要发生在农资生产阶段。调查结果显示,农户间的耗能潜力差异较大。这与氮肥使用量相关,氮肥施用量越大,小麦生命周期能耗潜力越大,这与我国化肥生

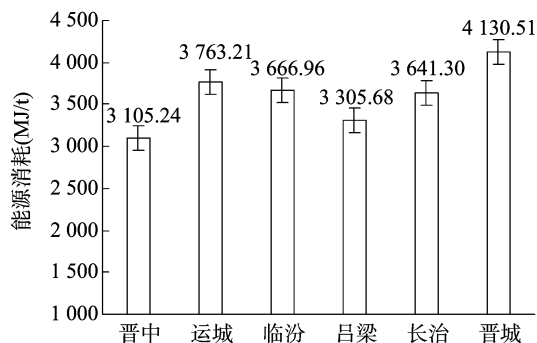


图1 山西省6个小麦种植市能源消耗

产工业能耗偏大有关。6市氮肥生产耗能分别占各自农资阶段耗能的91.8%、95.3%、93.0%、92.8%、93.6%、93.8%，可以看出，氮肥施用是小麦生命周期耗能的主要影响因素。如图2所示，6市小麦生产土地利用率大小依次是晋中市>运城市>临汾市>吕梁市>长治市>晋城市，其中土地利用率最高的是晋中市，生产1t小麦占用土地面积为1616.09 m<sup>2</sup>。土地利用率最低的是晋城市，生产1t小麦占用的土地面积为1965.95 m<sup>2</sup>。由图3可知，6市的温室效应潜力(以CO<sub>2</sub>当量计算)分别为晋中市737.53 kg CO<sub>2</sub>-eq/t、运城市708.11 kg CO<sub>2</sub>-eq/t、临汾市681.22 kg CO<sub>2</sub>-eq/t、长治市768.99 kg CO<sub>2</sub>-eq/t、吕梁市772.88 kg CO<sub>2</sub>-eq/t、晋城市865.23 kg CO<sub>2</sub>-eq/t。图4表明，6市富营养化潜力(以PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>当量计算)大小依次为运城市>晋城市>长治市>临汾市>吕梁市>晋中市。6市小麦生命周期环境酸化潜力(以SO<sub>2</sub>当量计算)分别为晋中市19.76 kg/t、运城市31.88 kg/t、临汾市29.06 kg/t、吕梁市24.41 kg/t、长治市23.55 kg/t、晋城市32.24 kg/t(图5)。

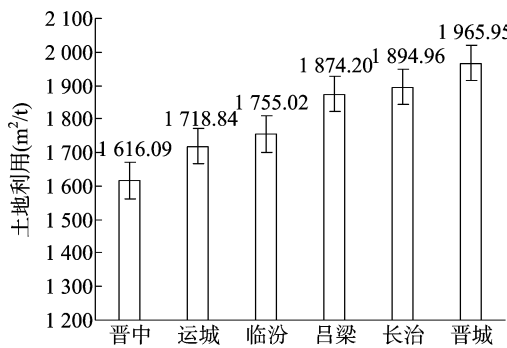


图2 山西省6个小麦种植市土地利用

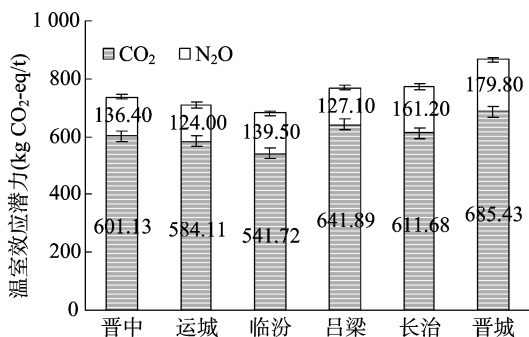


图3 山西省6个小麦种植市温室效应潜力

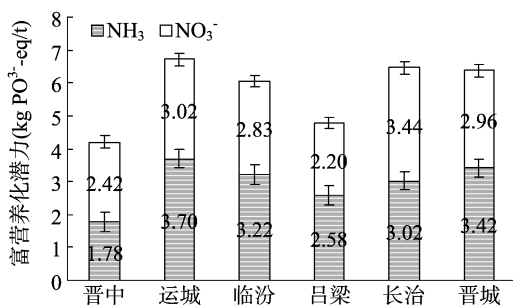


图4 山西省6个小麦种植市富营养化潜力

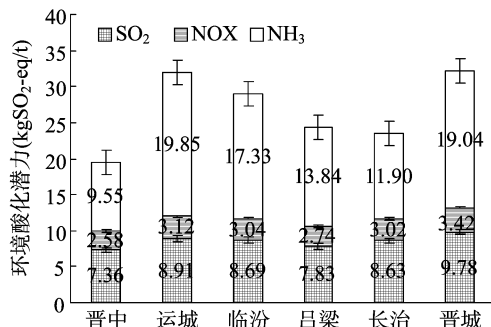


图5 山西省6个小麦种植市酸化潜力

2.2.2 标准化与加权 将2000年世界人均环境影响潜力作为基准值,对环境影响进行标准化。6市的富营养化指数在0.3925~0.6280之间,运城市最高,晋中市最低。环境酸化指数在0.3472~0.5743之间,晋城市最高,晋中市最低。对于土地利用指数,晋中地区为0.2980,土地利用率最好,晋城地区为0.3625,利用率最差,这与两地地理条件和自然因素有关。能源消耗指数在0.0546~0.0726之间,各市能源消耗差距不大。温室效应指数在0.0992~0.1260之间,晋城地区最高,临汾市最低。通过比较5种环境影响类型,富营养化的环境影响指数最高,相当于2000年世界人均环境影响潜力的39.3%~45.8%(图6)。

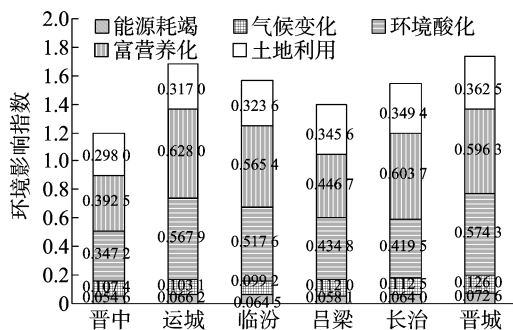


图6 山西省6个小麦种植市环境影响指数

加权评估后的环境影响总指数见图6,6市小麦生命周期环境影响潜力大小依次为富营养化、环境酸化、土地利用、温室效应和能源消耗。6市环境影响综合指数分别为晋中市0.2616、运城市0.3801、临汾市0.3512、吕梁市0.3039、长治市0.3495、晋城市0.3842。

### 2.3 改进评价

由环境影响综合指数可知,富营养化和环境酸化是对6市环境影响最大的2种环境影响类型。富营养化潜力和环境

酸化潜力占各市环境影响总潜力的 61.7% ~ 71.1%。降低环境污染首先要降低富营养化和环境酸化,其中农作阶段化肥施用  $\text{NH}_3$  挥发是导致富营养化和环境酸化的主要原因。而施肥方式又是降低  $\text{NH}_3$  挥发的有效途径。如果将 6 市小麦生产的施肥方式由撒施改为穴施,则小麦生产系统的富营养化指数分别降低到晋中市 0.306 5、运城市 0.508 4、临汾市

0.455 1、吕梁市 0.338 3、长治市 0.495 3、晋城市 0.456 1,环境酸化指数分别降低到晋中市 0.259 5、运城市 0.445 7、临汾市 0.404 2、吕梁市 0.324 2、长治市 0.385 3、晋城市 0.419 0,环境影响综合指数分别降到晋中市 0.218 2、运城市 0.319 7、临汾市 0.295 4、吕梁市 0.249 3、长治市 0.310 2、晋城市 0.311 1(图 7)。

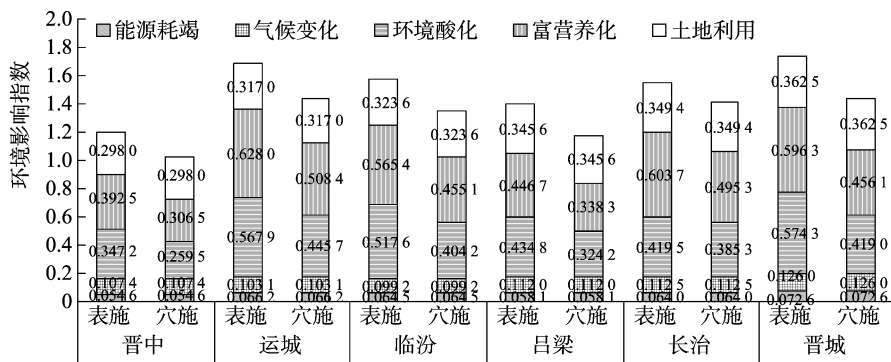


图7 不同施肥方式下环境影响指数

### 3 结论与讨论

因为我国的 LCA 研究属于发展阶段,缺乏优质的基础数据。虽然已经有些地区建立了生命周期数据库,但是数据库还不够完善和细化,这成为阻碍生命周期进一步发展的最大障碍。本研究对于 LCA 系统边界的确定具有一定的主观性,不一定普遍适用。由问卷调查方式获取的基础数据不确定性大;特征化、标准化的参数均引用国内外研究文献,影响了评价结果的准确性。另外,由于基础数据的限制,只考虑了资源和生态方面的环境问题,没有考虑经济和社会方面的影响。未来生命周期的发展方向应该致力于建立具有地域、时域、行业和工艺等特点的基础数据库,提高生命周期评价结果的准确性<sup>[20]</sup>。

本研究表明,山西省 6 个小麦种植市小麦施肥的资源环境影响综合指数分别为晋中市 0.261 6、运城市 0.380 1、临汾市 0.351 2、吕梁市 0.303 9、长治市 0.349 5、晋城市 0.384 2。6 个市小麦生命周期资源环境影响潜力大小依次是富营养化、环境酸化、土地利用、气候变化和能源耗竭。富营养化和环境酸化是小麦施肥环境污染中需要关注的重点问题,改变施肥方式可以有效降低  $\text{NH}_3$  的挥发,从而降低富营养化。

### 参考文献:

- [1] 李亮科. 生产要素利用对粮食增产和环境影响研究——以化肥为例[D]. 北京:中国农业大学,2015.
- [2] 王明新,包永红,吴文良,等. 华北平原冬小麦生命周期环境影响评价[J]. 农业环境科学学报,2006,25(5):1127-1132.
- [3] 刘洪涛,陈同斌,郑国砥,等. 有机肥与化肥的生产能耗、投入成本和环境效益比较分析——以污泥堆肥生产有机肥为例[J]. 生态环境学报,2010,19(4):1000-1003.
- [4] 李秀英,赵秉强,李絮花,等. 不同施肥制度对土壤微生物的影响及其与土壤肥力的关系[J]. 中国农业科学,2005,38(8):1591-1599.
- [5] 王长波,张力小,庞明月,等. 生命周期评价方法研究综述——兼

论混合生命周期评价的发展与应用[J]. 自然资源学报,2015,30(7):1232-1242.

- [6] 梁 龙,陈源泉,高旺盛,等. 华北平原冬小麦-夏玉米种植系统生命周期环境影响评价[J]. 农业环境科学学报,2009,28(8):1773-1776.
- [7] 王明新,吴文良,夏训峰. 华北高产粮区夏玉米生命周期环境影响评价[J]. 环境科学学报,2010,30(6):1339-1344.
- [8] 金勇进,蒋 妍,李序颖,等. 抽样技术[M]. 北京:中国人民大学出版社,2002:141-147.
- [9] 王 东,于振文,于文明,等. 土壤硝态氮时空变化及氨挥发的影响[J]. 应用生态学报,2006,17(9):1593-1598.
- [10] 张 凡,李长生,王 政. 耕作措施对陕西耕作土壤碳储量的影响模拟[J]. 第四纪研究,2006,26(6):1021-1028.
- [11] 王立刚,邱建军,马永良,等. 应用 DNDC 模型分析施肥与翻耕方式对土壤有机碳含量的长期影响[J]. 中国农业大学学报,2004,9(6):15-19.
- [12] 李贞宇,王 旭,高志岭,等. 我国不同区域小麦施肥资源环境影响的生命周期评价[J]. 农业环境科学学报,2010,29(7):1417-1422.
- [13] 王 利. 中国化肥生产体系养分资源流动规律与管理策略研究[D]. 武汉:华中农业大学,2008:43-46.
- [14] 狄向华,聂祚仁,左铁镛. 中国火力发电燃料消耗的生命周期排放清单[J]. 中国环境科学,2005,25(5):632-635.
- [15] 魏建新. 电力折算标准煤系数对钢铁节能的影响探析[J]. 中国统计,2010(11):34-45.
- [16] 刘宗尧. 电能以等价热值折算标准煤问题的探讨[J]. 中国能源,1993(8):35-36.
- [17] 李贞宇,王 旭,魏 静,等. 我国不同区域玉米施肥的生命周期评价[J]. 环境科学学报,2010,30(9):1912-1920.
- [18] 李 鑫,巨晓棠,张丽娟,等. 不同施肥方式对土壤氨挥发和氧化亚氮排放的影响[J]. 应用生态学报,2008,19(1):99-104.
- [19] 姜 洁,安晓宁,王义明,等. 中国小麦生产区域比较优势的模型分析[J]. 农业现代化研究,1998,19(1):9-12.
- [20] 陈万明,来延肖. 生命周期评价理论的发展现状与展望[J]. 安徽农业科学,2013,41(25):10490-10492.