

DOI: 10.19741/j.issn.1673-4831.2019.0004

吴晋波, 张吴平, 王国芳, 等. 水分条件影响下玉米生产过程的生命周期评价[J]. 生态与农村环境学报, 2019, 35(11): 1396-1403.

WU Jin-bo, ZHANG Wu-ping, WANG Guo-fang, et al. Life Cycle Assessment of the Maize Production Under Different Water Conditions [J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2019, 35(11): 1396-1403.

水分条件影响下玉米生产过程的生命周期评价

吴晋波¹, 张吴平²^①, 王国芳¹, 卜玉山¹, 贾若男¹, 张 茜¹, 张小红¹ (1. 山西农业大学资源环境学院, 山西 晋中 030801; 2. 山西农业大学软件学院, 山西 晋中 030801)

摘要: 研究了不同水分条件对玉米种植全过程中的产量和环境排放的影响以及相应改进措施。利用山西省太谷县 2002—2016 年 15 a 间的气象数据、玉米种植过程的施肥和灌溉数据、土壤数据以及玉米生长发育数据, 采用时间替换空间方法和经本地化校正的 DNDC (denitrification-decomposition) 模型和数值模拟方法, 模拟玉米种植全过程中降水量和施肥量变化下 CO₂、NH₃ 和 N₂O 排放量及硝酸盐淋洗量, 利用生命周期评价方法评价玉米全生长过程对资源消耗和环境排放的定量影响, 分析比较了降水量和资源消耗与环境排放的关系, 并提出不同降水年型的合理施肥量和灌溉量。结果表明: (1) 当降水量处于 300~600 mm 之间时, 降水量与 CO₂ 排放量、硝酸盐淋洗量、N₂O 排放量呈显著正相关 ($P < 0.05$), 与 NH₃ 挥发量呈显著负相关 ($P < 0.05$); (2) 年降水量大于 560 mm (丰水年) 条件下玉米种植全过程的环境影响综合指数为 0.19~0.20, 年降水量为 380~560 mm (平水年) 条件下环境影响综合指数为 0.17~0.27, 年降水量低于 380 mm (枯水年) 条件下的环境影响综合指数在 0.3 以上, 不同降水年型玉米种植全过程对环境的影响依次为枯水年、平水年和丰水年; (3) 数值模拟结果表明降水量小于 380 mm 时, 在施肥量不变条件下, 增加灌溉能够增加产量, 减少排放, 环境影响综合指数降至 0.2 以下; 在无灌溉条件下, 将施肥量减少为 210~315 kg·hm⁻², 环境影响综合指数可降低至 0.2~0.3, 产量降低幅度为 3.15%; 平水年施肥量减少到原施肥量的 80%~85% 时, 产量无显著下降, 但环境影响显著降低。温室效应、富营养化、能源消耗和环境酸化与降水年型相关。水分对玉米种植全过程的环境影响较大, 当水分条件充足时, 籽粒产量高且环境影响较小, 当水分供给不足时, 籽粒产量低且对环境的影响升高。在枯水年建议有灌溉条件的地区增加灌溉量, 无灌溉条件的地区减少施肥量; 在平水年减少施肥量, 可降低玉米生长对环境造成的影响。

关键词: 生命周期评价; DNDC 模型; 玉米; 水分条件

中图分类号: X820.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-4831(2019)11-1396-08

Life Cycle Assessment of the Maize Production Under Different Water Conditions. WU Jin-bo¹, ZHANG Wu-ping²^①, WANG Guo-fang¹, BU Yu-shan¹, JIA Ruo-nan¹, ZHANG Xi¹, ZHANG Xiao-hong¹ (1. College of Resources and Environment, Shanxi Agricultural University, Jinzhong 030801, China; 2. College of Software, Shanxi Agricultural University, Jinzhong 030801, China)

Abstract: For assessing the impacts of different water conditions on maize yield and environmental emissions of maize production, and for identifying the corresponding improvement measures, the meteorological data, and the data of fertilization, irrigation, soil properties as well as the development of maize growth were all collected in Taigu County, Shanxi Province from 2002 to 2016. The emissions of CO₂, NH₃, N₂O and nitrate leaching during the period of maize growing season with changing amounts of rainfall and fertilization were simulated by using the DNDC model. The life cycle assessment approach was applied to quantitatively evaluate the impact of maize growth on the resource use and environmental emissions; Then the relationships between rainfall and the resource consumption and emission were analyzed, and the reasonable amounts of fertilization and irrigation under different rainfall patterns were recommended. (1) When the rainfall ranged from 300 mm to 600 mm, the rainfall was positively correlated with the emissions of CO₂, nitrate leaching and NH₃ volatilization ($P < 0.05$), while it was negatively correlated with N₂O emission. (2) When the rainfall was above 560 mm,

收稿日期: 2019-01-07

基金项目: 山西省重点研发计划重点项目计划(201703D211002-2); 山西省重点研发计划重点项目计划(201703D211002-2-1); 山西省科技攻关项目(20130311008-5)

① 通信作者 E-mail: zwping@126.com

namely abundant rainfall year, the comprehensive impact factor in the whole process of maize production ranged from 0.19 to 0.20, it was in the range of 0.17–0.27 in normal year with the rainfall from 380 to 560 mm, while it was 0.3 in dry year with the rainfall below 380 mm, respectively. The whole process of maize production had much high impacts on the environment in the dry year, followed by the normal year and abundant rainfall year. (3) The results of numerical simulation indicate that when the rainfall was below 380 mm and fertilization rate was fixed, with the increasing of the irrigation amounts, the yield was increased and the environmental emission was reduced, and the comprehensive impact factor declined to less than 0.2. Under rainfed conditions, the comprehensive impact factor will fall to 0.2–0.3 and the yield was only decreased by 3.15% when the fertilization rate was reduced to 210–315 kg · hm⁻²; In the normal year, if the fertilization rate was decreased by 15% to 20%, the yield did not drop remarkably, but the impact on the environment was reduced obviously. Global warming potential, eutrophication potential, energy consumption and land use were correlated with the annual rainfall patterns. Irrigation has a great influence on the environment in the whole process of maize production. The sufficient irrigation led to high yield and less environmental impact, while the shortage of water resulted in low yield and much more environmental impact. Therefore, it is suggested to increase the amount of irrigation in dry years, and to decrease fertilization rate to reduce the environmental impact of maize production in rainfed areas.

Key words: life cycle assessment; denitrification-decomposition (DNDC) model; maize; water condition

近年来,农业的投入和消耗逐年增高,《中华人民共和国气候变化第二次国家信息通报》指出农业活动产生的环境问题越发严重^[1]。2017年中央一号文件提出深入推进农业供给侧结构性改革,要求推行绿色生产方式,增强农业可持续发展能力^[2]。

目前有关作物排放对环境影响评价的研究已有很多,其中生命周期评价(life cycle assessment, LCA)是应用于环境影响评价较为成功的一种方法^[3],且应用广泛。LCA是一种通过收集作物生长全过程的环境排放,按照国际标准及一定权重计算获得结果的方法,可用于全面评价作物生长“从摇篮到坟墓”的环境影响^[4]。评价前提是需要获得足够的排放数据,根据已有研究可总结为实地测量、系数计算和软件模拟3类。实地测量指通过一系列工具测量作物在田间的排放量从而得出相应结果^[5],但仅应用于少量点位测量,耗费时间长,投入人力物力大,不能准确测量每一天的环境排放,使评价准确性降低;系数法指根据已有研究中应用施肥量与相应的排放系数进行运算得出结果^[6],而没有考虑降水年型对作物生长和化肥施用后排放的影响,导致评价结果不确定性可能会增加;软件模拟指输入一系列参数使软件参数能适合当地作物生长环境,从而模拟得出结果^[7],但是在软件模拟应用过程中必须使参数本地化并经过模拟结果验证才能得到适合本地的生长环境和结果。

以山西省太谷县旱作玉米为例,应用DNDC(denitrification-decomposition)软件模型对作物生产过程进行模拟,收集作物的排放种类和排放量^[8]。在生命周期评价中充分考虑降水量对作物长势的影响,分析不同水分条件和环境排放的关系^[9],使

评价结果的可靠性提升,以期寻求在旱作条件下的合理施肥量,为达到环境和经济效益双丰收的平衡提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 DNDC模型

1.1.1 模型介绍

DNDC模型是一个描述农业生态系统中碳和氮生物地球化学过程的计算机模拟模型^[10]。该模型主要由气候、土壤、植被类型和农田管理模块组成,通过研究不同作物在不同环境下发生的化学反应得到一系列产出排放等结果。该模型在国内已得到广泛应用^[11-12]。该模型主要描述了一系列的农作物生长与土壤环境发生的硝化-反硝化作用对环境的影响。DNDC模型由两大部分组成。第1部分包括土壤气候、农作物生长和土壤有机质分解3个子模型,利用生态驱动因子(气候、土壤、植被和人类活动)模拟土壤环境条件(土壤温度、水分、酸碱度、氧化还原电位以及相关化学底物浓度梯度)。第2部分包括硝化作用、反硝化作用和发酵作用3个子模型,模拟土壤环境条件对微生物活动的影响,计算植物-土壤系统中二氧化碳(CO₂)、甲烷(CH₄)、氨(NH₃)、氧化亚氮(N₂O)和一氧化氮(NO)排放。DNDC模型中所采用的函数来自物理学、化学和生物学的经典法则或实验室研究所产生的经验方程^[13]。DNDC模型是一座架在基本生态驱动因子和碳氮生物地球化学循环之间的桥梁。

1.1.2 模型数据来源

在同一年中设置不同的降水环境对作物生长排放进行测量,但是由于受条件所限,耗费人力物

力较大。通过收集山西省太谷县 15 a 的气象数据,利用“以时间换空间”的方法,达到处理效果^[14]。为了提高模拟的准确性,气象数据包括日均降水量、日最高气温、日最低气温、平均风速和地面湿度 5 个指标。在模型中输入所有必要条件并且模拟不同降水量条件下的作物生长。研究区属于盆地地区,土壤属于黏性土壤(表 1)。

表 1 研究区土壤剖面的物理特性

Table 1 Basic physical properties of soil profile in experimental area

深度/cm	密度/(g·cm ⁻³)	土壤 w(黏粒)/%
0~10	1.315 04	12.10
>10~20	1.483 51	12.00
>20~40	1.488 01	10.20
>40~60	1.417 82	10.00
>60~80	1.359 91	17.10

农田管理数据主要来源于对村民耕作方式的问卷调查,调查结果中玉米采用一年一熟制。耕作时间是每年 4 月 28 日前后,收获时间是 10 月 3 日前后。在耕作前需要定量施肥,采用的肥料是玉米专用复合肥,施用量一般为 1 050 kg·hm⁻²,其中 w(N) 为 18%,w(P₂O₅) 为 10%,w(K₂O) 为 12%,牛粪投入量为 75 t·hm⁻²,所有肥料均在播种前一次性施入。

根据以上调查数据以及 DNDC 模型中的作物发育数据,模拟不同水分条件下的玉米生长,模拟

表 2 不同农业生产环节折算标准

Table 2 Conversion criteria of different agricultural production processes

消耗/排放	生产环节	计算标准
矿石(磷矿、钾矿)	磷钾肥生产环节	1 t 磷矿约生产出 0.3 t 的磷肥,1 t 钾矿约生产出 0.38 t 钾肥
能源(煤、电力)	肥料生产环节	生产 1 t 化肥需要 1.55 t 标准煤和 1 030 kW·h 电力
SO ₂ 、CO、CO ₂ 、NO _x	肥料阶段(能源消耗)	1 t 标准煤排放系数: SO ₂ (0.075)、CO(0.015)、CO ₂ (2.5)、NO _x (0.037 5)

作物生长阶段的环境排放数据主要来自 DNDC 模型模拟结果。产生的环境影响主要为耕种、灌溉、施肥等管理措施所引起的各项污染物排放。

1.2.3 环境影响评价

生命周期环境影响评价主要是对识别出的环境影响进行定性或定量的表征评价,分为特征化、标准化和加权评估 3 个步骤^[19]。

(1) 特征化。特征化是对资源消耗和环境排放清单进行分类并计算环境影响潜力的过程。该研究仅考虑农产品生命周期的能源消耗、温室气体排放、环境酸化和富营养化 4 种环境影响类型。以生产 1 t 玉米为评价单元,采用当量系数对排放进行折算。温室气体排放以 CO₂ 为当量标准,CH₄、N₂O

过程中不受其他环境因素影响,每年的施肥量和耕作方式相同,并收集模拟结果,主要包括产量和排放等数据。

1.2 生命周期评价(LCA)

自 20 世纪 90 年代以来,LCA 被逐渐应用于农业^[15]。LCA 在农业上主要评价的是作物从肥料原料开采到作物收获全部过程对环境的消耗。该方法评价从作物原料开采到作物生长最终处理全过程所进行的跟踪和定量分析^[16],已经被纳入国际 ISO 14040 体系标准。目前评价过程包括目标定义与确定范围、清单分析、环境影响评价和改进评价^[17]。

1.2.1 目标定义与确定范围

以太谷县生产 1 t 玉米为评价单元,将玉米生产所需肥料生产到作物收获全过程对环境产生的消耗作为评价对象,以评价玉米生长对环境的影响。

1.2.2 清单分析

LCA 的清单分析主要包括两个阶段,即肥料生产环节产生环境消耗的阶段和作物生长环节的能耗排放阶段。太谷县位于黄土高原地区,玉米种植方式为一年一熟制,在评价玉米生产每公顷的环境排放时对全年农作物环境影响进行核算。

在原料开采阶段主要评价内容是肥料矿石开采和制肥过程中产生的电力消耗和能源消耗。排放系数主要来源于相关研究^[18](表 2)。

和 CO 当量系数分别为 21、310 和 2;富营养化以 PO₄³⁻ 为当量标准,N、NO_x 和 NH₃ 当量系数分别为 0.42、0.13 和 0.35;环境酸化以 SO_x 和 SO₂ 为当量标准,NH₃ 当量系数为 1.88,NO_x 当量系数为 0.7^[20]。

(2) 标准化。标准化过程指建立标准化基准,在标准化过程中主要将环境排放分为环境酸化、温室效应、能源消耗和富营养化 4 类,并为其提供可比较的标准。拟采用 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,处理方法为

$$R_x = E_{P(x)} / S_{2000} \quad (1)$$

式(1)中,R_x 为第 x 种潜在环境影响标准化结果;E_{P(x)} 为系统对第 x 种环境影响因子的潜值即特征化

结果; S_{2000} 为选定的 2000 年基准值^[21]。

(3) 加权。通过综合各类环境影响指数得到一个可比较的评价结果, 这需要确定各种环境影响类型的权重。根据王明新等^[21]、梁龙等^[22] 设置的权重系数并进行调整, 基准值和权重值见表 3。

表 3 标准化加权影响值设置

Table 3 Standardized weighted impact value settings

环境影响类型	单位	标准化基准值 / (人·hm ⁻²)	权重
能源消耗	MJ	2 590 457	0.15
全球变暖	kgCO ₂ -eq	6 869	0.18
环境酸化	kgSO ₂ -eq	56.14	0.20
富营养化	PO ₄ ³⁻ -eq	10.7	0.18
土地占用	m ²	934.84	0.15
淡水灌溉	m ³	479	0.14

1.2.4 改进评价

通过对环境影响进行标准化和加权处理, 将环境影响量化为一个标准指数。该指数表示对环境影响的大小, 对环境影响较大的情况可以在农产品

整个生命周期内寻求减少能源消耗、原材料使用和污染物排放方式, 提出改进措施并做进一步评价。

2 结果与分析

2.1 DNDC 模型模拟结果

玉米产量和地表温度的实测值与模拟值拟合结果见图 1。对 2002—2016 年太谷县玉米生长进行模拟, 可以得出作物在生长过程中的排放和最终产量, 以调查产量为参考, 模拟得到的年均产量为 9 114.37 kg·hm⁻², 模拟产量结果与实际产量较相符。将模型模拟值与实际测得的土壤表层温度进行对比分析的结果表明, 在作物期内模拟温度能够较好地与实际温度吻合, 能够用于描述降水前后地表温度变化趋势; 但是两者也存在一定差异, 主要原因是在模拟过程中, 没有考虑作物茎叶对阳光的阻挡作用, 导致实测值和模拟值存在部分差异。但总体拟合度较高, 决定系数(R^2) 达到 0.925 5, 实现了模型参数的本地化(图 1)。

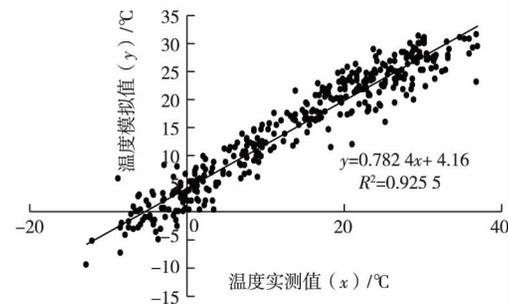
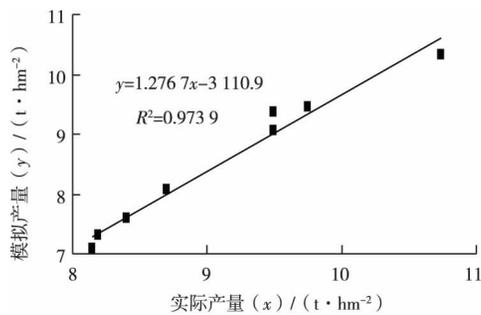


图 1 玉米产量和地表温度的实测值与模拟值

Fig. 1 Relationships between the measured and simulated values of maize yield and surface temperature

2.2 清单分析

在作物生长前期主要的环境排放源是肥料投入, 投入的肥料为玉米专用复合肥, 根据表 2 中折算方式折算可知每公顷玉米种植对环境 NO_x、CO、SO₂ 和 CO₂ 排放量分别为 2.020、0.808、4.039 和 134.652 kg·hm⁻²。由此可见, CO₂ 排放量显著高于其他几类, 对环境的影响大。

在作物生长阶段根据降水年型对排放清单进行划分。根据 GB/T 50095—98《水文基本术语和符号标准》计算可知, 2002—2016 年期间 2006、2008 和 2010 年降水量低于 380 mm, 为枯水年; 2007 和 2016 年降水量在 560 mm 以上, 为丰水年; 其余年份降水量在 380~560 mm 之间, 为平水年。玉米生长雨热同期, 因此可在很大程度上缓解作物需水量

(表 4)。

表 4 基于 DNDC 模型不同降水年型玉米生长阶段的环境排放均值

Table 4 Average emissions under different precipitation types based on DNDC model

降水年型	环境排放均值/(kg·hm ⁻²)			
	CO ₂	硝酸盐淋洗	NH ₃ 挥发	N ₂ O
枯水年	1 004.495*	10.41*	37.66*	0.320**
平水年	1 015.103**	11.62**	32.37**	0.323**
丰水年	1 017.217*	11.80**	31.70**	0.365**

* 表示差异显著 ($P < 0.05$), ** 表示差异极显著 ($P < 0.01$)。

由表 4 可知, 在不同降水年型, 玉米生长阶段对环境产生的排放量也不相同。在玉米生长阶段 CO₂ 排放量高于其他 3 类, 枯水年 CO₂ 排放量低于平水年和丰水年, 变化幅度为 1% 和 1.2%, 枯水年硝酸

盐淋洗量比丰水年低 11.8%，枯水年 NO₂ 排放量比丰水年低 12.3%，丰水年 NH₃ 挥发比枯水年低 15.8%。降水量与 NH₃ 挥发呈反比关系。

2.3 环境影响评价

2.3.1 标准化

利用 LCA 方法对环境影响进行标准化,并将其与作物期内降水量进行分析比较的结果表明,降水量大小影响环境排放。当降水量降低时,能源消耗、富营养化、温室气体排放和环境酸化的标准值都较高;当降水量增高时,其对环境的影响值则会降低。图 2 显示降水量分别与能源消耗、富营养化、环境酸化和温室气体排放呈反比关系。

环境酸化指氮氧化物和硫氧化物的排放,主要发生在化肥原材料开采和提取阶段($R^2 = 0.4615$);能源消耗指在肥料生产阶段通过折算后得到的所消耗标准煤需要的能源消耗($R^2 = 0.7276$);温室效应指温室气体的排放,在降水量较高的平水年和丰水年,玉米产生的环境排放较低,其温室气体排放量较小($R^2 = 0.6178$);富营养化指氮氧、氮氢物质的排放,受作物生长的排放影响,在降水较为充沛的年份,生产 1 t 玉米所产生的排放量较小,在降水不足的年份生产 1 t 玉米排放量则较大,对环境的影响也较大($R^2 = 0.6285$)。

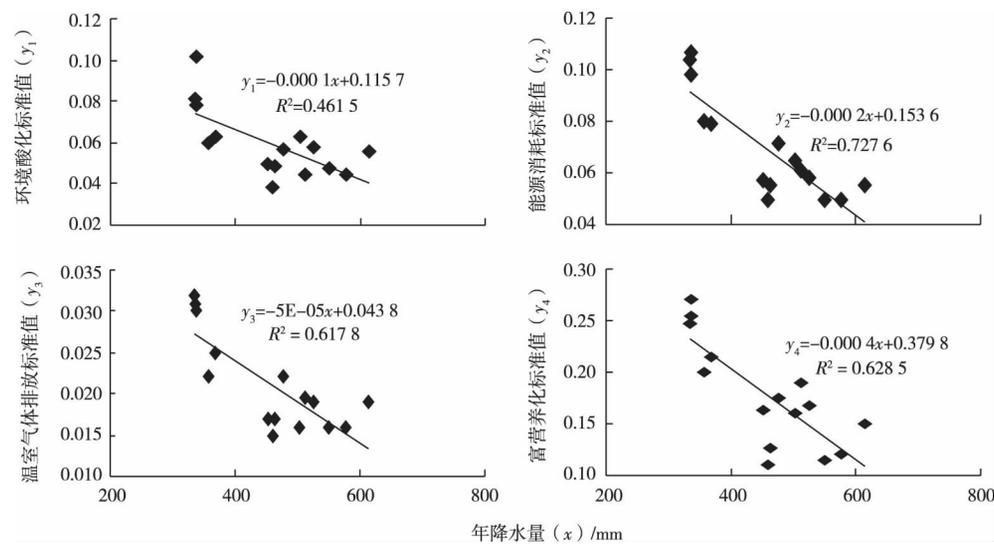


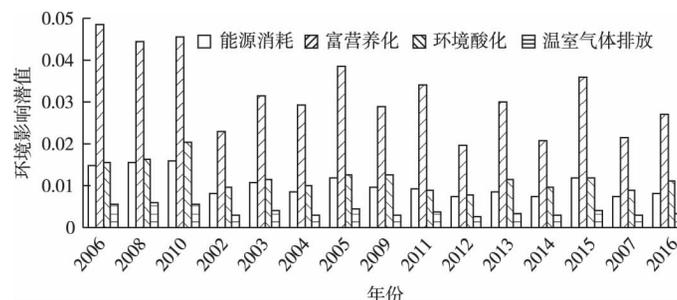
图 2 不同年份降水量与环境评价指标潜力的关系

Fig. 2 Relationship between different annual precipitation and environmental assessment indicators potentiality

2.3.2 加权

对各项指标标准化后进行加权。结果显示,丰水年、平水年和枯水年玉米种植全过程的环境影响综合指数分别为 0.19~0.20、0.17~0.27 和 >0.3, 不同降水年型玉米种植全过程对环境的影响由大

到小依次为枯水年、平水年和丰水年。不同环境影响类型对环境造成的影响由大到小依次为富营养化、环境酸化、能源消耗和温室气体排放,其均值分别为 0.0319、0.0119、0.0104 和 0.0038。枯水年生产 1 t 玉米产生的环境排放比其他降水年型高(图 3)。



2006、2008 和 2010 年为枯水年,2007 和 2016 年为丰水年,其他年份为平水年。

图 3 不同降水年型整个玉米生命周期生态环境影响潜值的加权结果

Fig. 3 Weighted results of potential ecological environmental impact for maize under different precipitation types

枯水年能源消耗、富营养化、环境酸化和温室气体排放均值分别为 0.015 5、0.046 3、0.017 4 和 0.005 6, 平水年 4 种环境影响类型均值分别为 0.009 0、0.029 2、0.010 6 和 0.003 4, 丰水年均值分别为 0.007 9、0.024 3、0.010 0 和 0.003 2。

2.4 改进情况及评价

由实际调查结果可知 2008 和 2010 年产量较低, 并且在其他生育期降水量不变的前提下作物拔节期和抽雄期两个阶段降水量较小, 影响了作物的最终产量。通过灌溉来弥补降水不足, 并且在保证 LCA 综合环境影响指数较小的前提下确定灌溉量。设置灌溉定额分别为 400、600、800、1 000、1 200 和 1 400 $t \cdot hm^{-2}$ 的 6 个处理, 于拔节期和抽雄期各灌溉 1 次, 每次灌溉量均分别为各处理灌溉定额的 50%。

在不灌溉的情况下利用 LCA 方法对 DNDC 模型的环境排放结果进行评价, 结果显示, 降水量较低年份对环境的影响较大, 降水量与污染排放量呈负相关。在改进措施中, 由于有灌溉处理, 所以 LCA 结果中增加淡水灌溉影响因素, 灌溉水量越大, 淡水灌溉的影响值就越高。由此可见, 不同的灌溉水量对玉米产量的影响较大, 当灌水量为 400~800 $t \cdot hm^{-2}$ 时, 玉米产量变化较大; 当灌水量大于 800 $t \cdot hm^{-2}$ 时, 其对产量的影响则变小(图 4)。

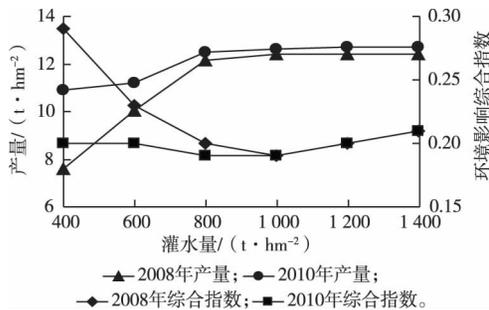


图 4 2008 和 2010 年不同灌水量条件下玉米产量和环境影响综合指数

Fig. 4 Comprehensive index of maize yield and environmental impact under different irrigation amounts in 2008 and 2010

在不同灌溉量条件下环境影响综合指数也随产量变化而变化。当灌水量较低时, 玉米产量较低, 环境影响却较高; 当灌溉量为 800~1 000 $t \cdot hm^{-2}$ 时环境影响降到最低; 随着灌溉量的持续增加, 环境影响综合指数不减反增, 且当灌溉量大于 1 000 $t \cdot hm^{-2}$ 时, 作物产量变化幅度降低。综合上述模拟

和分析结果发现, 当玉米生育期处于枯水年时, 产量降低, 可以用灌溉来弥补降水不足; 当灌溉量大于 1 000 $t \cdot hm^{-2}$ 时, 如果持续对其进行灌溉, 产量上升幅度减小, 作物生产成本增加, 同时对环境的负荷随之上升。所以在改进措施中建议在枯水年型用灌溉来缓解降水不足, 选取 2008 年(降水量为 335.30 mm) 和 2010 年(降水量为 336.70 mm) 作为模拟对象, 以灌溉量为 800~1 000 $t \cdot hm^{-2}$ 较为合适。

对于没有灌溉条件的地区, 则适量减少肥料施用, 并利用 DNDC 模型进行模拟。2008 年太谷县降水量低于多年平均降水量, 属于枯水年。枯水年降水量对作物生产造成很大影响, 不仅产量降低, 且在同等施肥条件下其对环境的影响较大。依据上述研究结果将 2008 年作为模拟对象, 设置施肥量为 735、525、420、315、210 $kg \cdot hm^{-2}$ 5 个水平和 1 个对照(不施肥)。模拟结果表明: 通过减少化肥使用量, 其环境影响会逐渐降低, 环境影响综合指数从原施肥量处理的 0.35 降至 0.25, 当施肥量降到原施肥量的 20%~30% 时, 环境排放降到最低, 且产量降低 180 $kg \cdot hm^{-2}$, 产量较原施肥量处理降低 3.15%, 降低幅度不明显(图 5)。

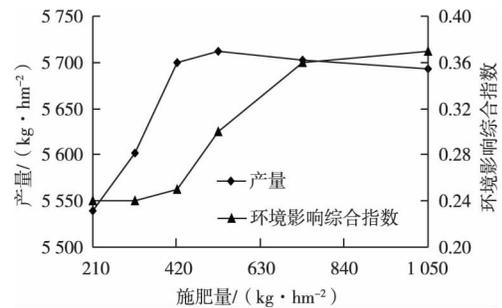


图 5 枯水年减量施肥后玉米产量和环境影响综合指数

Fig. 5 Maize yield and environmental impact index in dry year after fertilizer reduction

在平水年, 模拟减少施肥量, 玉米产量变化不大, 但环境影响综合指数降低。当施肥量为原施肥量的 80%~85% 时, 环境影响和产量达到最优效果, 此与 WU 等^[23] 研究结论一致, 说明在平水年应该降低施肥量。在丰水年通过减少肥料施用发现环境影响综合指数并没有降低, 反而有上升趋势, 表明在丰水年目前的施肥量比较合适。

3 讨论

在排放量模拟结果中, 降水量分别与 CO_2 排放

量、硝酸盐淋洗和 N_2O 排放量呈正相关,降水量与 NH_3 排放量呈负相关。这与张保成^[24] 研究结果一致。这是因为土壤湿度直接影响土壤微生物活性和土壤通气性,进而影响土壤硝化-反硝化作用以及 N_2O 在土壤中的传输和向大气的扩散。在一定范围内,土壤含水量提高可增加矿化速率和养分有效性,微生物活性增强,耗氧量加大,易形成厌氧区域,从而抑制土壤硝化作用,促进土壤反硝化作用。因此,在枯水年 CO_2 排放、硝酸盐淋洗、 N_2O 排放低于平水年和丰水年。当土表、田面水表面或植物外体空间氨分压大于其上方空气中氨分压时, NH_3 挥发过程即可发生,但 NH_3 又极易溶于水,当降水较多时, NH_3 因溶于水而减少挥发。

目前,对于农业环境方面的研究主要集中在农业肥料种类和用量与环境排放的关系上^[25],通过设定不同条件收集模拟的环境排放数据,对农艺施肥做出具体指导。采用 LCA 方法评价作物生长全过程的环境影响,在不同水分条件下玉米种植过程对环境的影响不同。当水分条件充足时,玉米种植的环境影响综合指数为 0.17~0.27。当水分缺少时,环境影响综合指数会升高至 0.3 以上;这主要是因为在水分条件较差的年份,肥料利用率降低,肥料发生蒸发,没有作用于作物生长过程中,最终导致产量降低^[26],在评价结果中单位产量的环境排放影响则会上升,对环境造成更大影响。当水分充足时,肥料随水分下渗到土壤中,虽然在这一过程中会发生反硝化作用,但是更多地则是肥料被作物生长所吸收,单位产量环境影响降低。

研究结果表明在枯水年通过增加灌溉量能够提高产量并且减轻环境影响。山西位于黄土高原地区东部,降水量少,75%的地区没有灌溉条件,大部分地区灌溉条件难以满足。在不增加灌溉的前提下枯水年减少施肥量,能够提高肥料利用效率,降低成本且减少环境污染。如果增加天气预报的准确性并且根据降水等大量数据来分析下一年的降水年型,可以指导农业调节施肥量,对降低农业生产成本和减轻环境负荷有重要意义。

农业种植过程对环境的影响不仅仅是水分条件的单一作用效果,农田污染排放受多种因素影响,肥料的过度使用对环境的影响会逐渐增高^[27]。此外,在玉米种植过程中,株间距、犁地方式与深度、种植时间等都会对玉米产量产生不同影响^[28]。因此,仍然需要多次、多条件的玉米种植模拟实验。

4 结论

(1) LCA 结果表明玉米产量与降水量呈正相

关,玉米地污染排放与降水量呈负相关,即:降水量高,则玉米产量高,环境影响指数低;降水量低,则产量较低,环境影响指数高。

(2) 通过改进措施进行模拟的结果表明:在平水年施肥量应减少至当前施肥量的 80%~85%,在作物产量不会大幅降低的同时环境影响显著降低;在枯水年当灌溉量达 $800 \sim 1\,000 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时可提高产量并降低对环境的影响;对于无灌溉条件的地区,施肥量减至原来施肥量的 20%~30%时,产量降低 $180 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,产量降低不明显,而环境影响显著降低。

参考文献:

- [1] 苏伟. 中华人民共和国气候变化第二次国家信息通报 [M]. 北京: 中国经济出版社, 2013: 4-5, 43-77.
- [2] 习银生, 高鸣, 罗兴寰, 等. 中国玉米产业供给侧结构性改革述略 [J]. 湖南农业大学学报(社会科学版), 2018, 19(5): 19-26. [XI Yin-sheng, GAO Ming, LUO Xing-huan, et al. Research of the Supply-Side Structural Reform of China's Corn Industry [J]. Journal of Hunan Agricultural University (Social Sciences), 2018, 19(5): 19-26.]
- [3] 王寿兵, 陈雅敏, 张伟倩, 等. LCA 中土地利用生态影响评价方法初探 [J]. 复旦学报(自然科学版), 2012, 51(3): 382-387. [WANG Shou-bing, CHEN Ya-min, ZHANG Wei-qian, et al. Preliminary Study on the Evaluation Method of the Ecological Impact Assessment of Land Use in Life Cycle Assessment (LCA) [J]. Journal of Fudan University (Natural Science), 2012, 51(3): 382-387.]
- [4] 王效琴, 吴庆强, 周建斌, 等. 设施番茄生产系统的环境影响生命周期评价 [J]. 环境科学学报, 2014, 34(11): 2940-2947. [WANG Xiao-qin, WU Qing-qiang, ZHOU Jian-bin, et al. Life Cycle Assessment of Tomato Production in Greenhouses [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2014, 34(11): 2940-2947.]
- [5] 邓长芳, 罗珠珠, 李玲玲, 等. 黄土高原雨养农业区不同种植模式土壤温室气体排放特征 [J]. 草业学报, 2018, 27(9): 1-13. [DENG Chang-fang, LUO Zhu-zhu, LI Ling-ling, et al. Characterization of Greenhouse Gases Emissions From Rainfed Soils in Different Cropping Systems on the Loess Plateau [J]. Acta Prataculturae Sinica, 2018, 27(9): 1-13.]
- [6] 徐强, 胡克林, 李季, 等. 华北平原不同生产模式设施蔬菜生命周期环境影响评价 [J]. 环境科学, 2018, 39(5): 2480-2488. [XU Qiang, HU Ke-lin, LI Ji, et al. Life Cycle Environmental Impact Assessment on Different Modes of Greenhouse Vegetable Production in the North China Plain [J]. Environmental Science, 2018, 39(5): 2480-2488.]
- [7] JONES J, HOOGENBOOM G, PORTER C H, et al. The DSSAT Cropping System Model [J]. European Journal of Agronomy, 2003, 18(3/4): 235-265.
- [8] 谢海宽, 江雨倩, 李虎, 等. DNDC 模型在中国的改进及其应用进展 [J]. 应用生态学报, 2017, 28(8): 2760-2770. [XIE Hai-kuan, JIANG Yu-qian, LI Hu, et al. Modification and Application of

- the DNDC Model in China [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2017, 28(8): 2760-2770.]
- [9] 李晓林, 陈新平, 崔俊霞, 等. 不同水分条件下表层施磷对小麦吸收下层土壤养分的影响 [J]. *植物营养与肥料学报*, 1995, 1(2): 40-46. [LI Xiao-lin, CHEN Xin-ping, CUI Jun-xia, *et al.* Uptake of Nutrients From Subsoil by Wheat as Affected P Supply Under Different Soil Moistures [J]. *Plant Nutrition and Fertilizing Science*, 1995, 1(2): 40-46.]
- [10] GILTRAP D L, LI C S, SAGGAR S. DNDC: A Process-Based Model of Greenhouse Gas Fluxes From Agricultural Soils [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2010, 136(3/4): 292-300.
- [11] 李虎, 王立刚, 邱建军, 等. 基于 DNDC 模型的华北典型农田氮素损失分析及综合调控途径 [J]. *中国生态农业学报*, 2012, 20(4): 414-420. [LI Hu, WANG Li-gang, QIU Jian-jun, *et al.* Nitrate Loss Simulated With DNDC Model and Control Technologies in Typical Cropland of North China [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2012, 20(4): 414-420.]
- [12] 刘宁, 韩娟, 刘露露, 等. 应用 DNDC 模型模拟沟垄集雨种植对陕西省玉米产量的影响 [J]. *西北农业学报*, 2016, 25(5): 691-701. [LIU Ning, HAN Juan, LIU Lu-lu, *et al.* Effects of Simulation of Rainfall Harvesting With Ridge and Furrow System on Maize Yield in Shaanxi Province by Use of DNDC Model [J]. *Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica*, 2016, 25(5): 691-701.]
- [13] WATSON A, STEPHEN K D, NEDWELL D B, *et al.* Oxidation of Methane in Peat: Kinetics of CH₄ and O₂ Removal and the Role of Plant Roots [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1997, 29(8): 1257-1267.
- [14] 王春梅, 刘艳红, 邵彬, 等. 量化退耕还林后土壤碳变化 [J]. *北京林业大学学报*, 2007, 29(3): 112-119. [WANG Chun-mei, LIU Yan-hong, SHAO Bin, *et al.* Quantifying the Soil Carbon Changes Following the Afforestation of Former Arable Land [J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2007, 29(3): 112-119.]
- [15] HEIJUNGS R. Identification of Key Issues for Further Investigation in Improving the Reliability of Life-Cycle Assessments [J]. *Journal of Cleaner Production*, 1996, 4(3): 159-166.
- [16] 胥刚, 王进贤, 林慧龙, 等. 基于生命周期评价的相同食物当量玉米与紫花苜蓿生产环境影响比较研究 [J]. *草业学报*, 2017, 26(3): 33-43. [XU Gang, WANG Jin-xian, LIN Hui-long, *et al.* Use of Life Cycle Assessment Methodology to Compare Environmental Impacts of the Same Food Equivalent for Corn and Alfalfa Production [J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2017, 26(3): 33-43.]
- [17] 刘夏璐, 王洪涛, 陈建, 等. 中国生命周期参考数据库的建立方法与基础模型 [J]. *环境科学学报*, 2010, 30(10): 2136-2144. [LIU Xia-lu, WANG Hong-tao, CHEN Jian, *et al.* Method and Basic Model for Development of Chinese Reference Life Cycle Database [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2010, 30(10): 2136-2144.]
- [18] 王利. 中国化肥产业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.
- [19] 罗燕, 乔玉辉, 吴文良, 等. 东北有机及常规大豆对环境影响的生命周期评价 [J]. *生态学报*, 2011, 31(23): 185-193. [LUO Yan, QIAO Yu-hui, WU Wen-liang. *Environment Impact Assessment of Organic and Conventional Soybean Production With*
- LCA Method in China Northeast Plain [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(23): 185-193.]
- [20] 彭小瑜, 吴喜慧, 吴发启, 等. 陕西关中地区冬小麦-夏玉米轮作系统生命周期评价 [J]. *农业环境科学学报*, 2015, 34(4): 809-816. [PENG Xiao-yu, WU Xi-hui, WU Fa-qi, *et al.* Life Cycle Assessment of Winter Wheat-Summer Maize Rotation System in Guanzhong Region of Shaanxi Province [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2015, 34(4): 809-816.]
- [21] 王明新, 闵慧, 夏训峰, 等. 聊城冬小麦测土配方施肥项目生命周期环境效益分析 [J]. *环境科学学报*, 2012, 32(2): 506-512. [WANG Ming-xin, MIN Hui, XIA Xun-feng, *et al.* Life Cycle Environmental Benefit Analysis of Soil Testing and Formulated Fertilization Project for Winter Wheat in Liaocheng City [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2012, 32(2): 506-512.]
- [22] 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. [LIANG Long, CHEN Yuan-quan, GAO Wang-sheng, *et al.* Life Cycle Environmental Impact Assessment in Winter Wheat-Summer Maize System in North China Plain [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(8): 1773-1776.]
- [23] WU H J, WANG S, GAO L M, *et al.* Nutrient-Derived Environmental Impacts in Chinese Agriculture During 1978-2015 [J]. *Journal of Environmental Management*, 2018, 217: 762-774.
- [24] 张保成. 水肥供应对玉米-小麦轮作系统土壤 N₂O 排放的影响 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2017. [ZHANG Bao-cheng. *Effects of Water and Fertilizer Supply on Soil N₂O Emissions in Maize-Wheat Rotation System* [D]. Yangling: Northwest A & F University, 2017.]
- [25] JU X T, XING G X, CHEN X P, *et al.* Reducing Environmental Risk by Improving N Management in Intensive Chinese Agricultural Systems [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2009, 106(9): 3041-3046.
- [26] 张伟纳, 刘宇娟, 董成, 等. 氮肥运筹对潮土冬小麦/夏玉米产量及氮肥利用率的影响 [J]. *土壤学报*, 2019, 56(1): 165-175. [ZHANG Wei-na, LIU Yu-juan, DONG Cheng, *et al.* Effect of Nitrogen Application on Yield and Nitrogen Use Efficiency of Winter Wheat and Summer Maize in Fluvo-Aquic Soil [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2019, 56(1): 165-175.]
- [27] 蔡佳佩, 朱坚, 彭华, 等. 有机肥施用对田面水氮磷流失风险的影响 [J]. *环境科学研究*, 2019. DOI: 10.13198/j.issn.1001-6929. 2019.03.16. [CAI Jia-pei, ZHU Jian, PENG Hua, *et al.* Effects of Organic Fertilization on the Risk of Nitrogen and Phosphorus Loss in Soil Surface Water [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2019. DOI: 10.13198/j.issn.1001-6929. 2019.03.16.]
- [28] 白国平. 山西省玉米生产现状与发展对策 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2007. [BAI Guo-ping. *Current Status of Maize Production and Its Developmental Strategy in Shanxi Province* [D]. Yangling: Northwest A & F University, 2007.]

作者简介: 吴晋波(1991—), 男, 山西阳曲人, 硕士生, 主要研究方向为农业环境技术。E-mail: 1093703347@qq.com

(责任编辑: 李祥敏)