

DOI: 10.11766/trxb201809120312

基于LCA分析的间作小麦土壤酸化气体排放*

任家兵¹ 汤利^{1†} 耿川雄^{1,2} 肖靖秀¹ 郑毅¹

(1 云南农业大学资源与环境学院, 昆明 650201)

(2 云南省农业科学院农业环境资源研究所, 昆明 650201)

摘要 为综合分析小麦蚕豆间作的环境酸化效应以及产量优势, 通过2个试验点为期2年(A和B试验点: 2014—2016年)的田间定位试验, 分析比较了小麦蚕豆间作产量以及基于生命周期评价(Life cycle assessment, LCA)的能源消耗、环境酸化等指标的差异。结果表明, 两个试验点的间作小麦产量均显著高于单作, 平均增幅达到了22.04%, 土地当量比(LER)均大于1, 表现出明显的间作优势。与单作小麦相比, 间作小麦的能源消耗和环境酸化影响指数较单作小麦分别平均减少了18.59%和17.45%, 硫氧化物(SO_x)、氨气(NH₃)和氮氧化物(NO_x)酸化气体分别平均减少了17.42%、17.68%和17.82%, 间作小麦的能源消耗和环境酸化的环境影响减缓潜力平均增加了18.96%和17.45%。表明小麦蚕豆间作可显著提高产量, 减少酸化气体排放, 具有明显的间作优势。

关键词 小麦蚕豆间作; 小麦产量; 环境酸化潜值; 酸化气体; LCA分析

中图分类号 S153.1 **文献标识码** A

随着环境酸化问题的日益严重, 大气中硫、氮排放量在二十世纪持续增加, 达到了工业化前的700%和540%^[1], 这不仅改变了硫、氮格局, 加速了大气酸沉降^[2], 更加剧了我国土壤酸化的严重程度^[3]。因此, 如何减少氮素损失, 控制SO₂、NH₃等酸化气体的排放量, 构建一种协调农学、经济和环境优化的种植管理模式, 以更低的环境代价实现作物高产, 对农业的可持续发展尤为重要。

生命周期评价(Life cycle assessment, LCA)作为环境影响评价的一种新方法, 不仅能对产品生产当前的环境冲突进行有效的量化评价, 而且能对产品全过程所涉及的环境问题进行分析^[4], 是有效的环境管理工具之一。已有不少研究从多个方面^[5-9]表明了生命周期评价在农业环境影响评估上的优势, 徐强等^[4]及郭金花^[9]结合生命周期评价

分析了不同种植模式设施蔬菜的环境影响指数, 梁龙^[7]和贡婷婷^[10]基于生命周期评价比较了冬小麦-夏玉米轮作系统的最佳施肥处理, 并指出环境酸化是玉米生命周期环境影响较大的潜在因素^[11]。

间套作通过利用作物不同的生长习性和生理特性, 形成不同时空生态位互补的复合群体。与单作相比, 合理间作可以显著提高粮食单产^[12-13], 控制病虫害^[14-15], 提高养分资源利用效率^[16], 并能够降低土壤中硝态氮的累积^[17]。已有研究表明, 玉米/大豆、玉米/豌豆等间作体系能有效控制土壤中氮氧化物的排放^[18-21], 但有关小麦蚕豆间作体系下单间作作物的酸化气体排放等环境影响尚未有系统报道。因此, 本文以云南普遍种植的小麦/蚕豆体系为研究对象, 拟通过田间试验比较云南不同区域小麦蚕豆间作体系的产量, 并基于生命周

* 国家自然科学基金项目(41361065, 31760615)和云南省科技计划重点项目(2015FA022)资助 Support by the National Natural Science Foundation of China (Nos. 41361065 and 31760615) and the Key Natural Science Foundation of Yunnan Province in China (No. 2015FA022)

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail: ltang@ynau.edu.cn

作者简介: 任家兵(1986—), 男, 河南沁阳人, 博士研究生, 主要研究养分资源高效利用。E-mail: 415685073@qq.com

收稿日期: 2018-09-12; 收到修改稿日期: 2019-01-24; 优先数字出版日期(www.cnki.net): 2019-03-07

期评价,分析单间作体系酸化气体排放的差异,综合探讨小麦蚕豆间作的产量优势及其酸化气体减排效果,以期为实现粮食增产、养分资源高效利用和环境友好提供一定的科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

2014—2016年在两个试验点开展田间定位试

验, A点:云南农业大学水资源与环境利用工程中心试验基地(25° 07' N, 102° 45' E), 年均温15 °C, 年均降水量1 186 mm, 年均日照时数2 200 h, 供试小麦为云麦42, 蚕豆为玉溪大粒豆; B点:云南省昆明市寻甸县云南农业大学实验基地(23° 32' N, 102° 02' E), 年平均温14.7 °C, 年均降水量1 040 mm, 年均日照时数2 617.4 h, 供试小麦为云麦52, 蚕豆为玉溪大粒豆。供试土壤基本理化性状见表1。

表1 供试土壤基本理化性状

Table 1 Basic physical and chemical properties of the soil

试验点 Test site	pH	有机质 OM/(g·kg ⁻¹)	碱解氮 Alkalytic N/(mg·kg ⁻¹)	有效磷 Available P/(mg·kg ⁻¹)	速效钾 Readily available K/(mg·kg ⁻¹)
A	6.65	29.50	175.9	16.44	105.9
B	7.18	35.05	80.02	16.97	146.0

1.2 试验设计

两个试验点均采用随机区组设计。设置小麦与蚕豆间作(I)、小麦单作(MW)、蚕豆单作(MB)三种种植模式,重复3次,随机排列, A试验点小区面积20 m² (5 m × 4 m), B试验点小区面积32.4 m² (5.4 m × 6 m)。

供试肥料为尿素(464 g·kg⁻¹)、普通过磷酸钙(140 g·kg⁻¹)、硫酸钾(500 g·kg⁻¹),按照当地推荐施肥量施用,磷肥(P₂O₅: A 75 kg·hm⁻²; B 90 kg·hm⁻²)和钾肥(K₂O: A 75 kg·hm⁻²; B 90 kg·hm⁻²)全部作为基肥施入,氮肥(N: A 225 kg·hm⁻²; B 180 kg·hm⁻²)在小麦拔节期追肥一次,基追比为1:1,不施有机肥。蚕豆氮肥仅施基肥,即A点112.5 kg·hm⁻², B点90 kg·hm⁻²。

按照当地常规技术措施进行肥水管理。

1.3 样品采集与分析

在小麦的成熟期依据划定的产区进行测产,全生育期内产区不进行采样操作,收获麦穗后,进行脱粒,测定等面积的单、间作小麦籽粒产量。

1.4 生命周期评价分析方法

本研究以生产1 000 kg小麦为评价的功能单元,研究单、间作小麦从原材料生产至小麦收获过程的资源消耗和酸化气体排放。本研究定义的边界包括了农资(化肥、柴油、电力)生产和小麦栽培(翻地、施肥、灌溉、收获)各过程使用能源

的生产和消耗,不包括农用机械的生产、农资物品运输和消费者消费的过程。本研究的能源生产和使用过程的环境影响指数参照梁龙^[7]的研究,依据陈新平和张福锁^[22]的研究确定氨挥发系数和硝态氮淋洗系数,依据Brentrup和Kusters^[5]的研究结果确定N₂O的直接和间接挥发系数,计算好每生产1 000 kg单位小麦产量所消耗的能量和原材料用量后,结合各原材料生产和使用过程中的环境影响系数,计算出单、间作小麦的环境酸化生命周期清单,并对酸化气体进行特征化和标准化处理,进一步采用王明新等^[6]设置的权重系数进行加权评估,分析间作小麦较单作小麦的环境影响减缓潜力。

本研究中单位产量所需的各种农资物质投入如表2所示,单位农资物质(化肥、柴油、电力)消耗所产生的酸化气体排放清单及农田系统中单位氮肥以NH₃和NO_x形式的排放量如表3所示。

1.5 数据处理与分析

试验数据用Microsoft Excel 2007整理后,用SPSS 20.0在0.05水平进行单因素方差分析(ANOVA)和统计分析。

土地当量比(LER)指同一农田中两种或两种以上作物间作的收益与各个作物单作时收益的比率,用来衡量间作相对于单作的增产程度,计算公式如下:

表2 单间作小麦单位产量 (1 000 kg) 物质投入

Table 2 Input inventory per unit area of intercropped and monocropped wheat

处理 Treatment		N /(kg·t ⁻¹)	P ₂ O ₅ /(kg·t ⁻¹)	K ₂ O /(kg·t ⁻¹)	灌溉水 Water /(m ³ ·t ⁻¹)	电力 Electricity /(kW·t ⁻¹)	柴油 Diesel oil /(kg·t ⁻¹)	农药 Pesticide /(kg·t ⁻¹)
2015 (A)	MW	63.74	21.25	21.25	212.5	84.99	0	0
	IW	52.82	17.61	17.61	176.1	70.42	0	0
2016 (A)	MW	53.44	17.81	17.81	197.9	79.10	0	0
	IW	48.18	16.06	16.06	178.4	71.31	0	0
2015 (B)	MW	43.3	21.67	21.67	288.9	126.4	4.09	0
	IW	30.97	15.48	15.48	206.4	90.31	2.92	0
2016 (B)	MW	34.34	17.16	17.16	286.2	109.7	0.95	0
	IW	29.09	14.54	14.54	242.4	92.92	0.81	0

注：MW代表单作小麦，IW代表间作小麦。下同 Note: MW indicate monocropped wheat, IW indicate intercropped wheat. The same below

表3 农资（化肥、柴油、电力）和农作系统的SO_x、NH₃和NO_x排放量^[5, 7, 22]Table 3 SO_x, NH₃ and NO_x emissions of agricultural materials (fertilizer, diesel oil, electricity) and farming system^[5, 7, 22]

		N	P ₂ O ₅	K ₂ O	柴油 Diesel oil	电力 Electricity
农资系统 Agricultural materials system	SO _x	31.90	7.609	1.576	1.155	1.682
	NH ₃	2.739	-	-	-	-
	NO _x	35.40	4.618	6.208	1.789	2.788
农作系统 Farming system	NH ₃	230.0	-	-	-	-
	NO _x	0.580	-	-	-	-

注：表中电力投入所产生的酸化气体单位为g·kW⁻¹，其余酸化气体排放量单位均为g·kg⁻¹ Note: The unit of SO_x, NH₃ and NO_x emissions is g·kW⁻¹ for electricity input, g·kg⁻¹ for others

$$LER = (Y_{iw}/Y_{mw}) + (Y_{ib}/Y_{mb}) \quad (1)$$

式中， Y_{iw} 和 Y_{ib} 分别代表间作总面积上小麦和蚕豆的产量，需乘以该作物在间作中所占的面积比例，单位为 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ； Y_{mw} 和 Y_{mb} 分别代表单作小麦和蚕豆的产量， $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。若LER大于1，即表示间作的土地利用效率高于单作。

依据表2和表3的清单分析结果，对每形成1 000 kg单位产量所消耗的农资物质进行计算，得出单位产量的SO_x、NH₃和NO_x排放量，具体公式如下：

$$M(\text{SO}_x) = (\sum A_i \times B_i) \times 10^{-3} \quad (2)$$

$$M(\text{NH}_3) = (F \times 230 + \sum A_i \times B_i) \times 10^{-3} \quad (3)$$

$$M(\text{NO}_x) = (F \times 0.58 + \sum A_i \times B_i) \times 10^{-3} \quad (4)$$

式中， M 为对应的气体排放量， $\text{kg} \cdot \text{t}^{-1}$ ； A 为单位产量的农资物质投入量， $\text{kg} \cdot \text{t}^{-1}$ ； B 为消耗单位农资物质对应的气体排放量， $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ； i 为不同的农资类别； F 为单位产量的氮素用量， $\text{kg} \cdot \text{t}^{-1}$ ；230表示农

作系统中氮素以NH₃形式排放的排放系数，0.58表示氮素以NO_x形式排放的排放系数，单位为 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ，排放系数参照陈新平和张福锁^[22]的研究成果以及Brentrup和Kusters^[5]的研究结果计算得出。

环境酸化特征化处理主要是以SO₂为基准，消除硫氧化物(SO_x)、氨气(NH₃)和氮氧化物(NO_x)对环境负荷贡献潜力的不一致性，即将SO₂作为环境酸化的基准生态影响因子，其他酸化气体通过当量系数法计算出相对于SO₂的环境酸化影响潜值，计算公式如下：

$$E(\text{SO}_2) = \text{SO}_x \times 1 + \text{NH}_3 \times 1.88 + \text{NO}_x \times 0.7 \quad (5)$$

式中， E 为潜在环境影响特征化结果，1表示SO_x相对于SO₂的当量系数，1.88表示NH₃相对于SO₂的当量系数，0.7表示NO_x相对于SO₂的当量系数。当量系数参照梁龙^[7]研究结果。

标准化主要说明潜在环境影响的相对大小，通过选择基准量，消除结果在量纲和级数上的差异；

加权评估是结合环境酸化的权重系数, 计算其对地区可持续发展的重要程度, 计算公式如下:

$$R=E/S \quad (6)$$

$$EI=R \times W \quad (7)$$

式中, R 为潜在环境影响标准化结果; S 为基准值, 参照梁龙^[7]研究结果; EI 为环境影响值, 即加权平均值; W 为环境影响权重, 参照王明新等^[6]研究中的专家组评议设置的权重系数。

文中环境影响减缓潜力 (EMP), 表征间作小麦相对于单作小麦的环境效益, 计算公式如下:

$$EMP=(EI_{mw}-EI_{iw})/EI_{mw} \quad (8)$$

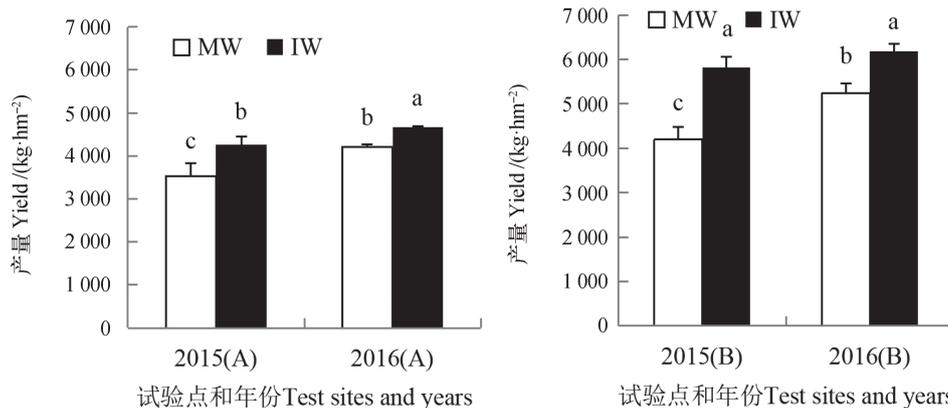
式中, EI_{iw} 为间作小麦的环境影响值; EI_{mw} 为单作小麦的环境影响值。

2 结果

2.1 小麦蚕豆间作的产量优势

田间试验表明, 小麦蚕豆间作显著提高了作物产量 (图1), 体现出了明显的间作产量优势。与单作小麦相比, A试验点的间作小麦产量2015年和2016年分别增加了20.58%和10.93% ($P<0.05$), 平均增幅为15.76%; B试验点与A试验点的趋势一致, 间作小麦产量分别增加了38.62%和18.04% ($P<0.05$), 平均增幅为28.33%, 两试验点的间作小麦产量平均增幅为22.04%。

A、B两点的土地当量比LER均大于1, 分别为1.10、1.07、1.08和1.09, 具有明显的间作产量优势。



注: 不同小写字母代表不同年份和单间作之间的差异达到0.05显著水平。下同 Note: Values followed by different lowercase letters mean significant difference between treatments different in year and between treatments in cropping pattern at the 0.05 level. The same below

图1 单间作小麦的产量

Fig. 1 Yield of intercropped and monocropped wheat

2.2 单间作小麦的能源消耗

A、B两点的间作小麦能源消耗较单作而言均有不同程度的减少 (表4)。A试验点的两年降幅

分别为17.25%和9.70%, B试验点的两年降幅分别为26.96%和22.49%, 其中, B试验点中两年的间作小麦降幅均达到了显著水平。

表4 不同处理单间作小麦的能源消耗

Table 4 Energy consumption of intercropped and monocropped wheat/(MJ·t⁻¹)

试验点和年份 Test sites and years	MW	IW
2015(A)	6 972 ± 584.1aA	5 769 ± 260.3aA
2016(A)	5 812 ± 56.08aA	5 248 ± 25.68bB
2015(B)	5 127 ± 265.7bA	3 744 ± 341.4cB
2016(B)	4 622 ± 401.9cA	3 582 ± 78.50cB

注: 同列不同小写字母代表不同年份之间的差异达到0.05显著水平, 同行不同大写字母代表单间作之间的差异达到0.05显著水平 Note: Values followed by different lowercase letters in the same column mean significant difference between treatments in years and different uppercase in the same row mean significant difference between treatments in cropping pattern at the 0.05 level

2.3 单间作小麦的酸化气体排放

两个试验点间作小麦的SO_x、NH₃和NO_x排放量较单作而言均有降低（图2）。与单作相比，不同年份下间作小麦的SO_x降幅分别为17.25%、9.68%、26.02%和16.72%，平均降低了17.42%；

NH₃分别降低了17.25%、9.85%、26.96%和16.65%，平均降低了17.68%；NO_x分别降低了17.25%、9.69%、27.71%和16.64%，平均降低了17.82%，除2016(A)外，其他年份均达到了显著性差异。

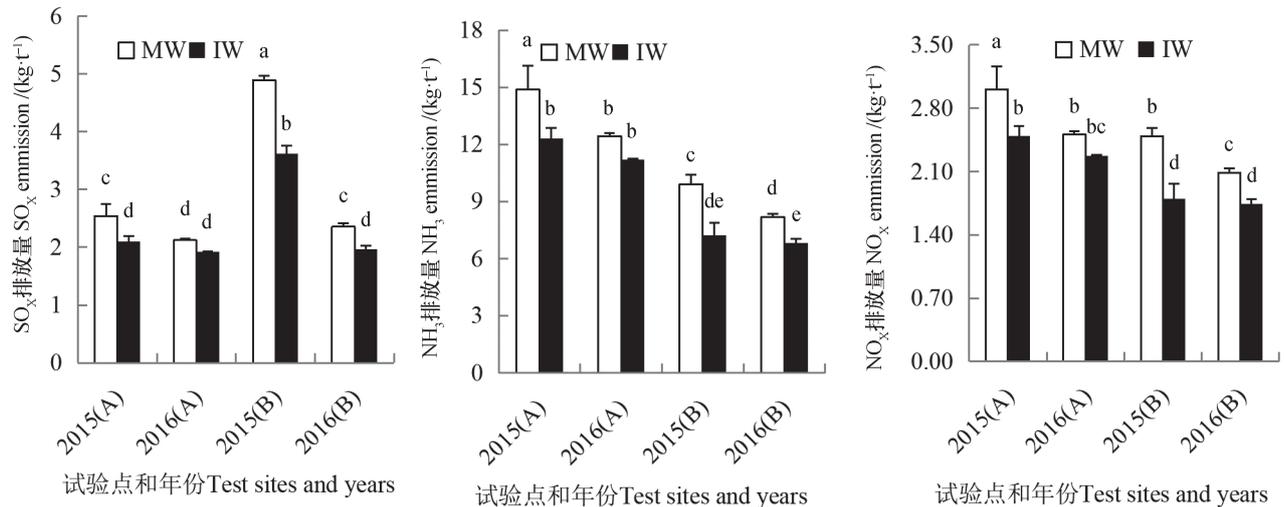


图2 单间作小麦单位产量（1 000 kg）的SO_x、NH₃和NO_x排放量

Fig. 2 SO_x, NH₃ and NO_x emissions in per unit area of intercropped and monocropped wheat

由表5可知，A、B两点间作小麦的环境酸化特征化结果均低于对应的单作处理。与单作小麦相比，不同年份的间作小麦SO₂特征化结果较单作分别降低了17.25%、9.05%、26.83%和16.65%，平

均减低了17.45%，除2016(A)外，其他处理间均达到了显著性差异。其中A、B两点，无论单作还是间作小麦，酸化气体NH₃所占比例最大，A点平均为85.75%，B点平均为76.89%。

表5 单间作小麦生命周期环境酸化潜值特征化结果

Table 5 Characterization of life cycle assessment (LCA) acidification of intercropped and monocropped wheat

处理 Treatment	酸化气体的SO ₂ 当量值 SO ₂ equivalent value of acidification gases				
	SO _x /(kg·t ⁻¹)	NH ₃ /(kg·t ⁻¹)	NO _x /(kg·t ⁻¹)	合计 Total/(kg·t ⁻¹)	
2015(A)	MW	2.54 ± 0.21c	27.97 ± 2.34a	2.11 ± 0.18a	32.61 ± 2.73a
	IW	2.10 ± 0.10d	23.14 ± 1.04b	1.74 ± 0.08b	26.99 ± 1.21b
2016(A)	MW	2.12 ± 0.03d	23.37 ± 0.28b	1.76 ± 0.02b	27.25 ± 0.24b
	IW	1.92 ± 0.01d	21.07 ± 0.09b	1.59 ± 0.007bc	24.57 ± 0.12b
2015(B)	MW	4.89 ± 0.08a	18.62 ± 0.96c	1.74 ± 0.06b	25.26 ± 1.11b
	IW	3.62 ± 0.13b	13.60 ± 1.24de	1.26 ± 0.11d	18.48 ± 1.49cd
2016(B)	MW	2.36 ± 0.05c	15.37 ± 0.36d	1.46 ± 0.03c	19.19 ± 0.45c
	IW	1.96 ± 0.07d	12.81 ± 0.41e	1.22 ± 0.04d	15.99 ± 0.52d

注：同列不同小写字母代表不同年份和单间作之间的差异达到0.05显著水平 Note: Values followed by different lowercase letters in the same column mean significant difference between treatments different in years and between treatments in cropping pattern at the 0.05 level

2.4 单间作小麦的环境酸化风险评价

不同年份下, 间作小麦的能源消耗和环境酸化影响指数均表现出低于单作的趋势(表6)。与单作小麦相比, 不同年份的间作小麦能源消耗权重影响指数分别降低了17.25%、9.70%、26.96%和22.49%, 平均降低了18.59%; 环境酸化指数分别降低了17.25%、9.05%、26.83%和16.65%, 平均降低了17.45%, 除2016(A), 其他处理间均达到了显著性差异。

本研究中, 间作处理在不同年份均表现出了明显的环境影响减缓潜力(表7): A试验点的能源消耗减缓潜力两年平均值为13.36%, 环境酸化减缓潜力平均值为13.35%, B试验点的分别为13.02%和21.78%, 两个试验点的能源消耗和环境酸化减缓潜力平均值分别为18.96%和17.40%。其中以B试验点的减缓潜力更为明显, 2015(B)的效果最为突出。

表6 单间作小麦生命周期加权分析结果

Table 6 Weighting of intercropped and monocropped wheat LCA

影响因子 Impact factor	能源消耗 (权重后影响指数) Energy consumption (Weighed impact index)		环境酸化 (权重后影响指数) Acidification (Weighed impact index)	
	MW	IW	MW	IW
	2015(A)	0.000 40aA	0.000 33aB	0.087 4aA
2016(A)	0.000 34bA	0.000 30aA	0.072 5bA	0.065 9aB
2015(B)	0.000 30bA	0.000 22bB	0.067 7bA	0.049 5abB
2016(B)	0.000 27bA	0.000 21bB	0.051 4cA	0.042 8bB

注: 同列不同小写字母代表不同年份之间的差异达到0.05显著水平, 同行不同大写字母代表单间作之间的差异达到0.05显著水平 Note: Values followed by different lowercase letters in the same column mean significant difference between treatments different in years and different uppercase in the same row mean significant difference between treatments in cropping pattern at the 0.05 level

表7 间作小麦生命周期环境影响减缓潜力

Table 7 Potentials of wheat and faba bean intercropping mitigating environmental impact in wheat LCA

影响因子 Impact factor	2015(A)	2016(A)	2015(B)	2016(B)
能源消耗 Energy consumption	17.01% ± 5.2%ab	9.69% ± 1.3%b	27.04% ± 2.9%a	22.12% ± 8.5%a
环境酸化 Acidification	17.01% ± 5.2%b	9.04% ± 1.2%c	26.89% ± 2.7%a	16.66% ± 0.74%b

注: 同行不同小写字母代表不同年份间的差异达到0.05显著水平 Note: Values followed by different lowercase letters in the same row mean significant difference between treatments different in years at the 0.05 level

3 讨论

3.1 小麦蚕豆间作的增产效应

诸多研究表明, 与单一种植农田相比, 间作种植模式下, 通过共生作物在时间和空间上的合理搭配, 能够有效提高资源利用率和单位面积粮食产出^[23]。本研究结果显示, 间作均显著提高小麦产量, 平均增幅达到了22.04%, 且不同年份的土地当量比(LER)均大于1, 说明间作小麦能有效促进作物籽粒产量的形成, 这与前人有关合理间作后的产量优势^[16, 24-25]研究结果表现出了很好的一致性。这主要是因为禾本科/豆科体系中, 作物能

够通过直根系和须根系更大限度地互补利用地下空间, 促进作物对养分的吸收利用^[25-26], 加之豆科作物的生物固氮能够为间作的禾本科作物提供额外氮素来源, 特别是在低氮肥供应条件下使其达到更高的产量, 进而表现出明显的间作增产效应。结合本研究, 下一步可以通过分析氮素利用效率、收获指数以及田间土壤氮素损失等指标, 探讨间作在减少养分损失、提高养分吸收转运的优势, 为间作增产提供一定的数据支撑。

3.2 间作减少酸化气体排放的生态效应

当下环境酸化已成为最严重的环境问题之一, 极大地危害着土壤、水体的生态平衡。周龙等^[26]

在对马铃薯土壤 N_2O 排放的研究中发现, 施氮量的增加显著增加了土壤 N_2O 的累积排放量; 刘宇等^[27]研究结果也显示, 土壤中的氨挥发量随着施氮量的增加而明显增加; 但同时很多研究表明, 玉米/大豆、玉米/豌豆、大豆/甘蔗^[18-21]等多种间作体系能够有效减少氮氧化物的排放, 减轻环境风险。本文通过LCA分析得到的结果中, 与单作小麦相比, 间作小麦的能源消耗和酸化气体排放分别平均减少了18.59%和17.45%, SO_x 、 NH_3 和 NO_x 酸化气体分别减少了17.42%、17.68%和17.82%, 其中, NH_3 在环境酸化中占到了80%左右的比例, 这一方面说明了本试验农作系统中施用的氮肥以 NH_3 形式大量损失, 从而加重了环境酸化的风险, 另一方面也揭示了间作在控制酸化气体排放和生态友好方面的优越性, 表明了间作小麦能够显著避免氮素以 NH_3 等酸化气体形式损失, 同时促进作物对氮素的吸收利用, 体现出了明显的间作产量优势和环境减缓潜力。这可能是由于间作蚕豆后, 豆科作物的生物固氮以及种间的根系互作增加了间作小麦的养分来源, 改善了根系环境, 在提高间作小麦养分利用率的同时影响其对酸化气体排放的控制效果。

唐艺玲等^[18]对甜玉米和大豆间作的研究结果表明, N_2O 排放强度多集中在 $1.2 \sim 1.7 \text{ kg} \cdot \text{t}^{-1}$, 最高达到了 $3.0 \text{ kg} \cdot \text{t}^{-1}$; 黄坚雄等^[20]研究结果表明, 在玉米/大豆间作体系中, 田间 N_2O 的排放量在 $10.2 \sim 16.0 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 之间, 这与本研究结果中处于 $1.7 \sim 3.0 \text{ kg} \cdot \text{t}^{-1}$ 和 $10.4 \sim 10.9 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 范围内的氮氧化物排放量表现出了一定的一致性, 说明生命周期评价可以在一定程度上较好地反映出田间的实际环境影响情况。而章莹等^[21]结果显示, 甘蔗/大豆间作体系中的 N_2O 排放量仅为 $2.2 \sim 5.6 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 这可能是由于试验区域、供试材料以及施肥量等因素造成了不同试验之间的差异, 加之目前有关小麦蚕豆间作体系下 SO_x 、 NH_3 等酸化气体的田间排放实测值尚未有系统报道, 因此, 本研究下一步一方面可通过田间实测酸化以及温室气体的排放, 验证并进一步说明间作小麦的环境影响潜力以及间作蚕豆在其中的作用机理, 另一方面系统地分析小麦/蚕豆间作体系对氮素的累积、淋溶及气体排放和作物对氮素的吸收利用三者之间的联系, 深入探讨其中的作用机制。当下已有不少研究表明^[15, 28-29]间作能够有效改善土壤微生物群落结构, 增加土壤中氨氧

化微生物数量和硝化作用, 因此, 进一步联系微生物在土壤氮素转化过程中的作用, 对更好地说明间作的产量优势和减少酸化气体排放的生态效应以及揭示间作养分资源高效利用和环境友好的机理有着重要意义。

4 结 论

两个试验点间作小麦的产量较单作显著增加, 平均增幅22.04%; 间作显著降低了能源消耗和酸化气体的排放, SO_x 、 NH_3 和 NO_x 多种酸化气体平均分别减少了17.42%、17.68%和17.82%, 有效增加了间作小麦的环境影响减缓潜力, 体现出了明显的间作优势。

参 考 文 献

- [1] Vires W, Dobbertin M H, Solberg S, et al. Impacts of acid deposition, ozone exposure and weather conditions on forest ecosystems in Europe: An overview. *Plant and Soil*, 2014, 380 (1) : 1—45
- [2] van Breemen N, Driscoll C T, Mulder J. Acidic deposition and internal proton sources in acidification of soils and waters. *Nature*, 1984, 307 (5952) : 599—604
- [3] Guo J H, Liu X J, Zhang Y, et al. Significant acidification in major Chinese croplands. *Science*, 2010, 327 (5968) : 1008—1010
- [4] 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. *环境科学*, 2018, 39 (5) : 2480—2488
Xu Q, Hu K L, Li J, et al. Life cycle environmental impact assessment on different modes of greenhouse vegetable production in the North China Plain (In Chinese). *Environmental Science*, 2018, 39 (5) : 2480—2488
- [5] Brenttrup F, Kusters J. Environmental impact assessment of agricultural production systems using the life cycle assessment methodology II. The application to N fertilizer use in winter wheat production system. *European Journal of Agronomy*, 2004, 20 (3) : 265—279
- [6] 王明新, 夏训峰, 刘建国, 等. 太湖地区高产水稻生命周期评价. *农业环境科学学报*, 2009, 28 (2) : 420—424
Wang M X, Xia X F, Liu J G, et al. Life cycle assessment of high-yielding rice in Taihu Region (In

- Chinese). *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28 (2): 420—424
- [7] 梁龙. 基于LCA的循环农业环境影响评价方法探讨与实证研究. 北京: 中国农业大学, 2009
Liang L. Environmental impact assessment of circular agriculture based on life cycle assessment: Methods and case studies (In Chinese). Beijing: China Agricultural University, 2009
- [8] Boulard T, Raeppl C, Brun R, et al. Environmental impact of greenhouse tomato production in France. *Agronomy for Sustainable Development*, 2011, 31 (4): 757—777
- [9] 郭金花. 典型设施蔬菜生产系统水肥、农药投入及环境影响的生命周期评价. 北京: 中国农业大学, 2016
Guo J H. Inputs of irrigation water, fertilizers, pesticides to and life cycle assessment of environmental impacts from typical greenhouse vegetable production systems in China (In Chinese). Beijing: China Agricultural University, 2016
- [10] 贡婷婷. 曲周冬小麦-夏玉米高产高效模式的生命周期评价. 北京: 中国农业大学, 2012
Gong T T. Life cycle assessment of wheat-maize rotation system for high yield and high efficiency in Quzhou County (In Chinese). Beijing: China Agricultural University, 2012
- [11] 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. *农业环境科学学报*, 2009, 28 (8): 1773—1776
Liang L, Chen Y Q, Gao W S, et al. Life cycle environmental impact assessment in winter wheat-summer maize system in North China Plain (In Chinese). *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28 (8): 1773—1776
- [12] Li L, Sun J H, Zhou L L, et al. Diversity enhances agricultural productivity via rhizosphere phosphorus facilitation on phosphorus-deficient soils. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2007, 27 (104): 11192—11196
- [13] 柳欣茹, 包兴国, 王志刚, 等. 灌漠土上连续间作对作物生产力和土壤化学肥力的影响. *土壤学报*, 2016, 53 (4): 951—962
Liu X R, Bao X G, Wang Z G, et al. Effects of continuous intercropping on crop productivity and chemical properties of soil fertility in orthic antrosols (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2016, 53 (4): 951—962
- [14] Zhu Y Y, Chen H R, Fan J H, et al. Genetic diversity and disease control in rice. *Letters to Nature*, 2000, 406 (6797): 718—722
- [15] 张亚楠, 李孝刚, 王兴祥. 矛苍术间作对连作花生土壤线虫群落的影响. *土壤学报*, 2016, 53 (6): 1497—1505
Zhang Y N, Li X G, Wang X X. Effects of intercropping of *Atractylodes lancea* in monocultured peanut fields on soil nematode community (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2016, 53 (6): 1497—1505
- [16] 王宇蕴, 郑毅, 汤利. 不同抗性小麦品种与蚕豆间作对小麦根际速效养分含量的影响. *土壤通报*, 2012, 43 (2): 466—471
Wang Y Y, Zheng Y, Tang L. Effects of intercropping with different resistant wheat varieties and faba bean on available nutrient content in the rhizosphere (In Chinese). *Chinese Journal of Soil Science*, 2012, 43 (2): 466—471
- [17] 马心灵, 朱启林, 赵胜利, 等. 不同种植模式粮田土壤氮素淋失的研究进展. *土壤通报*, 2015, 46 (6): 1529—1536
Ma X L, Zhu Q L, Zhao S L, et al. Research progress of nitrogen leaching in grain field under different cropping patterns (In Chinese). *Chinese Journal of Soil Science*, 2015, 46 (6): 1529—1536
- [18] 唐艺玲, 管奥梅, 周贤玉, 等. 减量施氮与间作大豆对华南地区甜玉米连作农田N₂O排放的影响. *中国生态农业学报*, 2015, 23 (12): 1529—1535
Tang Y L, Guan A M, Zhou X Y, et al. Effect of reduced N application and soybean intercropping on soil N₂O emission in sweet corn fields in South China (In Chinese). *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2015, 23 (12): 1529—1535
- [19] 刘辉娟. 施氮对玉米间作豌豆农田温室气体排放的影响及机制. 兰州: 甘肃农业大学, 2012
Liu H J. The effect and mechanism of Nitrogen on farmland greenhouse gas emissions of corn interplanting peas (In Chinese). Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2012
- [20] 黄坚雄, 隋鹏, 高旺盛, 等. 华北平原玉米//大豆间作农田温室气体排放及系统净温室效应评价. *中国农业大学学报*, 2015, 20 (4): 66—74
Huang J X, Sui P, Gao W S, et al. Effect of maize-soybean intercropping on greenhouse gas emission and the assessment of net greenhouse gas balance in North China Plain (In Chinese). *Journal of China Agricultural University*, 2015, 20 (4): 66—74
- [21] 章莹, 王建武, 王蕾, 等. 减量施氮与大豆间作对蔗田土壤温室气体排放的影响. *中国生态农业学报*, 2013, 21 (11): 1318—1327

- Zhang Y, Wang J W, Wang L, et al. Effect of low nitrogen application and soybean intercrop on soil greenhouse gas emission of sugarcane field (In Chinese). *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2013, 21 (11): 1318—1327
- [22] 陈新平, 张福锁. 小麦-玉米轮作体系养分资源综合管理理论与实践. 北京: 中国农业大学出版社, 2006: 203—205
- Chen X P, Zhang F S. Theory and practice of nutrient resources integrated management wheat maize rotation system (In Chinese). Beijing: China Agricultural University Press, 2006: 203—205
- [23] Ghanbari A, Dahmardeh M, Siahisar B A, et al. Effect of maize (*Zea mays* L.) - cowpea (*Vigna unguiculata* L.) intercropping on light distribution, soil temperature and soil moisture in arid environment. *Journal of Food Agriculture and Environment*, 2010, 8 (1): 102—108
- [24] 叶优良, 李隆, 孙建好, 等. 地下部分隔对蚕豆/玉米间作氮素吸收和土壤硝态氮残留影响. *水土保持学报*, 2005, 19 (3): 13—16
- Ye Y L, Li L, Sun J H, et al. Effect of root separation on plant nitrogen uptake and soil nitrate nitrogen residual in faba bean/ maize intercropping (In Chinese). *Journal of Soil and Water Conservation*, 2005, 19 (3): 13—16
- [25] 肖靖秀, 汤利, 郑毅, 等. 大麦/蚕豆间作条件下供氮水平对作物产量和大麦氮吸收累积的影响. *麦类作物学报*, 2011, 31 (3): 499—503
- Xiao J X, Tang L, Zheng Y, et al. Effects of N level on yield of crops, N absorption and accumulation of barley in barley and faba bean intercropping system (In Chinese). *Journal of Triticeae Crops*, 2011, 31 (3): 499—503
- [26] 周龙, 龙光强, 汤利, 等. 综合产量和土壤N₂O排放的马铃薯施氮量分析. *农业工程学报*, 2017, 33 (2): 155—161
- Zhou L, Long G Q, Tang L, et al. Analysis on N application rates considering yield and N₂O emission in potato production (In Chinese). *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2017, 33 (2): 155—161
- [27] 刘宇, 章莹, 杨文亭, 等. 减量施氮与大豆间作对蔗田氮平衡的影响. *应用生态学报*, 2015, 26 (3): 817—825
- Liu Y, Zhang Y, Yang W T, et al. Effects of reduced nitrogen application and soybean intercropping on nitrogen balance of sugarcane field (In Chinese). *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2015, 26 (3): 817—825
- [28] 胡国彬, 董坤, 董艳, 等. 小麦蚕豆间作对根际真菌代谢功能多样性的影响. *土壤学报*, 2015, 52 (4): 926—933
- Hu G B, Dong K, Dong Y, et al. Effects of intercropping of wheat and faba bean on diversity of metabolic function of rhizosphere fungal community (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2015, 52 (4): 926—933
- [29] 吕玉, 周龙, 龙光强, 等. 不同氮水平下间作对玉米土壤硝化势和氨氧化微生物数量的影响. *环境科学*, 2016, 37 (8): 3229—3236
- Lü Y, Zhou L, Long G Q, et al. Effect of Different nitrogen rates on the nitrification potential and abundance of ammonia-oxidizer in intercropping maize soils (In Chinese). *Environmental Science*, 2016, 37 (8): 3229—3236

Emission of Acidified Gas from Intercropped Wheat Field Based on LCA Analysis

REN Jiabing¹ TANG Li^{1†} GENG Chuanxiong^{1,2} XIAO Jingxiu¹ ZHENG Yi¹

(1 College of Resources and Environmental Science, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China)

(2 Institute of Agricultural Environment and Resources, Yunnan Academy of Agricultural Sciences, Kunming 650201, China)

Abstract This study was to comprehensively analyze effects of wheat and faba bean intercropping in wheat fields on environmental acidification and yield of the crops. Two two-year field experiments, (A and B), were carried out and analysis of the results of the experiments done for effects of wheat and faba bean intercropping on crop yield, energy consumption and environmental acidification based on LCA (life cycle assessment) by comparison. Results showed that in the two experimental fields, intercropped

wheat was significantly of 22.04% higher than mono-cropped one in yield on average with land equivalent ratio (LER) being higher than 1, showing obvious intercropping advantage. Compared with monocropped wheat, intercropped wheat decreased by 18.59% and 17.45% in energy consumption and environmental acidification index, respectively, and by 17.42%, 17.68% and 17.82% in emission of SO_x, NH₃ and NO_x, respectively, and hence was 18.96% and 17.45% higher in potential of mitigating the environmental impact of energy consumption and environmental acidification of wheat cultivation. In conclusion, wheat and faba bean intercropping can significantly increase yield of the wheat and reduce emission of acidified gases, which are obvious intercropping advantages.

Key words Wheat and faba bean intercropped; Wheat yield; Environmental acidification potential; Acidified gas emission; Life cycle assessment (LCA)

(责任编辑: 陈荣府)