

DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.190704

耿川雄, 任家兵, 马心灵, 龙光强, 鲁耀, 汤利. 基于 LCA 的不同间作体系产量优势及温室效应研究[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2020, 28(2): 159–167

GENG C X, REN J B, MA X L, LONG G Q, LU Y, TANG L. Yield improvement and greenhouse effect of different intercropping systems based on life cycle assessment[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2020, 28(2): 159–167

基于 LCA 的不同间作体系产量优势及温室效应研究*

耿川雄^{1,2}, 任家兵¹, 马心灵^{1,3}, 龙光强¹, 鲁耀², 汤利^{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 650205;
3. 文山学院三七学院 文山 663000)

摘要: 为了探究间作体系对农田生态系统温室效应和产量优势的影响, 本文选用小麦/蚕豆和玉米/马铃薯间作种植体系, 通过为期 2 年的田间小区试验, 采用生命周期评价法(LCA), 以小麦/蚕豆间作和小麦单作、玉米/马铃薯间作和玉米单作为研究对象, 以生产 1 000 kg 作物为评价的功能单元, 建立农作系统和农作系统生命周期资源消耗以及温室气体排放清单, 研究了不同种植体系的作物产量、全球增温潜势和能源消耗等指标的差异。结果表明: 与单作小麦相比, 间作小麦两年的产量分别增加 18.04%和 39.94%; 与单作玉米相比, 间作玉米的产量分别增加 2.65%和 23.16%; 小麦/蚕豆间作系统两年平均增幅高于玉米/马铃薯间作系统。小麦/蚕豆间作的土地当量比两年均大于 1, 玉米/马铃薯间作的土地当量比仅有 1 年大于 1。与单作小麦相比, 两年间作小麦的全球变暖潜值分别降低 15.28%和 28.53%, 能源消耗分别减少 15.29%和 28.53%; 与单作玉米相比, 间作玉米的全球变暖潜值分别降低 2.61%和 19.05%, 能源消耗分别减少 2.61%和 18.83%。小麦/蚕豆间作的间作产量优势优于玉米/马铃薯, 但玉米/马铃薯间作的增温潜势低于小麦/蚕豆间作。合理间作具有显著增产效应, 同时可以降低温室效应以及能源消耗, 以更低环境代价获得作物高产高效。

关键词: 间作; 生命周期评价法(LCA); 温室效应; 玉米/马铃薯; 小麦/蚕豆; 产量优势

中图分类号: S162

开放科学码(资源服务)标识码(OSID):



Yield improvement and greenhouse effect of different intercropping systems based on life cycle assessment*

GENG Chuanxiong^{1,2}, REN Jiabing¹, MA Xinling^{1,3}, LONG Guangqiang¹, LU Yao², TANG Li^{1**}

(1. College of Resources and Environmental Sciences, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China; 2. Institute of Agricultural Environment and Resources, Yunnan Academy of Agricultural Sciences, Kunming 650205, China; 3. School of Sanqi, Wenshan University, Wenshan 663000, China)

Abstract: Global warming has become the most pressing problem affecting the ecological environment, and the greenhouse gases (N₂O, CH₄, and CO₂) produced due to agricultural practices are one of the factors that cannot be neglected. Establishing different planting models and production management measures, reducing energy consumption and greenhouse gas emissions in the farmland ecosystems, and achieving high yields and efficiency in an environment friendly manner are important safety

* 国家重点研发计划(2017YFD02002007)、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

** 通信作者: 汤利, 主要从事农业资源与环境等方面的研究。E-mail: ltang@ynau.edu.cn

耿川雄, 主要从事养分资源高效利用研究。E-mail: 1007234769@qq.com

收稿日期: 2019-09-27 接受日期: 2019-10-30

* This study was supported by the National Key Research and Development Program of China (2017YFD02002007), the National Natural Science Foundation of China (41361065, 31760615), and the Key Projects of Yunnan Science and Technology Plan (2015FA022).

** Corresponding author, E-mail: ltang@ynau.edu.cn

Received Sep. 27, 2019; accepted Oct. 30, 2019

strategies for sustainable agricultural development. In this study, the effects of intercropping systems on greenhouse gas emission and yields were explored in the farm ecosystems for the wheat/faba bean and corn/potato intercropping systems. Two years of research using the life cycle assessment (LCA) method has produced data that compare the differences in crop yield, global warming potential, and energy consumption in the intercropping and monocropping systems. The wheat/faba bean intercropping and wheat monocropping system as well as the corn/potato intercropping and maize monocropping systems were used as research objectives and a production unit of 1 000 kg was evaluated as the functional unit. The agricultural capital system, life cycle resource consumption, and greenhouse gas emission inventory for agricultural resources systems and farming systems under different planting models were established; and monocropping and intercropping environmental impact assessments was conducted. The results showed that compared to the yield of monocropped wheat, the yield of intercropped wheat increased by 18.04% and 39.94%, respectively, in 2014 and 2015. Besides, the global warming potential of intercropped wheat decreased by 15.28% and 28.53%, while the energy consumption decreased by 15.29% and 28.53%, respectively, in 2014 and 2015. Furthermore, compared with monocropped maize, the yield of intercropped maize increased by 2.65% and 23.16%, whereas the global warming potential of intercropped maize decreased by 2.61% and 19.05%, respectively, in 2014 and 2015. In addition, energy consumption decreased by 2.61% and 18.83%, respectively, in 2014 and 2015. Compared with monocropping, reasonable intercropping significantly increased the crop yield while reducing greenhouse gas emissions and energy consumption. This aided in protecting the environment while reducing energy consumption, and achieving a high yield and efficiency of crops at a lower environmental cost.

Keywords: Intercropping; Life Cycle Assessment (LCA); Greenhouse effect; Maize/potato; Wheat/faba bean; Yield improvement

以温室气体排放为主导因素的全球变暖问题已经成为当前人类最亟待解决的生态环境问题^[1],而农业生产中产生的温室气体是导致全球变暖不可忽视的因素之一。农田土壤 NO_x 、 CH_4 、 CO_2 等的排放及其减排控制是目前国内外研究热点^[2]。通过组建不同的种植模式和生产管理措施,降低农田生态系统中能源消耗和温室气体的排放,以环境友好的方式实现高产高效是农业可持续发展的重要保障。

生命周期评价(LCA)是可计量分析伴随农业生产活动中的物质和能量的投入、产出与所引起的农业生态环境负荷之间关系的综合评价工具^[3],主要应用于农产品的环境影响评价以及比较不同农业生产方式的环境效应^[4],为农业生产决策提供数据和理论依据。全球变暖潜值是基于 LCA 的一个衡量污染物对环境效应的指标^[5]。Meisterling 等^[6]运用 LCA 分析比较了有机小麦(*Triticum aestivum*)和传统小麦种植及商品运输过程中的碳排放关键影响因子,从而为达成低碳目标的农业生产决策提供依据;王明新等^[7]对太湖高产水稻(*Oryza sativa*)管理措施做了全面的生命周期评价,指出降低水肥投入,提高养分资源利用效率是减缓水稻种植对太湖地区环境影响的关键因素;梁龙等^[5]基于生命周期环境影响评价,分析了华北平原冬小麦-夏玉米(*Zea mays*)种植系统的最佳施肥方案,并提出此轮作体系最大的潜在环境风险是环境酸化。

间套作是一种传统的种植模式,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^[8]。现有研究表明,合理间套作可显著提高作物产量和土地当量比^[9]、提高养分资源利用效率^[10]、有效控制病虫害^[11]、改善土壤微生物区系^[12],是一种解决现代农业中的低产、病虫害严重、土壤退化和环境恶化等问题的重要手段,有助于实现农业可持续发展^[13]。前人研究发现,玉米/大豆(*Glycine max*)间作^[14]、大豆/甘蔗(*Saccharum officinarum*)间作^[15]在温室气体排放等方面较单作有更好的减排效应。然而,小麦/蚕豆(*Vicia faba*)、玉米/马铃薯(*Solanum tuberosum*)间作体系中的温室气体排放、能源消耗等环境影响尚缺乏系统的研究报道。因此,本文以西南地区普遍种植的主要间作模式小麦/蚕豆、玉米/马铃薯为研究对象,基于为期两年的田间试验数据,采用 LCA 评价模型对不同间作模式作物进行分析研究,以期为实现高产高效的可持续发展农业提供一定的科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验设计

试验区位于云南省昆明市寻甸县云南农业大学试验基地(102°2'E, 23°32'N, 海拔 1 953.5 m)。该基地位于云南省昆明市东北部,属北亚热带季风气候,年平均气温 14.7℃,年降水量 1 040 mm,主要集中在夏季的 7—9 月,年蒸发量为 2 384 mm,年日照时数 2 617.4 h。供试土壤为山地红壤,有机质含量为 29.50 g·kg⁻¹,速效氮含量 175.85 mg·kg⁻¹,速效磷含

量 $16.44 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 速效钾含量 $105.90 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, pH 6.65。

试验设小麦/蚕豆和玉米/马铃薯两种种植体系。小麦蚕豆种植体系中, 设小麦/蚕豆间作(A)、小麦单作(B)和蚕豆单作(C)3 种植模式, 重复 3 次, 共 9 个小区, 随机排列。玉米马铃薯种植体系中, 设玉米/马铃薯间作(A)、马铃薯单作(B)和玉米单作(C)3 种植模式, 重复 3 次, 共 9 个小区, 随机排列。上述试验小区面积均为 32.5 m^2 ($5 \text{ m}\times 6.5 \text{ m}$)。供试小麦品种为‘云麦 52’, 蚕豆品种为‘玉溪大粒豆’, 玉米品种为‘耕源寻单 7 号’, 马铃薯品种为‘会泽 2 号’。

1.2 种植管理

小麦蚕豆体系: 小麦单作采用条播, 行距为 0.2 m , 播种量为 $180 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$; 蚕豆单作行距为 0.3 m , 株距 0.1 m , 种植密度为 $3.2\times 10^5 \text{ 株}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。小麦/蚕豆间作小区采用 6 行小麦间作 2 行蚕豆模式, 行株距和种植与对应单作一致。小麦、蚕豆于 2014 年和 2015 年的 10 月 25 日种植, 在出苗后的 170 d 和 150 d 左右收获。间作体系中小麦和蚕豆的共生期 150 d 左右。玉米马铃薯体系: 玉米单作株距为 0.25 m , 行距为 0.5 m , 种植密度为 $7.2\times 10^4 \text{ 株}\cdot\text{hm}^{-2}$; 马铃薯单作株距为 0.35 m , 行距为 0.5 m , 种植密度为 $5\times 10^4 \text{ 株}\cdot\text{hm}^{-2}$; 玉米/马铃薯间作采用 2 行玉米和 2 行马铃薯相间, 株行距和种植密度与对应单作一致。试验小区四周设 1 m 的保护行, 种植玉米。于 2014 年和 2015 年的 4 月 5 日和 5 月 11 日分别播种马铃薯和玉米, 8 月 11 日收获马铃薯, 10 月 6 日收获玉米, 共生期共 90 d。

供试肥料均为尿素、普通过磷酸钙、硫酸钾。小麦蚕豆种植体系中氮肥用量 $180 \text{ kg}(\text{N})\cdot\text{hm}^{-2}$, 磷肥用量 $90 \text{ kg}(\text{P}_2\text{O}_5)\cdot\text{hm}^{-2}$, 钾肥用量 $90 \text{ kg}(\text{K}_2\text{O})\cdot\text{hm}^{-2}$, 磷肥、钾肥全部用作基肥施入, 氮肥在小麦拔节期追施 1 次, 基追比为 1:1, 蚕豆不追肥, 氮肥仅做基肥施入。单作玉米的氮肥用量 $250 \text{ kg}(\text{N})\cdot\text{hm}^{-2}$, 分基肥、小喇叭口期追肥和大喇叭口期追肥 3 次施入, 分别占总施氮量的 40%、25%、35%; 磷肥用量 $75 \text{ kg}(\text{P}_2\text{O}_5)\cdot\text{hm}^{-2}$ 、钾肥用量 $125 \text{ kg}(\text{K}_2\text{O})\cdot\text{hm}^{-2}$, 均以基肥施入。单作马铃薯氮肥用量为 $125 \text{ kg}(\text{N})\cdot\text{hm}^{-2}$, 分两次施入, 基肥 60%, 现蕾期施肥 40%; 磷肥用量为 $75 \text{ kg}(\text{P}_2\text{O}_5)\cdot\text{hm}^{-2}$, 钾肥用量为 $125 \text{ kg}(\text{K}_2\text{O})\cdot\text{hm}^{-2}$, 均以基肥形式施入。间作处理的施肥按 2 行玉米或 2 行马铃薯条带进行, 每一条带的施肥量和施肥时期与相应单作相同。

按当地常规的小麦、蚕豆、玉米和马铃薯栽培技术措施进行肥水管理, 整个生育期不使用除草剂和杀菌剂。分别在两个体系作物的成熟期进行产量收获的测定, 并计算土地当量比。

1.3 研究方法

1.3.1 产量分析

籽粒产量测定: 蚕豆、小麦每个小区提前划出 2 块 $0.6 \text{ m}\times 5 \text{ m}$ 的条状测产区。收获麦穗和豆荚后, 脱粒测定两种作物的产量后折算出每公顷产量, 并计算土地当量比(LER)。

在玉米和马铃薯成熟期取每个小区的中间 2 行(宽度为 1 m)长度为 5 m 的产区进行测产。玉米籽粒、马铃薯块茎称重折算出每公顷作物产量, 并计算土地当量比(LER)。

土地当量比(LER)是指同一田块中两种或以上作物间作的收益与各个作物单作收益的比率, 用来衡量间作优势, 计算公式为:

$$\text{LER} = (Y_{ia}/Y_{ma}) + (Y_{ib}/Y_{mb}) \quad (1)$$

式中: Y_{ia} 和 Y_{ib} 分别代表间作的两种作物的产量, Y_{ma} 和 Y_{mb} 分别代表单作的两种作物的产量。LER>1 时为间作较单作有产量优势, LER<1 时为间作较单作有产量劣势^[16]。

数据用 Microsoft Excel 2016 整理后, 用 SPSS 17.0 在 0.05 水平进行方差分析(Duncan 检验法)。

1.3.2 评价方法

本研究基于为期 2 年的田间试验数据, 采用 LCA, 以小麦/蚕豆间作和小麦单作、玉米/马铃薯间作和玉米单作为研究对象, 以生产 $1\,000 \text{ kg}$ 作物为评价的功能单元, 定义的边界包括农资(化肥、柴油、电力)生产和农作物种植过程中(翻地、施肥、灌溉、收获)能源消耗和温室气体的排放, 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。分别针对不同种植模式下的农资系统和农作系统建立生命周期资源消耗以及温室气体排放清单, 进行单作和间作对环境影响评价。

标准化是为了消除结果在量纲和级数上的差异, 主要说明环境潜在影响的相对大小, 加权评估是结合全球变暖潜值的权重系数, 计算其对地区可持续发展的重要程度, 计算公式为:

$$\text{EI} = E/S \times W \quad (2)$$

式中: E 为潜在环境影响特征化结果; S 为基准值, 参照梁龙^[17]的研究结果; 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^[7]研究中专家组评议设置的权重系数。

用环境影响减缓潜力表征间作相对于单作的环境效益, 计算公式为:

$$EMP=(EI_m-EI_i)/EI_m \quad (3)$$

式中: EMP 为间作相对于单作的环境影响减缓潜力, EI_i 为间作的环境影响值, EI_m 为单作的环境影响值。

全球增温潜势以 CO_2 为基准进行特征化处理, 将 CO_2 作为全球增温潜势的基准生态影响因子, 其他温室气体通过当量系数法计算出相对于 CO_2 的环境变暖影响潜值, CO 、 CH_4 、 NO_x 的当量系数分别为

2、21 和 310^[18], 计算公式为:

$$CO_2=CO \times 1 + CH_4 \times 21 + NO_x \times 310 \quad (4)$$

1.3.2.1 清单分析

清单分析是生命周期法中以具体数据量化生产指标的过程, 本文将小麦/蚕豆间作、小麦单作、玉米/马铃薯间作和玉米单作的完整生命周期分为包括化肥、电力生产的农资系统和作物生长灌溉收获全过程的农作系统, 具体的物质投入产出如表 1 所示。

表 1 2014 年和 2015 年小麦、玉米单、间作体系物质投入产出表

Table 1 Input-output inventory of intercropped and monocropped wheat and maize in 2014 and 2015

物质投入-产出 Input-output inventory		单作小麦 Monocropped wheat		与蚕豆间作的小麦 Wheat intercropped with faba bean		单作玉米 Monocropped maize		与马铃薯间作的玉米 Maize intercropped with potato	
		2014	2015	2014	2015	2014	2015	2014	2015
投入 Input	N ($kg \cdot hm^{-2}$)	180	180	180	180	250	250	250	250
	P_2O_5 ($kg \cdot hm^{-2}$)	90	90	90	90	75	75	75	75
	K_2O ($kg \cdot hm^{-2}$)	90	90	90	90	125	125	125	125
	灌溉水 Irrigation water ($m^3 \cdot hm^{-2}$)	1 200	1 500	1 200	1 500	425	400	425	400
	电力 Electricity ($kW \cdot h \cdot hm^{-2}$)	525	575	525	575	175	150	175	150
产出 Output	柴油 Diesel oil ($kg \cdot hm^{-2}$)	17	5	17	5	17	19	17	19
	籽粒产量 Grain yield ($kg \cdot hm^{-2}$)	4 154.0	5 242.4	5 813.4	6 188.2	11 690.0	11 475.2	14 397.5	11 780.2

1.3.2.2 农资生产系统

本试验原料物资生产过程中主要涉及的是温室气体排放和能源消耗, 农资生产系统主要涉及的是化肥制作投入。根据梁龙^[17]对化肥生命周期的清单排放研究成果, 以生产 1 000 kg 小麦和玉

米为单元, 根据表 1 中的化肥投入量乘以农资系统相应的温室气体排放量和能源消耗(表 2)计算出间作小麦、单作小麦、间作玉米、单作玉米生产过程中农资子生产系统的生命周期清单如表 3 所示。

表 2 农资系统(化肥生产)的温室气体排放量及能源消耗

Table 2 Greenhouse gases emissions and energy depletion of agricultural materials system (fertilizers production)

化肥 Fertilizer	CO ($g \cdot kg^{-1}$)	NO_x ($g \cdot kg^{-1}$)	CO_2 ($g \cdot kg^{-1}$)	CH_4 ($g \cdot kg^{-1}$)	N_2O ($g \cdot kg^{-1}$)	能源消耗 Energy depletion ($MJ \cdot kg^{-1}$)
N	4.255	35.400	10 125.56	0.241	0.173	92.924
P_2O_5	0.870	4.620	1 496.49	0.021	0.018	20.958
K_2O	0.805	6.208	973.20	0.044	0.027	13.130

表 3 2014 年和 2015 年小麦、玉米单、间作体系农资系统清单

Table 3 Inventory of agricultural materials subsystem for intercropped and monocropped wheat and maize in 2014 and 2015

因子 Factor	单作小麦 Monocropped wheat		与蚕豆间作的小麦 Wheat intercropped with faba bean		单作玉米 Monocropped maize		与马铃薯间作的玉米 Maize intercropped with potato	
	2014	2015	2014	2015	2014	2015	2014	2015
能源消耗 Energy depletion (MJ)	4 765.083 9	4 105.101 1	3 405.538 5	3 477.198 7	2 262.554 4	2 304.865 0	1 836.320 2	2 244.659 0
CO ($kg \cdot t^{-1}$)	0.220 8	0.174 9	0.157 8	0.148 2	0.105 2	0.107 2	0.085 4	0.104 4
NO_x ($kg \cdot t^{-1}$)	1.768 5	1.401 5	1.263 9	1.187 2	0.853 2	0.869 2	0.692 5	0.846 5
CO_2 ($kg \cdot t^{-1}$)	492.258 7	390.116 3	351.819 4	330.461 8	236.596 7	241.021 1	192.023 8	234.722 7
CH_4 ($kg \cdot t^{-1}$)	0.011 9	0.009 4	0.008 5	0.008 0	0.005 8	0.005 9	0.004 7	0.005 7
N_2O ($kg \cdot t^{-1}$)	0.008 5	0.006 7	0.006 1	0.005 7	0.004 1	0.004 2	0.003 3	0.004 1

1.3.2.3 农作生产系统

小麦、玉米生产体系的农作生产系统包括整地、施肥、收获等过程。以生产 1 000 kg 小麦和玉米为单元计算土壤温室气体排放量, 以灌溉水产生的电力消耗和柴油投入计算此过程中产生的温室气体和能源消耗。农作系统温室气体排放量及能源消耗见表 4。本研究依据陈新平等^[19]的研究基础, 确定土壤 NH_3 挥发系数取氮肥投入总量的 23%,

NO_3^- -N 淋洗系数取氮肥投入总量的 14%; 依据 Mosier 等^[20]的研究结果, 确定 N_2O 的直接挥发系数取氮肥投入总量的 1.25%, 间接挥发系数取 NH_4^+ -N 挥发量的 1.00%和 NO_3^- -N 淋洗量的 2.50%, NO_x 挥发系数取 N_2O 挥发量的 10.00%。计算出间作小麦、单作小麦、间作玉米、单做玉米生产过程中农作生产系统的能源消耗和温室气体排放生命周期清单(表 5)。

表 4 农作系统的温室气体排放量及能源消耗
Table 4 Greenhouse gases emissions and energy depletion of farming system

能源 Energy	CO (g)	NO _x (g)	CO ₂ (g)	CH ₄ (g)	N ₂ O (g)	能源消耗 Energy depletion (MJ)
柴油 Diesel oil (kg)	0.772	1.789	690.691	0.645	0.121	—
电力 Electricity (kW·h)	0.01	—	1 767.83	13.68	—	3.596

表 5 2014 年和 2015 年小麦、玉米单作和间作体系农作系统清单
Table 5 Inventory of farming subsystem for intercropping and monocropping systems of wheat and maize in 2014 and 2015

因子 Factor	单作小麦 Monocropped wheat		与蚕豆间作的小麦 Wheat intercropped with faba bean		单作玉米 Monocropped maize		与马铃薯间作的玉米 Maize intercropped with potato	
	2014	2015	2014	2015	2014	2015	2014	2015
能源消耗 Energy depletion (MJ)	454.462 5	394.420 8	324.754 8	334.135 9	53.832 3	47.005 7	43.709 0	45.788 7
CO (kg·t ⁻¹)	0.004 4	0.001 8	0.003 2	0.001 6	0.001 3	0.001 4	0.001 0	0.001 4
NO _x (kg·t ⁻¹)	0.796 9	0.680 9	0.569 4	0.576 9	0.125 9	0.116 3	0.102 2	0.113 3
CO ₂ (kg·t ⁻¹)	226.243 3	194.551 8	161.669 5	164.826 2	27.465 9	24.252 1	22.294 1	23.616 5
CH ₄ (kg·t ⁻¹)	1.731 5	1.501 0	1.237 3	1.271 7	0.205 7	0.179 9	0.167 0	0.175 2
N ₂ O (kg·t ⁻¹)	0.793 4	0.628 5	0.567 1	0.532 4	0.391 6	0.399 0	0.317 8	0.388 5

2 结果与分析

2.1 不同间作体系的产量效应和土地当量比

2.1.1 产量效应

图 1 结果表明, 除 2015 年间作玉米较单作玉米产量没有显著提高外, 小麦/蚕豆间作、玉米/马铃薯间作均显著提高了作物产量, 具有明显的间作产量优势。2014 年和 2015 年小麦/蚕豆间作体系中, 间作小麦的产量均显著高于单作小麦产量。与单作小麦相比, 间作小麦产量分别提高 39.94%和 18.04%。2014 年玉米/马铃薯间作显著提高了玉米产量, 而 2015 年间作玉米较单作也有增产但未达显著差异。2014 年和 2015 年间作玉米产量较单作分别提高 23.16%、2.65%。间作均能提高两个系统的产量, 就增幅而言, 小麦/蚕豆间作系统两年平均增幅高于玉米/马铃薯间作系统, 说明禾本科与豆科间作的产量增幅优势更明显。

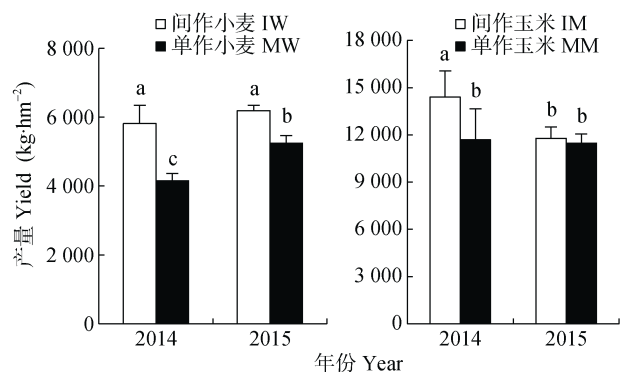


图 1 2014 年和 2015 年单作小麦、与蚕豆间作小麦和单作玉米、与马铃薯间作玉米的产量

Fig. 1 Yields of wheat monocropped and intercropped with faba bean, and maize monocropped and intercropped with potato in 2014 and 2015

不同小写字母表示单作、间作产量在 5%水平差异显著。Different lowercase letters mean significant differences between monocropped and intercropped crops at 0.05 level. IW: intercropped wheat; MW: monocropped wheat; IM: intercropped maize; MM: monocropped maize.

2.1.2 土地当量比

除 2014 年玉米/马铃薯土地当量比小于 1 外, 2014 年、2015 年小麦/蚕豆间作和 2015 年玉米/马铃薯间作的 LER 均大于 1(图 2)。小麦/蚕豆间作的 LER 分别为 1.06 和 1.09, 玉米/马铃薯间作 2015 年 LER 为 1.05, 表现出显著的间作产量优势, 而 2014 年 LER 为 0.95, 没有间作优势, 可能是由于当年该体系试验区进行了填土改造所导致。

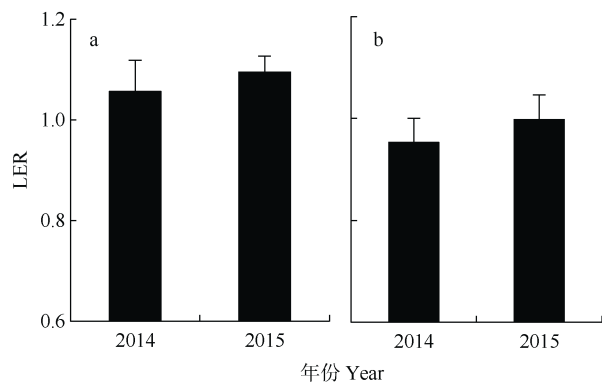


图 2 2014 年和 2015 年小麦/蚕豆间作系统(a)和玉米/马铃薯(b)间作体系的土地当量比(LER)

Fig. 2 Land equivalent ratios (LER) of wheat/faba bean intercropping system (a) and maize/potato intercropping system (b) in 2014 and 2015

2.2 不同间作体系的全球增温潜势

通过对农资和农作系统的资源消耗和环境排放清单进行加权统计, 计算出能引起温室效应的污染物(CO_2 、 CH_4 、 CO 和 NO_x)当量排放值(图 3)。

2014 年和 2015 年小麦蚕豆体系中间作的全球增温潜势均低于单作, 2014 年具有明显的间作环境效应优势, 与单位小麦差异显著; 2014 年和 2015 年间作全球增温潜势较单作分别降低 28.54% 和 15.29%, 年际间变化表现为无论单作、间作, 2014

年全球增温潜势均高于 2015 年(图 3)。玉米马铃薯体系 2014 年和 2015 年的间作全球增温潜势值均低于相应的单作, 表现出一定的环境效应优势, 2014 年差异显著, 2014 年和 2015 年间作全球增温潜势较单作分别降低 19.06% 和 2.61%。就两个不同间作体系而言, 小麦/蚕豆间作全球增温潜势两年均值高于玉米/马铃薯间作体系(图 3)。

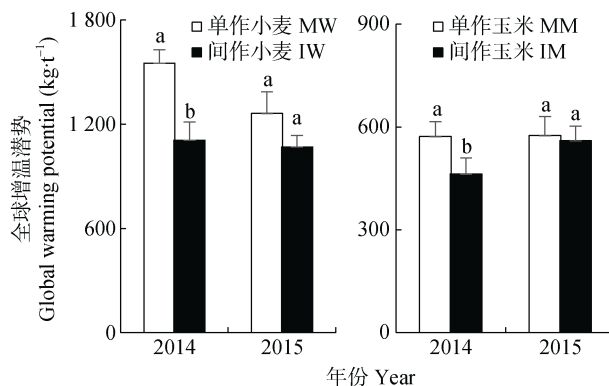


图 3 2014 年和 2015 年小麦/蚕豆和玉米/马铃薯间作体系的全球增温潜势

Fig. 3 Global warming potentials of wheat/faba bean and maize/potato intercropping systems in 2014 and 2015

不同小写字母表示单作、间作在 5% 水平差异显著。Different lowercase letters mean significant differences between monocropping and intercropping systems at 0.05 level. MW: monocropped wheat; IW: intercropped wheat; MM: monocropped maize; IM: intercropped maize.

2.3 不同间作体系的能源消耗

从表 6 可知, 2014 年和 2015 年小麦/蚕豆体系中间作小麦能源消耗显著低于单作小麦, 两年能源消耗分别降低 28.53% 和 15.29%; 2014 年和 2015 年玉米马铃薯体系中间作玉米比单作玉米能源消耗分别降低 18.83% 和 2.61%, 2014 年间作玉米能源消耗显著低于单作玉米, 但 2015 年未达显著差异。

表 6 2014 年和 2015 年小麦、玉米单作和间作体系的能源消耗

Table 6 Energy depletion of intercropped and monocropped wheat and maize in 2014 and 2015

$\text{MJ} \cdot \text{t}^{-1}$

年份 Year	单作小麦 Monocropped wheat	与蚕豆间作的小麦 Wheat intercropped with faba bean	单作玉米 Monocropped maize	与马铃薯间作的玉米 Maize intercropped with potato
2014	5 219.5±273.0a	3 730.3±222.6b	2 316.4±260.5a	1 880.0±156.2b
2015	4 499.5±144.7a	3 811.3±84.2b	2 351.9±243.9a	2 290.4±115.5a

不同小写字母表示单作、间作在 0.05 水平差异显著。Different lowercase letters mean significant differences between monocropped and intercropped crops at 0.05 level.

2.4 不同间作体系的环境风险评价

不同年份下, 小麦蚕豆和玉米马铃薯两个体系下, 间作的能源消耗和全球增温潜势权重后影响指数均低于单作(表 7)。两年间小麦蚕豆体系中间作小麦降低能源消耗作用与单作小麦差异显著, 玉米马铃薯体系均未达显著差异。就全球增温潜势而言, 2014 年无论小

麦蚕豆体系还是玉米马铃薯体系, 间作的环境权重后影响指数均显著低于相应单作, 2015 年间作影响指数同样低于相应单作, 但未达显著差异。

本研究中, 间作处理在不同年份均表现出明显的环境影响减缓潜力(表 8): 小麦/蚕豆间作的能源消耗减缓潜力两年平均值为 24.58%, 全球增温潜势

减缓潜力平均值为 20.49%; 玉米/马铃薯间作两年平均值分别为 11.46%和 13.32%。小麦/蚕豆间作较

玉米/马铃薯间作降低能源消耗和全球增温潜势的效果更明显, 有更友好的环境效应。

表 7 2014 年和 2015 年小麦/蚕豆和玉米/马铃薯间作体系能源消耗和全球增温潜势生命周期加权分析结果

Table 7 Weighting of life cycle assessment (LCA) of energy consumption and global warming potential of wheat/faba bean and maize/potato intercropping systems in 2014 and 2015

年份 Year	作物 Crop	能源消耗(权重后影响指数) Energy consumption (weighed impact index)		全球增温潜势(权重后影响指数) Global warming potential (weighed impact index)	
		单作 Monocropping	间作 Intercropping	单作 Monocropping	间作 Intercropping
2014	小麦 Wheat	0.002 0a	0.001 4b	0.027 09a	0.019 36b
	玉米 Maize	0.000 9a	0.000 7a	0.010 00a	0.008 11b
2015	小麦 Wheat	0.001 7a	0.001 5b	0.022 05a	0.019 50a
	玉米 Maize	0.000 9a	0.000 9a	0.010 04a	0.009 78a

不同小写字母表示单作、间作体系在 5%水平差异显著。Different lowercase letters mean significant differences between monocropping and intercropping systems at 0.05 level.

表 8 2014 年和 2015 年小麦/蚕豆和玉米/马铃薯间作体系生命周期环境影响减缓潜力

Table 8 Potentials of mitigating environmental impact of life cycle assessment (LCA) of wheat/faba bean and maize/potato intercropping systems in 2014 and 2015

环境影响因子 Environmental impacting factor	2014		2015	
	间作小麦 Monocropping wheat	间作玉米 Monocropping maize	间作小麦 Intercropping wheat	间作玉米 Intercropping maize
能源消耗 Energy depletion	27.04±2.9	20.08±1.7	22.12±8.5	2.84±0.3
全球增温潜势 Global warming potential	29.08±0.8	21.95±4.3	11.89±0.5	4.68±2.9

3 讨论

3.1 间作产量优势

在间作复合种植试验中, 79%的试验结果显示间作的生物产量比单作平均高 1.7 倍^[21]。很多研究表明, 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, 农田生态系统能有效提高资源利用率和单位面积粮食产出^[22]。本研究表明, 两年间小麦/蚕豆间作均显著提高了小麦产量, 平均增幅达 28.99%, 且不同年份间的土地当量比(LER)均大于 1。体现出间作增产优势, 与前人关于合理间作能促进产量优势的研究结果有很好的 consistency^[23]。这可能是由于间作处理下改善了作物的根系形态^[11], 豆科作物的共生固氮作用促进了禾本科小麦对氮素的吸收, 促进了根际养分活化^[9], 同时提高了养分利用效率^[24], 具体机制还有待进一步探讨。

玉米/马铃薯间作 2014 年和 2015 年同样对玉米也具有增产作用, 2015 年土地当量比(LER)大于 1, 表现出间作优势。Ebongu 等^[25]研究结果与本研究一致, 均证实玉米/马铃薯间作具有产量优势。这可能是玉米/马铃薯间作会提高土壤微生物总量、丰富微生物群落结构^[26], 造成不同生态位的微生物物种多样性, 提高作物根系对养分的吸收利用^[27], 进而

提高间作体系产量。

3.2 间作降低全球增温潜势和能源消耗

21 世纪人类最亟待解决的生态环境问题之一就是温室气体排放导致的全球气候变暖。CO₂、N₂O 以及 CH₄ 是重要的温室气体, CO₂ 和 N₂O 对增强温室效应的贡献率分别约占 60%和 5%, N₂O 的增温效应约是 CO₂ 的 296~310 倍^[28], 由此可见, N₂O 和 CO₂ 是大气中最重要温室气体。农业土壤是 N₂O 和 CO₂ 重要的排放源, 农业生产过程中排放的 N₂O 占全国 N₂O 排放总量的 80%~92%^[29], 排放的 CO₂ 占全国 CO₂ 排放总量的 5%~20%^[30], 且年排放量呈递增趋势。本研究中小麦/蚕豆和玉米/马铃薯两种间作种植体系下 N₂O 和 CO₂ 等温室气体的排放量均低于单作, 与周龙等^[10]、黄坚雄等^[14]在玉米间作大豆种植模式和玉米间作马铃薯中研究结果一致, 农田 N₂O 排放通量小于相应的单作。与蚕豆间作的小麦较单作小麦全球增温潜势 2 年平均降幅为 21.91%; 与马铃薯间作的玉米较单作玉米全球增温潜势 2 年平均降幅为 10.83%。Dyer 等^[31]研究表明禾本科和豆科间作可以有效降低土壤温室气体的排放, 刘辉娟^[32]对玉米/豌豆(*Pisum sativum*)间作的研究表明, 间作可降低 10.5%~40.6%的土壤温室气体排放。这些与本研究结论一致。究其原因可能是间作改变了土壤微生物

群落结构、活性和根系形态构造,促进了根系养分的吸收利用,因此供土壤微生物反硝化底物减少,并且由于间作复合作物种间相互作用,会使其生长带内土壤呼吸速率降低^[33],最终温室气体的排放量降低。就两种体系而言,在玉米/马铃薯间作体系总施肥量高于小麦/蚕豆间作体系的情况下,其增温潜势低于小麦/蚕豆间作体系,由此可见玉米/马铃薯间作体系在降低全球增温潜势方面有更好的环境效应。

在能源消耗方面,本研究中两种体系下间作的能源消耗均低于单作。与蚕豆间作的小麦较单作小麦 2 年间能源消耗平均降低 21.91%,与马铃薯间作的玉米较单作玉米 2 年间能源消耗平均降低 10.72%。这主要得益于间作的产量优势,在收获同样作物经济产量的同时,间作体系有着更低农田投入品消耗(肥料、柴油、电力),进而在农资生产端可以节省能源消耗降低排放。LER 较好地表征了间作优势,同样的地块(同样的农田投入品消耗)下,小麦/蚕豆间作和玉米/马铃薯间作 2 年的 LER 均大于 1,较相应单作可以获得更高的产量收益。等农田投入品消耗下,间作可以获得更好的产量和更低的能源消耗;等收获产量下,间作可以投入更少消耗品,进而控制能源消耗。

4 结论

基于 LCA 对小麦/蚕豆和玉米/马铃薯间作常规施肥水平下进行了评价分析,针对产量、能源消耗、全球变暖效应等方面展开对比评价。结果表明,与单作小麦相比,与蚕豆间作的小麦产量两年分别增加 18.04%和 39.94%,与单作玉米相比,与马铃薯间作的玉米产量分别增加 2.65%和 23.16%;与单作小麦相比,与蚕豆间作的小麦的全球变暖潜值降低 15.28%和 28.53%,能源消耗减少 15.29%和 28.53%;与单作玉米相比,与马铃薯间作的玉米的全球变暖潜值降低 2.61%和 19.05%,能源消耗减少 2.61%和 18.83%。合理间作具有显著增产效应,同时可以降低温室气体的排放以及能源消耗,以更低环境代价获得作物高产高效。本研究对于环境效应中大气酸化、水体富营养化、土壤重金属毒性等方面研究不足,且只在常规施肥水平下进行研究,今后望能在不同施肥水平下对间作体系进行 LCA 多方面的环境效应评价。

参考文献 References

- [1] VITOUSEK P M, MOONEY H A, Lubchenco J, et al. Human domination of earth's ecosystems[J]. *Science*, 1997, 277(5325): 494–499
- [2] RAVISHANKARA A R, DANIEL J S, PORTMANN R W. Nitrous oxide (N₂O): the dominant ozone-depleting substance emitted in the 21st century[J]. *Science*, 2009, 326(5949): 123–125
- [3] YANG Y S, SHENG G H, LU G H. The suggestion for application LCA in the agriculture in China[J]. *Soft Science*, 2003, (5): 7–11
- [4] CEDERBERG C, MATTSSON B. Life cycle assessment of milk production — a comparison of conventional and organic farming[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2000, 8(1): 49–60
- [5] 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 L, CHEN Y Q, GAO W S, 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
- [6] MEISTERLING K, SAMARAS C, SCHWEIZER V. Decisions to reduce greenhouse gases from agriculture and product transport: LCA case study of organic and conventional wheat[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2009, 17(2): 222–230
- [7] 王明新, 夏训峰, 刘建国, 等. 太湖地区高产水稻生命周期评价[J]. *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[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(2): 420–424
- [8] ZHANG F S, SHEN J B, ZHANG J L, et al. Rhizosphere processes and management for improving nutrient use efficiency and crop productivity: Implications for China[J]. *Advances in Agronomy*, 2010, (10): 1–32
- [9] 肖靖秀, 汤利, 郑毅. 氮肥用量对油菜/蚕豆间作系统作物产量及养分吸收的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2011, 17(6): 1468–1473
XIAO J X, TANG L, ZHENG Y. Effects of N fertilization on yield and nutrient absorption in rape and faba bean intercropping system[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2011, 17(6): 1468–1473
- [10] 周龙, 吕玉, 朱启林, 等. 施氮与间作对玉米和马铃薯钾吸收与分配的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2016, 22(6): 1485–1493
ZHOU L, LYU Y, ZHU Q L, et al. Effects of N application on potassium absorption and distribution of maize and potato in intercropping system[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2016, 22(6): 1485–1493
- [11] 董艳, 董坤, 杨智仙, 等. 间作减轻蚕豆枯萎病的微生物和生理机制[J]. *应用生态学报*, 2016, 27(6): 1984–1992
DONG Y, DONG K, YANG Z X, et al. Microbial and physiological mechanisms for alleviating Fusarium wilt of faba bean in intercropping system[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2016, 27(6): 1984–1992
- [12] 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[J]. *环境科学*, 2016, 37(8): 3229–3236
LYU 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[J]. *Environmental Science*, 2016, 37(8): 3229–3236

- [13] LITHOURGIDIS A S, DORDAS C A, DAMALAS C A, et al. Annual intercrops: an alternative pathway for sustainable agriculture[J]. Australian Journal of Crop Science, 2011, 5(4): 396–410
- [14] 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[J]. 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[J]. Journal of China Agricultural University, 2015, 20(4): 66–74
- [15] 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[J]. 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[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2013, 21(11): 1318–1327
- [16] 王宇蕴, 任家兵, 郑毅, 等. 间作小麦根际和土体磷养分的动态变化[J]. 云南农业大学学报, 2011, 26(6): 851–855
WANG Y Y, REN J B, ZHENG Y, et al. Dynamics of available phosphorus in rhizosphere and bulk soil of wheat under intercropping[J]. Journal of Yunnan Agricultural University, 2011, 26(6): 851–855
- [17] 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[D]. 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[D]. Beijing: China Agricultural University, 2009
- [18] CARDINALE B J, WRIGHT J P, CADOTTE M W, et al. Impacts of plant diversity on biomass production increase through time because of species complementarity[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2007, 104(46): 18123–18128
- [19] 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[M]. 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 of Wheat-Maize Rotation System[M]. Beijing: China Agricultural University Press, 2006: 203–205
- [20] MOSIER A, KROEZE C, NEVISON C, et al. Closing the global N₂O budget: nitrous oxide emissions through the agricultural nitrogen cycle[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 1998, 52(2/3): 225–248
- [21] GHANBARI A, DAHMARDEH M, SIAHSAR 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[J]. Journal of Food, Agriculture and Environment, 2010, 8(1): 102–108
- [22] ECHARTE L, MAGGIORA A D, CERRUDO D, et al. Yield response to plant density of maize and sunflower intercropped with soybean[J]. Field Crops Research, 2011, 121(3): 423–429
- [23] 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[J]. 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[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2012, 43(2): 466–471
- [24] 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[J]. 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[J]. Journal of Triticeae Crops, 2011, 31(3): 499–503
- [25] EBWONGU M, ADIPALA E, SSEKABEMBE C K, et al. Effect of intercropping maize and solanum potato on yield of the component crops in Central Uganda[J]. African Crop Science Journal, 2001, 9(1): 83–96
- [26] 覃潇敏, 郑毅, 汤利, 等. 玉米与马铃薯间作对根际微生物群落结构和多样性的影响[J]. 作物学报, 2015, 41(6): 919–928
QIN X M, ZHENG Y, TANG L, et al. Effects of maize and potato intercropping on rhizosphere microbial community structure and diversity[J]. Acta Agronomica Sinica, 2015, 41(6): 919–928
- [27] 黄承建, 赵思毅, 王季春, 等. 马铃薯/玉米不同行数比套作对马铃薯光合特性和产量的影响[J]. 中国生态农业学报, 2012, 20(11): 1443–1450
HUANG C J, ZHAO S Y, WANG J C, et al. Photosynthetic characteristics and yield of potato in potato/maize intercropping systems with different row number ratios[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2012, 20(11): 1443–1450
- [28] 翟胜, 高宝玉, 王巨媛, 等. 农田土壤温室气体产生机制及影响因素研究进展[J]. 生态环境, 2008, 17(6): 2488–2493
ZHAI S, GAO B Y, WANG J Y, et al. Mechanism and impact factors of greenhouse gases generation from farmland[J]. Ecology and Environment, 2008, 17(6): 2488–2493
- [29] 国家发展和改革委员会. 中华人民共和国气候变化初始国家信息通报[M]. 北京: 中国计划出版社, 2004
National Development and Reform Commission. People's Republic of China Initial National Communication on Climate Change[M]. Beijing: China Planning Press, 2004
- [30] 张玉铭, 胡春胜, 张佳宝, 等. 农田土壤主要温室气体(CO₂, CH₄, N₂O)的源/汇强度及其温室效应研究进展[J]. 中国生态农业学报, 2011, 19(4): 966–975
ZHANG Y M, HU C S, ZHANG J B, et al. Research advances on source / sink intensities and greenhouse effects of CO₂, CH₄ and N₂O in agricultural soils[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2011, 19(4): 966–975
- [31] DYER L, OELBERMANN M, ECHARTE L. Soil carbon dioxide and nitrous oxide emissions during the growing season from temperate maize-soybean intercrops[J]. Journal of Plant Nutrient and Soil Science, 2012, 175: 394–400
- [32] 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[D]. 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[D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2012
- [33] QIN A Z, HUANG G B, CHAI Q, et al. Grain yield and soil respiratory response to intercropping systems on arid land[J]. Field Crops Research, 2013, 144: 1–10