



灌漠土上连续间作对作物生产力和土壤化学肥力的影响^{*}

柳欣茹^{1, 2} 包兴国³ 王志刚² 李 隆^{2†}

(1 石河子大学农学院, 新疆石河子 832000)

(2 中国农业大学资源与环境学院, 生物多样性与有机农业北京市重点实验室, 北京 100193)

(3 甘肃省农业科学院土壤肥料与节水研究所, 兰州 730070)

摘 要 间套作是我国传统农业的精髓, 是发展生态农业的重要措施之一, 在我国乃至世界的现代农业中仍然占有一定的地位。然而, 长期间套作条件下的土壤肥力变化研究较为缺乏。在甘肃武威连续6年(2009—2014年)进行定位试验, 采用两因素试验设计, 主因素为三个施磷水平(0、40和80 kg hm⁻²), 副因素为9种植模式(蚕豆/玉米、大豆/玉米、鹰嘴豆/玉米和油菜/玉米间作, 蚕豆、大豆、鹰嘴豆、油菜和玉米单作), 分别在第5年(2013年)和第6年(2014年)测定体系生产力和土壤肥力的主要化学指标, 旨在明确连续间作条件下土壤肥力的变化。结果表明: 1) 三个施磷水平平均下, 间作显著提高体系籽粒产量, 鹰嘴豆、蚕豆、大豆和油菜与玉米间作体系平均产量比对应单作分别高出38.2%、32.6%、34.0%和38.4%; 2) 与单作相比, 间作种植显著提高了土壤有机质含量; 3) 施磷及种植方式对土壤全氮含量均无显著影响; 4) 间作种植与单作相比在2013年分别显著降低土壤Olsen P含量5.2%、6.9%、15.9%和11.3%, 2014年间作相对于单作土壤Olsen P无显著变化; 5) 间作显著降低土壤速效钾含量, 2年平均下降10.3%、14.1%、8.5%和13.2%; 6) 施磷和作物组合以及间作均未显著改变土壤pH。总之, 连续种植5—6年, 间作相对于单作仍能提高体系作物籽粒产量, 施磷也能提高体系籽粒产量, 80 kg hm⁻²施磷量时产量达到最高; 间作有增加土壤有机质, 降低土壤Olsen P和速效钾含量趋势, 土壤全氮和pH未受到施磷和间作的影响。表明在合理的施肥条件下, 间套作不仅相对于单作提高了作物产量, 还能够增强农田生态系统的可持续性。

关键词 间作; 生产力; 土壤有机质; 土壤全氮; 土壤有效磷; 土壤速效钾

中图分类号 S158.2 **文献标识码** A

间作是指在同一时期内, 同一地块分行或分带种植两种或两种以上作物的传统种植方式^[1], 是作物物种水平上增加农田生态系统作物多样性的重要措施之一。间套作在我国历史悠久, 是我国传统农业的精髓之一^[2]。间套作种植的优势在于单位土地面积上可以同时收获两种或两种以上的经济产量, 具有明显的产量优势和经济优势^[3]。同时,

具有提高资源利用率和粮食产量^[4]、提高耕地复种指数^[5]和土壤肥力^[6-7]、增强农业系统的抗风险能力^[2, 8]、防止水土流失^[9]、防治病虫害、抑制杂草以及降低农药使用量^[10-12]等优势, 因此在我国乃至全世界都有较为广泛的应用和分布。

间作种植的产量优势在许多田间试验中得以证实^[13-16]。在肯尼亚马查科斯镇, 间作玉米较

^{*} 国家科技支撑计划项目(2012BAD14B10)、国家重点基础研究发展计划“973”项目(2011CB100405)和国家自然科学基金项目(31430014)共同资助 Supported by the National Key Technology R&D Program of China (No. 2012BAD14B10), the National Basic Research Program of China (973 Program) (No. 2011CB100405) and the National Natural Science Foundation of China (No. 31430014)

[†] 通讯作者 Corresponding author, E-mail: lilong@cau.edu.cn

作者简介: 柳欣茹(1991—), 女, 新疆维吾尔族自治区额敏县人, 硕士研究生, 主要从事农田生物多样性与资源利用研究。E-mail: liuxinru91@sina.cn

收稿日期: 2015-11-19; 收到修改稿日期: 2016-01-25; 优先数字出版日期(www.cnki.net): 2016-03-01



单作玉米产量提高了17%~24%^[17]。在比利时布鲁塞尔韭菜/芹菜间作的土地当量比(LER)均大于1^[18]。在我国西北地区高氮低磷的土壤上通过连续四年的田间试验发现:与单作相比,间作玉米产量增加43%,间作蚕豆产量增加26%^[19]。

间作具有显著的产量优势,同时间作种植还具有养分吸收优势^[20-22],即间作种植从土壤中移出的氮磷钾和微量元素量也显著高于单作^[23]。在灌漠土上研究发现玉米/蚕豆间作不仅促进了蚕豆对磷的吸收,而且还改善了玉米的磷营养^[19];李隆等^[24]通过田间小区试验证明,与各相应单作相比,间作作物的氮、磷、钾养分吸收总量分别高出单作24%~39%、6%~27%和24%~64%。小麦/鹰嘴豆体系中,间作体系磷素的吸收量较单作高出22.3%^[25],扁豆/大麦体系中,间作体系氮素的吸收量较单作高出51.4%^[26]。

因此,间作提高产量的同时从土壤中携出较单作更多养分是否导致土壤肥力降低?这成为众所关注的问题。叶优良等^[27]通过研究3种豆科作物与玉米间作后地下部硝态氮的分布发现:在蚕豆收获后,间作的蚕豆、大豆、豌豆和玉米的土壤硝态氮累积量均低于其相对应的单作。Wang等^[28]发现,间作3—4年能够维持土壤化学性状基本稳定。本文拟在此基础上,在定位试验的第5年(2013年)和第6年(2014年),通过测定土壤肥力的主要化学指标(有机质、全氮、Olsen P含量、速效钾和pH等),探讨在4种不同间作种植体系下,连续间作对作物生产力和土壤化学肥力的影响,为间套作可持续发展提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验设在甘肃省农业科学院土壤肥料与节水研究所武威白云绿洲试验站。试验站位于甘肃省武威市永昌镇白云村(38°37'N, 102°40'E),海拔高度为1 504 m,年平均气温为7.7℃,≥0℃和≥10℃年均有效积温分别为3 646℃和3 149℃,无霜期170~180 d,日照时数为3 023 h,年太阳辐射总量为5 988 MJ m⁻²,年平均降水量为150 mm,年平均蒸发量为2 021 mm,蒸发量约为降水量的14倍,属于典型两季不足、一季有余大陆性干旱气候。供试土壤类型为灌漠土,表土质地为轻

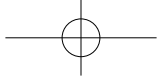
壤,试验设置前耕层土壤基本性质:土壤有机质15.9 g kg⁻¹,全氮1.07 g kg⁻¹,Olsen P 19.5 mg kg⁻¹,土壤速效钾205 mg kg⁻¹,pH 8.0。

1.2 试验设计

本试验是两因素试验,主因素是三个磷水平(0、40、80 kg hm⁻²),副因素是玉米/鹰嘴豆、玉米/蚕豆、玉米/大豆、玉米/油菜四种间作体系以及相应5种作物单作共9种植植方式(玉米/鹰嘴豆、玉米/蚕豆、玉米/大豆、玉米/油菜、单作玉米、单作鹰嘴豆、单作蚕豆、单作大豆、单作油菜),每个处理设置三次重复,共81个小区,随机区组排列。试验始于2009年。

供试作物及品种:玉米为郑单958(*Zea mays* L. cv. Zhengdan No.958),鹰嘴豆为陇鹰1号(*Cicer arietinum* L. cv. Longying No.1),蚕豆为临蚕5号(*Vicia faba* L. cv. Lincan No.5),大豆为华夏1号(*Glycine max* L. cv. Huaxia No.1),油菜为陇油5号(*Brassica campestris* L. cv. Longyou No.5)。间作小区面积为30.8 m²(5.6 m×5.5 m),种植4个组合带,每带包括2行玉米和3行配对作物;单作小区面积为,单作鹰嘴豆、蚕豆、大豆、油菜小区面积为22 m²(4 m×5.5 m),种植20行;单作玉米小区面积27.5 m²(5.0 m×5.5 m),种植12行。配对作物在间作和单作中的行距均为0.2 m,株距为0.2 m,玉米无论单、间作行距均为0.4 m,株距约为0.25 m。

施肥与田间管理:试验中所有作物统一施肥,按照设计的施磷量(40、80 kg hm⁻²)均以重过磷酸钙(P含量44%)作基肥一次性施入。氮肥用量均为225 kg hm⁻²,其中150 kg hm⁻²播种前基施,剩余75 kg hm⁻²在玉米拔节期追施,其他作物(鹰嘴豆、蚕豆、大豆和油菜)与玉米同时施肥。氮肥为尿素(N含量46%)。在作物整个生长期,所有小区均给予适当的灌溉,其中单作玉米、单作大豆、间作玉米、间作大豆各灌水7次,单作油菜、间作油菜各灌水4次,单作蚕豆、单作鹰嘴豆、间作蚕豆、间作鹰嘴豆各灌溉5次,每次灌水量75 mm。第一次灌溉在4月15—20日,第二次灌溉在5月15日,第三次灌溉在6月5—10日,第四次灌溉在6月20—25日,第五次灌溉在7月20日,第六次灌溉在8月5日,第七次灌溉在8月25日。进行适时除草中耕。在蚕豆盛花期均匀喷施氧化乐果(0, 0-二甲基-S-(N-甲基氨基甲酰甲基)硫代



磷酸酯)防治蚜虫病害。

1.3 取样及测定方法

作物全部收获后,一次性收获后测产,单作小区取两个作物种植带,间作小区每种作物各取两个作物种植带,自然风干后测产。待作物全部收获后每个小区采取土壤样品用于土壤化学指标的测定。间作小区取8个点,每种作物带均取4个点,单作小区也取4个点,分别将每种作物下面所取的四个点的土样混合均匀,按照四分法选取其中一部分土壤样品装袋。取样深度为0~20 cm。将风干样品过2 mm筛,去除土壤样品中的杂质和根系,装入自封袋以备进行土壤化学性质分析。

土壤有机质采用重铬酸钾容量法测定,土壤全氮用半微量凯氏定氮法(SKD-800定氮仪,沛鸥有限公司,上海),土壤Olsen P用0.5 mol L⁻¹ NaHCO₃浸提—钼锑钒紫外分光光度法(Uvmini-1240分光光度计,岛津有限公司,上海),土壤速效钾用1.0 mol L⁻¹ NH₄OAc 浸提—火焰光度法(M410火焰光度计,苑胜有限公司,上海);土壤pH采用去离子水浸提(土水比为1:5),pH计(pH-3C型,米青科实有限公司,上海)测定。

为了便于间作和单作之间进行比较,除特别说明之外,本文中所有测定指标(籽粒产量、土壤有机质、土壤全氮、土壤Olsen P、土壤速效钾等)均采用加权平均的方法。以间作中两作物所占面积的比例将两作物单作的前述指标转化为两作物单作加权平均值,即对应单作指标乘以该作物在间作中所占面积比例,两者之和为单作加权平均值。同样地,将两种间作作物的前述指标转化为两作物加权平均值,即对应间作指标乘以该作物在间作中所占的面积比例,两者之和为间作加权平均值。

以产量为例:

$$\text{籽粒产量} = Y_{\text{monocrop-a}} \times P_a + Y_{\text{monocrop-b}} \times P_b \quad (1)$$

式中, $Y_{\text{monocrop-a}}$ 与 $Y_{\text{monocrop-b}}$ 分别表示作物a、b单作时的籽粒产量(t hm⁻²), P_a 和 P_b 分别表示其对应间作作物所占的面积比例, $P_a = W_a / (W_a + W_b)$, $P_b = W_b / (W_a + W_b)$, W_a 和 W_b 表示作物a、b所占的带幅宽度。即所得产量是净面积的单作和间作产量。

1.4 数据处理

每年数据采用两因素区组设计进行统计分析;主因素为3个磷水平,副因素为8个种植体系(4个间作体系和相应单作体系的加权平均值)。两年数据考虑年际间因素,采用三因素统计分析(SAS

19.1, 2003)。采用SAS 9.1进行方差分析,使用最小显著性差异法(LSD)进行多重比较。统计显著差异的水平为 $p < 0.05$ 。

2 结 果

2.1 连续间作下的作物籽粒产量

与单作相比,间作显著提高了作物的籽粒产量。两年间,平均三个磷水平,与单作相比,间作配对作物(鹰嘴豆、蚕豆、大豆、油菜)和间作玉米籽粒产量比对应单作显著高出26.7%和40.1%(表1和表2)。

从不同施磷水平来看,随着施磷水平的提高籽粒产量显著增加。两年间,与不施磷相比,配对作物(鹰嘴豆、蚕豆、大豆、油菜)籽粒产量在40和80 kg hm⁻²施磷水平下,平均显著高出不施磷14.2%和47.7%。间作玉米籽粒产量在40和80 kg hm⁻²施磷水平下,平均显著高出不施磷3.9%和10.37%(表1和表2)。

两年结果表明,综合三个施磷水平,间作显著增加了作物籽粒产量(表3和表7)。三个施磷水平平均,玉米/鹰嘴豆、玉米/蚕豆、玉米/大豆和玉米/油菜间作比相应单作籽粒产量加权平均分别增加38.2%、32.6%、34.0%和38.4%,达显著水平。与单作相比,间作种植在不施磷、40 kg hm⁻²施磷水平、80 kg hm⁻²施磷水平下籽粒产量分别高出对应单作40.5%、37.7%、39.1%。综合单间作体系,不同施磷水平对籽粒产量有显著影响(表3和表7)。与不施磷相比,两年平均,施用磷肥40和80 kg hm⁻²籽粒平均产量增加5.11%和13.69%。两年80 kg hm⁻²施磷量相对于40 kg hm⁻²增加4.7%和11.2%($p < 0.05$)。

2.2 连续间作下的土壤有机质含量

综合三个施磷水平,两年间,间作对土壤有机质含量的影响呈现不一致的结果(表4和表7)。2013年,玉米/鹰嘴豆、玉米/蚕豆、玉米/大豆和玉米/油菜间作较相对应单作土壤有机质含量分别提高15.4%、10.3%、16.2%和10.6%。而2014年,四种作物组合的间作与相应单作的土壤有机质相比均无显著差异。间作种植在不施磷下土壤有机质含量低于对应单作。与单作相比,40 kg hm⁻²施磷水平和80 kg hm⁻²施磷水平下分别高出12.8%和7.8%($p < 0.05$)。



表1 施磷和间作对鹰嘴豆、蚕豆、大豆、油菜籽粒产量的影响

Table 1 Effects of P application and intercropping on grain yields of chickpea, faba bean, soybean and rapeseed (t hm ⁻²)										
年份 Year	施磷水平 P rate (kg hm ⁻²)	鹰嘴豆 Chickpea		蚕豆 Faba bean		大豆 Soybean		油菜 Rapeseed		平均值 Mean
		单作	间作	单作	间作	单作	间作	单作	间作	
		Monocrop	Intercrop	Monocrop	Intercrop	Monocrop	Intercrop	Monocrop	Intercrop	
2013	0	1.59cd	1.81bc	1.63cd	2.28a	1.25d	2.09ab	0.57e	0.73e	1.49C
	40	1.84cd	2.05bc	1.79cd	2.33ab	1.54d	2.38a	0.76e	0.80e	1.69B
	80	2.03bc	2.56ab	2.25ab	2.64a	1.67c	2.4ab	0.80d	0.87d	1.90A
	平均值 Average	1.82C	2.14B	1.89C	2.42A	1.48D	2.29AB	0.71E	0.80E	1.69
2014	0	1.65cd	2.40a	1.48d	1.78c	1.57cd	2.04b	0.66e	0.71e	1.53B
	40	1.68c	2.54ab	1.83c	2.64a	1.94c	2.01bc	0.71d	0.77d	1.76B
	80	1.93bcd	3.69ab	2.74abcd	3.79a	3.11ab	3.03abc	0.94d	1.21cd	2.56A
	平均值 Average	1.75D	2.88A	2.02CD	2.74AB	2.21BCD	2.36ABC	0.77E	0.90E	1.95

注：表中所列数据为3个重复的平均值。同一年内的数据采用两因素统计分析；同一年内同一施磷量下相同小写字母表示不同作物之间在 $p < 0.05$ 水平差异不显著（水平方向比较）；同一年相同大写字母表示不同作物（水平方向比较）或不同施磷量间（垂直方向比较）在 $p < 0.05$ 水平差异不显著。下同 Note: Values are means of 3 replicates. Two factorial analysis was used in the same year. Values followed by the same lowercase letters are not significantly different between different crops with the same P application rate in one year at 5% level (horizontal comparison) ; values followed by the same capital letters are not significantly different between treatments different in P rate (vertical comparison) or between treatments different in crop (horizontal comparison) in one year at 5% level. The same below

表2 施磷和间作对玉米籽粒产量的影响

Table 2 Effects of P application and intercropping on grain yield of maize (t hm ⁻²)							
年份 Year	施磷水平 P rate (kg hm ⁻²)	玉米（单作） Maize (Monocrop)	玉米（间作）Maize (Intercrop)				平均值 Mean
2013	0	12.38c	M/C-M ^①	M/F-M ^②	M/S-M ^③	M/R-M ^④	16.59B
	40	12.46b	16.69b	17.20a	17.51a	17.27a	19.12a
	80	12.73c	16.96b	17.51a	17.27a	19.08a	16.70B
	平均值 Average	12.52C	18.29b	18.25b	18.61a	19.66a	17.51A
2014	0	11.77b	16.58a	16.32a	16.12a	17.09a	15.58C
	40	13.09c	17.55b	16.95b	18.69a	17.31b	16.72B
	80	14.15b	18.64a	18.28a	19.36a	19.36a	17.96A
	平均值 Average	13.00C	17.59AB	17.19B	18.06A	17.92A	16.75

注：①②③④分别代表与鹰嘴豆、蚕豆、大豆和油菜间作时的玉米 Note: ①②③④ indicate maize intercropped with chickpea, faba bean, soybean and rapeseed, respectively

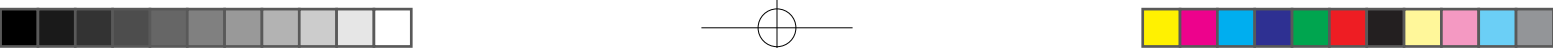


表3 施磷和间作对间作体系混合籽粒产量和单作加权平均籽粒产量的影响

Table 3 Effects of P application and intercropping on grain yields of intercropping and the weighted means of corresponding monocultures (t hm⁻²)

年份 Year	施磷水平 P rate (kg hm ⁻²)	玉米+鹰嘴豆		玉米+蚕豆		玉米+大豆		玉米+油菜		平均值 Mean
		Maize + Chickpea		Maize + Faba bean		Maize + Soybean		Maize + Rapeseed		
		单作	间作	单作	间作	单作	间作	单作	间作	
		Monocrop	Intercrop	Monocrop	Intercrop	Monocrop	Intercrop	Monocrop	Intercrop	
2013	0	7.76c	10.31b	7.77c	10.67ab	7.61c	11.07ab	7.39c	11.17a	9.22B
	40	7.91b	10.71a	7.89b	11.00a	7.78b	10.89a	7.44b	11.24a	9.36B
	80	8.14b	11.55a	8.23b	11.56a	7.99b	11.66a	7.62b	11.61a	9.80A
	平均值 Average	7.94CD	10.86B	7.96C	11.08AB	7.79CD	11.21AB	7.48D	11.34A	9.46
2014	0	7.38b	10.50a	7.36b	10.09a	7.48b	10.09a	7.01b	10.07a	8.75C
	40	8.20de	11.12ab	8.26d	10.82b	8.31d	11.54a	7.78e	10.22c	9.53B
	80	8.92b	12.23a	9.26b	12.07a	9.50b	12.28a	8.54b	11.97a	10.60A
	平均值 Average	8.16CD	11.28A	8.30C	10.99AB	8.43C	11.30A	7.78D	10.75B	9.63

施磷对土壤有机质含量有显著影响：2013年不施磷和80 kg hm⁻²显著高于施磷40 kg hm⁻²。2014年80 kg hm⁻²和40 kg hm⁻²显著高于不施磷。与单作相比，间作种植提高了体系土壤有机质含量。平均四种作物组合，2013年不施磷和施磷80 kg hm⁻²土壤有机质含量高出施磷40 kg hm⁻²水平12.9%和8.1%，2014年施磷40 kg hm⁻²和80 kg hm⁻²处理分别高出不施磷土壤有机质含量7.5%和10.9%（表4

和表7）。

与试验开始前（2009年）的土壤化学性质比较，连续间作5年（2013年）后单作和间作土壤有机质分别降低了12.8%和1.4%。连续间作6年（2014年）后单作和间作土壤有机质分别降低8.9%和7.0%。两年平均后，单作和间作分别降低有机质10.8%和4.2%，间作能够缓解有机质的下降趋势。

表4 施磷和间作对土壤有机质含量的影响

Table 4 Effects of P application and intercropping on soil organic matter (g kg⁻¹)

	施磷水平	玉米+鹰嘴豆		玉米+蚕豆		玉米+大豆		玉米+油菜		
年份	P rate	Maize + Chickpea		Maize + Faba bean		Maize + Soybean		Maize + Rapeseed		平均值
Year	(kg hm ⁻²)	单作	间作	单作	间作	单作	间作	单作	间作	Mean
		Monocrop	Intercrop	Monocrop	Intercrop	Monocrop	Intercrop	Monocrop	Intercrop	
2013	0	15.32ab	15.55ab	15.35a	15.95a	15.65ab	16.69a	15.54a	14.63ab	15.59A
	40	12.55b	15.97a	12.56b	14.61ab	12.49b	15.12ab	12.59b	14.58b	13.81B
	80	13.58b	16.31a	13.11b	14.67ab	14.04b	17.23a	13.56b	16.90a	14.93A
	平均值Average	13.82D	15.95AB	13.67D	15.08BC	14.06CD	16.34A	13.90D	15.37AB	14.77
2014	0	13.33a	13.59a	14.04a	14.23a	13.50a	14.20a	13.52a	13.91a	13.79B
	40	14.43a	14.45a	14.38a	16.07a	14.09ab	14.73a	14.53a	15.89a	14.82A
	80	16.08a	15.12ab	15.09ab	14.40b	15.78ab	15.20ab	15.17ab	15.61ab	15.30A
	平均值Average	14.61A	14.39A	14.50A	14.90A	14.45AB	14.71A	14.41A	15.14A	14.64

2.3 连续间作下的土壤Olsen P含量

平均四种作物组合, 2013和2014年体系土壤Olsen P含量随施磷水平增加显著增加(表5和表7), 80 kg hm⁻²时土壤Olsen P含量达到最大。40 kg hm⁻²和80 kg hm⁻²施磷量体系土壤Olsen P含量分别高于不施磷11.7%~25.4%和30.2%~30.9% ($p < 0.05$)。

三个磷水平下, 对于不同作物组合而言, 与单作相比, 除玉米/蚕豆间作体系无显著差异外, 2013年80 kg hm⁻²施磷水平下其他三个作物组合土壤Olsen P含量显著降低(表5和表7)。2014年,

四个作物组合单作和间作之间土壤Olsen P含量均无显著差异。与单作相比, 间作种植在不施磷、40 kg hm⁻²施磷水平和80 kg hm⁻²施磷水平下分别低于相对应单作9.4%、5.9%和5.4%。施磷提高了土壤Olsen P的含量, 间作种植相对于单作降低了土壤Olsen P的含量。

与试验开始前(2009年)的土壤Olsen P含量19.5 mg kg⁻¹比较, 不施磷单作土壤Olsen P有所增加, 间作连续种植并未使土壤Olsen P含量降低。在连续施磷5—6年条件下, 无论是单作还是间作, 土壤Olsen P含量增加幅度达到30.0%~52.6%。

表5 施磷和间作对土壤Olsen P含量的影响

Table 5 Effects of P application and intercropping on soil Olsen P (mg kg⁻¹)

施磷水平		玉米+鹰嘴豆		玉米+蚕豆		玉米+大豆		玉米+油菜		
年份	P rate	Maize + Chickpea		Maize + Faba bean		Maize + Soybean		Maize + Rapeseed		平均值
Year	(kg hm ⁻²)	单作	间作	单作	间作	单作	间作	单作	间作	Mean
		Monocrop	Intercrop	Monocrop	Intercrop	Monocrop	Intercrop	Monocrop	Intercrop	
2013	0	26.2ab	26.1ab	26.7a	24.4abc	23.6bc	19.9d	24.6abc	21.8cd	24.1C
	40	28.0ab	25.7bcd	29.9a	29.1a	27.1abc	23.7d	27.0abc	24.4cd	26.9B
	80	33.9a	31.8ab	35.2a	32.1ab	31.2ab	25.2c	33.0ab	28.9bc	31.4A
	平均值Average	29.4AB	27.9BC	30.6A	28.5BC	27.3C	22.9E	28.2BC	25.0D	27.5
2014	0	22.2a	19.9abc	19.2abc	17.4c	21.1abc	17.9bc	22.9ab	21.6ab	20.3B
	40	25.7a	23.9a	25.9a	24.9a	26.6a	26.4a	25.4a	24.7a	25.4A
	80	28.1a	29.4a	25.6b	25.9b	25.6b	25.1b	25.7ab	26.9ab	26.5A
	平均值Average	25.3A	24.4AB	23.5ABC	22.7C	24.4AB	23.2BC	24.7AB	24.4ABC	24.1

2.4 连续间作下的土壤速效钾含量

综合三个施磷水平, 2013年, 与单作相比, 除玉米/鹰嘴豆体系显著降低土壤速效钾含量之外, 其余三种作物组合间作种植并未影响土壤速效钾的含量。2014年, 与单作相比, 四种作物组合间作种植分别降低了土壤速效钾的含量12.0%、16.0%、11.6%和13.8% ($p < 0.05$)。两年间, 不同种植方式显著影响体系土壤速效钾含量(表6)。与单作相比, 间作种植在不施磷、40 kg hm⁻²施磷水平和80 kg hm⁻²施磷水平下分别低于相应单作7.5%、8.6%和14.6%。施磷能提高体系土壤速效钾的含量。与单作相比, 间作种植降低了土壤速效钾含量(表6和表7)。

平均四种作物组合, 2013年, 80 kg hm⁻²显著高于40 kg hm⁻²和不施磷下的土壤速效钾含量, 不施磷和40 kg hm⁻²之间土壤速效钾含量无显著差异

(表6)。2014年, 40 kg hm⁻²显著高于不施磷和80 kg hm⁻²水平下的土壤速效钾含量。不施磷和80 kg hm⁻²之间土壤速效钾含量无显著差异。

与试验开始前(2009年)的土壤化学性质比较, 单作和间作分别降低土壤速效钾含量59.6%和63.8%。

2.5 连续间作下的土壤全氮和pH

不同种植方式和不同施磷水平土壤全氮含量在1.07~1.16 g kg⁻¹, 各处理间均无显著差异。与试验开始前(2009年)的土壤全氮含量比较, 单作和间作土壤全氮分别增加4.7%和3.7%。

不同种植方式和施磷水平下土壤pH在8.01~8.55, 各处理间均无显著差异。与试验开始前(2009年)的土壤pH8.0相比较, 无论是间作还是单作, 均未明显改变土壤pH。

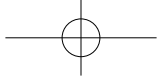


表6 施磷和间作对土壤速效钾含量的影响

Table 6 Effects of P application and intercropping on soil available K (mg kg ⁻¹)										
年份 Year	施磷水平	玉米+鹰嘴豆		玉米+蚕豆		玉米+大豆		玉米+油菜		平均值 Mean
	P rate	Maize + Chickpea		Maize + Faba bean		Maize + Soybean		Maize + Rapeseed		
	(kg hm ⁻²)	单作	间作	单作	间作	单作	间作	单作	间作	
		Monocrop	Intercrop	Monocrop	Intercrop	Monocrop	Intercrop	Monocrop	Intercrop	
2013	0	78.0ab	71.4b	78.0ab	71.7b	84.8a	87.5a	80.9ab	70.2b	77.8B
	40	81.4a	67.2c	81.4a	77.0ab	77.5ab	76.1ab	75.2b	66.2c	75.2B
	80	78.0c	80.1c	90.6a	74.2c	88.8ab	74.6c	88.8ab	81.0abc	82.0A
	平均值Average	79.1AB	72.9C	83.3A	74.3BC	83.7A	79.4A	81.6A	72.5C	78.4
2014	0	74.8bc	72.3bc	86.2a	75.1bc	78.2abc	71.3c	82.2ab	75.5bc	77.0B
	40	82.4b	75.5b	84.6ab	79.3b	78.9b	74.4b	96.6a	85.8ab	82.2A
	80	83.1ab	66.8cd	84.8ab	65.8d	77.4bc	64.5d	93.4a	77.8bc	76.7B
	平均值Average	80.1BC	71.5E	85.2AB	73.4CDE	78.2CD	70.1E	90.7A	79.7BC	78.6

表7 施磷和间作对作物籽粒产量和土壤化学性状影响的方差分析 (*p*值)

Table 7 Effects of P application and intercropping on ANOVA results for grain yields and Soil chemical properties (<i>p</i> Value)						
方差分析	籽粒产量	有机质	全氮	Olsen-P	速效钾	pH
ANOVA	Grain yields	Organic matter	Total N	Olsen-P	Available K	
年际Year	0.055 4	0.423 7	0.590 8	< 0.000 1	0.798 9	0.223 2
施磷水平P application	< 0.000 1	< 0.000 1	0.000 7	< 0.000 1	0.287 5	0.455 9
种植方式 Cropping	< 0.000 1	0.140 8	0.031 1	< 0.000 1	< 0.000 1	0.425 1
年际×施磷水平Y×P ^①	< 0.000 1	0.361 8	0.015 9	0.000 1	< 0.000 1	0.610 2
年际×种植方式Y×C ^②	0.031 4	0.945 1	0.993	< 0.000 1	0.000 4	0.836 2
种植方式×施磷水平C×P ^③	0.956 6	< 0.000 1	0.320 3	0.052 5	0.024 4	0.093 9
年际×种植方式×施磷水平Y×C×P ^④	0.927 4	< 0.000 1	0.619 8	0.412 7	0.136 7	0.528 7

注：三因素方差分析（ANOVA）分析，考虑年际、种植模式和施磷水平及其各要素之间的交互作用的显著性。①②③④分别代表年份与施磷水平的交互作用、年份与种植方式的交互作用、种植方式与施磷水平的交互作用和年份、种植方式与施磷水平的交互作用。Note: Three factors analysis were used for all the data including years, cropping systems, and P applications. Values under ANOVA are the probabilities (*p* values) of the source of variation by three factor analysis. ①, ②, ③, ④ indicate the interaction of Years (Y) and P applications (P), the interaction of Years and Cropping (Y × C), the interaction of Cropping and P applications (C × P), and the interaction of Years, Cropping and P applications (Y × C × P).

3 讨 论

3.1 连续间作条件下的产量优势

本研究进一步证实，与单作相比，玉米/蚕豆，玉米/大豆，玉米/鹰嘴豆和玉米/油菜四种间作体系提高了体系产量（表2），这与相同试验地前四年的结果一致^[28-29]。相似的结果在很多研究中均有体现^[30]，例如在中国西北干旱区宁夏回族自治区红寺堡新开垦荒漠土试验中，与单作相

比，连续间作两年后蚕豆和玉米土地当量比均大于1^[31]。在非洲莫桑比克中部地区，玉米和与其配对的豆科作物产量分别提高42.1%和88.9%，达到显著水平^[32]。间作种植的产量优势不仅在田间试验有所体现，在盆栽试验中有研究表明，与单作相比，间作小麦/鹰嘴豆增产效果明显^[19]。番茄与豆科间作后，番茄产量显著增加15.7%^[33]。大量研究证明间作种植具有产量优势，而本研究在更长的时间尺度上（5—6年）连续间作仍然能够保持



明显的产量优势（表3和表7）。可能的机制是，间作作物生育期存在“竞争—恢复”过程，油菜与玉米间作，在作物共生期阶段，作物之间存在竞争关系^[20]，导致优势物种能够显著提高产量（油菜），优势物种收获后，剩下相对弱势物种（玉米），存在明显恢复过程，养分吸收量和生物量累积逐渐上升，最终接近或超过其对应单作作物。实现恢复的前提是，竞争能力强作物收获后，竞争能力弱作物能够获得足够生长时间^[34]。此外，有些作物间作后，有显著的种间促进作用，例如本实验中的蚕豆/玉米间作时，蚕豆可以促进自身和玉米对土壤养分的吸收^[19]；鹰嘴豆/玉米（禾本科）间作后，鹰嘴豆可以促进自身和玉米对有机磷的吸收加强了种间促进作用，并且间作鹰嘴豆根系提高了酸性磷酸酶活性，促进了其邻体作物（玉米）对有机磷的吸收，从而显著增加作物产量^[35-37]。这也可能是间作优势的原因之一。

3.2 连续间作可以维持土壤化学性状基本稳定

连续间作第5年（2013年）和第6年（2014年），与单作相比，间作种植四种作物组合的土壤有机质含量提高（表4）。这与Thierfelder和Wall^[38]发现间作能使低碳土壤的有机质增加结果一致。Beedy等^[39]在马拉维南部间作种植皂荚属/玉米一年后发现，与单作相比，间作后土壤有机质增加了 3.4 g kg^{-1} ，增幅14%。间作种植能增加土壤有机质现象在自然生态系统中也有体现，Fornara和Tilman^[40]草原试验表明，与单作相比，植物物种丰富度提高能使土壤碳储量增加5倍左右。这说明提高植物物种的多样性可以使土壤有机质含量上升。

与试验开始前（2009年）的土壤有机质本底值（ 15.9 g kg^{-1} ）比较，经过连续5—6年种植后，单作和间作土壤有机质分别降低10.8%和4.2%。虽然间作从土壤中带出更多养分^[28-29]，但是多样性仍然能够缓解土壤有机质的下降。特别需要说明的是，本试验连续6年没有施用任何有机肥。在这种情况下，土壤有机质含量仅仅下降4.2%。如果合理配施有机肥，土壤有机质含量应该能够保持，不会下降。

与单作相比，间作未显著改变土壤全氮的含量，这说明间作在高产和高养分携出量的条件下并未降低土壤全氮含量。这可能是因为 225 kg hm^{-2} 施氮量满足间作高产，同时一部分氮被土壤固定维

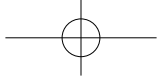
持了土壤的全氮含量。也可能与试验开始时较高的土壤全氮含量（ 1.07 kg hm^{-2} ）有关，也可能是间作体系土壤有机质分解作用大于单作体系^[41]，从而无过多的氮素累积。施磷水平也未改变土壤全氮含量。

与2009年初始全氮含量相比，单作和间作分别增加土壤全氮4.7%和3.7%。可能是化学氮肥、豆科生物固氮以及根系残留物导致更多的氮投入到土壤^[28]。本试验处理含有大豆、鹰嘴豆、蚕豆，这些豆科作物从空气中固定的氮能在一定程度上增加土壤全氮含量^[17]。Jensen^[42]的研究表明，在荷兰砂土上豆科作物通过生物固氮使土壤氮含量相比单作显著增加62%~82%。类似的结果在其他的试验中也有发现，例如，万福绪等^[43]在杨粮间作、桐粮间作后发现，间作土壤全氮含量均高于对照地。

连续间作5年（2013年）后，与单作相比，间作种植后，土壤Olsen P含量显著降低，这可能是间作种植后，在产量显著增加的同时也从土壤中带走了更多的磷（表5和表7）。连续间作6年（2014年）后，四种作物组合的土壤Olsen P含量无明显差异，与单作相比，土壤Olsen P含量依旧有下降的趋势，但差异未达到显著水平。平均四种作物组合来看，随着施磷水平的提高，土壤Olsen P含量显著增加，两年结果一致。

不施磷条件下单作和间作Olsen P含量与试验初始值（2009年）相比，并未下降，特别是在单作条件下，还略有升高，这可能是单作条件下豆科作物对土壤难溶性磷的活化^[17]，基本满足了作物对磷素的需求，单作作物地上部累积的磷量为每年 $20 \sim 25 \text{ kg hm}^{-2}$ ，间作作物携出磷量为 $25 \sim 40 \text{ kg hm}^{-2}$ ^[26]。间作种植相对于单作显著降低了土壤Olsen P含量，这可能是因为，在磷充足条件下，豆科本身对磷活化作用减弱，而间作种植相对于单作，高产的同时必然也带走了较单作作物更多的磷素^[26-27]。

两年间，不同种植方式显著影响体系土壤速效钾含量（表6和表7）。与单作相比，间作种植显著降低了土壤速效钾含量。这可能是因为间作在高产的同时，从土壤中带出更多养分^[26-27]。但是对于试验地初始土壤速效钾含量（ 205 mg kg^{-1} ，2009年），连续间作种植5—6年（2013—2014年）后，土壤速效钾含量下降了61.6%~62.5%。



由于本实验中,并未施用钾肥,也未施用农家肥。土壤钾平衡可以解释单作种植和间作种植后土壤速效钾含量下降,尤其间作种植从土壤中带走更多的钾素。

两年间,不同的种植方式、不同磷水平和作物组合均未影响土壤pH。有研究表明豆科/玉米间作种植后,因种间相互作用导致根际土壤酸化从而使土壤pH由8.19降至8.06^[6]。而本研究中,间作种植后土壤pH并未发生显著的变化,这可能是由于石灰性土壤对pH的强烈缓冲作用所致。

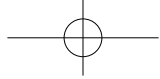
4 结 论

本研究在连续间作第5年(2013年)和第6年(2014年)后,与单作相比,间作种植显著提高了作物籽粒产量。平均作物种植模式,随着施磷水平的提高,作物籽粒产量显著增加。施磷能提高土壤Olsen P的含量,土壤有机质、全氮、速效钾和pH未受到施磷的影响。与单作相比,间作种植提高了土壤有机质含量,降低了土壤Olsen P和有效钾含量,全氮和pH未受到种植方式的影响。与试验开始前的土壤肥力化学性状相比,经过六年的连续种植,无论单作还是间作,土壤有机质仅有轻微变化,土壤全氮略有增加,Olsen P显著增加,土壤速效钾的含量由于连年携出明显下降,表明在西北高产间作体系要关注钾肥的施用,特别是在不施用农家肥的条件下更为重要。总之,合理施化学氮肥和磷肥,同时考虑施用农家肥或钾肥的前提下,间作套种是西北地区稳定提高作物产量的重要种植措施。

参 考 文 献

- [1] Vandermeer J H. The ecology of intercropping. England, UK: Cambridge University Press, 1992
- [2] 李文学. 小麦/玉米/蚕豆间作系统中氮、磷吸收利用特点及其环境效应. 北京: 中国农业大学植物营养系, 2001
- [3] Amoss é C, Jeuffroy M H, Mary B, et al. Contribution of relay intercropping with legume cover crops on nitrogen dynamics in organic grain systems. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2014, 98 (1) : 1—14
- [4] Willey R W. Intercropping: its importance and research needs. Part 2: Agronomy and research approaches. UK: Commonwealth Agricultural Bureaux, 1979
- [5] 卞新民, 冯金侠. 多元多熟种植制度复种指数计算方法探讨. 南京农业大学学报, 1999, 22 (1) : 11—15
- [6] Ae N, Arihara J, Okada K, et al. Phosphorus uptake by pigeon pea and its role in cropping systems of the Indian subcontinent. *Science*, 1990, 248 (4954) : 477—480
- [7] Stern W R. Nitrogen fixation and transfer in intercrop systems. *Field Crops Research*, 1993, 34 (3) : 335—356
- [8] 胡飞龙, 高倩圆, 房静, 等. 木薯花生间作系统的生态稳定性研究. *土壤*, 2012, 44 (2) : 338—344
- [9] Horwith B. A role for intercropping in modern agriculture. *BioScience*, 1985, 35 (5) : 286—291
- [10] Chen Y X, Zhang F S, Tang L, et al. Wheat powdery mildew and foliar N concentrations as influenced by N fertilization and belowground interactions with intercropped faba bean. *Plant and Soil*, 2007, 291 (1/2) : 1—13
- [11] Zhu Y Y, Chen H R, Fan J H, et al. Genetic diversity and disease control in rice. *Nature*, 2000, 406 (6797) : 718—722
- [12] 曹云, 马艳. 间套作防治作物土传枯萎病的研究进展. *土壤*, 2015, 47 (3) : 466—473
- [13] 褚贵新, 沈其荣, 曹金留, 等. 旱作水稻与花生间作系统中的氮素固定与转移及其对土壤肥力的影响. *土壤学报*, 2003, 40 (5) : 717—723
- [14] Zhang W P, Liu G C, Sun J H, et al. Growth trajectories and interspecific competitive dynamics in wheat/maize and barley/maize intercropping. *Plant and Soil*, 2015, 397 (1) : 227—238

- [15] Zhang F S, Li L. Using competitive and facilitative interactions in intercropping systems enhances crop productivity and nutrient-use efficiency. *Plant and Soil*, 2003, 248 (1/2) : 305—312
- [16] Mucheru-Muna M, Pypers P, Mugendi D, et al. A staggered maize-legume intercrop arrangement robustly increases crop yields and economic returns in the highlands of Central Kenya. *Field Crops Research*, 2010, 115 (2) : 132—139
- [17] Rao M R, Mathuva M N. Legumes for improving maize yields and income in semi-arid Kenya. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2000, 78 (2) : 123—137
- [18] Baumann D T, Bastiaans L, Kropff M J. Competition and crop performance in a leek-celery intercropping system. *Crop Science*, 2001, 41 (3) : 764—774
- [19] Li L, Li S M, Sun J H, et al. Diversity enhances agricultural productivity via rhizosphere phosphorus facilitation on phosphorus-deficient soils. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2007, 104 (27) : 11192—11196
- [20] Li L, Sun J H, Zhang F S, et al. Wheat/maize or wheat/soybean strip intercropping: II. Recovery or compensation of maize and soybean after wheat harvesting. *Field Crops Research*, 2001, 71 (3) : 173—181
- [21] Karpenstein-Machan M, Stuelpnagel R. Biomass yield and nitrogen fixation of legumes monocropped and intercropped with rye and rotation effects on a subsequent maize crop. *Plant and Soil*, 2000, 218 (1/2) : 215—232
- [22] Li Q Z, Sun J H, Wei X J, et al. Overyielding and interspecific interactions mediated by nitrogen fertilization in strip intercropping of maize with faba bean, wheat and barley. *Plant and Soil*, 2011, 339 (1/2) : 147—161
- [23] Vance C P. Symbiotic nitrogen fixation and phosphorus acquisition. *Plant nutrition in a world of declining renewable resources*. *Plant Physiology*, 2001, 127 (2) : 390—397
- [24] 李隆, 李晓林, 张福锁, 等. 小麦/大豆间作条件下作物养分吸收利用对间作优势的贡献. *植物营养与肥料学报*, 2000, 6 (2) : 140—146
- Li L, Li X L, Zhang F S, et al. Uptake and utilization of nitrogen, phosphorus and potassium as related to yield advantage in wheat/soybean intercropping (In Chinese). *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2000, 6 (2) : 140—146
- [25] Gunes A, Inal A, Adak M S, et al. Mineral nutrition of wheat, chickpea and lentil as affected by mixed cropping and soil moisture. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2007, 78 (1) : 83—96
- [26] Schmidtke K, Neumann A, Hof C, et al. Soil and atmospheric nitrogen uptake by lentil (*Lens culinaris* Medik.) and barley (*Hordeum vulgare* ssp. nudum L.) as monocrops and intercrops. *Field Crops Research*, 2004, 87 (2) : 245—256
- [27] 叶优良, 李隆, 孙建好. 3种豆科作物与玉米间作对土壤硝态氮累积和分布的影响. *中国生态农业学报*, 2008, 16 (4) : 818—823
- Ye Y L, Li L, Sun J H. Effect of intercropping three legume crops with maize on soil nitrate-N accumulation and distribution in the soil profile (In Chinese). *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2008, 16 (4) : 818—823
- [28] Wang Z G, Jin X, Bao X G, et al. Intercropping enhances productivity and maintains the most soil fertility properties relative to sole cropping. *PLoS ONE*, 2014, 9 (12) : e113984
- [29] Xia H Y, Wang Z G, Zhao J H, et al. Contribution of interspecific interactions and phosphorus application to sustainable and productive intercropping systems. *Field Crops Research*, 2013, 154 (3) : 53—64
- [30] 房增国, 赵秀芬, 孙建好, 等. 接种根瘤菌对蚕豆/玉米间作系统产量及结瘤作用的影响. *土壤学报*, 2009, 46 (5) : 887—892
- Fang Z G, Zhao X F, Sun J H, et al. Effects of rhizobium inoculation on yield and nodulation in fababean/maize intercropping system (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2009, 46 (5) : 887—892
- [31] Mei P P, Gui L G, Wang P, et al. Maize/faba bean intercropping with rhizobia inoculation enhances productivity and recovery of fertilizer P in a reclaimed desert soil. *Field Crops Research*, 2012, 130: 19—27
- [32] Rusinamhodzi L, Corbeels M, Nyamangara J, et al. Maize-grain legume intercropping is an attractive option for ecological intensification that reduces climatic risk for smallholder farmers in central Mozambique. *Field Crops Research*, 2012, 136: 12—22
- [33] 代会会, 胡雪峰, 曹明阳, 等. 豆科间作对番茄产量、土壤养分及酶活性的影响. *土壤学报*, 2015, 52 (4) : 911—917
- Dai H H, Hu X F, Cao M Y et al. Effects of intercropping with leguminous crops on tomato yield, soil nutrients and enzyme activity (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2015, 52 (4) : 911—917
- [34] Li L, Yang S C, Li X L, et al. Interspecific complementary and competitive interactions between intercropped maize and faba bean. *Plant and Soil*,



- 1999, 212 (2) : 105—114
- [35] Li L, Sun J H, Zhang F S, et al. Wheat/maize or wheat/soybean strip intercropping: I. Yield advantage and interspecific interactions on nutrients. *Field Crops Research*, 2001, 71 (2) : 123—137
- [36] Li S M, Li L, Zhang F S, et al. Acid phosphatase role in chickpea/maize intercropping. *Annals of Botany*, 2004, 94 (2) : 297—303
- [37] Li L, Tang C X, Rengel Z, et al. Chickpea facilitates phosphorus uptake by intercropped wheat from an organic phosphorus source. *Plant and Soil*, 2003, 248 (1/2) : 297—303
- [38] Thierfelder C, Wall P C. Effects of conservation agriculture on soil quality and productivity in contrasting agro - ecological environments of Zimbabwe. *Soil Use and Management*, 2012, 28 (2) : 209—220
- [39] Beedy T L, Snapp S S, Akinnifesi F K, et al. Impact of *Gliricidia sepium* intercropping on soil organic matter fractions in a maize-based cropping system. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2010, 138 (3) : 139—146
- [40] Fornara D A, Tilman D. Plant functional composition influences rates of soil carbon and nitrogen accumulation. *Journal of Ecology*, 2008, 96 (2) : 314—322
- [41] Cong W F, Hoffland E, Li L, et al. Intercropping affects the rate of decomposition of soil organic matter and root litter. *Plant and Soil*, 2015, 391 (1/2) : 399—411
- [42] Jensen E S. Grain yield, symbiotic N₂ fixation and interspecific competition for inorganic N in pea-barley intercrops. *Plant and Soil*, 1996, 182 (1) : 25—38
- [43] 万福绪, 陈平, 王严星. 苏北林粮间作地土壤理化性质分析. *南京林业大学学报 (自然科学版)*, 2003, 27 (6) : 27—30
- Wan F X, Chen P, Wang Y X. Analysis of the physical and chemical properties of soil in agroforestry system (In Chinese). *Journal of Nanjing Forestry University (Natural Science Edition)*, 2003, 27 (6) : 27—30

Effects of Continuous Intercropping on Crop Productivity and Chemical Properties of Soil Fertility in Orthic Antrosols

LIU Xinru^{1, 2} BAO Xingguo³ WANG Zhigang² LI Long^{2†}

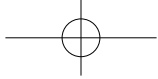
(1 College of Agriculture, Shihezi University, Shihezi, Xinjiang 832000, China)

(2 Beijing Key Laboratory of Biodiversity and Organic Farming, College of Resources and Environmental Sciences, China

Agricultural University, Beijing 100193, China)

(3 Institute of Soils and Fertilizers, and Water-Saving Agriculture, Gansu Academy of Agricultural Sciences, Lanzhou 730070, China)

Abstract 【Objective】 Being the kernel of the traditional agriculture of China, and one of the major practices in developing ecological agriculture, intercropping still occupies an important position in modern agriculture in China as well as other parts of the world. One of the advantages of intercropping is overyielding relative to monocultures, which consequently removes more soil nutrients from the soils. However, in respect of high nutrient removal, few researches have been done on intercropping as on monocultures on a long-term scale. 【Method】 To find a solution to this issue, a long-term field experiment was therefore established in 2009 at Baiyun, Wuwei City, Gansu Province, Northwest China, and carried out to investigate changes in soil chemical properties in response to P application and cropping system. The experiment was laid out in a two factorial design with three replicates, where the main factor was P application rate, designed to have three rates (0, 40 and 80 kg hm⁻² of triple superphosphate) and the second factor was cropping system, including maize/faba bean, maize/soybean, maize/chickpea, maize/rapeseed and their corresponding monocultures, maize, faba bean, soybean, chickpea and rapeseed. In 2013 (the 5th year) and 2014 (the 6th year) yields were measured and some soil chemical properties (soil organic matter, soil total N, Olsen P, available K, and pH) were examined after the crops were harvested to explore changes in soil fertility as affected by



cropping system. To estimate yields, two rows of maize and three rows, each of the other 4 crops, regardless of cropping pattern, were selected at random and harvested at their respective harvest seasons. To collect soil samples, 0 ~ 20 cm in length, for analysis, an auger was used to minimize disturbance of the soil structure after harvest. Eight cores and four cores were collected from intercropping plot (4 for each crop species) and monocultures, separately. And then the soil samples from the same plot under the same crop were blended separately together as one for analysis. 【Result】 Results show that by averaging the yields of the plots the same in cropping system regardless of P application rates, 1) The grain yield of treatment, chickpea/maize, faba bean/maize, soybean/maize, and rapeseed/maize was 38.2%, 32.6%, 34.0% and 38.4% higher than their respective monocultures treatment; 2) Intercropping significantly increased the content of soil organic matter; 3) Neither P application nor cropping pattern had any effect on soil total nitrogen concentration; 4) In 2013, intercropping decreased soil Olsen P by 5.2% in treatment chickpea/maize, by 6.9% in treatment faba bean/maize, by 15.9% in treatment soybean/maize and by 11.3% in treatment rapeseed/maize, while in 2014, it did not affect much; 5) Intercropping significantly depleted available K, by 10.3% in treatment chickpea/maize, by 14.1% in treatment faba bean/maize, by 8.5% in treatment soybean/maize and by 13.2% in treatment rapeseed/maize over the two years; 6) There was no significant differences in soil pH between P applications and cropping systems in 2013 and 2014. To sum up, intercropping enhances productivity for at least five to six years. No matter P application or not, it could increase grain yield, and the effect intensified with P application rate rising till 80 kg hm⁻². Moreover, intercropping tended to increase soil organic matter and reduce soil Olsen P and available K. But neither P application nor intercropping had much effect on soil total nitrogen or pH in 2013 and 2014. 【Conclusion】 In conclusion, intercropping enhances not only crop productivity over time, but also improves stability and sustainability of soil fertility if coupled with proper applications of organic manure, P and K fertilizers.

Key words Intercropping; Productivity; Soil organic matter; Total nitrogen; Soil Olsen P; Soil available K

(责任编辑: 陈荣府)