

DOI: 10.3724/SP.J.1006.2020.04071

华北寒旱区作物轮作的生产效应

姚兆磊¹ 张继宗^{1,2} 杜玉琼¹ 刘玉华^{1,2} 张立峰^{1,2,*}

¹ 河北农业大学农学院, 河北保定 071000; ² 农业农村部张北农业资源与生态环境重点野外科学观测试验站, 河北张家口 076450

摘要: 为明确华北寒旱区主栽作物的茬口适应性机制与轮作效果, 提出适宜区域种植的轮作组合, 本研究于 2015–2019 年采用交叉式设计, 对马铃薯、蚕豆、饲用玉米、莜麦、甜菜 5 种作物进行了以年际间为重复的轮作定位试验。结果表明, 各茬口马铃薯、莜麦、甜菜产量分别是连作的 1.30~1.68、1.28~1.48、1.25~1.48 倍, 甜菜茬蚕豆产量较连作减产 10.58%, 莜麦茬、甜菜茬饲用玉米产量较连作减产 9.10%~15.42%; 10 种轮作组合的轮作土地当量比(LER_r) 值为 1.09~1.68, 与连作相比, 均表现为有利效应, 其中莜麦→马铃薯、甜菜→马铃薯、饲用玉米→马铃薯、蚕豆→马铃薯、莜麦→甜菜的 LER_r 值较高。蚕豆、饲用玉米作物耐连作; 就产量而言, 华北寒旱区适宜种植的轮作组合为莜麦→马铃薯、甜菜→马铃薯、饲用玉米→马铃薯、蚕豆→马铃薯和莜麦→甜菜。

关键词: 华北寒旱区; 作物; 轮作; 土地当量比

Productivity evaluation of crop rotation in cold and arid region of Northern China

YAO Zhao-Lei¹, ZHANG Ji-Zong^{1,2}, DU Yu-Qiong¹, LIU Yu-Hua^{1,2}, and ZHANG Li-Feng^{1,2,*}

¹ College of Agronomy, Hebei Agricultural University, Baoding 071000, Hebei, China; ² Zhangbei Agricultural Resource and Ecological Environment Key Field Research Station, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Zhangjiakou 076450, Hebei, China

Abstract: To understand mechanisms of crop adaptability to various previous crop croppings, evaluate crop performance on the croppings, and identify suitable crop combinations for rotation of major crops in the cold and arid region of Northern China. A five-year field experiment was conducted using five crops from 2015 to 2019, including potato (*Solanum tuberosum*), faba bean (*Vicia faba*), forage maize (*Zea mays*), oat (*Avena sativa*), and beet (*Beta vulgaris*). Yields of potato, oat, and beet in rotation were 1.30–1.68, 1.28–1.48, and 1.25–1.48 times of those in continuous cropping of single crops, respectively. Yield of faba bean on beet cropping was 10.58% lower than that of continuous faba bean while yield of forage maize on oat or beet stubble was 9.10%–15.42% lower than that of continuous forage maize. The LER_r of 10 crop combinations was 1.09–1.68, indicating positive effects of rotation. Combinations of oat → potato, beet → potato, forage maize → potato and faba bean → potato had higher LER_r, indicating faba bean and forage maize might be more durable of continuous cropping. In terms of productivity, suitable crop combinations for rotation in the area were oat → potato, beet → potato, forage maize → potato, faba bean → potato and oat → beet.

Keywords: the cold and arid region of Northern China; crop; rotation; land equivalent ratio

依据国家区域重大发展战略, 位于华北长城沿线的生态环境脆弱地区被明确定位为京津冀的重要生态保障区和水源涵养地。该区属高寒半干旱生态类型区, 气候低温冷凉, 无霜期短, 作物种类多样, 为典型的喜凉类作物雨养一熟区^[1]。为解决该区农

业生产所面临的作物连年种植与作物间轮作选配不合理导致的作物减产、农田资源利用低效等问题, 可通过作物间适宜的时序轮换与倒茬种植, 以利用不同作物茬口的水分、养分等土壤环境因素差异, 实现作物稳产、高产^[2]。因此, 选配适生作物与优化

本研究由国家公益性行业(农业)科研专项项目(201503120)和河北省重点研发计划项目(18227004D)资助。

This study was supported by the Special Fund for Agro-scientific Research in the Public Interest (201503120) and the Key Research and Development Project of Hebei Province (18227004D).

* 通信作者(Corresponding author): 张立峰, E-mail: zlf@hebau.edu.cn

第一作者联系方式: E-mail: 1273990544@qq.com

Received (收稿日期): 2020-03-18; Accepted (接受日期): 2020-07-02; Published online (网络出版日期): 2020-08-18.

URL: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1809.S.20200818.1525.004.html>

轮作关系,成为促进华北寒旱区农田生态资源高效利用、农牧生产可持续发展的迫切需求。研究认为,适宜的轮作种植能使受益作物产量增加 2.4%~96.6%^[3-7],经济增收 11.6%~352.0%^[8-9]。选用浅根性一年生粮油作物与多年连作苜蓿进行倒茬,不仅使冬油菜、冬小麦较其连作增产 34.9%、45.0%,而且 2 年内使连作苜蓿导致的深层干化土壤的水分恢复 2.8%、2.0%^[8];轮作 2~12 年粮食作物期间,年均土壤水分恢复厚度为 123.1 cm^[10]。加入豆科作物的轮作有效改善了土壤养分,与玉米连作相比,大豆→玉米 2 个轮作周期后玉米田土壤全氮增加 9%,无机氮增加 11.65%,玉米平均产量增加了 29.58%^[11]。在粮菜倒茬中,大豆茬玉米较玉米连作增产 5%,而马铃薯茬和甘蓝茬的玉米产量只有连作的 97%^[12]。对于存在作物自毒、专性寄生的土传病虫害的作物^[13-14],轮作倒茬则对参试各作物的产量与品质具有显著的“双赢”效果^[15-18]。然而,在轮作中茬口效应存在多样性,Tucker 等^[19]研究表明,由于紫花苜蓿严重耗竭底土水分,自苜蓿翻耕后至第一茬小麦成熟期之间的水分无法补充,苜蓿后第一茬小麦籽粒产量仅有连作的 97%。当接续玉米茬口时,玉米根系分泌物效应降低了烟草品质,使烟叶蛋白质、钾和烟碱含量分别减少 18.0%、19.0%和 12.5%^[20]。农田生产中的作物间轮作关系,实质上是以土壤为载体的种群间时序演替关系。现代生态学所抽象的种群间 9 种基本感应机制^[21],同样可引以揭示作物间的倒茬与轮作效应;而作物间轮作的综合效果,则需要归一化的定量指标进行评价。本研究在设置田间定位试验、监测作物间轮作关系的产量效果基础上,通过作物间轮作关系的生态学定性评价、定量分析,明确华北寒旱区主栽作物间轮作关系及作物组配机制,以期为该区农业生产提供合理的轮作制度。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验于 2015 年 4 月到 2019 年 10 月在河北省张家口市农业部(张北)农业资源与生态环境重点野外观测试验站(41°09'N, 114°42'E)进行。试验区平均海拔 1420 m,年均降水量 382.5 mm,年均温 3.9°C,区域气候冷凉,无霜期 135 d,≥10°C 积温 2426.3°C^[22],属于高寒半干旱生态类型区。区域常年作物生长季(5 月至 9 月)降水量 343.4 mm,试验年 2016 年生长季(5 月至 9 月)降水 428.1 mm,为降水偏丰年;2017、

2018、2019 年生长季(5 月至 9 月)降水分别为 282.1、303.7、303.3 mm,为降水偏旱年。试验田土壤类型为草甸栗钙土,pH 7.7,含全氮 1.09 g kg⁻¹、全磷 0.54 g kg⁻¹、全钾 22.03 g kg⁻¹、有机质 18.53 g kg⁻¹、碱解氮 80.68 mg kg⁻¹、速效磷 34.10 mg kg⁻¹、速效钾 76.63 mg kg⁻¹。

1.2 试验材料与设计

选择华北寒旱区具有代表性的 5 种主栽作物作为供试材料,分别为马铃薯(*Solanum tuberosum*)品种‘小白花’、蚕豆(*Vicia faba*)品种‘崇礼蚕豆’、饲用玉米(*Zea mays*)品种‘巡青 518’、莜麦(*Avena sativa*)品种‘坝莜 1 号’、甜菜(*Beta vulgaris*)品种‘KWH-6231’。

采用交叉式设计(表 1),5 种作物年际间两两组合,形成 10 种轮作模式,且每种轮作模式的倒茬关系年内实施,另有 5 种作物的连作模式,共计 15 种植模式。即共有 25 个试验小区,小区面积为 120 m²,作物一年一熟。为了有效减少试验土壤误差,定位实施,年际间重复。试验田作物雨养旱作生产。各作物施肥参照作物常年施肥量。各作物播种与收获日期见表 2。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 产量测定 在测产区测定各作物的实际收获产量。各作物测定项目包括:(1)马铃薯:在测产区内,首先进行五点取样,每点取 1 株马铃薯作为样品,称取薯块、株体鲜重;将样品带回实验室后烘干,称其干重,计算出干率。而后收获剩余面积的马铃薯,称取薯块、株体鲜重。(2)饲用玉米:在测产区内,首先进行 3 点取样,每点取 2 m 双行饲用玉米,称取鲜重,待自然风干后,称其干重,计算出干率。而后收获剩余面积的饲用玉米,称取植株(除根部)鲜重。(3)蚕豆、莜麦:将测产区收获,自然风干后测得生物产量;脱粒后测得经济产量。(4)甜菜:在测产区内,首先进行五点取样,每点取 1 株甜菜作为样品,称取叶丛、块根鲜重;烘干后称其干重,计算出干率。而后收获剩余面积的甜菜,称取叶丛、块根鲜重。

1.3.2 土地利用效果评价 借鉴土地当量比(land equivalent ratio, LER)原理^[23],比较茬口对后茬作物生产的影响。以连作产量为对照(CK),采用了作物土地当量比(LERc)和轮作土地当量比(LERr)概念^[24]。

$$LERc = Yr/Yc$$

表 1 试验小区种植方式
Table 1 Planting pattern of experimental plot

试验小区 Experimental plot	年份 Year					试验小区 Experimental plot	年份 Year				
	2015	2016	2017	2018	2019		2015	2016	2017	2018	2019
1	B	P	B	P	B	14	FB	FM	FB	FM	FB
2	O	P	O	P	O	15	P	FM	P	FM	P
3	FM	P	FM	P	FM	16	B	O	B	O	B
4	FB	P	FB	P	FB	17	O	O	O	O	O
5	P	P	P	P	P	18	FM	O	FM	O	FM
6	B	FB	B	FB	B	19	FB	O	FB	O	FB
7	O	FB	O	FB	O	20	P	O	P	O	P
8	FM	FB	FM	FB	FM	21	B	B	B	B	B
9	FB	FB	FB	FB	FB	22	O	B	O	B	O
10	P	FB	P	FB	P	23	FM	B	FM	B	FM
11	B	FM	B	FM	B	24	FB	B	FB	B	FB
12	O	FM	O	FM	O	25	P	B	P	B	P
13	FM	FM	FM	FM	FM	—	—	—	—	—	—

P: 马铃薯; FB: 蚕豆; FM: 饲用玉米; O: 莜麦; B: 甜菜。
P: potato; FB: faba bean; FM: forage maize; O: oat; B: beet.

表 2 试验作物播种期与收获期
Table 2 Sowing and harvesting dates of experimental crops

作物 Crop	播种与收获日期 Sowing and harvesting date (month/day)									
	2015		2016		2017		2018		2019	
	播种 Sowing date	收获 Harvesting date	播种 Sowing date	收获 Harvesting date	播种 Sowing date	收获 Harvesting date	播种 Sowing date	收获 Harvesting date	播种 Sowing date	收获 Harvesting date
马铃薯 Potato	04/30	09/18	05/02	08/25	04/25	09/16	04/28	09/12	05/03	09/17
蚕豆 Faba bean	05/04	08/21	05/04	08/24	05/19	08/26	05/15	09/09	05/14	09/16
饲用玉米 Forage maize	05/26	09/20	05/22	08/26	05/19	09/11	05/15	09/15	05/14	09/21
莜麦 Oat	05/31	09/16	05/21	09/03	05/25	09/08	05/23	09/01	05/23	09/18
甜菜 Beet	05/23	10/07	05/25	10/01	05/27	10/01	05/29	10/03	05/20	09/28

式中, Y_c 为某作物连作单位面积产量(kg hm^{-2}), Y_r 为该作物倒茬下单位面积产量(kg hm^{-2})。

$LER_c > 1$ 时, 说明茬口对后茬作物具有促进增产的有利效应, 以“+”表示; $LER_c < 1$ 时, 说明茬口对后茬作物具有减产的有害效应, 以“-”表示; $LER_c = 1$ 时, 则茬口对后茬作物生产无明显影响, 以“0”表示。

轮作土地当量比(LER_r)是以各作物连作的产量为对照, 比较轮作时作物以土地面积为量纲的生产效果。

$$LER_r = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Y_{r_i} / Y_{c_i}$$

式中, Y_{c_i} 为轮作系统中第 i 作物连作单位面积平均产量(kg hm^{-2}), Y_{r_i} 为该作物轮作下单位面积产量(kg hm^{-2}), n 为轮作系统中的作物数量。

$LER_r > 1$ 时, 说明轮种作物具有促进轮作系统增产的有利效应, 以“+”表示; $LER_r < 1$ 时, 说明轮种作物具有使轮作系统减产的有害效应, 以“-”表示; 若 $LER_r = 1$ 时, 说明轮种作物对轮作系统生产无明显影响, 以“0”表示。

1.3.3 病情指数调查 马铃薯早疫病与甜菜褐斑病鉴定均按照试验调查记载 9 级标准进行^[25-26], 病情指数计算公式: 病情指数 = $[\sum(\text{各级病叶数} \times \text{相对级数的代表值}) / (\text{总叶数} \times \text{最高级数的代表值})] \times 100$

1.4 数据统计

采用 Microsoft Excel 与 SPSS 统计分析试验数据。以年际间作为重复, 通过运用 LSD 法和 Duncan’s 法进行多重比较, 处理间的差异显著性水平为 $P < 0.05$ ^[27]。

2 结果与分析

2.1 茬口对作物经济产量的影响

试验在 2015 年创造茬口的基础上, 2016 年之后为年际间重复。由表 3 可知, 与马铃薯连作相比, 其他茬口马铃薯 4 年的平均产量均高于连作, 是连作的 1.30~1.68 倍, 以苜蓿茬马铃薯的平均产量最高。统计分析表明, 饲用玉米茬、苜蓿茬马铃薯平均产量与连作间差异显著, 其他茬口马铃薯平均产量与连作间差异不显著。与蚕豆连作相比, 甜菜茬蚕豆减产 10.58%, 其他 3 个茬口蚕豆的平均产量是连作

的 1.01~1.28 倍, 但不同茬口的蚕豆产量间差异不显著。不同茬口下饲用玉米平均产量与蚕豆相似, 与连作相比差异均不显著; 但马铃薯茬饲用玉米产量显著高于甜菜茬饲用玉米产量。马铃薯茬饲用玉米较连作增产 13.07%, 苜蓿茬、甜菜茬饲用玉米产量较连作减产 9.10%~15.42%。与苜蓿连作相比, 其他 4 种茬口苜蓿的产量是连作的 1.28~1.48 倍, 以马铃薯茬苜蓿的平均产量最高。统计分析表明, 不同茬口苜蓿与连作间产量无显著差异。比较各茬口下甜菜的平均产量, 表明倒茬较连作甜菜能够显著增产, 达 25.07%~47.64%, 其中马铃薯茬甜菜产量最高。

表 3 各茬口作物的经济产量

Table 3 Economic yield of crops at different croppings (kg hm⁻²)

作物 Crop	年份 Year	茬口 Cropping				
		马铃薯茬 Potato cropping	蚕豆茬 Faba bean cropping	饲用玉米茬 Forage maize cropping	苜蓿茬 Oat cropping	甜菜茬 Beet cropping
马铃薯 Potato	2016	2163.07	4254.37	4238.45	5833.94	4308.85
	2017	2801.63	3776.77	4504.18	4358.62	3416.63
	2018	3592.31	5504.73	6470.60	6405.94	5898.10
	2019	4711.07	5725.97	5339.61	5714.08	3615.10
	平均 Average	3317.02 a	4815.46 ab	5138.21 b	5578.15 b	4309.67 ab
蚕豆 Faba bean	2016	1684.84	1775.89	3289.14	1838.42	1758.38
	2017	2207.77	1540.77	1739.20	1570.79	1288.98
	2018	1333.05	1435.22	1750.29	1533.71	966.93
	2019	2771.22	1978.16	1858.91	1915.53	2003.43
	平均 Average	1999.22 a	1682.51a	2159.39a	1714.61a	1504.43a
饲用玉米 Forage maize	2016	13,861.37	14,350.51	12,467.90	11,515.76	8099.60
	2017	17,271.16	16,558.21	16,776.81	13,681.24	12,204.87
	2018	19,993.85	16,922.10	16,420.76	17,487.80	16,897.30
	2019	17,130.04	18,201.34	14,700.37	12,189.03	13,858.04
	平均 Average	17,064.11 b	16,508.04 ab	15,091.46 ab	13,718.46 ab	12,764.95 a
苜蓿 Oat	2016	3151.58	2601.30	2101.05	1950.98	2451.23
	2017	2486.32	2090.49	2646.33	1525.14	1597.04
	2018	2207.76	2059.03	1854.65	1148.67	1316.63
	2019	2206.59	2173.76	2298.03	2162.77	3353.97
	平均 Average	2513.06 a	2231.15 a	2225.02 a	1696.89 a	2179.72 a
甜菜 Beet	2016	12173.89	10865.77	9355.20	9456.63	8393.31
	2017	11,378.05	9843.94	11,423.90	9293.52	7019.03
	2018	9471.98	9519.76	9543.03	8795.43	6151.40
	2019	11,485.23	10,670.61	9484.93	10,160.39	8583.51
	平均 Average	11,127.29 c	10,225.02 bc	9951.77 bc	9426.49 b	7536.81 a

不同小写字母代表差异显著 ($P < 0.05$)。

Different lowercase letters represent significant difference ($P < 0.05$).

综合分析, 蚕豆、饲用玉米作物较耐连作; 马铃薯、莠麦、甜菜作物不适宜连作。马铃薯、甜菜作物在生长中期出现的病害较其他茬口严重。由图 1 可知, 马铃薯连作的早疫病病情指数为 24.72, 是蚕豆茬、饲用玉米

茬、莠麦茬、甜菜茬马铃薯早疫病病情指数的 1.15~2.48 倍; 甜菜连作的褐斑病病情指数为 27.87, 是马铃薯茬、蚕豆茬、饲用玉米茬、莠麦茬甜菜病情指数的 1.69~2.93 倍, 这成为马铃薯、甜菜连作减产的重要原因。

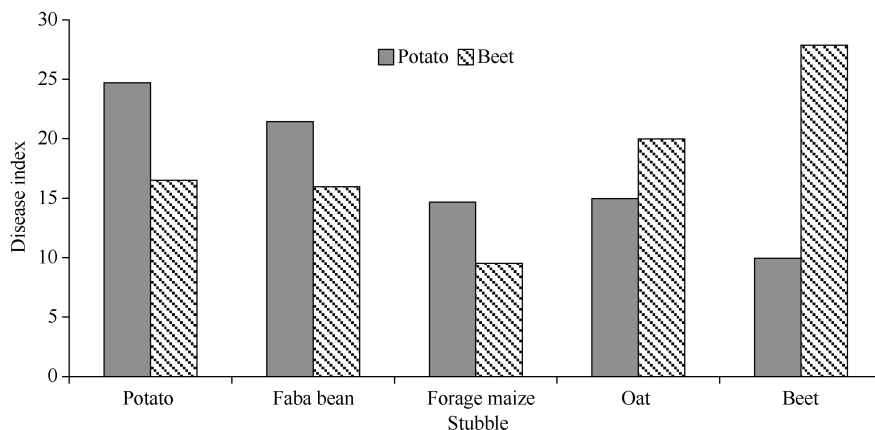


图 1 各茬口马铃薯、甜菜的病情指数

Fig. 1 Disease index of potato and beet at different croppings

2.2 作物对茬口的适应性

由表 4 可知, 2016—2019 年蚕豆茬、饲用玉米茬、莠麦茬、甜菜茬的马铃薯作物土地当量比(LERc)平均值分别为 1.52、1.63、1.81、1.41, 与连作相比, 该 4 种茬口对马铃薯生产均表现为“有利效应”, 但 2019 年甜菜茬马铃薯 LERc 值为 0.77, 表现为“有害效应”, 说明甜菜茬口对马铃薯生产的效应受年份环境的明显影响。统计分析表明, 莠麦茬马铃薯与连作相比增产效果显著, 说明马铃薯更适应莠麦茬口。

甜菜茬的蚕豆 LERc 值为 0.88, 甜菜茬口对接茬的蚕豆生产表现为“有害效应”; 马铃薯茬、饲用玉米茬、莠麦茬的蚕豆 LERc 值分别为 1.18、1.29、1.02, 表现为“有利效应”, 同时马铃薯、饲用玉米、莠麦茬口在不同年份条件下对于蚕豆生产均出现过有害效应。统计分析表明, 饲用玉米茬口较甜菜茬口对蚕豆具有显著的增产效果, 各茬口较连作对蚕豆生产的影响均无显著差异。表明, 蚕豆的茬口适应性较强。

对于饲用玉米, 莠麦茬、甜菜茬的饲用玉米 LERc 值分别为 0.91、0.84, 与连作相比, 这 2 种茬口对饲用玉米生产均表现为“有害效应”; 马铃薯茬、蚕豆茬的玉米 LERc 值分别为 1.13、1.10, 表现为“有利效应”。马铃薯、蚕豆茬口较莠麦、甜菜茬口对饲用玉米具有显著的增产效果; 与饲用玉米连作相比, 不同茬较连作对饲用玉米无显著差异。表明饲用玉米的茬口适应性较强。

莠麦与甜菜生产对于各茬口的反应相似, 不同

茬口莠麦、甜菜的 LERc 值均大于 1, 且年际间比较稳定, 与连作相比各茬口对于两作物生产均表现为“有利效应”。统计分析表明, 只有马铃薯茬口较连作莠麦增产显著, 而所有茬口的甜菜都较连作甜菜显著增产, 马铃薯茬口的甜菜 LERc 值达 1.49。表明莠麦与甜菜的茬口适应性强。

分析如上 20 种茬口衔接方式中, 有 17 种即占 85% 的衔接方式表现出“有利效应”, 但只有 12 种即占 60% 的衔接方式比较稳定; 有 3 种即占 15% 的衔接方式对接茬作物产生“有害效应”。

2.3 作物轮作效果的分析

2016—2019 年 10 种轮作组合和 5 种连作组合的土地利用效果如表 5。10 种轮作组合的 LERr 平均值为 1.09~1.68, 与连作相比, 均表现为有利效应。甜菜→蚕豆、甜菜→饲用玉米、莠麦→饲用玉米 3 种轮作组合两作物间具有偏利补偿效果; 其他 7 种轮作组合两作物间具有互利增益效果, 其中饲用玉米→马铃薯、莠麦→马铃薯、甜菜→马铃薯、甜菜→莠麦 4 种轮作组合受年际环境的影响较小, 4 种轮作组合中莠麦→马铃薯 LERr 值显著高于饲用玉米→马铃薯、甜菜→莠麦轮作组合, 莠麦→马铃薯 LERr 值最高为 1.68, 其他 3 种轮作组合受年际间环境的影响轮作效果存在宽幅的差异。

统计分析表明, 与连作相比, 蚕豆→马铃薯、饲用玉米→马铃薯、莠麦→马铃薯、甜菜→马铃薯的 LERr 值显著高于连作, 其余轮作组合的 LERr 值与

表 4 不同种植模式下作物土地当量比
Table 4 Crop land equivalent ratio under different cropping patterns

作物 Crop	年份 Year	马铃薯茬		蚕豆茬		饲用玉米茬		莜麦茬		甜菜茬	
		Potato cropping		Faba bean cropping		Forage maize cropping		Oat cropping		Beet cropping	
		作物土地 当量比 LERc	效应 Effect	作物土地 当量比 LERc	效应 Effect	作物土地 当量比 LERc	效应 Effect	作物土地 当量比 LERc	效应 Effect	作物土地 当量比 LERc	效应 Effect
马铃薯 Potato	2016	1.00	0	1.97	+	1.96	+	2.70	+	1.99	+
	2017	1.00	0	1.35	+	1.61	+	1.56	+	1.22	+
	2018	1.00	0	1.53	+	1.80	+	1.78	+	1.64	+
	2019	1.00	0	1.22	+	1.13	+	1.21	+	0.77	—
	Average	1.00 a	0	1.52 ab	+	1.63 ab	+	1.81 b	+	1.41 ab	+
蚕豆 Faba bean	2016	0.95	—	1.00	0	1.85	+	1.04	+	0.99	—
	2017	1.43	+	1.00	0	1.13	+	1.02	+	0.84	—
	2018	0.93	—	1.00	0	1.22	+	1.07	+	0.67	—
	2019	1.40	+	1.00	0	0.94	—	0.97	—	1.01	+
	Average	1.18 ab	+	1.00 ab	0	1.29 b	+	1.03 ab	+	0.88 a	—
饲用玉米 Forage maize	2016	1.11	+	1.15	+	1.00	0	0.92	—	0.65	—
	2017	1.03	+	0.99	—	1.00	0	0.82	—	0.73	—
	2018	1.22	+	1.03	+	1.00	0	1.06	+	1.03	+
	2019	1.17	+	1.24	+	1.00	0	0.83	—	0.94	—
	Average	1.13 b	+	1.10 b	+	1.00 ab	0	0.91 a	—	0.84 a	—
莜麦 Oat	2016	1.62	+	1.33	+	1.08	+	1.00	0	1.26	+
	2017	1.63	+	1.37	+	1.74	+	1.00	0	1.05	+
	2018	1.92	+	1.79	+	1.61	+	1.00	0	1.15	+
	2019	1.02	+	1.01	+	1.06	+	1.00	0	1.55	+
	Average	1.55 b	+	1.38 ab	+	1.37 ab	+	1.00 a	0	1.25 ab	+
甜菜 Beet	2016	1.45	+	1.29	+	1.11	+	1.13	+	1.00	0
	2017	1.62	+	1.40	+	1.63	+	1.32	+	1.00	0
	2018	1.54	+	1.55	+	1.55	+	1.43	+	1.00	0
	2019	1.34	+	1.24	+	1.11	+	1.18	+	1.00	0
	Average	1.49 b	+	1.37 b	+	1.35 b	+	1.27 b	+	1.00 a	0

不同小写字母代表差异显著($P<0.05$)。“+、—、0”分别表示茬口对后茬作物具有促进增产的有利效应、减产的有害效应和无明显影响。
Different lowercase letters represent significant difference ($P<0.05$). “+、—、0” indicate that there are positive, negative and no effect of previous crops on yield increasing in next growing season, respectively.

连作间差异不显著;各轮作组合间相比,莜麦→马铃薯的 LERr 值与甜菜→马铃薯轮作组合间无显著差异,但显著高于其余 8 种轮作组合;甜菜→马铃薯的 LERr 值显著高于莜麦→饲用玉米、甜菜→蚕豆、甜菜→饲用玉米;其余各轮作组合间无显著差异。

结合表 4 分析表明,甜菜→饲用玉米轮作组合

2016 年 LERr 值为 0.88,莜麦→蚕豆、莜麦→饲用玉米轮作组合 2019 年 LERr 值分别为 0.99、0.95 (表 5),说明轮作的两作物间产生了强偏害效应对弱偏利效应的偏害负偿效果;莜麦→饲用玉米轮作组合在 2016 年 LERr 值为 1.00 (表 5),说明作物间产生了偏害效应与偏利效应的利害抵偿效果。

表 5 作物种植模式的轮作土地当量比

Table 5 Crop rotation land equivalent ratio of cropping patterns

种植模式 Cropping pattern	年份 Year	轮作土地当量比 LERr	效应 Effect	种植模式 Cropping pattern	年份 Year	轮作土地当量比 LERr	效应 Effect
连作马铃薯 Continuous cropping potato	2016	1.00	0	甜菜→马铃薯 Beet→Potato	2016	1.72	++
	2017	1.00	0		2017	1.42	++
	2018	1.00	0		2018	1.59	++
	2019	1.00	0		2019	1.06	+—
	Average	1.00 a	0		Average	1.45 cd	+
连作蚕豆 Continuous cropping faba bean	2016	1.00	0	饲用玉米→蚕豆 Forage maize→Faba bean	2016	1.50	++
	2017	1.00	0		2017	1.06	+—
	2018	1.00	0		2018	1.13	++
	2019	1.00	0		2019	1.09	+—
	Average	1.00 a	0		Average	1.20 abc	+
连作饲用玉米 Continuous cropping forage maize	2016	1.00	0	莜麦→蚕豆 Oat→Faba bean	2016	1.19	++
	2017	1.00	0		2017	1.20	++
	2018	1.00	0		2018	1.43	++
	2019	1.00	0		2019	0.99	+—
	Average	1.00 a	0		Average	1.20 abc	+
连作莜麦 Continuous cropping oat	2016	1.00	0	甜菜→蚕豆 Beet→Faba bean	2016	1.14	+—
	2017	1.00	0		2017	1.12	+—
	2018	1.00	0		2018	1.11	+—
	2019	1.00	0		2019	1.13	++
	Average	1.00 a	0		Average	1.13 ab	+
连作甜菜 Continuous cropping beet	2016	1.00	0	莜麦→饲用玉米 Oat→Forage maize	2016	1.00	0
	2017	1.00	0		2017	1.28	+—
	2018	1.00	0		2018	1.34	++
	2019	1.00	0		2019	0.95	+—
	Average	1.00 a	0		Average	1.14 ab	+
蚕豆→马铃薯 Faba bean→Potato	2016	1.46	+—	甜菜→饲用玉米 Beet→Forage maize	2016	0.88	+—
	2017	1.39	++		2017	1.18	+—
	2018	1.23	+—		2018	1.29	++
	2019	1.31	++		2019	1.03	+—
	Average	1.35 bc	+		Average	1.10 ab	+
饲用玉米→马铃薯 Forage maize→Potato	2016	1.54	++	甜菜→莜麦 Beet→Oat	2016	1.20	++
	2017	1.32	++		2017	1.19	++
	2018	1.51	++		2018	1.29	++
	2019	1.15	++		2019	1.37	++
	Average	1.38 bc	+		Average	1.26 abc	+
莜麦→马铃薯 Oat→Potato	2016	2.16	++				
	2017	1.6	++				
	2018	1.85	++				
	2019	1.12	++				
	Average	1.68 d	+				

不同小写字母代表差异显著($P < 0.05$)。“+、—、0”分别表示轮种作物具有促进轮作系统增产的有利效应、减产的有害效应和无明显影响。

Different lowercase letters represent significant difference ($P < 0.05$). “+, —, 0” indicate that there are positive, negative and no effect of rotation crops on system yield increasing, respectively.

3 讨论

轮作增产的实质是避免连作的障碍, 提高作物对茬地资源的利用效率。当存在作物专性寄生的土传病害时, 随着连作年数延长, 病害加重, 作物出现减产^[28], 作物间轮作倒茬, 能够有效降低作物的病情指数。宋树慧等^[29]探究不同前茬对马铃薯病害发生和产量的影响表明, 蚕豆茬马铃薯较连作 4 年马铃薯黑痣病病情指数降低 60.88%, 增产 51.44%; 王长魁等^[30]研究表明, 通过豆科、禾本科作物与甜菜轮作倒茬种植, 使甜菜褐斑病的发病率较连作降低 17.46%~24.30%, 相应甜菜增产 82.26%~90.72%。本试验表明, 轮作下马铃薯、甜菜的早疫病、褐斑病病情指数是连作的 40.3%~87.0%、34.1%~59.2%, 相应较连作马铃薯、甜菜增产 29.93%~68.17%、25.07%~47.64%, 与前人研究结果一致。通过轮作创造抑制病害生长的环境, 是感病作物成功生产的关键。

轮作中作物选配的原则是发挥作物对茬口效应的适合性, 选出具有时序互利合作或偏利合作的轮作方式。本研究中, 当马铃薯作为前茬作物时, 对后茬作物均表现为有利效应, 且较其他茬口对后茬作物具有较高的 LERc 值; 而作为后茬作物时, 马铃薯均表现为受益效应。马铃薯与其他作物进行轮作产生互利效应, 可能与马铃薯连作病害加重^[31], 以及与马铃薯较玉米、麦类作物对土壤水分的恢复能力强等有关^[32]。甜菜作为前茬作物, 对后茬蚕豆和饲用玉米具有有害效应; 但作为后茬作物时, 甜菜均表现为受益效应。甜菜与其他作物进行轮作产生偏利补偿作用, 可能与甜菜产生自毒物质影响连作产量^[33], 且生育期长、根系庞大, 对土壤水分的消耗量大等有关^[34-35]。因此, 组配轮作方式时, 在充分利用主作物最高受益的基础上, 选择对副作物减效最低或有利效应的组合至为重要。

通过定性与定量方法对作物的茬口特性与茬口适应性进行评价, 成为进行作物间组配、选择适宜轮作方式的基础。轮作的实质是以土壤作为载体的种群间时序演替关系。对于作物茬口特性与茬口适应性的定性评价, 本试验在作物种群间 9 种感应机制^[21]的基础上, 将轮作方式中作物间的关系定义为茬口对后茬作物的有利、有害效应, 作物间的互利增益效果、偏利补偿效果、利害抵偿效果、偏害负效果、互害效果; 对于作物轮作系统的农田资源

综合利用效果的定量评价, 本试验在土地当量比 (LER) 概念^[23]的基础上, 利用作物土地当量比 (LERc) 和轮作土地当量比 (LERr) 的概念, 量化不同轮作方式以土地资源面积为量纲的产出效果, 为揭示自然属性下的农田轮作生产效果探索了有效途径, 而结合农田生产的社会属性, 全面评价轮作生产效果的方法需要进一步完善。

4 结论

在华北寒旱区草甸栗钙土农田, 蚕豆、饲用玉米作物耐连作, 马铃薯、莜麦、甜菜作物连作明显减产; 马铃薯、蚕豆、饲用玉米茬口对其他作物生产均表现为有利效应, 莜麦、甜菜茬口对饲用玉米表现为有害效应; 马铃薯、莜麦、甜菜作物的茬口适应性强, 蚕豆、饲用玉米的茬口适应性较强。在华北寒旱区草甸栗钙土农田, 适宜种植的轮作组合为莜麦→马铃薯、甜菜→马铃薯、饲用玉米→马铃薯、蚕豆→马铃薯和莜麦→甜菜。

References

- [1] 张立峰, 徐长金. 北方高寒半干旱农牧交错带资源环境障碍与农牧生产力开发. 资源科学, 1999, 21(5): 64-67.
Zhang L F, Xu C J. Environmental problems and development of agricultural and pastoral productivity in the semi-arid alpine and pastoral ecotone in northern China. *Resour Sci*, 1999, 21(5): 64-67 (in Chinese with English abstract).
- [2] 张立峰, 边秀举, 刘玉华. 冀北高原作物耗水特性与倒茬效应研究. 中国农业科学, 2001, 34: 56-60.
Zhang L F, Bian X J, Liu Y H. Studies on water consumption characteristics and effects of crops rotation in plateau of North Hebei province. *Sci Agric Sin*, 2001, 34: 56-60 (in Chinese with English abstract).
- [3] 于高波, 吴凤芝, 周新刚. 小麦、毛苕子与黄瓜轮作对土壤微生态环境及产量的影响. 土壤学报, 2011, 48: 175-184.
Yu G B, Wu F Z, Zhou X G. Effect of rotations of cucumber with wheat and hairy vetch on soil micro-ecological environment. *Acta Pedol Sin*, 2011, 48: 175-184 (in Chinese with English abstract).
- [4] 郭秀娟, 杨建春, 冯学金, 姜超. 不同前茬作物对胡麻干物质积累规律、品质及产量构成因子的影响. 作物杂志, 2016, (2): 165-167.
Guo X J, Yang J C, Feng X J, Jiang C. Effects of different previous crops in rotation system on dry matter accumulation, quality and yield in fax. *Crops*, 2016, (2): 165-167 (in Chinese with English abstract).
- [5] 杨宁, 赵护兵, 王朝辉, 张达斌, 高亚军. 豆科作物-小麦轮作方式下旱地小麦花后干物质及养分累积、转移与产量的关系. 生态学报, 2012, 32: 4827-4835.
Yang N, Zhao H B, Wang Z H, Zhang D B, Gao Y J. Accumulation and translocation of dry matter and nutrients of wheat rotated with legumes and its relation to grain yield in a dryland area. *Acta Ecol Sin*, 2012, 32: 4827-4835 (in Chinese with English abstract).

- abstract).
- [6] Munkholm L J, Heck R J, Deen B. Long-term rotation and tillage effects on soil structure and crop yield. *Soil Tillage Res*, 2013, 127: 85–91.
 - [7] Ren T, Li H, Lu J W, Bu R Y, Li X K, Cong R H, Lu M X. Crop rotation-dependent yield responses to fertilization in winter oil-seed rape (*Brassica napus* L.). *Crop J*, 2015, 3: 396–404.
 - [8] 韩丽娜, 丁静, 韩清芳, 丁瑞霞, 聂俊峰, 贾志宽, 李文静. 黄土高原区草粮(油)翻耕轮作的土壤水分及作物产量效应. *农业工程学报*, 2012, 28(24): 129–137.
Han L N, Ding J, Han Q F, Ding R X, Nie J F, Jia Z K, Li W J. Effects of alfalfa-grain (oil) crop plowing rotation on soil moisture and crop yield in Loess Plateau. *Trans CSAE*, 2012, 28(24): 129–137 (in Chinese with English abstract).
 - [9] 吴艳飞, 张雪艳, 李元, 魏文杰, 高丽红. 轮作对黄瓜连作土壤环境和产量的影响. *园艺学报*, 2008, 35: 357–362.
Wu Y F, Zhang X Y, Li Y, Wei W J, Gao L H. Influence of rotation continuous cropping soil environment and cucumber yield. *Acta Horti Sin*, 2008, 35: 357–362 (in Chinese with English abstract).
 - [10] 孙剑, 李军, 王美艳, 王学春, 方新宇, 任晶晶. 黄土高原半干旱偏旱区苜蓿-粮食轮作土壤水分恢复效应. *农业工程学报*, 2009, 25(6): 33–39.
Sun J, Li J, Wang M Y, Wang X C, Fang X Y, Ren J J. Effects of alfalfa-grain rotation on soil moisture restoration in semi-arid and drought-inclined areas of Loess Plateau. *Trans CSAE*, 2009, 25(6): 33–39 (in Chinese with English abstract).
 - [11] Naab J B, Mahama G Y, Yahaya I, Prasad P V V. Conservation agriculture improves soil quality, crop yield, and incomes of smallholder farmers in North Western Ghana. *Front Plant Sci*, 2017, 8: 996.
 - [12] 张伟, 张冬梅, 韩彦龙, 刘化涛, 赵聪, 姜春霞, 李娜娜. 不同前茬下旱地玉米的水分动态及产量效应. *山西农业科学*, 2017, 45: 749–752.
Zhang W, Zhang D M, Han Y L, Liu H T, Zhao C, Jiang C X, Li N N. Effects of different previous crops on soil moisture and crop yield of maize in dryland. *J Shanxi Agric Sci*, 2017, 45: 749–752 (in Chinese with English abstract).
 - [13] 李戌清, 张雅, 田忠玲, 吴根良. 茄子连作与轮作土壤养分、酶活性及微生物群落结构差异分析. *浙江大学学报(农业与生命科学版)*, 2017, 43: 561–569.
Li X Q, Zhang Y, Tian Z L, Wu G L. Difference analysis of soil nutrients, enzymatic activities and microbial community structure between eggplant continuous cropping and rotation. *J Zhejiang Univ (Agric Life Sci)*, 2017, 43: 561–569 (in Chinese with English abstract).
 - [14] 杨祥田, 周翠, 李建辉, 李伟龙, 林俊. 不同轮作方式下大棚草莓产量及土壤生物学特性. *中国生态农业学报*, 2010, 18: 312–315.
Yang X T, Zhou C, Li J H, Li W L, Lin J. Effect of cropping system on yield of strawberry and soil biological property under plastic greenhouse condition. *Chin J Eco-Agric*, 2010, 18: 312–315 (in Chinese with English abstract).
 - [15] 剡斌. 胡麻轮作模式对农田土壤养分、生物特性及作物产量的影响. 甘肃农业大学博士学位论文, 甘肃兰州, 2018.
Yan B. Effects of Different Oilseed Flax Rotation on the Soil Nutrient, Biological Characteristics and Crop Yield. PhD Dissertation of Gansu Agricultural University, Lanzhou, Gansu, China, 2018 (in Chinese with English abstract).
 - [16] Crookston R K, Kurle J E, Copland P J, Ford H J, Lueschen W E. Rotational cropping sequence affects yield of corn and soybean. *Agron J*, 1991, 83: 108–113.
 - [17] 晋艳, 杨宇虹, 段玉琪, 孔光辉. 烤烟轮作、连作对烟叶产量质量的影响. *西南农业学报*, 2004, 17(增刊 1): 267–271.
Jin Y, Yang Y H, Duan Y Q, Kong G H. Effects of rotation cropping and continuous cropping on yield and quality of flue-cured tobacco. *Southwest China J Agric Sci*, 2004, 17(S1): 267–271 (in Chinese with English abstract).
 - [18] 黄光荣. 不同轮作方式对烤烟病虫害及产量品质的影响. *河南农业科学*, 2009, (5): 40–42.
Huang G R. The influence concerning different crop rotation models to pests and diseases of flue-cured tobacco, yield and quality of products. *J Henan Agric Sci*, 2009, (5): 40–42 (in Chinese with English abstract).
 - [19] Tucker B B, Cos M B, Eck H V. Effects of rotation, tillage methods, and N fertilization on winter wheat production. *Agron J*, 1971, 63: 699–702.
 - [20] 王欣英. 前茬作物玉米和甘薯对烟草的轮作效应及其机理的研究. 山东农业大学硕士学位论文, 山东泰安, 2006.
Wang X Y. Effects of Corn and Sweet Potato on Tobacco Growth and Quality as Fore-rotating Crops. MS Thesis of Shandong Agricultural University, Tai'an, Shandong, China, 2006 (in Chinese with English abstract).
 - [21] 陈阜. 农业生态学. 北京: 中国农业出版社, 2011. pp 77–78.
Chen F. Agricultural Ecology. Beijing: China Agriculture Press, 2011. pp 77–78 (in Chinese).
 - [22] 崔婷茹. 坝上地区农业气候资源特征及高效利用策略. 河北农业大学硕士学位论文, 河北保定, 2017.
Cui T R. Characteristics of Agricultural Climatic Resources and Effective Utilization Strategy in Bashang Area. MS Thesis of Hebei Agricultural University, Baoding, Hebei, China, 2017 (in Chinese with English abstract).
 - [23] Willey R W, Osiru D S O. Studies on mixtures of maize and beans (*Phaseolus vulgaris*) with particular reference to plant population. *J Agric Sci*, 1972, 79: 517–529.
 - [24] 刘玉华, 张立峰, 边秀举. 土地当量比计算方法的改进与应用. *河北农业大学学报*, 1999, 22(2): 19–21.
Liu Y H, Zhang L F, Bian X J. Improvement and application of calculating method of Land Equivalent Ratio. *J Hebei Agric Univ*, 1999, 22(2): 19–21 (in Chinese with English abstract).
 - [25] 李继明, 李城德. 定西市旱作区马铃薯引种试验初报. *甘肃农业科技*, 2017, (10): 59–62.
Li J M, Li C D. Preliminary report of potato introduction experiment in dryland area of Dingxi city. *Gansu Agric Sci Technol*, 2017, (10): 59–62 (in Chinese with English abstract).
 - [26] 杨安沛, 曹禹, 孙桂荣, 马俊义. 不同甜菜品种对褐斑病的抗性分析. *中国糖料*, 2014, (4): 48–49.
Yang A P, Cao Y, Sun G R, Ma J Y. Resistance analysis of different beet varieties to brown spot disease. *Sugar Crops China*, 2014, (4): 48–49 (in Chinese with English abstract).
 - [27] 宋素芳, 秦豪荣, 赵聘. 生物统计学. 北京: 中国农业大学出版社, 2008. pp 59–60.

- Song S F, Qin H R, Zhao P. Biostatistics. Beijing: China Agricultural University Press, 2008. pp 59–60 (in Chinese).
- [28] 谢奎忠, 陆立银, 罗爱花, 胡新元. 长期连作对马铃薯土传病害和产量的影响. 中国种业, 2018, (2): 65–67.
Xie K Z, Lu L Y, Luo A H, Hu X Y. Effects of long-term continuous cropping on soil-borne diseases and yield of potato. *China Seed Ind*, 2018, (2): 65–67 (in Chinese).
- [29] 宋树慧, 何梦麟, 任少勇, 肖强, 蒙美莲, 陈有君, 杨丽辉, 魏翠果. 不同前茬对马铃薯产量、品质和病害发生的影响. 作物杂志, 2014, (2): 123–126.
Song S H, He M L, Ren S Y, Xiao Q, Meng M L, Chen Y J, Yang L H, Wei C G. Effect of different preceding crops on yield, quality and disease of potato. *Crops*, 2014, (2): 123–126 (in Chinese with English abstract).
- [30] 王长魁, 陈晓军, 贾瑞存. 甜菜不同轮作方式效应及对后茬作物的影响. 甘肃农业科技, 1998, (9): 11–13.
Wang C K, Chen X J, Jia R C. Effects of different rotation patterns of sugar beet and its effect on post-crop crops. *Gansu Agric Sci Technol*, 1998, (9): 11–13 (in Chinese with English abstract).
- [31] 谭雪莲, 郭天文, 刘高远. 马铃薯连作土壤微生物特性与土传病原菌的相互关系. 灌溉排水学报, 2016, 35(8): 30–35.
Tan X L, Guo T W, Liu G Y. Relationship between microbial characteristics of potato continuous cropping soil and soil-borne pathogens. *J Irrig Drainage*, 2016, 35(8): 30–35 (in Chinese with English abstract).
- [32] 王俊, 刘文兆, 李凤民. 半干旱区不同作物与苜蓿轮作对土壤水分恢复与肥力消耗的影响. 土壤学报, 2007, 44: 179–183.
Wang J, Liu W Z, Li F M. Effects of crop rotation and alfalfa on soil water recovery and fertility consumption in Semi-arid areas. *Acta Pedol Sin*, 2007, 44: 179–183 (in Chinese with English abstract).
- [33] 夏红梅, 杨宇博, 韩新文, 罗成飞, 史淑芝. 甜菜褐斑病的危害及防治. 中国甜菜糖业, 2003, (1): 53–55.
Xia H M, Yang Y B, Han X W, Luo C F, Shi S Z. The harm and prevention of beet brown spot. *China Beet Sugar*, 2003, (1): 53–55 (in Chinese with English abstract).
- [34] 孙彦彬. 茬口特性对甜菜产量的影响. 新疆农业科技, 1999, (6): 7.
Sun Y B. Effects of stubble characteristics on sugar beet yield. *Xinjiang Agric Sci Technol*, 1999, (6): 7 (in Chinese).
- [35] 孙友萍, 王洪英, 王艳丽. 作物的茬口特性与大田轮作. 吉林农业, 2004, (5): 9.
Sun Y P, Wang H Y, Wang Y L. Characteristics of crop stubble and field rotation. *Agric Jilin*, 2004, (5): 9 (in Chinese).