

基于Meta分析评价覆盖作物与玉米轮作 或间/套作对玉米产量的影响 ——以北美和中国北方地区为例

杨志远¹, 黎颖敏¹, 丛汶峰², 马博闻², 李 颖³, 麻虹宇^{3,4}, 张 丹^{3,5}

(1. 黎拓生物技术(北京)有限公司, 北京 102206; 2. 中国农业大学资源与环境学院, 北京 100193; 3. 大自然保护协会TNC, 北京 100600;
4. 北京林业大学水土保持学院, 北京 100083; 5. 南京农业大学, 南京 210095)

摘 要: 利用Meta分析方法, 分析北美和中国北方地区覆盖作物与玉米轮作和间/套作两种种植模式下覆盖作物对玉米产量的效应。结果表明, 覆盖作物与玉米轮作使玉米平均增产5.9%, 覆盖作物与玉米间/套作使玉米平均减产2.5%。不同种类覆盖作物与玉米轮作对玉米产量的效应不同, 豆科、十字花科和覆盖作物混播分别使后茬玉米平均增产13.0%、1.6%和18.1%, 禾本科覆盖作物使后茬玉米平均减产2.7%。中国北方地区豆科覆盖作物与玉米间/套作使玉米平均增产8.1%, 北美地区覆盖作物与玉米间/套作使玉米平均减产9.6%。研究结果表明, 覆盖作物与玉米轮作在北美和我国北方玉米种植区均对玉米产量具有积极影响, 以禾本科、豆科、十字花科为主的混播增产的效益最大。

关键词: 玉米; 覆盖作物; Meta分析; 轮作; 间套作

中图分类号: S513.047

文献标识码: A

Meta Analysis of Cover Crops Effects on Corn Yield under Rotation and Intercropping Regimes in North America and Northern China

YANG Zhi-yuan¹, LI Ying-min¹, CONG Wen-feng², MA Bo-wen², LI Ying³, MA Hong-yu^{3,4}, ZHANG Dan^{3,5}

(1. Litoll Biotechnology(Beijing) Co., Ltd., Beijing 102206;

2. College of Resources and Environmental Sciences, China Agricultural University, Beijing 100193;

3. The Nature Conservancy(TNC), Beijing 100600;

4. School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083;

5. Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China)

Abstract: A meta-analysis was conducted to summarize the effects of cover crops on corn yield under rotation and intercropping in North America and northern China. The results showed that corn yield in rotation with cover crops was significantly increased by 5.9% on average, while a yield reduction of 2.5% was found under intercropping. Planting of legume, brassica and mixture of cover crops increased subsequent corn yield on average by 13.0%, 1.6% and 18.1%, respectively. While planting of grass cover crops decreased yield by 2.7%. Intercropping with legume cover crops resulted in an average yield increase of 8.1% compared to corn monoculture in northern China, while an average yield reduction of 9.6% was found in North America. The results of this study suggested that rotation with cover crops had positive effect on corn yield both in North America and northern China, and mixed sowing of grass, legume and brassica was the most beneficial.

Key words: Corn; Cover crop; Meta-analysis; Rotation; Intercropping

录用日期: 2022-10-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(32072676)、中国高校科学基金(2021TC060)

作者简介: 杨志远(1987-), 山东青州人, 农艺师, 博士, 主要从事牧草遗传育种与栽培研究。

E-mail: yangzhiyuan0626@aliyun.com

张 丹为本文通信作者。E-mail: zhangdan8720@163.com

覆盖作物也称绿肥作物,通过减少土壤侵蚀、增加土壤渗透性和有机质以及提高土壤微生物活性和多样性来改善土壤的整体健康,为后茬作物带来益处,是有利于农业增产增效、生态环境和谐的有机肥源^[1-3]。覆盖作物通常与作物交替种植,合理安排茬口有助于发挥覆盖作物对作物可持续稳产高产的促进作用。覆盖作物在保护土壤和环境方面的综合生态效益较为明显,但种植成本以及可能对后续作物产量的不利影响限制了覆盖作物更广泛的推广^[4]。农业生产具有显著的地域性,同一种类的覆盖作物在不同区域的生态和经济效益也不尽相同,其对作物的增产效应不一。

覆盖作物主要通过减少土壤水分蒸散、增强植株氮素供应和抑制杂草提高作物生产潜力。与休耕裸地相比,覆盖作物种植可以减少土壤水分的蒸发或径流损失^[5],其根系生长可改善土壤团聚体分布,增加田间持水量^[6]。此外,覆盖作物残茬腐解后为下茬作物提供额外的氮,减少肥料投入。豆科植物可以固定大气中的氮气并储存为有机氮,后通过微生物分解并以植物可用形式供下茬作物利用^[7,8]。覆盖作物可以有效地控制杂草,其与玉米间作时,在不使用除草剂或机械耕作的情况下杂草生长受到显著抑制^[9]。同时,十字花科覆盖作物可通过分泌化感物质来抑制杂草种子的萌发,进而控制杂草^[10]。

由于覆盖作物和经济作物直接或间接地争夺资源,因此覆盖作物种植可能导致作物减产。经济作物群体减少、土壤氮被固定和土壤水分匮乏被认为是后茬作物减产的原因。覆盖作物种植可能导致后茬作物群体的减少,这是由于覆盖作物残茬对农业机械的干扰,造成播种时种子与土壤接触不充分^[11,12]。此外,经济作物数量减少也与土壤温度较低和覆盖作物残茬释放的化感物质抑制了幼苗生长有关^[13]。覆盖作物的另一个不利影响是由于其生长过程中的直接吸收或残茬分解过程中的氮固定导致无机氮利用率降低^[14]。覆盖作物可能会减少土壤水分储量,对后茬作物的产量产生负面影响。降雨量低于正常水平的年份、土壤粗糙易旱或在主要作物早期生长之前土壤储水不足,可能会加剧水分匮乏,造成作物减产。

整合分析(Meta-analysis)是针对某一科学问题收集足够的已发表的文献,将零散的数据和试验进行定量化统计分析的一种方法^[15,16]。玉米是重要的粮食作物之一,利用整合分析方法明确覆盖作物对玉米产量的影响,对于保证玉米可持续高产与稳产具有重要意义。已有覆盖作物对玉米产量或其他作

物产量的整合分析研究多集中于对某一区域的研究,尚且缺乏研究多个区域内覆盖作物对玉米产量的影响。Marcillo 和 Miguez^[17]整合分析北美地区冬季覆盖作物对玉米产量的影响,结果表明,豆科覆盖作物和混合覆盖作物种植分别使玉米产量增加21%和13%,单独种植禾本科覆盖作物对玉米产量无影响。北欧地区种植豆科覆盖作物对主作物同样产生增产效应,非豆科覆盖作物种植使主作物产量下降3%^[18]。本研究利用Meta分析方法来归纳评价覆盖作物在与玉米轮作和间/套作两种植模式下对玉米产量的效应,为覆盖作物在玉米种植区的选择利用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 数据来源

1.1.1 文献检索

在中国知网以“覆盖作物”、“绿肥”和“玉米”为关键词,在Web of Science和谷歌学术以“cover crops”、“green manure”、“catch crops”和“corn”或“maize”为关键词检索1970–2020年间发表的有关覆盖作物对玉米产量影响的文献。

1.1.2 文献筛选

筛选标准为田间试验,试验包括覆盖作物体系和对照体系(无覆盖作物)。主作物包括玉米,并且有产量数据。所有试验需要有重复,试验地区为北美或中国北方。最终共收集到文献95篇,其中中文文献24篇,英文文献71篇,1283条数据记录。文献中试验位点分布及样本数见表1和2。

1.2 数据的分类和数据库构建

将收集到的文献,根据覆盖作物的播种时期分为覆盖作物与玉米轮作和覆盖作物与玉米间/套作两类。玉米收获后播种覆盖作物,为覆盖作物与玉米轮作;在玉米建植后,将覆盖作物播种到玉米的行间,为覆盖作物与玉米间/套作。

将收集到的数据按照覆盖作物种类分为4组,分别为禾本科、豆科、十字花科、2种或3种混作(豆科+禾本科、豆科+十字花科、禾本科+十字花科、豆科+禾本科+十字花科)。

1.3 数据统计与分析

对数据进行整合分析时需要提取每篇文献中的处理样本量和对照样本量、处理指标(Y_{cc})和对照指标(Y_{ncc})。

响应比(Response ratios, RR)表示覆盖作物对玉米产量的影响,公式为: $RR = Y_{cc}/Y_{ncc}$,其中, Y_{cc} 表示覆盖作物处理平均值, Y_{ncc} 表示无覆盖作物处理平

均值。

在分析过程中,转化成它的对数形式表示,公式为 $\ln(RR) = \ln(Y_{cc}/Y_{ncc})$ 。为了便于解释覆盖作物对玉米产量的影响,将结果转换为百分率来表示,公式如下: $D=(RR-1)\times 100\%$, D 表示覆盖作物对玉米产量影响的百分率,当 $D>0$ 时,表示覆盖作物对玉米有增产效应;当 $D<0$ 时,表示覆盖作物对玉米有减产效应;当 $D=0$ 时,表示覆盖作物对玉米产量无影响。如果 D 值 95% 置信区间包含 0,认为覆盖作物组与对照组间差异不显著;若不包含 0,则认为二者间

差异显著。

用 Metawin 计算效应值,平均效应值和 95% 的置信区间使用非参数估计方法 (bootstrapping) 生成^[19]。进行 Meta 分析时需检验样本数据是否存在异质性,用卡方检验 (Chi-square test) 来检验异质性,若检验结果 $P>0.05$,表明数据不存在异质性,采用固定效应模型 (Fixed effects model);反之则表明数据有异质性,应采用随机效应模型 (Random effects model)。

表 1 北美地区数据来源的试验位点分布及样本数
Table 1 Site distribution and sample size of data sources in North America

地 点	样本数	地 点	样本数
Location	Sample size	Location	Sample size
安大略省	195	佐治亚州	27
马里兰州	135	伊利诺伊州	27
北卡罗来纳州	112	魁北克省	23
爱荷华州	108	弗吉尼亚州	22
纽约州	99	新泽西州	18
威斯康辛州	60	马萨诸塞州	16
华盛顿州	58	密歇根州	16
南达科他州	48	内布拉斯加州	15
特拉华州	42	宾夕法尼亚州	12
肯塔基州	34	俄亥俄州	12
亚拉巴马州	33	明尼苏达州	2

表 2 中国北方地区数据来源的试验位点分布及样本数
Table 2 Site distribution and sample size of data sources in northern China

地 点	样本数	地 点	样本数
Location	Sample size	Location	Sample size
甘肃	55	天津	13
辽宁	36	北京	5
陕西	23	吉林	4
河北	14	新疆	4
山西	14	宁夏	1

2 结果与分析

2.1 数据库基本信息

如图 1 所示,在北美地区,与玉米轮作种植覆盖作物的种类较多,包括禾本科、豆科、十字花科和两种(豆科+禾本科、豆科+十字花科、禾本科+十字花科)或 3 种(豆科+禾本科+十字花科)混播,其中禾本科覆盖作物使用较多的是黑麦(*Secale cereale*)、燕麦(*Avena sativa*)、一年生黑麦草(*Lolium multiflorum*)、冬小麦(*Triticum aestivum*);豆科覆盖作物使用较多的

是毛苕子(*Vicia villosa*)、红三叶(*Trifolium pratense*)、绛三叶(*Trifolium incarnatum*);十字花科覆盖作物使用较多的是萝卜(*Raphanus sativus*)和油菜(*Brassica napus*)。混播覆盖作物多为豆科与禾本科混播,最常用的为毛苕子与黑麦混播。与玉米间/套作覆盖作物主要为豆科、豆科与禾本科混播。

在中国北方地区,与玉米轮作主要为豆科和十字花科覆盖作物,其中豆科主要为毛苕子和草木樨(*Melilotus officinalis*),十字花科主要为二月兰(*Orychophragmus violaceus*)和油菜。与玉米间/套作主要

为豆科覆盖作物,包括大豆(*Glycine max*)、绿豆(*Vigna radiata*)、草木樨、怪麻(*Crotalaria juncea*)、田菁(*Sesbania cannabina*)、豌豆(*Pisum sativum*)、毛苕子、箭筈豌豆(*Vicia sativa*)、紫花苜蓿(*Medicago sativa*)等。

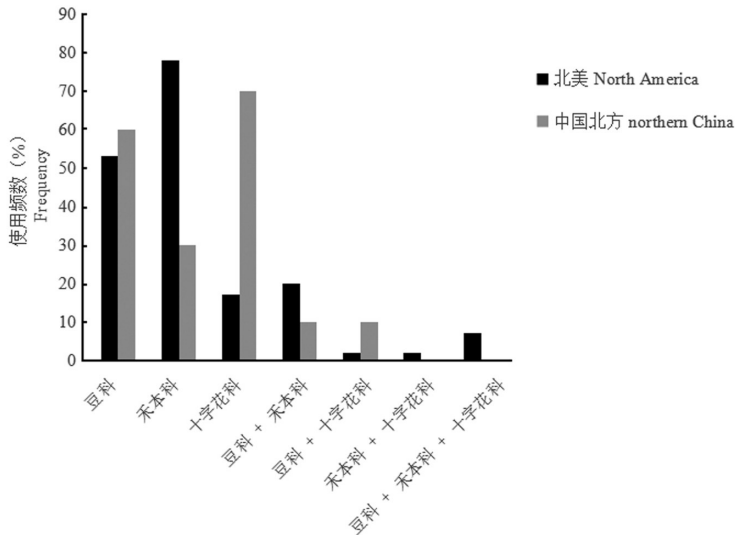


图1 北美和中国北方地区与玉米轮作覆盖作物种类

Fig.1 Cover crop species in rotation with corn in North America and northern China

2.2 不同覆盖作物种植模式对玉米产量的影响

覆盖作物与玉米轮作和覆盖作物与玉米间/套作对玉米产量的效应不同(图2)。与冬季休耕相比,覆盖作物与玉米轮作能够使后茬玉米产量平均显著

增加 5.9%(−91.1% ~ 288.9%, $P<0.05$)。与玉米单作相比,覆盖作物与玉米间/套作能够使玉米显著减产 2.5%(−56.5% ~ 55.5%, $P<0.05$)。

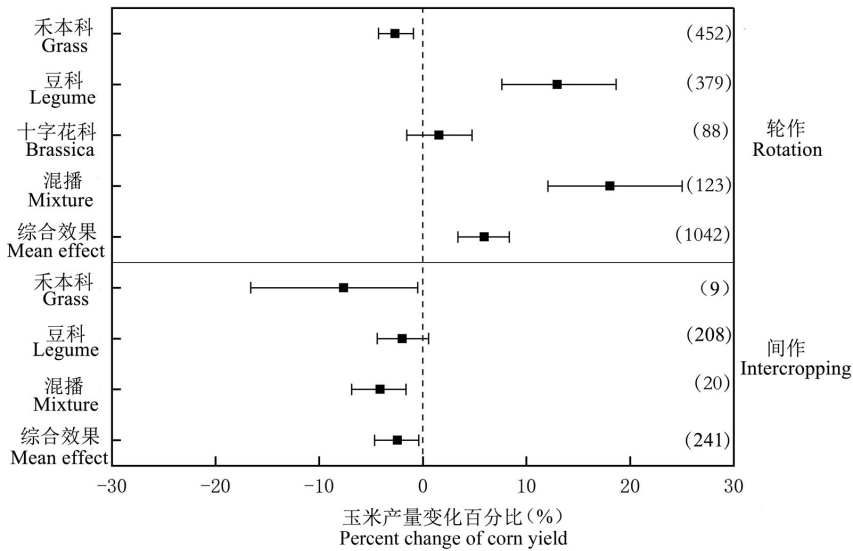


图2 两种种植模式下不同种类覆盖作物对玉米产量的效应

Fig.2 Effects of different cover crops on corn yield under two planting patterns

2.3 不同种类覆盖作物对玉米产量的影响

2.3.1 不同种类覆盖作物与玉米轮作对玉米产量的影响

不同种类覆盖作物与玉米轮作对后茬玉米产量的效应不同。覆盖作物混播、豆科和十字花科覆盖作物对后茬玉米产量有正面效应,与冬季休耕相比,

覆盖作物混播和豆科覆盖作物使后茬玉米产量分别显著增加 18.1%(−42.3% ~ 207.2%, $P<0.05$)和 13.0%(−76.8% ~ 288.9%, $P<0.05$);十字花科覆盖作物使后茬玉米产量增加 1.6%(−33.7% ~ 115.6%),增产效应不显著。禾本科覆盖作物对后茬玉米产量有负面效应,与冬季休耕相比,禾本科覆盖作物与玉米轮作使

后茬玉米产量显著减少2.7%(-56.6%~93.1%, $P<0.05$)。

2.3.2 不同种类覆盖作物与玉米间/套作对玉米产量的影响

豆科、禾本科和混播覆盖作物与玉米间/套作均对玉米产量有负面效应,与玉米单作相比,禾本科和混播覆盖作物与玉米间/套作使玉米显著减产7.6%(-38.7%~7.0%, $P<0.05$)和4.1%(-17.2%~6.9%, $P<0.05$)。豆科覆盖作物与玉米间/套作使玉米减产2.0%(-56.5%~55.5%),减产效应不显著。

2.4 不同地区覆盖作物对玉米产量的影响

2.4.1 不同地区覆盖作物与玉米轮作对后茬玉米产量的影响

中国北方地区,与玉米轮作的冬季覆盖作物主要有二月兰、油菜、毛苕子、草木樨等十字花科和豆科作物(图3)。与冬季休耕相比,种植覆盖作物使后茬玉米平均显著增产11.2%(-28.8%~115.6%, $P<0.05$)。豆科和十字花科覆盖作物与玉米轮作使后茬玉米显著增产19.1%(-5.6%~72.9%, $P<0.05$)和11.1%(-13.8%~115.6%, $P<0.05$)。

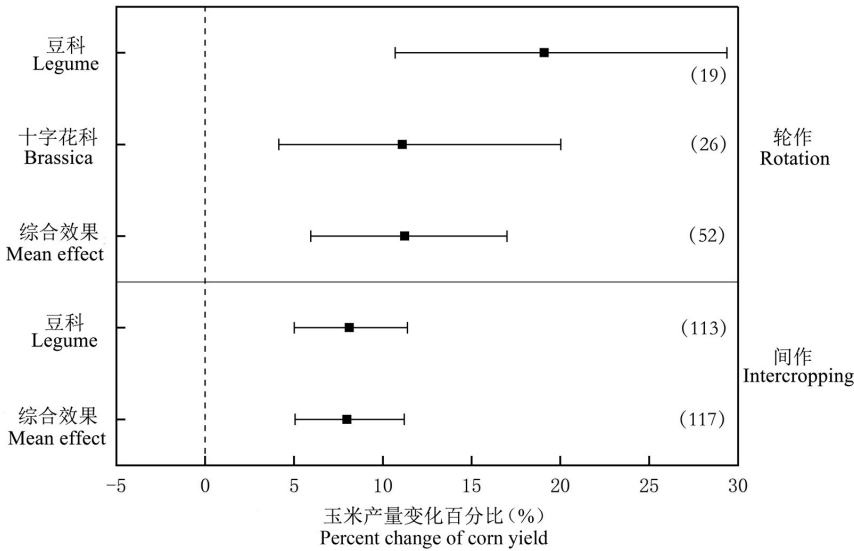


图3 中国北方地区不同种植模式下覆盖作物对玉米产量的效应
Fig.3 Effects of cover crops on corn yield under different cropping patterns in northern China

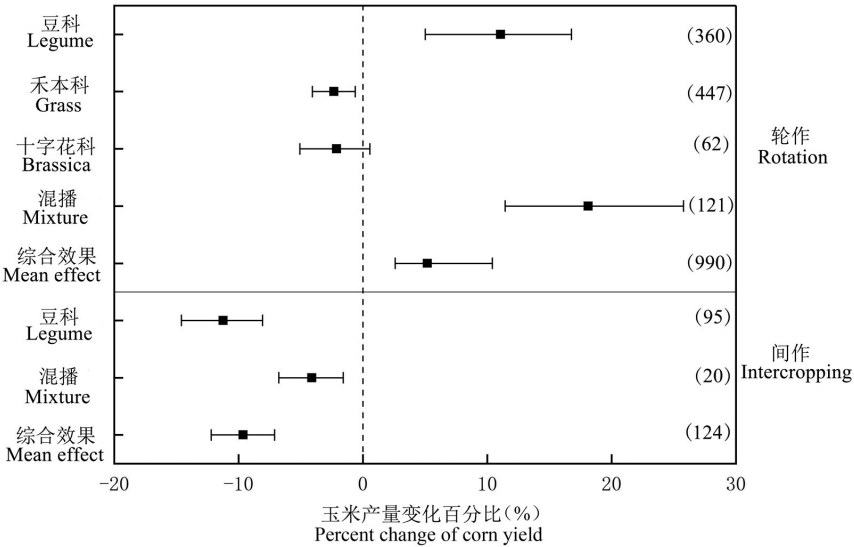


图4 北美地区不同种植模式下覆盖作物对玉米产量的效应
Fig.4 Effects of cover crops on corn yield under different cropping patterns in North America

北美地区(美国和加拿大),与冬季休耕相比,种植覆盖作物使后茬玉米产量平均显著增加5.2%

(-91.1%~288.9%)。所种覆盖作物更加多样化,包括禾本科、豆科、十字花科和不同种类混播,不同类

型覆盖作物与玉米轮作对后茬玉米产量的效应不同。覆盖作物混播和豆科覆盖作物对后茬玉米产量有正面效应(图4),与冬季休耕相比,覆盖作物混播和豆科覆盖作物使后茬玉米产量平均显著增加18.1%(-42.3%~207.2%)和11.1%(-76.8~288.9%)。禾本科和十字花科覆盖作物对后茬玉米产量有负面效应,与冬季休耕相比,种植禾本科和十字花科覆盖作物使后茬玉米产量平均减少2.3%(-56.6%~93.1%)和2.1%(-33.7%~23.9%)。

2.4.2 不同地区覆盖作物与玉米间/套作对玉米产量的影响

中国北方地区,与玉米间/套作主要为豆科覆盖作物,与玉米单作相比,豆科覆盖作物与玉米间/套作使玉米显著增产8.1%(-25.3%~55.5%, $P<0.05$)。

北美地区(美国和加拿大),与玉米间/套作的覆盖作物包括豆科、禾本科及豆科与禾本科的混播,整体来看,覆盖作物与玉米间/套作使玉米平均显著减产9.6%(-56.5%~22.2%, $P<0.05$)。

3 讨 论

覆盖作物对作物产量的效应受气候、种植模式、耕作类型、土壤类型、覆盖作物种类和种植年限等多种因素的影响。覆盖作物通过保持土壤水分、提供氮素和抑制杂草等对作物产量产生积极影响,也可能因为与作物争夺水分和养分而阻碍作物的生长。本研究中,覆盖作物与玉米轮作,豆科、十字花科和覆盖作物混播都对玉米产量有正面效应,只有禾本科覆盖作物对玉米产量有负面效应。豆科覆盖作物对后茬玉米产量的积极影响表现在两个方面,一是增加土壤中氮素含量,豆科覆盖作物通过生物固氮提供大量的氮素;二是提高了土壤氮的有效性,豆科覆盖作物植株碳氮比(C/N)低,残茬分解快,能够快速释放无机氮,供给后茬玉米利用^[20,21]。十字花科覆盖作物对后茬玉米的积极影响主要表现在其生长过程中能够活化土壤中的难溶性磷和缓效钾,提高土壤中有效磷和速效钾的含量,植株翻压至土壤能够促进氮的矿化和增加土壤有机质的含量^[22,23]。不同种类覆盖作物混播能够增加覆盖作物的生物量,从而能够更好地抑制杂草和减少土壤侵蚀^[24]。此外,豆科与非豆科混播可以最大化豆科作物的生物固氮作用和促进土壤养分循环^[25~26],这些都为后茬玉米的生长创造了有利条件。禾本科覆盖作物对玉米产量中性或负面的效应可能是因为在冬春季消耗了土壤中的水分和养分,而灭生后残茬不能为土壤快速补充氮素,从而影响了下茬玉米的生长。

有研究表明,高碳氮比(C/N)的禾本科覆盖作物残茬翻压还田会固定土壤中的氮,减少土壤氮素给下茬作物的供应;低碳氮比(C/N)的豆科类覆盖作物植株氮含量高,残茬通常分解较快,能够快速将无机氮释放到土壤中,增加土壤中可利用氮的含量,供后茬作物利用^[27]。

此外,禾本科覆盖作物对后茬玉米产量的影响可能与种植年限相关。美国爱荷华州连续12年的种植试验显示,玉米-大豆轮作系统中种植冬季覆盖作物黑麦几乎不影响后茬玉米产量,在39个试验年点中,只有5个年点玉米产量减少,而且这5个产量减少的试验年点多数是在试验的前2年,在试验的后4年,有3个试验年点玉米产量增加^[28]。表明禾本科覆盖作物对后茬玉米产量的积极影响可能需要较长时间的积累。

虽然覆盖作物可以促进土壤水分下渗和减少蒸发损失^[29],但它也消耗土壤水分,这在水分匮乏地区可能对后茬作物产量产生负面影响。大多数研究表明,在美国大平原中部和南部缺水的半干旱农业生态系统中,由于覆盖作物对土壤水分的消耗,后茬作物产量下降^[30,31]。因此,在冬春季水分受限或无灌溉地区,不宜采用覆盖作物与玉米轮作的种植模式。在水分充足地区,冬季覆盖作物的选择也需谨慎,尽量选择豆科类低C/N的覆盖作物,或者豆科与其他科的混播。

本研究中,中国北方地区,综合来看豆科覆盖作物与玉米间/套作对玉米有增产效应;在北美地区,覆盖作物与玉米间/套作,豆科和豆科与禾本科混播都对当季玉米有减产效应。两个地区覆盖作物与玉米间/套作对玉米产量的不同效应可能与两个地区玉米间/套作覆盖作物的方式不同有关。中国北方地区豆科覆盖作物与玉米间作,分别按各自的正常行距播种。豆科覆盖作物与玉米间作,对玉米根际土壤具有保墒蓄水、调节温度的作用,玉米与覆盖作物复合群体高矮相间,改善了玉米的通风透光条件,提高光能利用率^[32~33]。此外,豆科覆盖作物的根系可进行生物固氮,不仅满足自身对氮素养分的需求,还增加了玉米对氮素等养分的吸收和利用。因此,豆科覆盖作物与玉米间作改善了玉米生长生态环境,促进了玉米的生长发育,最终使玉米产量增加。

北美地区,玉米套种覆盖作物是在玉米生长的某个阶段(如4叶至6叶期)在玉米行间条播或撒播覆盖作物,覆盖作物在建植生长过程中势必会同玉米竞争资源(水分、养分、光照等),对当季玉米产量产生不良影响^[34~37]。此外,两个地区玉米田对覆盖

作物的利用方式不同,中国北方地区常将间作的豆科覆盖作物用作绿肥,在玉米收获前进行粉碎翻压,豆科覆盖作物腐解后能形成大量的有机质,提高土壤肥力,同时覆盖作物鲜草含有大量的水分,翻压还田能够使土壤保持一定的湿润,从而对玉米的生长发育有一定的促进作用^[38-39]。北美地区,覆盖作物套播于玉米行间,在玉米收获后让其继续生长,主要利用其抑制杂草、保持水土、减少土壤侵蚀的作用,其在冬春季灭生还田能增加土壤中有有机质含量,提高土壤养分的有效性,为下季作物的养分需求奠定基础。因此,北美地区覆盖作物与玉米套作对后茬玉米有积极影响。覆盖作物的建植会与玉米争夺水分、养分等资源,对当季玉米产量有不利影响。Jeranyama 等^[40]发现,一年生苜蓿与玉米套作能够使下茬玉米产量增加 3%~25%,对当季玉米有减产效应。覆盖作物对玉米产量的影响也与覆盖作物套播时间有关,覆盖作物播种太早,与玉米同时播种,覆盖作物会扮演类似杂草的角色,与玉米竞争水肥,对玉米生长产生不利影响;覆盖作物播种期在玉米生长的杂草敏感期之后会减少或消除对玉米产量的负面影响。在玉米 3 叶期套播覆盖作物(豆科和禾本科混播)使玉米减产 10%,在玉米 5 叶期套播覆盖作物对玉米产量没有影响^[41]。因此,在北美地区覆盖作物套播时间的选择至关重要,最好在玉米生长的杂草敏感期之后、干旱和低温天气到来之前播种。

本文利用 Meta 分析方法分析北美地区和中国北方地区覆盖作物与玉米轮作和间/套作两种种植模式下覆盖作物对玉米产量的效应。研究结果表明,覆盖作物与玉米轮作在北美和中国北方玉米种植区均对玉米产量具有积极的影响。在中国北方地区豆科覆盖作物与玉米间/套作对玉米有增产效应,在北美地区覆盖作物与玉米间/套作对玉米有减产效应。本研究为中国北方和北美地区玉米种植区覆盖作物的选择利用提供了理论依据,覆盖作物的选择应以禾本科、豆科和十字花科为主的混播来实现产量和生态效益的双赢。

参考文献:

- [1] KASPAR T C, RADKE J K, LAFLEN J M. Small grain cover crops and wheel traffic effects on infiltration, runoff, and erosion[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2001, 56(2): 160-64.
- [2] MOORE E B, WIEDENHOEFT M H, KASPAR T C, et al. Rye cover crop effects on soil quality in no-till corn silage - soybean cropping systems[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2014, 78(3): 968.
- [3] 韩明会,李保国,张 丹,等.再生农业——基于土地保护性利用的可持续农业[J]. *中国农业科学*, 2021, 54(5): 1003-1016.
- [4] HAN M H, LI B G, ZHANG D, et al. Regenerative agriculture-sustainable agriculture based on the conservational and use[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2021, 54(5): 1003-1016. (in Chinese)
- [5] SINGER J W, NUSSER S M, ALF C J. Are cover crops being used in the US Corn Belt?[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2007, 62(5): 353-358.
- [6] TRUMAN C C, REEVES D W, SHAW J N, et al. Tillage impacts on soil property, runoff, and soil loss variations from a Rhodic Paleudult under simulated rainfall[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2003, 58(5): 258-267.
- [7] VILLAMIL M B, BOLLEROG A, DARMODY R G, et al. No-till corn/soybean systems including winter cover crops[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2006, 70(6): 1936.
- [8] REEVES, D W. Cover crops and rotations[M]// L. Hatfield and B.A. Steward. *Advances in Soil Science: Crops Residue Management*. Boca Raton, FL: CRC Press, 1994, 125-172.
- [9] BLANCO-CANQUI H, SHAVER T M, LINDQUIST J L, et al. Cover crops and ecosystem services: Insights from studies in temperate soils[J]. *Agronomy Journal*, 2015, 107(6): 2449-2474.
- [10] HARTWIG N L, AMMON H U. Cover crops and living mulches[J]. *Weed Science*, 2002, 50(6): 688-699.
- [11] TEASDALE J R, MOHLER C L. The quantitative relationship between weed emergence and the physical properties of mulches[J]. *Weed Science*, 2000, 48(3): 385-392.
- [12] ECKERT D J. Rye cover crops for no-tillage corn and soybean production[J]. *Journal of Production Agriculture*, 2013, 210(127): 207-210.
- [13] KASPAR T C, BAKKER M G. Biomass production of 12 winter cereal cover crop cultivars and their effect on subsequent no-till corn yield[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2015, 70(6): 353-64.
- [14] BALKCOM K S, SCHOMBERG H, REEVES D W, et al. Managing cover crops in conservation tillage systems[M]// A.J. Clark. *Managing Cover Crops Profitably*. College Park, MD: Sustainable Agriculture Research and Education, 2007: 189-204.
- [15] WAGGER M G, MENGEL D B. The role of nonleguminous cover crops in the efficient use of water and nitrogen[M]// W.L. Hargrove. *Cropping Strategies for Efficient Use of Water and Nitrogen*. Madison, WI: American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, and Soil Science Society of America. 1993: 115-27.
- [16] DICKERSIN K, BERLIN J A. Meta-analysis: state of the science [J]. *Epidemiologic Reviews*, 1992, 14: 154-176.
- [17] SILESHI G, AKINNIFESI F K, AJAYI O C, et al. Meta-analysis of maize yield response to woody and herbaceous legumes in sub-Saharan Africa[J]. *Plant and Soil*, 2008, 307: 1-19.
- [18] MARCILLO G S, MIGUEZ F E. Corn yield response to winter cover crops: An updated meta-analysis[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2017, 72: 226-239.
- [19] VALKAMA E, LEMOLA R, KÄNKÄNEN H, et al. Meta-analysis of the effects of under sown catch crops on nitrogen leaching loss and grain yields in the Nordic countries[J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2015, 203: 93-101.
- [20] ROSENBERG M S, ADAMS D C, GUREVITCH J. MetaWin: Statis-

- tical software for meta-analysis[M]. Sunderland: Sinauer Associates, 2000: 20–25.
- [20] VARCO J J, FRYE W W, SMITH M S, et al. Tillage effects on nitrogen recovery by corn from a nitrogen-15 labeled legume cover crop[J]. Soil Science Society of America Journal, 1989, 53: 822–827.
- [21] DABNEY S, DELGADO J A, REEVES D W. Using winter cover crops to improve soil and water quality[J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 2001, 32(7–8): 1221–1250.
- [22] FAGERIA N K. Green manuring in crop production[J]. Journal of Plant Nutrition, 2007, 30(5): 691–719.
- [23] 杨璐, 曹卫东, 白金顺, 等. 种植翻压二月兰配施化肥对春玉米养分吸收利用的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2013, 19(4): 799–807.
- YANG L, CAO W D, BAI J S, et al. Effect of combined application of February Orchid(*Orychophragmus violaceus* L.) and chemical fertilizer on nutrient uptake and utilization of spring maize[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2013, 19(4): 799–807. (in Chinese)
- [24] KUO S, JELLUM E J. Influence of winter cover crop and residue management on soil nitrogen availability and corn[J]. Agronomy Journal, 2002, 94: 501–508.
- [25] KUO S, SAINJU U M. Nitrogen mineralization and availability of mixed leguminous and non-leguminous cover crop residues in soil[J]. Biology and Fertility of Soils, 1998, 26: 346–355.
- [26] MULDER C P H, JUMPPONEN A, HOGBERG P, HUSS-DANEL K. How plant diversity and legumes affect nitrogen dynamics in experimental grassland communities[J]. Oecologia, 2002, 133: 412–421.
- [27] WHITE C M, DUPONT S T, HAUTAU M, et al. Managing the trade-off between nitrogen supply and retention with cover crop mixtures[J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2017, 237: 121–133.
- [28] JUCHEMS L, GAILANS S. Winter cereal rye cover crop effect on cash crop yield[EB/OL]. [2021–01]. https://www.iowalearningfarms.org/files/page/files/winter_rye_effect_on_yield_final.pdf
- [29] UNGER P W, VIGIL M F. Cover crops effects on soil water relationships[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1998, 53: 200–207.
- [30] NIELSEN D C, LYON D J, HIGGINS R K, et al. Cover crop effect on subsequent wheat yield in the central Great Plains[J]. Agronomy Journal, 2016, 108: 243–256.
- [31] ROBINSON C, NIELSEN D. The water conundrum of planting cover crops in the Great Plains: When is an inch not an inch?[J]. Crops and Soils, 2015, 48: 24–31.
- [32] 董红芬, 李洪, 霍成斌, 等. 覆盖作物在玉米/大豆间作模式中的效应分析[J]. 玉米科学, 2019, 27(3): 95–101.
- DONG H F, LI H, HUO C B, et al. Effect analysis of cover crops in maize/soybean intercropping model[J]. Journal of Maize Sciences, 2019, 27(3): 95–101. (in Chinese)
- [33] 樊丽生, 郑联寿, 王俊, 等. 玉米套种绿肥模式对连作田土壤肥力及产量的影响[J]. 山东农业科学, 2013, 45(10): 89–91, 94.
- FAN L S, ZHENG L S, WANG J, et al. Effect of interplanting corn and green manure mode on soil fertility and outputs of continuous cropping farmland[J]. Shandong Agricultural Sciences, 2013, 45(10): 89–91, 94. (in Chinese)
- [34] VOS R J. Effect of spring-seeded annual medics on weed management in *Zea mays* production[D]. Brookings: South Dakota State University, 1999.
- [35] SMELTEKOP H, CLAY D E, CLAY S A. The impact of intercropping annual ‘Sava’ snail medic on corn production[J]. Agronomy Journal, 2002, 94: 917–924.
- [36] SCHIPANSKI M E, BARBERCHECK M, DOUGLAS M R, et al. A framework for evaluating ecosystem services provided by cover crops in agroecosystems[J]. Agricultural Systems, 2014, 125: 12–22.
- [37] SNAPP S, SWINTON S, LABARTA R, et al. Evaluating cover crops for benefits, costs, and performance within cropping system niches[J]. Agronomy Journal, 2005, 97: 322–332.
- [38] 刘宏伟. 绿肥作物还田后腐解规律及对土壤肥力与玉米产量的影响[D]. 北京: 中国农业科学院硕士学位论文, 2011.
- [39] 张媛媛. 绿肥腐解规律及玉米绿肥间种效益的研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学硕士学位论文, 2011.
- [40] JERANYAMA P, HESTERMAN O B, SHEAFFER C C. Medic planting date effect on dry matter and nitrogen accumulation when clear-seeded or intercropped with corn[J]. Agronomy Journal, 1998, 90(5): 616–622.
- [41] BICH A D, REESE C L, KENNEDY A C, et al. 2014. Corn yield is not reduced by mid-season establishment of cover crops in northern great plains environments[J]. Crop Management, 2014, 13(1), DOI: 10.2134/CM-2014-0009-RS.

(责任编辑: 栾天宇)