

不同轮作模式下玉米产量及养分利用效率对化肥与有机物料配施模式的响应

李涛¹, 方娅婷^{1*}, 杜思垚¹, 盛倩男¹, 赵剑¹, 李凯旭²,
徐维明², 朱俊¹, 任涛¹, 鲁剑巍¹

(1 华中农业大学资源与环境学院 / 农业农村部长江中下游耕地保育重点实验室 / 华中农业大学微量元素研究中心, 湖北武汉 430070; 2 沙洋县农业技术推广中心, 湖北荆门 448000)

摘要:【目的】油菜-玉米 (oilseed rape-maize, OM) 和小麦-玉米 (wheat-maize, WM) 轮作是长江流域典型的玉米轮作模式, 研究化肥和有机物料投入对 OM 和 WM 轮作体系玉米产量和养分利用的影响及其差异, 以期为玉米高产栽培养分管理提供依据。【方法】2020—2021 年在湖北省沙洋县开展田间试验, 在 OM 和 WM 轮作模式下, 分别设置不施肥 (CK)、化肥 (NPK)、化肥+秸秆 (NPK+S) 和化肥+秸秆+有机肥 (NPK+S+M) 4 个施肥处理, 调查了玉米产量、地上部生物量、养分利用效率和养分表观平衡。【结果】两年试验的平均结果表明, 两个轮作模式下, 4 个处理间玉米产量相差显著, 由高到低均为 NPK+S+M>NPK+S>NPK>CK ($P<0.05$); 在 CK 和 NPK 处理下, OM 和 WM 的玉米产量差异显著, 而在 NPK+S 和 NPK+S+M 处理下, 两个轮作体系玉米产量差异不显著。两个轮作模式下, 4 个处理间玉米地上部养分积累量差异显著, 氮、磷、钾积累量由高到低均为 NPK+S+M>NPK+S>NPK>CK ($P<0.05$); 4 个处理下, OM 玉米地上部养分积累量显著高于 WM, 氮、磷、钾积累量分别高出 9.6%~52.7%、9.9%~28.7% 和 9.2%~36.2%。两个轮作模式下, 有机物料的投入降低了玉米养分利用效率, 与 NPK 处理相比, NPK+S 和 NPK+S+M 处理的玉米氮磷钾生理利用率分别降低 12.7%~25.4% 和 9.1%~28.3%; 在 CK 和 NPK 处理下, OM 的玉米养分收获指数和养分生理利用率高于 WM, 而在 NPK+S 和 NPK+S+M 处理下则低于 WM。两个轮作模式下, 4 个处理间养分表观盈余相差显著, 氮、磷表观盈余由高到低均为 NPK+S+M>NPK>NPK+S>CK, 钾表观盈余由高到低表现为 NPK+S+M>NPK+S>NPK>CK; 4 个处理下, 氮磷钾表观盈余均表现为 WM>OM。【结论】单施化肥油玉轮作的玉米产量和养分积累量显著高于麦玉轮作, 而化肥配合秸秆还田和有机肥可显著提高玉米产量和养分积累量, 麦玉轮作下玉米产量和养分积累量可增加到与油玉轮作相当的水平, 并提高养分表观盈余量。在麦玉轮作体系中, 提倡同时施用化肥和有机肥并结合秸秆还田, 以充分满足玉米高产对养分的需求, 而在油玉轮作模式下, 可考虑油菜作为有机肥的效应, 推荐化肥配合秸秆还田来保证玉米产量和养分利用效率, 从而实现粮油兼丰。

关键词: 轮作; 化肥; 秸秆; 有机肥; 玉米产量; 养分利用效率

Response of maize yield and nutrient use efficiency to combined application of chemical fertilizer and organic amendments under different rotation systems

LI Tao¹, FANG Ya-ting^{1*}, DU Si-yao¹, SHENG Qian-nan¹, ZHAO Jian¹, LI Kai-xu²,
XU Wei-ming², ZHU Jun¹, REN Tao¹, LU Jian-wei¹

(1 College of Resources and Environment, Huazhong Agricultural University / Key Laboratory of Arable Land Conservation (Middle and Lower Reaches of Yangtze River), Ministry of Agriculture and Rural Affairs / Microelement Research Center, Huazhong Agricultural University, Wuhan, Hubei 430070, China; 2 Shayang County Agricultural Technology Extension Center, Jingmen, Hubei 448000, China)

Abstract: 【Objectives】Oilseed rape-maize (OM) and wheat-maize (WM) are typical rotation patterns in the Yangtze River Basin in China. This study investigated the effects of combined application of chemical fertilizers

收稿日期: 2025-08-08

接受日期: 2025-11-29

基金项目: 国家油菜产业技术体系项目 (CARS-12); 中央高校基本科研业务费 (2662024PY017)。

联系方式: 李涛 E-mail: tli@webmail.hzau.edu.cn; * 通信作者 方娅婷 E-mail: fangyating@mail.hzau.edu.cn

and organic materials on maize yield and nutrient use under OM and WM rotation systems, aiming to provide a scientific basis for nutrient management in high-yielding maize production. 【 **Methods** 】 Field experiments were conducted in Shayang County, Hubei Province in 2020 and 2021. Four fertilization treatments were set up under the OM and WM rotations: no fertilization (CK), chemical fertilizers (NPK), chemical fertilizers+straw return (NPK+S), chemical fertilizers+straw return+manure (NPK+S+M). Maize yield, aboveground biomass, nutrient utilization efficiency and nutrient apparent balance were analyzed. 【 **Results** 】 The average results of the two-year experiment showed that there was a significant difference in maize yield among four treatments under two rotation patterns, and the order from high to low was $\text{NPK+S+M} > \text{NPK+S} > \text{NPK} > \text{CK}$ ($P < 0.05$). The maize yield of OM was significantly higher than that of WM under CK and NPK treatments, but not significantly different from that of WM under NPK+S and NPK+S+M treatments. The N, P and K nutrient accumulation of maize shoots were significantly different among the four treatments in both the rotation patterns, showing an order of $\text{NPK+S+M} > \text{NPK+S} > \text{NPK} > \text{CK}$ ($P < 0.05$), and the N, P, and K nutrient accumulation of OM maize were 9.6%–52.7%, 9.9%–28.7% and 9.2%–36.2% higher than those of WM, respectively. The input of organic materials reduced the nutrient use efficiency of maize in the four treatments. Compared with NPK treatment, the physiological utilization rates of N, P and K in NPK+S and NPK+S+M treatments decreased by 12.7%–25.4% and 9.1%–28.3%, respectively. Under CK and NPK treatments, the nutrient harvest index and nutrient physiological utilization rate of OM were higher than those of WM, but lower than those of WM under NPK+S and NPK+S+M treatments. Under the two rotation patterns, the apparent surplus of nutrients among the four treatments was significantly different. The apparent surplus of N and P from high to low was $\text{NPK+S+M} > \text{NPK} > \text{NPK+S} > \text{CK}$, and the apparent surplus of K was in order of $\text{NPK+S+M} > \text{NPK+S} > \text{NPK} > \text{CK}$. Under the four treatments, the apparent surplus of N, P and K was $\text{WM} > \text{OM}$. 【 **Conclusions** 】 Applying chemical fertilizer alone resulted in significantly higher maize yield and nutrient accumulation under the oilseed rape-maize rotation pattern than under the wheat-maize rotation. However, the combined application of chemical fertilizer with straw return or organic fertilizer significantly increased maize yield and nutrient accumulation. In the wheat-maize rotation system, maize yield and nutrient accumulation could be raised to levels comparable to those in the oilseed rape-maize rotation, and the apparent nutrient surplus was also improved. In the wheat-maize rotation system, it is recommended to apply both chemical and organic fertilizers combined with straw return to fully meet the nutrient demands for high maize yields. In contrast, in the oilseed rape-maize rotation system, considering the organic fertilizer effect of oilseed rape itself, the combined application of chemical fertilizer with straw return is recommended to ensure maize yield and nutrient use efficiency, thereby achieving high and stable yields of both grain and oil crops.

Keywords: rotation; chemical fertilizer; straw; organic fertilizer; maize yield; nutrient utilization

玉米作为我国重要的粮食作物、饲料作物和工业原料^[1], 其优质高产对于保障国家粮食安全和缓解能源危机具有重要意义^[2]。油菜-玉米和小麦-玉米轮作是长江流域典型的复种轮作制度。施用化肥是实现作物高产的有效途径^[3], 但长期过量施肥不仅导致肥料利用率下降、农户生产成本增加, 还引起了严重的环境问题, 如温室气体排放^[4]和地下水污染^[5]等。近年来, 我国出台了一系列农业绿色发展政策, 旨在通过有机物料替代化肥实现绿色高效施肥^[6]。我国有机物料资源丰富, 其氮(N)、磷(P)、钾(K)养分含量较高, 但利用率较低, 若处置不当, 极易成

为农业环境污染的根源^[7]。因此, 探究化肥和有机物料投入对油玉和麦玉轮作模式下玉米产量的影响, 对于保障粮食安全和实现农业绿色可持续发展具有重要意义。目前, 关于秸秆、有机肥等有机物料调控作物养分利用与改善土壤养分供应的研究已较多。如 Ma 等^[8]研究表明, 秸秆还田提高了玉米籽粒氮素积累量和氮收获指数, 且增幅与秸秆还田量成正比; Li 等^[9]研究表明, 秸秆还田可以提高土壤全磷和有效磷含量, 并提高土壤磷储量; Ye 等^[10]研究表明, 长期施用有机肥可以通过提高固氮细菌和硝化细菌的相对丰度, 降低反硝化细菌的相对丰度,

进而增加土壤有效氮供应。合理的有机无机配施可以维持健康的叶片生理特性, 促进作物生长进而提高产量^[11]。前人围绕有机物料在麦玉轮作体系中的应用开展了大量研究。如 Wang 等^[12]研究表明, 与单施化肥相比, 有机肥替代 50% 氮肥可以提高麦玉轮作体系玉米产量 7%; Li 等^[13]通过麦玉轮作定位试验研究发现, 有机物料与化肥联合施用较单施化肥可显著改善土壤养分供应并增加玉米产量。油菜作为我国重要的冬季油料作物, 将其纳入轮作体系, 有利于合理充分利用土地, 更有利于促进粮油共同发展^[14]。刘哲辉等^[15]研究表明, 与小麦茬后玉米相比, 油菜茬后玉米产量显著提高。油玉和麦玉轮作作为长江流域玉米的主要种植模式, 前人不乏关于化肥和有机物料对玉米产量和养分吸收影响的报道, 但这些研究多基于单一轮作模式, 忽略了不同轮作模式中玉米产量和养分利用对不同化肥和有机物料投入的响应及其差异特征。因此, 本研究通过为期两年的油玉和麦玉轮作田间试验, 分析玉米季的产量和养分利用特征, 以期对轮作体系下玉米种植的养管理提供理论依据与实践参考。

1 材料与方法

1.1 试验点概况

该定位试验位于湖北省荆门市沙阳县华中农业大学沙洋实验站 (30°43'5"N, 112°18'25"E), 于 2014 年 10 月建成, 经过一年匀地处理后于 2015 年 9 月正式开展试验。本研究于 2020 年 5 月至 9 月和 2021 年 5 月至 9 月进行。供试土壤类型为粉砂质粘壤土, 土壤基础理化性质为: pH 6.84、有机质 11.78 g/kg、全氮 0.74 g/kg、有效磷 3.48 mg/kg、速效钾 212.0 mg/kg 和有效硼 0.58 mg/kg。该地区为亚热带季风气候, 试验期间主要气象要素如图 1 所示, 整体来看, 2021 年 6—7 月平均降水量和气温较 2020 年分别下降 275 mm 和 1.1℃。

1.2 试验设计

本研究采用裂区试验设计, 主处理为不同轮作模式, 包括油菜—玉米 (oilseed rape-maize, OM) 和小麦—玉米 (wheat-maize, WM)。副处理分别为: 1) 不施肥 (CK) 处理; 2) 化肥 (NPK) 处理, 根据《中国主要作物施肥推荐》^[16], 化肥施用量分别为 N 180 kg/hm²、P₂O₅ 60 kg/hm²、K₂O 75 kg/hm², 其中氮肥分为 40% 基肥、40% 拔节肥、20% 穗肥, 磷肥和钾肥全部基施; 3) 化肥+秸秆 (NPK+S) 处理, 在 NPK 处

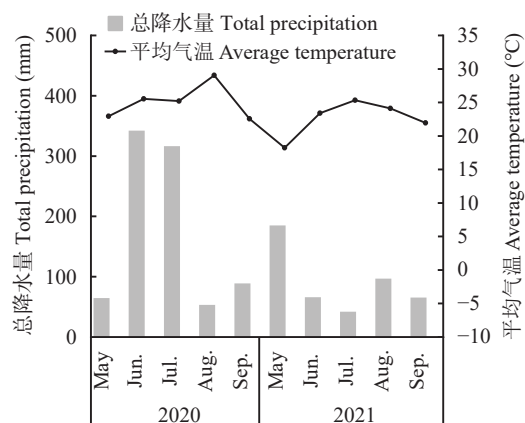


图 1 2020—2021 年玉米季月平均气温和总降水量
Fig. 1 Monthly average temperature and total precipitation in the 2020–2021 maize season

理基础上配施前季油菜/小麦秸秆, 采用粉碎覆盖还田方式, 还田量为 6 t/hm², 还田油菜秸秆 N 含量为 0.42%、P 含量为 0.07%、K 含量为 2.54%; 还田小麦秸秆 N 含量为 0.49%、P 含量为 0.08%、K 含量为 2.58%; 4) 化肥+秸秆+有机肥 (NPK+S+M) 处理, 在 NPK+S 处理的基础上增施有机肥, 有机肥施用量由其中氮含量确定, 供氮量为 N180 kg/hm², 有机肥全部基施, 有机肥用量约为 8 t/hm²。供试化肥品种分别为尿素 (46% N)、过磷酸钙 (12% P₂O₅)、氯化钾 (60% K₂O); 供试有机肥为生物有机肥, 含水率 30%、有机质含量 34.6%、N 含量 2.22%、P₂O₅ 含量 3.14%、K₂O 含量 2.11%。各小区面积 24.75 m², 每个处理 3 次重复, 随机区组排列。

2020 年供试玉米品种为‘濮单 6 号’, 2021 年为‘蠡玉 166’。采取育苗移栽的种植方式, 移栽密度为 6×10⁴ 株/hm², 行距 45 cm, 株距 24 cm。两季育苗播种时间分别为 2020 年 5 月 12 日和 2021 年 5 月 19 日, 移栽时间分别为 2020 年 5 月 28 日和 2021 年 6 月 5 日, 收获时间分别为 2020 年 9 月 1 日和 2021 年 8 月 20 日。田间管理和病虫害防治均采用当地农业技术推广部门推荐的方法。

1.3 项目测定与方法

1.3.1 基础土壤样品采集与分析 于试验布置前, 以整个试验田为采样单元, 采用“S”形采样法, 均匀布点采集 15 个点的耕层 (0—20 cm) 土壤, 按常规方法测定土壤 pH、有机质、全氮、有效磷、速效钾和有效硼等指标^[17]。

1.3.2 玉米成熟期样品采集制备与养分含量测定

玉米收获前 1~2 天, 在各试验小区内随机选取 6 株代表性植株, 齐地收割其地上部, 装入网袋悬挂风

干后脱粒。将植株分为茎秆、叶片、苞叶、穗轴和籽粒 5 个部分, 于 65 °C 烘箱中烘干至恒重, 计算各部位干物质比例。小区茎秆、叶片、苞叶和穗轴生物量由小区实产乘以样方各部位干物质比例换算而得。样品经粉碎机磨碎并过 1 mm 筛备用。采用 $\text{H}_2\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}_2$ 消煮, 以流动注射分析仪 (AA3, SEAL, Germany) 测定氮、磷含量, 火焰光度计测定钾含量^[18]。

1.3.3 作物收获测产 待玉米成熟 (籽粒乳线消失, 籽粒变硬, 苞叶呈黄白色, 叶片变黄干枯), 各小区单独收割, 晾干后人工脱粒并称取籽粒总重。取约 1000 g 籽粒装入网袋, 悬挂风干至恒重, 根据水分散失量换算各小区实际产量。

1.4 数据计算与统计分析

1.4.1 参数计算 作物氮素吸收量 (kg/hm^2) = 籽粒氮含量 × 籽粒干物质质量 + 穗轴氮含量 × 穗轴干物质质量 + 苞叶氮含量 × 苞叶干物质质量 + 叶片氮含量 × 叶片干物质质量 + 茎秆氮含量 × 茎秆干物质质量, 磷素和钾素吸收量同样如此, 本研究所有养分均以 N、 P_2O_5 、 K_2O 形式计算。

养分收获指数 (nutrient harvest index, NHI) = 籽粒养分积累量 / 地上部养分积累量。

养分生理利用率 (Nutrient physiological efficiency, NPUE) = 籽粒产量 / 地上部养分吸收量。

养分表观平衡 (kg/hm^2) = 施肥处理养分投入量 - 玉米地上部养分积累量。

1.4.2 统计分析 使用 IBM SPSS Statistics 20.0 (SPSS Inc., Chicago, IL, USA) 软件进行描述性统计分析, 以评估每个参数的平均值和标准差, 使用混合模型并选择“年份”作为随机效应进行多重比较。图形均使用 Origin 2024 (Origin Lab Corporation, Northampton, MA, USA) 绘制。

2 结果与分析

2.1 化肥和有机物料投入对不同轮作玉米产量和地上部生物量的影响

不同施肥处理和轮作模式对玉米产量影响显著, 且存在交互作用 (表 1)。两种轮作模式下, 与不施肥 (CK) 处理相比, 化肥和有机物料施用显著提高玉米产量 (产量为 CK 处理的 4.6~7.1 倍, $P<0.05$), 其中, 与化肥 (NPK) 处理相比, 化肥+秸秆 (NPK+S) 处理和化肥+秸秆+有机肥 (NPK+S+M) 处理的玉米产量分别平均提高 33.2% 和 51.7% ($P<0.05$)。此外, 不同施肥处理下不同轮作玉米产量差异显著, 油玉轮

作玉米产量高于麦玉轮作, 其中, CK 和 NPK 处理油玉轮作体系玉米产量较麦玉轮作体系分别增加 93.7% 和 12.9% ($P<0.05$)。

化肥与有机物料施用显著提升玉米地上部生物量 (图 2)。在两种轮作模式中, 与 CK 处理相比, 化肥与有机物料施用提升玉米地上部生物量 (地上部生物量为 CK 处理的 2.8~4.6 倍, $P<0.05$); 与 NPK 处理相比, NPK+S 和 NPK+S+M 处理玉米地上部生物量分别平均增加 53.6% 和 63.3% ($P<0.05$)。在所有施肥处理中, 油玉轮作玉米地上部生物量均显著高于麦玉轮作, 平均高出 5.3%~61.1% ($P<0.05$), 不同施肥处理玉米生物量依次为 $\text{NPK+S} > \text{NPK+S+M} > \text{CK} > \text{NPK}$, 可见施肥处理会影响轮作模式对地上部生物量的提升效果, NPK+S 处理下油玉轮作的生物量优势最显著, 而 NPK 处理下该优势最小。玉米地上部各部位生物量表现为籽粒 > 叶片 > 茎秆 > 穗轴 > 苞叶。其中, CK 和 NPK 处理的玉米收获指数在油玉轮作下较高, NPK+S 和 NPK+S+M 的玉米收获指数在麦玉轮作下较高。

2.2 化肥和有机物料投入下不同轮作模式对玉米养分利用的影响

玉米地上部氮、磷和钾积累量受不同施肥处理和轮作体系的显著影响 (图 3)。综合两种轮作模式, 与 CK 处理相比, NPK 处理玉米地上部氮、磷和钾积累量分别增加 2.6、1.9 和 1.6 倍 ($P<0.05$); 有机无机肥结合处理 (NPK+S 和 NPK+S+M 处理) 分别增加 4.5~5.1、3.9~5.2、3.5~4.4 倍 ($P<0.05$)。与 NPK 处理相比, 两种轮作模式下 NPK+S 处理玉米地上部氮、磷和钾积累量分别平均增加 53.7%、67.3% 和 78.8% ($P<0.05$); NPK+S+M 处理分别平均增加 66.9%、111.3% 和 112.6% ($P<0.05$)。化肥和有机物料的投入降低了苞叶和穗轴的养分分配比例。与 CK 处理相比, NPK 处理苞叶和穗轴氮分配比例分别平均降低 57.1% 和 31.9%, 磷分配比例分别平均降低 45.3% 和 57.4%; 有机无机肥结合处理 (NPK+S 和 NPK+S+M 处理) 氮分配比例分别平均降低 33.7%~61.3% 和 32.1%~49.3%, 磷分配比例分别平均降低 37.8%~51.3% 和 36.4%~51.3%。整体来看, 相同施肥处理下, 油玉轮作体系玉米地上部氮、磷和钾积累量高于麦玉轮作, 油玉轮作体系玉米地上部氮、磷和钾积累量较麦玉轮作在 CK 处理下分别增加 52.7%、24.3% 和 36.2% ($P<0.05$); 在 NPK 处理下分别增加 9.6%、9.9% 和 10.4% ($P<0.05$); 在 NPK+S 处理下分别增加 14.3%、28.7% 和 22.7% ($P<0.05$); 在

表 1 不同施肥处理和轮作模式下玉米产量 (kg/hm²)

Table 1 Yield of maize as affected by fertilization treatments and rotation patterns

轮作 Rotation	处理 Treatment	2020	2021	平均 Average
油菜-玉米 Oilseed rape-maize	CK	1562±225 dA	1141±124 dA	1352
	NPK	4559±205 cA	4600±220 cA	4580
	NPK+S	5961±124 bA	5850±213 bA	5906
	NPK+S+M	6744±272 aA	6630±338 aA	6687
小麦-玉米 Wheat-maize	CK	872±77 dB	525±80 dB	698
	NPK	4001±192 cB	4107±133 cB	4054
	NPK+S	5390±384 bA	5747±326 bA	5569
	NPK+S+M	6351±399 aA	6412±282 aA	6382
方差分析 ANOVA		F值 F-value		
处理 Treatment (T)		1176.105***		
轮作 Rotation (R)		41.221***		
年份 Year (Y)		0.569 ^{ns}		
T×R		3.338*		
R×Y		1.893 ^{ns}		
T×Y		2.606 ^{ns}		
T×R×Y		0.442 ^{ns}		

注: CK—不施肥; NPK—化肥; NPK+S—化肥+秸秆; NPK+S+M—化肥+秸秆+有机肥。同列数据后不同小写字母表示同一轮作模式不同施肥处理间差异达0.05显著水平; 不同大写字母表示同一施肥处理不同轮作间的差异达0.05显著水平。*、***分别表示变量效应达到0.05、0.001显著水平, ns表示无显著效应。

Note: CK—No fertilization; NPK—Chemical fertilizers; NPK+S—Chemical fertilizers+straw return; NPK+S+M—Chemical fertilizers+straw return+manure. Within a column, different lowercase letters indicate significant difference among fertilization treatments in the same rotation pattern, while different uppercase letters indicate significant difference between rotation patterns of the same fertilization treatment ($P<0.05$). *, and *** indicate variable effect at 0.05, and 0.001 significant levels, respectively, and ns indicates no significant effect.

NPK+S+M 处理下分别增加 12.9%、21.2% 和 9.2% ($P<0.05$)。

2.3 化肥和有机物料投入下不同轮作模式对玉米养分利用效率及养分表现平衡的影响

不同施肥处理能够提高玉米养分收获指数和养分生理利用率(表 2)。在两种轮作模式下, 与 CK 处理相比, 化肥和有机物料施用处理的玉米氮、磷和钾养分收获指数分别平均提升 19.6%~29.4%、37.3%~58.9% 和 63.8%~92.1%; 氮、磷和钾养分生理利用率分别平均提升 10.7%~26.1%、13.8%~56.1% 和 24.9%~72.6%。与 NPK 处理相比, NPK+S 处理的玉米氮、磷和钾养分收获指数分别平均降低 6.4%、14.9% 和 19.1%; 氮、磷和钾养分生理利用率分别平均降低 12.7%、19.7% 和 25.4%。NPK+S+M 处理的氮、磷和钾养分生理利用率较 NPK 处理分别平均降低 9.1%、28.3% 和 27.1%。不同轮作模式间养分利用效率的差异在不同施肥处理下并不一致, 油玉轮作体系玉米养分收获指数和养分生理利

用率在 CK 和 NPK 处理下均高于麦玉轮作体系, 在 NPK+S 和 NPK+S+M 处理下则低于麦玉轮作体系。

化肥和有机物料的投入增加了油玉和麦玉轮作模式下玉米季的土壤养分表现盈余(表 3)。与 NPK 处理相比, NPK+S 处理下的氮和磷养分表现盈余分别平均降低 16.1 和 6.7 kg/hm², 钾养分表现盈余则扭亏为盈; NPK+S+M 处理下的氮、磷和钾养分表现盈余分别平均增加 153.2、240.7 和 228.7 kg/hm²。整体来看, 麦玉轮作体系玉米季的养分盈余量高于油玉轮作。CK 处理下, 油玉和麦玉轮作模式下玉米季氮、磷和钾素均有亏缺。NPK 处理下, 麦玉轮作玉米季氮和磷素盈余量较油玉轮作分别增加 7.7% 和 3.7%, 而钾素在两种轮作体系下均有亏缺。NPK+S 处理下, 麦玉轮作体系玉米季氮、磷和钾素盈余量分别较油玉轮作体系增加 28.5%、22.7% 和 56.9%; NPK+S+M 处理下, 麦玉轮作体系玉米季氮、磷和钾素盈余量分别较油玉轮作增加 8.5%、2.6% 和 8.8%。

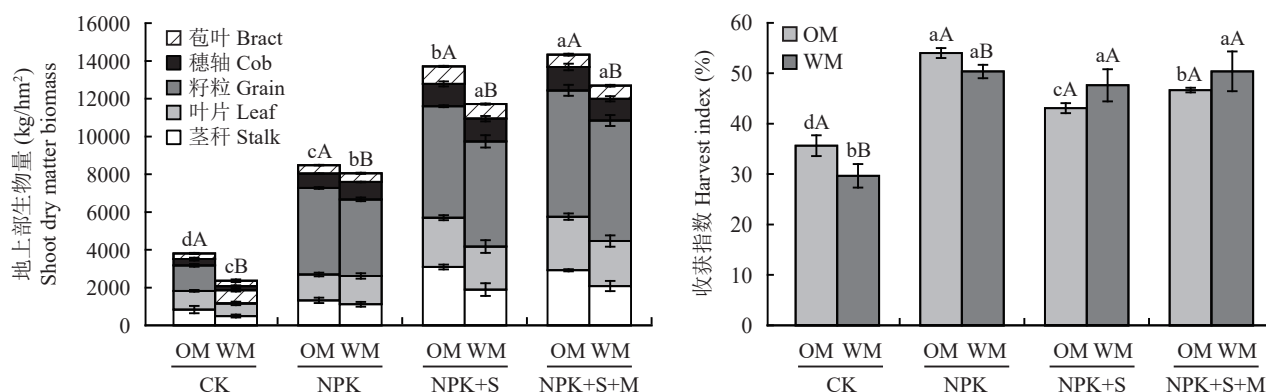


图2 不同施肥处理和轮作模式下玉米地上部生物量和收获指数(两年平均)

Fig. 2 Shoot dry matter biomass and harvest index of maize as affected by fertilization treatments and rotation patterns (two-year average)

注: CK—不施肥; NPK—化肥; NPK+S—化肥+秸秆; NPK+S+M—化肥+秸秆+有机肥。OM—油菜-玉米轮作; WM—小麦-玉米轮作。柱上不同小写字母表示同一轮作模式不同施肥处理间差异达 0.05 显著水平; 不同大写字母表示同一施肥处理不同轮作间的差异达 0.05 显著水平。

Note: CK—No fertilization; NPK—Chemical fertilizers; NPK+S—Chemical fertilizers+straw return; NPK+S+M—Chemical fertilizers+straw return+manure. OM—Oilseed rape-maize rotation; WM—Wheat-maize rotation. Above the bars, different lowercase letters indicate significant difference among fertilization treatments in the same rotation pattern, and different uppercase letters indicate significant difference between rotation patterns of the same fertilization treatment ($P < 0.05$).

2.4 油玉轮作和麦玉轮作玉米产量对地上部养分积累量的响应

玉米地上部养分积累量与产量的拟合结果显示两者呈正相关关系(图4),表明玉米产量随地上部养分积累量的增加呈现上升趋势。从单位养分积累所产生的产量增量(拟合斜率 k 值)来看,油玉轮作中单位氮和钾积累对应的产量增加速率均高于麦玉轮作,而单位磷积累的产量增加速率则略低。这表明在获得相同产量时,油玉轮作相比麦玉轮作需要更少的地上部氮和钾积累量,但需要更多的磷积累量。

3 讨论

3.1 化肥和有机物料促进玉米产量提升

合理利用秸秆、有机肥等有机物料是促进农业可持续发展的重要方式,有机物料的投入可以显著提高作物产量^[12]。Wang等^[19]研究表明,秸秆还田可促进全球作物产量增产约5.5%。有机无机肥相结合可以促进作物干物质积累,进而提高产量^[20]。在本试验中,化肥或化肥与有机物料相结合均显著提高玉米产量。与NPK处理相比,NPK+S处理玉米产量平均提高33.2%,从植物生理角度来看,可能是由于有机无机肥配施能够持续供应玉米生长所需养分,有利于延长吐丝期后叶片持绿性,促进光合生产,进而提高产量^[11];从土壤养分供应角度来看,这可能是由于有机物料的投入有利于土壤大团聚体的形成和

保持,改善了土壤水肥调控能力和肥力水平^[21-22],从而为植株提供充足的养分供应,进而促进植株生长发育,实现增产。与NPK+S处理相比,NPK+S+M处理的产量提升作用更强,首先是因为化肥提供了速效养分,而有机物料分解则通过微生物的矿化作用,养分释放较为持续且稳定,可以更好地匹配作物全生育期的养分需求,尤其是维持了生育后期的养分供应,提高了地上部氮磷钾养分积累量,促进了干物质积累,为产量的提升打好了基础^[23];其次,有机肥富含玉米生长发育所需的各类养分,保证养分供应更全面、更充足,加大光合产物向籽粒输送,进而提高产量^[24]。值得注意的是,CK处理下2021年玉米产量较2020年明显下降,而其他处理年际间差异较小,这可能是由于2021年玉米季苗期温度较低且降雨较少,削弱了苗期根系活力和叶片光合能力^[25-26],而有机物料可能通过增强土壤保温保水性能促进玉米生长^[27],进而提高玉米幼苗应对极端气候的抵抗力。

3.2 不同施肥处理下玉米养分利用特征

近年来,我国持续推进中低产田改造,推动耕地质量保护与产能提升,其中有机物料因其富含作物所需的各类营养元素被广泛施用,不仅可以提升土壤肥力,还可以有效减替化肥、促进养分吸收转运^[8]。本研究结果表明,与NPK处理相比,NPK+S和NPK+S+M处理显著提升了玉米地上部氮、磷、

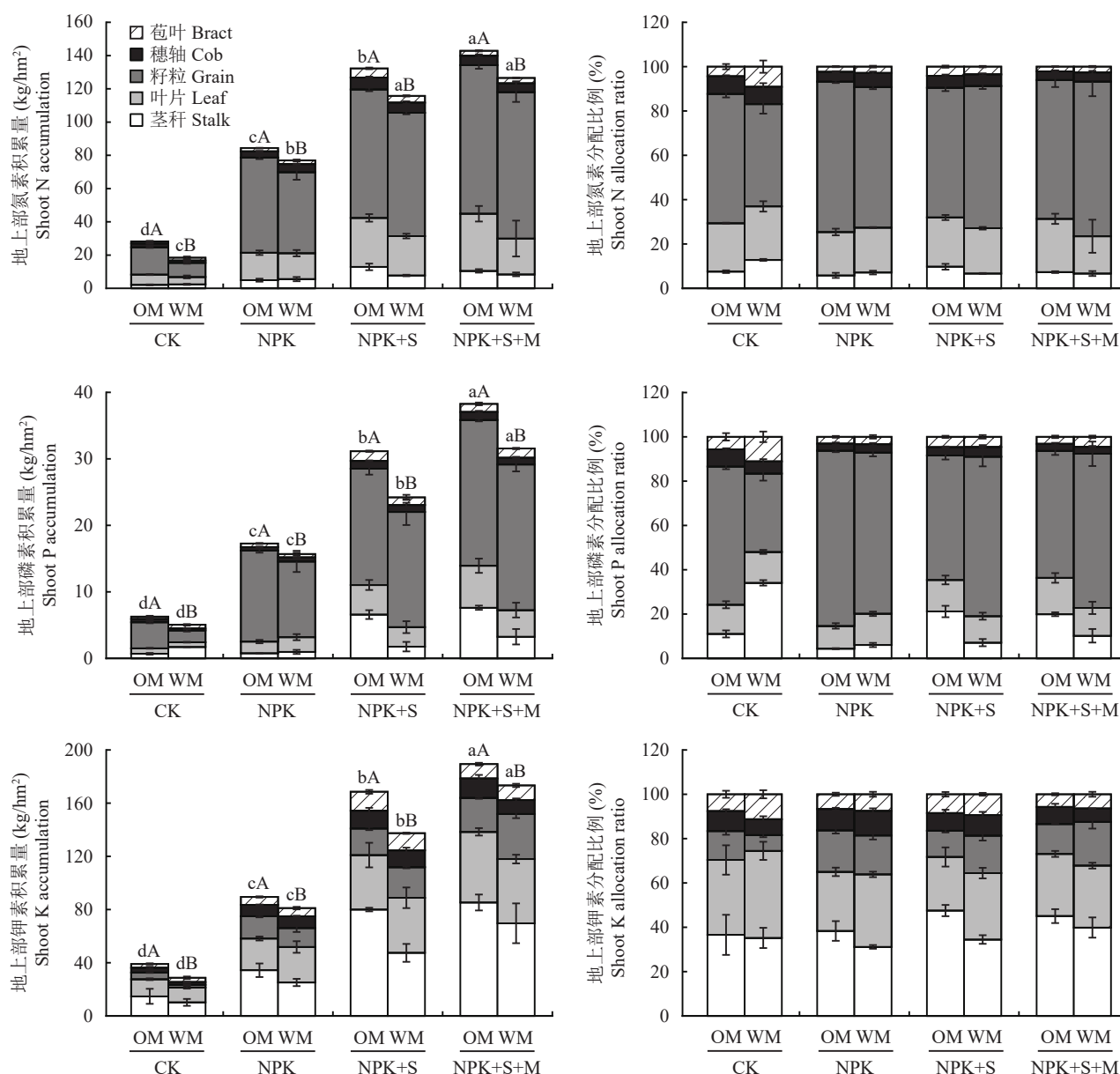


图3 不同施肥处理和轮作模式下玉米地上部各部位养分吸收和分配 (两年平均)

Fig. 3 Nutrient uptake and allocation in different parts of maize as affected by fertilization treatments and rotation patterns (two-year average)

注: CK—不施肥; NPK—化肥; NPK+S—化肥+秸秆; NPK+S+M—化肥+秸秆+有机肥。OM—油菜-玉米轮作; WM—小麦-玉米轮作。柱上不同小写字母表示同一轮作模式不同施肥处理间差异达 0.05 显著水平; 不同大写字母表示同一施肥处理不同轮作间的差异达 0.05 显著水平。

Note: CK—No fertilization; NPK—Chemical fertilizers; NPK+S—Chemical fertilizers+straw return; NPK+S+M—Chemical fertilizers+straw return+manure. OM—Oilseed rape-maize rotation; WM—Wheat-maize rotation. Above the bars, different lowercase letters indicate significant difference among fertilization treatments in the same rotation pattern, and different uppercase letters indicate significant difference between rotation patterns of the same fertilization treatment ($P < 0.05$).

钾积累量, 其中与 NPK+S 处理相比, NPK+S+M 处理磷素积累量显著增加, 一方面因为有机肥中本身含有较多的可溶性磷, 另一方面有机肥的添加提高了土壤中溶磷微生物的活性, 进而促进了磷酸酶等物质的分泌, 加快了土壤中有机磷化合物向无机磷转化, 从而提高了作物磷吸收^[28]。养分收获指数反映

了成熟期作物籽粒养分的相对分配状况, 养分生理利用率表征了作物吸收养分形成产量的潜力。有机物料的投入改变了玉米养分利用效率, 与 NPK 处理相比, NPK+S 处理降低了玉米氮、磷、钾收获指数, 这是因为秸秆投入增加土壤养分, 促进植株生长发育, 进而使生物量增加, 但生物量增加并不意

表 2 不同施肥处理和轮作模式下玉米养分利用效率 (两年平均)

Table 2 Maize nutrient utilization efficiency as affected by fertilization treatments and rotation patterns (two-year average)

轮作 Rotation	处理 Treatment	养分收获指数 (%) Nutrient harvest index			养分生理利用率 (kg/kg) Nutrient physiological efficiency		
		N	P	K	N	P	K
油菜-玉米 Oilseed rape-maize	CK	58.3 cA	62.4 bA	13.1 bA	48.1 bA	215.6 bA	35.3 bA
	NPK	67.9 aA	79.1 aA	18.7 aA	54.3 aA	265.4 aA	51.2 aA
	NPK+S	58.5 cA	56.2 cB	11.9 bA	44.7 cA	189.8 cB	35.1 bA
	NPK+S+M	62.7 bB	57.3 cB	13.5 bB	46.8 bA	174.8 dB	36.1 bA
小麦-玉米 Wheat-maize	CK	46.1 bB	38.1 bB	7.1 bB	38.1 bB	138.6 dB	24.8 dB
	NPK	63.4 aA	72.7 aB	17.2 aA	53.1 aB	261.9 aA	50.5 aA
	NPK+S	64.1 aA	71.9 aA	16.9 aA	49.1 aA	233.3 bA	40.8 bA
	NPK+S+M	69.8 aA	69.6 aA	19.7 aA	50.7 aA	203.1 cA	37.2 cA

注：CK—不施肥；NPK—化肥；NPK+S—化肥+秸秆；NPK+S+M—化肥+秸秆+有机肥。同列数据后不同小写字母表示同一轮作模式不同施肥处理间差异达0.05显著水平；不同大写字母表示同一施肥处理不同轮作间的差异达0.05显著水平。
Note: CK—No fertilization; NPK—Chemical fertilizers; NPK+S—Chemical fertilizers+straw return; NPK+S+M—Chemical fertilizers+straw return+manure. Within a column, different lowercase letters indicate significant difference among fertilization treatments in the same rotation pattern, while different uppercase letters indicates significant difference between rotation pattern of the same fertilization treatments ($P<0.05$).

表 3 不同施肥处理和轮作模式下玉米季养分表观平衡 (两年平均)

Table 3 Apparent nutrient balance of maize as affected by fertilization treatments and rotation patterns (two-year average)

轮作模式 Rotation	处理 Treatment	N (kg/hm ²)					P (kg/hm ²)					K (kg/hm ²)				
		投入 Input			支出 Output	平衡 Balance	投入 Input			支出 Output	平衡 Balance	投入 Input			支出 Output	平衡 Balance
		化肥 CF	秸秆 Straw	有机肥 Manure			化肥 CF	秸秆 Straw	有机肥 Manure			化肥 CF	秸秆 Straw	有机肥 Manure		
油菜-玉米 Oilseed rape-maize	CK	0	0	0	28.2	-28.2	0	0	0	6.3	-6.3	0	0	0	39.1	-39.1
	NPK	180	0	0	84.3	95.7	60	0	0	17.3	42.7	75	0	0	89.5	-14.5
	NPK+S	180	25.2	0	132.3	72.9	60	4.2	0	31.2	33.1	75	152.4	0	168.5	58.9
	NPK+S+M	180	25.2	180	142.9	242.3	60	4.2	254.6	38.3	280.5	75	152.4	171.1	189.3	209.2
小麦-玉米 Wheat-maize	CK	0	0	0	18.5	-18.5	0	0	0	5.1	-5.1	0	0	0	28.7	-28.7
	NPK	180	0	0	76.9	103.1	60	0	0	15.7	44.3	75	0	0	81.1	-6.1
	NPK+S	180	29.4	0	115.7	93.7	60	4.8	0	24.2	40.6	75	154.8	0	137.4	92.4
	NPK+S+M	180	29.4	180	126.6	262.8	60	4.8	254.6	31.6	287.8	75	154.8	171.1	173.3	227.6

注：CK—不施肥；NPK—化肥；NPK+S—化肥+秸秆；NPK+S+M—化肥+秸秆+有机肥。
Note: CK—No fertilization; NPK—Chemical fertilizers; NPK+S—Chemical fertilizers+straw return; NPK+S+M—Chemical fertilizers+straw return+manure.

味着籽粒中养分积累量增加，反而导致养分向非籽粒部位分配，使茎秆中养分积累量占作物整体养分积累量的比例增加，从而降低养分收获指数^[29]。NPK+S 和 NPK+S+M 处理下玉米氮、磷、钾养分生理利用率显著低于 NPK 处理，这是由于秸秆和有机肥的投入增加了玉米氮、磷、钾总积累量，且更多的氮、磷、钾储存于茎秆和叶片等营养器官中 (图 3)，籽粒养分积累量占比相对较低。因此，未来可进一步通过研究有机物料投入下各生育时期土壤养分供

应和作物养分吸收状况探明作物养分吸收利用规律，以充分发挥有机无机肥配施增产潜力。
土壤养分表观平衡对作物增产稳产和农业生态环境具有重要作用^[30]，通过计算“土壤-植物”系统养分盈余或亏缺状况可以更好地指导施肥。养分表观平衡主要受养分投入和作物养分吸收的影响，本研究结果表明，与 NPK 处理相比，NPK+S 处理油玉和麦玉轮作模式下氮和磷盈余量均下降。尽管秸秆还田增加了氮和磷养分输入，但 NPK+S 较 NPK 处理

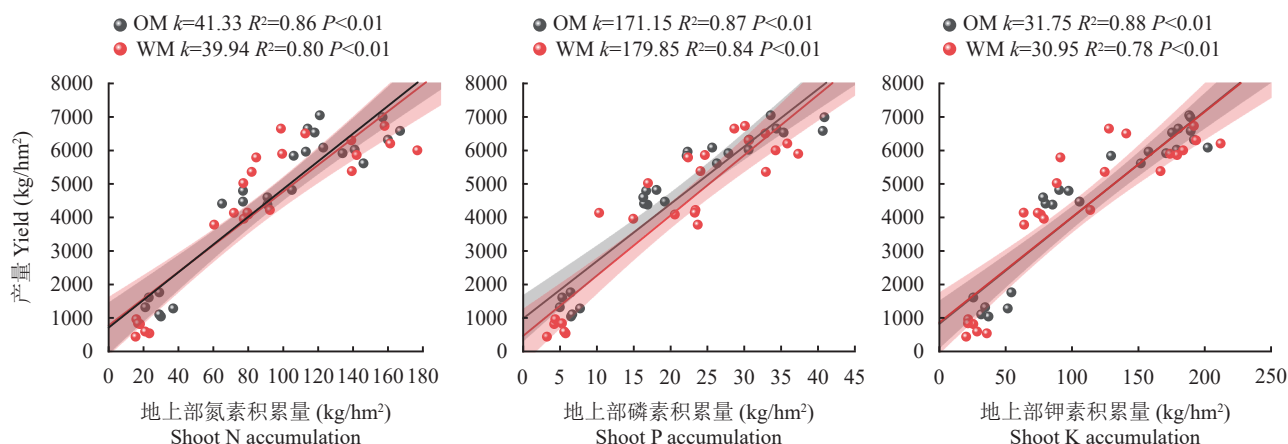


图 4 油玉和麦玉轮作模式下玉米产量与地上部养分积累量相关分析

Fig. 4 Correlation analysis between maize yield and aboveground nutrient accumulation under oilseed rape-maize and wheat-maize rotation

注: OM—油菜—玉米轮作; WM—小麦—玉米轮作。 k 表示线性拟合的斜率, 代表单位养分积累量所产生的产量增量; R^2 代表线性拟合精度。
Note: OM—Oilseed rape-maize rotation; WM—Wheat-maize rotation. k represents the slope of linear fitting, representing the yield increment per unit nutrient accumulation; R^2 represents the linear fitting accuracy.

的玉米地上部氮和磷养分积累量差值高于养分投入量差值, 因此 NPK+S 处理下土壤氮和磷盈余量均下降。秸秆养分释放缓慢可以避免作物生育后期养分供应不足的情况, 有利于作物后期干物质的积累, 进而提高养分积累量, 这可能是 NPK+S 处理较 NPK 处理氮和磷积累量显著增加的原因。本研究结果还表明, 与单施化肥相比, 配施秸秆使土壤钾平衡扭亏为盈, 这进一步说明了秸秆还田有助于改善土壤养分平衡, 进而可以避免土壤养分过度消耗造成减产。本研究结果表明, 与 NPK 处理相比, NPK+S+M 处理在油玉和麦玉轮作模式下玉米季氮、磷和钾盈余量均增加, 这与 NPK+S+M 处理是在 NPK 处理化肥用量不变的基础上增施有机肥, 从而导致系统总养分输入量显著增加有关。当外界养分供应超过作物养分需求时, 会使养分在土壤中盈余。NPK+S+M 处理通过有机质的调节作用使养分的释放和供给更加均匀, 可以避免出现养分供应过量和不足的情况, 同时有机质分解释放的生长促进物质既有利于提高微生物活性促进养分分解, 提高土壤养分含量, 也可以通过刺激作物生长, 提高产量^[31]。长期有机物料的施入可以通过显著提高土壤养分盈余以提高作物养分吸收的潜力, 进而可以适量减少化肥的施用。另外, 由于本研究在计算养分表观平衡时并未考虑挥发、淋溶和径流等途径的养分损失, 进而可能高估了 NPK+S+M 处理的养分盈余量。因此, 在后续的研究中建议使用更加精准的研究方法, 如同位素示踪等, 以便准确评估不同施肥处理对土壤养分平

衡的影响。同时本研究只针对轮作系统玉米季进行研究, 并未涉及轮作系统周年的养分表观平衡, 因此未来需要综合评估周年养分输入与输出的动态关系, 并基于多年试验来深入解析“土壤-植物”系统养分状况。

3.3 油玉和麦玉轮作下玉米产量及养分利用差异分析

合理的轮作制度可以提高作物产量。本试验结果表明, 油玉轮作的玉米产量高于麦玉轮作, 其中 CK 和 NPK 处理下油玉轮作较麦玉轮作玉米产量分别增加 654 和 526 kg/hm² (表 1), 这与前人关于在同等肥力土壤条件下油菜茬口玉米产量高于小麦茬口的研究结果^[15, 32]保持一致。Fang 等^[33]研究表明, 水稻轮作较麦稻轮作的水稻产量更高, 尤其是在不施肥和不施氮处理下。这表明油菜种植不仅在水旱轮作体系中促进后茬作物增产, 旱旱轮作体系也表现出相似的规律。油菜为主根系作物, 与小麦相比, 根系发达、扎入土壤较深, 其残体与根系分泌物有助于增强通气持水性, 改善土壤结构^[34], 且落叶与根系分泌物为土壤微生物提供了重要的营养物质, 提高微生物活性^[35], 这些过程共同增强了土壤养分循环与供应能力, 为后茬玉米的生长创造了有利的土壤环境^[36]。油玉和麦玉轮作体系玉米养分积累量差异趋势与产量差异相似, 相同施肥处理下, 玉米地上部氮、磷和钾积累量均表现为油玉轮作高于麦玉轮作, 相关性分析表明, 油玉和麦玉轮作产量与地上部氮、磷和钾养分积累量均呈正相关关系, 且获得相同产

量时,油玉轮作地上部较麦玉轮作需要更少的氮和钾素积累,养分积累是玉米物质生产的基础^[37],与籽粒产量密切相关,进一步验证了与小麦相比,油菜作为前茬作物促进后茬作物养分吸收,进而实现增产。此外,两个轮作模式玉米氮素积累量在CK处理差异最大,这说明油菜茬口土壤本底氮素供应能力优于小麦茬口。Zhang等^[38]研究发现,与前茬小麦相比,前茬油菜显著提高了土壤有机质、全氮和碱解氮含量。油菜收获后,土壤固氮菌、亚硝酸细菌和氨化细菌等数量显著增加,有利于土壤中有机氮向铵态氮和硝态氮转化,从而增加土壤速效氮含量^[39]。轮作玉米磷素积累量在NPK+S处理差异最大,这可能是因为油菜秸秆还田改善了土壤微生物群落组成^[40],且其粗长的根系对土壤具有天然的深耕作用,改善了土壤结构,提高了土壤呼吸速率与酶活性。肥料利用效率受不同轮作制度的影响,低养分投入下(CK和NPK处理),油玉轮作玉米养分生理利用率显著高于麦玉轮作,这意味着在有限的养分投入条件下,相较于小麦茬口,油菜茬口提升后茬作物产量的潜力更大。

4 结论

施用化肥与有机物料有助于提升轮作玉米产量和养分积累量,且化肥、秸秆、有机肥三者配施较化肥与秸秆两者配施,不仅在增产和促进养分吸收方面更具优势,还可提高养分表观盈余量。整体来看,油玉轮作下玉米产量和养分积累量均高于麦玉轮作,且轮作模式间玉米养分利用效率的差异受施肥处理调控。可见,在化肥与秸秆配施基础上增施有机肥可显著提高玉米产量,将油菜纳入轮作体系可进一步提升后茬作物产量,从而实现粮油兼丰。

参 考 文 献:

- [1] Guo J J, Fan J L, Xiang Y Z, *et al.* Synchronizing nitrogen supply and uptake by rainfed maize using mixed urea and slow-release nitrogen fertilizer[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2022, 122(2): 157–171.
- [2] Li Y P, Gu X B, Li Y N, *et al.* Ridge-furrow mulching combined with appropriate nitrogen rate for enhancing photosynthetic efficiency, yield and water use efficiency of summer maize in a semiarid region of China[J]. *Agricultural Water Management*, 2023, 287: 108450.
- [3] 周卫, 丁文成. 新阶段化肥减量增效战略研究[J]. *植物营养与肥料学报*, 2023, 29(1): 1–7.
Zhou W, Ding W C. Strategic researches of reducing fertilizer use and increasing use efficiency in China in the new era[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2023, 29(1): 1–7.
- [4] Zhang W F, Dou Z X, He P, *et al.* New technologies reduce greenhouse gas emissions from nitrogenous fertilizer in China[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2013, 110(21): 8375–8380.
- [5] Zhao Z, Cao L K, Sha Z M, *et al.* Impacts of fertilization optimization on N loss from paddy fields: Observations and DNDC modeling case study in Shanghai, China[J]. *Soil & Tillage Research*, 2020, 199: 104587.
- [6] 付浩然, 李婷玉, 曹寒冰, 张卫峰. 我国化肥减量增效的驱动因素探究[J]. *植物营养与肥料学报*, 2020, 26(3): 561–580.
Fu H R, Li T Y, Cao H B, Zhang W F. Research on the driving factors of fertilizer reduction in China[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2020, 26(3): 561–580.
- [7] 牛新胜, 巨晓棠. 我国有机肥料资源及利用[J]. *植物营养与肥料学报*, 2017, 23(6): 1462–1479.
Niu X S, Ju X T. Organic fertilizer resources and utilization in China[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2017, 23(6): 1462–1479.
- [8] Ma Q, Jiang C M, Li S L, Yu W T. Maize yield and nitrogen-use characteristics were promoted as consistently improved soil fertility: 6-year straw incorporation in Northeast China[J]. *Plant, Soil and Environment*, 2021, 67(7): 383–389.
- [9] Li F Y, Liang X Q, Liu Z W, *et al.* No-till with straw return retains soil total P while reducing loss potential of soil colloidal P in rice-fallow systems[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2019, 286: 106653.
- [10] Ye G P, Samiran B, He J Z, *et al.* Manure application increases microbiome complexity in soil aggregate fractions: Results of an 18 year field experiment[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2021, 307: 107249.
- [11] 陈桂平, 李盼, 邵冠贵, 等. 减量灌水与有机无机肥配施对青贮玉米吐丝期后叶片持绿特性的调控作用[J]. *中国农业科学*, 2025, 58(7): 1381–1396.
Chen G P, Li P, Shao G G, *et al.* The regulatory effect of reduced irrigation and combined organic-inorganic fertilizer application on stay-green characteristics in silage maize leaves after tasseling stage[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2025, 58(7): 1381–1396.
- [12] Wang Z H, Yin Y L, Wang Y C, *et al.* Integrating crop redistribution and improved management towards meeting China's food demand with lower environmental costs[J]. *Nature Food*, 2022, 3(12): 1031–1039.
- [13] Li Y H, Feng X J, Huai Y B, *et al.* Enhancing crop productivity and resilience by promoting soil organic carbon and moisture in wheat and maize rotation[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2024, 368: 109021.
- [14] 王汉中. 以新需求为导向的油菜产业发展战略[J]. *中国油料作物学报*, 2018, 40(5): 613–617.
Wang H Z. New-demand oriented oilseed rape industry developing strategy[J]. *Chinese Journal of Oil Crop Sciences*, 2018, 40(5): 613–617.
- [15] 刘哲辉, 张利艳, 康继平, 等. 旱作条件下油菜根茬对玉米两种土传病害的生防作用[J]. *中国油料作物学报*, 2017, 39(5): 674–680.
Liu Z H, Zhang L Y, Kang J P, *et al.* Bio-control effects of rapeseed stubbles on two soil-borne diseases of maize under dry-land planting system[J]. *Chinese Journal of Oil Crop Sciences*, 2017, 39(5): 674–680.

- [16] 张福锁, 陈新平, 陈清. 中国主要作物施肥指南[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2009.
Zhang F S, Chen X P, Chen Q. Fertilizer recommendations for major crops in China[M]. Beijing: China Agricultural University Press, 2009.
- [17] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2007.
Bao S D. Soil and agricultural chemistry analysis[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2007.
- [18] Wolf B. A comprehensive system of leaf analyses and its use for diagnosing crop nutrient status[J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 1982, 13(12): 1035–1059.
- [19] Wang M, Pendall E, Fang C M, *et al.* A global perspective on agroecosystem nitrogen cycles after returning crop residue[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2018, 266: 49–54.
- [20] 康彩睿, 谢军红, 李玲玲, 等. 培肥方式对陇中旱农区玉米光合特性和产量的影响[J]. *玉米科学*, 2021, 29(5): 113–120.
Kang C R, Xie J H, Li L L, *et al.* Effects of soil amendment on maize yield and photosynthetic characteristics in arid areas of central Gansu[J]. *Journal of Maize Sciences*, 2021, 29(5): 113–120.
- [21] Peng X, Zhu Q H, Xie Z B, *et al.* The impact of manure, straw and biochar amendments on aggregation and erosion in a hillslope Ultisol[J]. *Catena*, 2016, 138: 30–37.
- [22] Tang H M, Cheng K K, Shi L H, *et al.* Effects of long-term organic matter application on soil carbon accumulation and nitrogen use efficiency in a double-cropping rice field[J]. *Environmental Research*, 2022, 213: 113700.
- [23] 袁静超, 刘剑钊, 梁尧, 等. 综合农学管理模式对春玉米产量和养分累积特征的影响[J]. *中国农业科学*, 2019, 52(20): 3546–3558.
Yuan J C, Liu J Z, Liang Y, *et al.* Characteristics of grain yield and nutrient accumulation for spring maize under different agronomic management practices[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2019, 52(20): 3546–3558.
- [24] 刘秉鑫, 孟浩峰, 李玲玲, 等. 有机肥替代基施化肥氮对旱作玉米叶片光合性能、产量及氮肥利用效率的影响[J]. *玉米科学*, 2024, 32(9): 96–107.
Liu B X, Meng H F, Li L L, *et al.* Effects of organic fertilizer substitution for basal chemical nitrogen on photosynthetic performance, yield, and nitrogen use efficiency in rainfed maize[J]. *Journal of Maize Sciences*, 2024, 32(9): 96–107.
- [25] Xiong L M, Schumaker K S, Zhu J K. Cell signaling during cold, drought, and salt stress[J]. *The Plant Cell*, 2002, 14(S): 165–183.
- [26] 冯晓钰, 周广胜. 夏玉米叶片水分变化与光合作用和土壤水分的关系[J]. *生态学报*, 2018, 38(1): 177–185.
Feng X Y, Zhou G S. Relationship of leaf water content with photosynthesis and soil water content in summer maize[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(1): 177–185.
- [27] 梅四卫, 朱涵珍, 王术, 杨习文. 不同覆盖方式对土壤水肥热状况以及玉米产量影响[J]. *灌溉排水学报*, 2020, 39(4): 68–73.
Mei S W, Zhu H Z, Wang S, Yang X W. Effects of different mulching methods on soil moisture, nutrient, temperature status and corn yield[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2020, 39(4): 68–73.
- [28] Chen G L, Yuan J H, Chen H, *et al.* Manure application influences microbial stoichiometry and alters microbial life strategies to regulate phosphorus bioavailability in low-P paddy soil[J]. *Soil & Tillage Research*, 2024, 244: 106241.
- [29] 秦丁, 张铎, 王宜伦, 等. 秸秆还田模式下施氮对夏玉米产量、品质及养分吸收特性的影响[J]. *玉米科学*, 2024, 32(8): 72–79.
Qin D, Zhang D, Wang Y L, *et al.* Effects of nitrogen application on yield, quality, and nutrient absorption and utilization characteristics of summer maize under straw incorporation[J]. *Journal of Maize Sciences*, 2024, 32(8): 72–79.
- [30] Zhang J L, Nie J, Cao W D, *et al.* Long-term green manuring to substitute partial chemical fertilizer simultaneously improving crop productivity and soil quality in a double-rice cropping system[J]. *European Journal of Agronomy*, 2023, 142: 126641.
- [31] Walsh E, McDonnell K P. The influence of added organic matter on soil physical, chemical, and biological properties: A small-scale and short-time experiment using straw[J]. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 2012, 58(1): 201–205.
- [32] 孙小花, 牛俊义, 赵刚. 不同前茬与施氮量对半干旱黄土高原夏玉米产量和土壤有机碳库的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2018, 36(1): 19–27.
Sun X H, Niu J Y, Zhao G. Effects of previous crop stubbles and nitrogen applied amount on summer maize yield and soil organic carbon pool at a semiarid loess site of China[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2018, 36(1): 19–27.
- [33] Fang Y T, Ren T, Zhang S T, *et al.* Rotation with oilseed rape as the winter crop enhances rice yield and improves soil indigenous nutrient supply[J]. *Soil & Tillage Research*, 2021, 212: 105065.
- [34] Cui Z, Wu G L, Huang Z, *et al.* Fine roots determine soil infiltration potential than soil water content in semi-arid grassland soils[J]. *Journal of Hydrology*, 2019, 578(1): 124023.
- [35] Bennett AJ, Hilton S, Bending G D, *et al.* Impact of fresh root material and mature crop residues of oilseed rape (*Brassica napus*) on microbial communities associated with subsequent oilseed rape[J]. *Biology and Fertility Soils*, 2014, 50(8): 1267–1279.
- [36] 李利利, 马骊, 张宁, 等. 冬季覆盖作物对土壤水分和春玉米产量的影响[J]. *耕作与栽培*, 2025, 45(5): 31–37.
Li L L, Ma L, Zhang N, *et al.* Effects of winter cover crops on soil moisture and spring maize yield[J]. *Tillage and Cultivation*, 2025, 45(5): 31–37.
- [37] 侯云鹏, 杨小丹, 杨建, 等. 不同施肥模式下玉米氮、磷、钾吸收利用特性研究[J]. *玉米科学*, 2017, 25(5): 128–135.
Hou Y P, Yang X D, Yang J, *et al.* Research on absorption and utilization characteristics of N, P and K under different fertilization modes[J]. *Journal of Maize Sciences*, 2017, 25(5): 128–135.
- [38] Zhang S T, Lu J W, Zhu Y, *et al.* Rapeseed as a previous crop reduces rice N fertilizer input by improving soil fertility[J]. *Field Crop Research*, 2022, 281: 108487.
- [39] 赵曼利, 戴志刚, 顾焱明, 等. 油菜用地养地的作物优势及其在冬闲田开发中的应用潜力[J]. *中国油料作物学报*, 2022, 44(6): 1139–1147.
Zhao M L, Dai Z G, Gu Z M, *et al.* Advantage of oilseed rape (*Brassica napus* L.) in land use and conservation and its application for winter fallow field[J]. *Chinese Journal of Oil Crop Sciences*, 2022, 44(6): 1139–1147.
- [40] Ye X F, Liu H E, Li Z, *et al.* Effects of green manure continuous application on soil microbial biomass and enzyme activity[J]. *Journal of Plant Nutrition*, 2014, 37(4): 498–508.