

不同轮作模式对黄淮平原潮土区土壤养分及作物产量的影响

李洋¹, 石柯¹, 朱长伟¹, 姜桂英¹, 罗澜¹,
孟威威¹, 申凤敏¹, 刘芳¹, 魏芳芳², 刘世亮¹

(1.河南农业大学资源与环境学院, 郑州 450002; 2.河南省气象服务中心, 郑州 450003)

摘要: 通过大田试验, 研究黄淮平原潮土区不同轮作方式对不同土层土壤速效养分和小麦产量构成因素及产量的影响。采用随机区组设置连续的小麦—玉米(WM—WM—WM)、1周期小麦—玉米+1周期小麦—大豆(WM—WS—WM)、1周期小麦—玉米+1周期小麦—夏花生(WM—WP—WM)、连续的小麦—夏花生(WP—WP—WP)和连续的小麦—大豆(WS—WS—WS)5个处理。结果表明, 2017—2019年各处理土壤碱解氮、硝态氮、铵态氮、有效磷和速效钾含量在0—30 cm土层逐渐降低。随着栽培期限的增长, 0—20 cm土层, WM—WP—WM和WP—WP—WP处理的土壤碱解氮(AN)含量最高。土壤硝态氮(NO_3^- -N)和铵态氮(NH_4^+ -N)含量以WP—WP—WP和WS—WS—WS处理最优, 而WP—WP—WP处理 NO_3^- -N和 NH_4^+ -N含量最高, 分别为43.98, 17.58 mg/kg。WP—WP—WP处理有效磷(AP)含量和速效钾(AK)含量显著高于其他处理, 分别为24.49, 172.80 mg/kg。轮作模式和土层深度对 NO_3^- -N、 NH_4^+ -N、AN、AP和AK有明显交互效应。WP—WP—WP处理小麦籽粒蛋白质在年际间变化明显, 最高达到17.83%。小麦成熟期生物量和产量均以WP—WP—WP和WS—WS—WS处理最高。小麦氮收获指数与收获指数呈正相关关系。WP—WP—WP处理提高小麦的穗粒数(34.2个/穗), WS—WS—WS处理提高小麦亩穗数(26.7万穗/hm²)。总体来说, 3年周期内, WP—WP—WP处理可以显著提高土壤碱解氮、硝态氮、铵态氮、有效磷以及地上部生物量和籽粒蛋白质含量。WS—WS—WS处理显著提高土壤铵态氮含量; WS—WS—WS和WP—WP—WP处理的小麦产量最高。因此, 小麦—花生和小麦—大豆轮作模式均明显增加土壤有效氮含量, 同时增加或维持小麦产量, 推荐为该地区适宜的轮作模式。

关键词: 潮土; 轮作制度; 土壤速效养分; 小麦产量

中图分类号: S158.5

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2022)02-0312-10

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2022.02.040

Effect of Different Crop Rotations on Soil Nutrients and Crop Yield in Fluvo-aquic Soil in Huang Huai Plain

LI Yang¹, SHI Ke¹, ZHU Changwei¹, JIANG Guiying¹, LUO Lan¹, MENG Weiwei¹,
SHEN Fengmin¹, LIU Fang¹, WEI Fangfang², LIU Shiliang¹

(1.College of Resources and Environment, Henan Agricultural University, Zhengzhou 450002;

2.Henan Meteorological Service Centre, Zhengzhou 450003)

Abstract: This study was aimed to select suitable crop rotation system by exploring the effect of the different crop rotation systems on soil available nutrients and wheat yield in Fluvo-aquic soil in Huang-Huai Plain. A field experiment was conducted with five treatments: (1) continuous annual wheat-maize (WM—WM—WM), (2) annual wheat—maize+annual wheat—soybean alternately (WM—WS—WM), (3) annual wheat—maize+annual wheat—peanut (WM—WP—WM), (4) continuous annual wheat—peanut (WP—WP—WP), (5) continuous annual wheat—soybean (WS—WS—WS). The results showed soil available nutrients decreased generally with soil depth under all treatments. The different of alkali-hydrolyzed nitrogen (AN) content in different soil layers was higher with time among treatments. The AN contents in 0—20 cm soil layer under WM—WP—WM and WP—WP—WP were higher. The nitrate nitrogen (NO_3^- -N) and ammonium

收稿日期: 2021-08-24

资助项目: 国家重点研发计划项目(2021YFD1700900); 国家自然科学基金项目(41401327); 河南省科技厅基金项目(192102110161); 河南省教育厅基金项目(20A210024); 山东农业大学作物生物学国家重点实验室开放基金项目(2018KF05)

第一作者: 李洋(1995—), 男, 在读硕士研究生, 主要从事土壤碳循环研究。E-mail: ly17630252603@126.com

通信作者: 姜桂英(1983—), 女, 副教授, 主要从事土壤培肥与调控研究。E-mail: jgy9090@126.com

刘世亮(1970—), 男, 教授, 主要从事土壤培肥、土壤污染防治研究。E-mail: shlliu70@163.com

nitrogen ($\text{NH}_4^+ - \text{N}$) contents in 0—20 cm under WP—WP—WP and WS—WS—WS were higher, and with the highest as 43.98 mg/kg and 17.58 mg/kg under WP—WP—WP. The available phosphorus (AP) content and available potassium content under WP—WP—WP were higher, with the highest value as 24.49 mg/kg and 172.80 mg/kg, respectively. Both crop rotation system and soil depth affected $\text{NO}_3^- - \text{N}$, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$, AN, AP and AK. The grain protein content of wheat under WP—WP—WP changed significantly with time, with the highest value as 17.83%. The highest wheat biomass and yield were found under WP—WP—WP and WS—WS—WS. Moreover, there was a positive correlation between wheat N harvest index and wheat harvest index. The WP—WP—WP treatment increased the number of grains (34.2/ear), and the WS—WS—WS treatment increased the number of wheat (267 000 ears/hm²). During the experimental period, in the Fluvo-aquic soil in Huang—Huai Plain, the contents of soil AN, $\text{NO}_3^- - \text{N}$, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$, AP, above ground biomass and grain protein were increased under WP—WP—WP. The $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ content was increased under WS—WS—WS. Meanwhile, the highest wheat yield was obtained under WS—WS—WS and WP—WP—WP. Therefore, the wheat—peanut and wheat—soybean rotation models were suggested as the optimum crop rotation system in this area.

Keywords: Fluvo-aquic soil; crop rotation system; soil available nutrients; wheat yield

小麦和玉米是我国主要的粮食作物,但这 2 种作物均是耗水耗肥的作物^[1-2],对于资源浪费严重,尤其对于水肥的消耗量占比极大^[3]。而豆科作物本身可以固氮,可以减少氮肥的投入,另外豆科作物也耐旱,可以减少灌溉水的投入^[4-5]。因此,豆科作物与禾本科作物轮作是一种可以节本增效的轮作模式。符小文等^[6]利用改变轮作方式减少氮肥投入;陈昱利等^[7]利用豆科作物的固氮作用与小麦轮作来提高土壤氮素养分,减少化肥的施入,提高小麦产量。因此,研究小麦与豆科作物轮作来提高土壤速效养分以及产量具有重要意义。周春来^[8]研究表明,在 0—20 cm 耕层,豆科作物与麦类作物 3 年轮作后土壤速效氮和有效磷含量与 3 年前保持一致,这表明土壤速效氮和有效磷在土壤中有有所提高,与豆科作物轮作有一定关系,豆科作物对于提高土壤肥力有一定作用。Feiziene 等^[9]研究发现,0—20 cm 土层,通过谷类作物与豆科作物轮作,提高土壤氮素及钾素的供应;李军贤^[10]研究表明,在干旱地区,小麦—豆科作物轮作体系中,耕层的速效氮含量会增加,并且豆科作物收获后,碎屑和腐烂作物的根释放出有机氮化物,供下一季的植物吸收,也提高耕层土壤速效养分含量;严君等^[11]研究表明,玉米—大豆—小麦轮作处理的根瘤菌丰度最高,大豆与小麦轮作的种植制度,能提高土壤肥力,起到增产作用;Tamm 等^[12]和杨宁等^[13]研究表明,豆科作物前茬对于后季作物小麦有增产效果。此外,Zhao 等^[14]研究发现,轮作具有较高的产量效益,豆科作物与小麦轮作的增产幅度比无豆科作物与小麦的轮作高 14.0%;Ma 等^[15]试验表明,与 200 kg/hm² N 的施氮量下禾本科连续种植体系相比,100 kg/hm² N 的施氮量禾本科作物与豆类作物

轮作也可以保持较高产量;Gan 等^[16]研究指出,与小麦—免种轮作方式相比,多年的小麦—豆科作物轮作模式下,可以提高小麦籽粒产量和氮肥利用率。前人对豆科作物轮作体系下,土壤速效养分和后茬小麦产量已有大量研究,但多集中对耕层养分的研究,对不同土层养分变化及该体系下速效养分与产量和品质之间关系,鲜见报道。本研究通过在豫北潮土区 3 年的大田试验,探究小麦与豆科作物轮作模式下不同土层土壤养分变化特征及对作物产量和品质的影响,为该区域合理的农业轮种模式提出理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

本试验地概况见石柯等^[17],2016 年 10 月至 2019 年 10 月的逐月气温和降水量见图 1。

1.2 试验设计

试验开展于 2016 年 10 月至 2020 年 10 月,试验设 5 个轮作处理:(1)连续小麦—玉米(WM—WM—WM);(2)1 周期小麦—玉米+1 周期小麦—大豆(WM—WS—WM);(3)1 周期小麦—玉米+1 周期小麦—夏花生(WM—WP—WM);(4)连续小麦—夏花生(WP—WP—WP);(5)连续小麦—大豆(WS—WS—WS)。试验采用随机区组排列,每个处理设 3 个重复,小区面积为 68.75 m²(12.5 m×5.5 m)。小麦季氮素按基追比 7:3 施用,每年 3 月 15 日左右进行追肥;磷肥与钾肥作为基肥一次性施用;秋季作物施肥因作物类型不同施用量具体见表 1。小麦每年 10 月 13 日左右播种,播种前玉米秸秆粉碎后还田,大豆和夏花生秸秆不还田,耕作均采用旋耕,深度为 13~15 cm。秋季作物每年 6 月 10 日左右播种,玉米采用免耕铁茬播种,种肥同播;夏花生和大豆采用人工播种和施肥。各小

区田间管理措施,例如除草、防病虫害、灌水等措施均保持一致。各作物播量及施肥量见表 1。

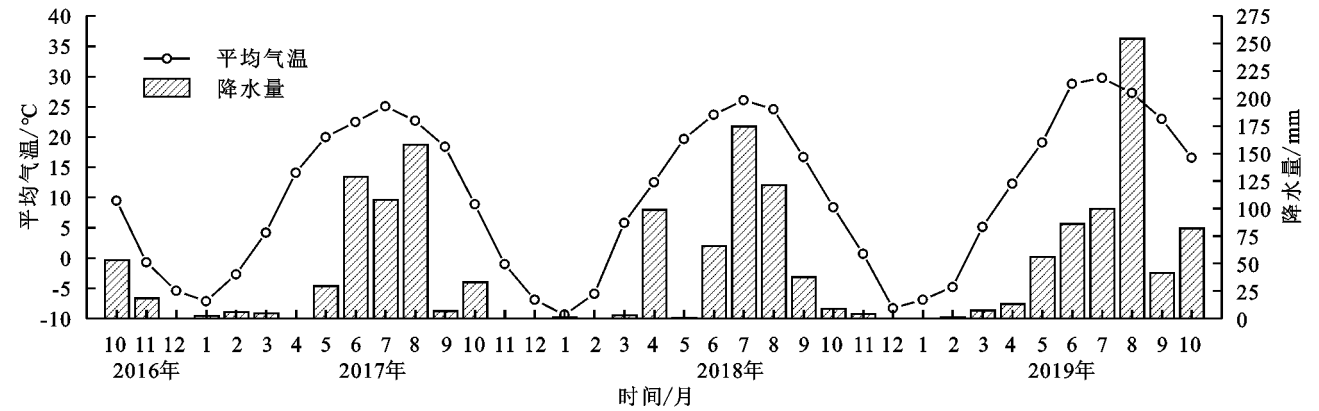


图 1 2016—2019 年月均气温和月降水量

表 1 不同作物播种量和施肥量					
作物	品种	播种量/ (kg·hm ⁻²)	施肥量/(kg·hm ⁻²)		
			N	P ₂ O ₅	K ₂ O
小麦	郑麦 369	302.25	150+69	120	120
玉米	浚单 29	67500*	210	75	90
大豆	圣丰徐豆 20	60	43	15	18
夏花生	豫花 9327	240	70	70	70

注:小麦生育期氮肥底肥为 150 kg/hm²,追肥量为 69 kg/hm²; *表示玉米播种量单位为株/hm²。

1.3 样品采集与测定

在 2017 年 10 月至 2019 年 10 月,玉米等秋季作物收获期,利用五点取样法取土,分别采取 0—30 cm 土壤样品,每 10 cm 取 1 个样,去除植物根系和坚硬石块,风干,过 0.85,0.25 mm 筛,测定土壤速效氮、磷、钾。铵态氮、硝态氮、碱解氮、有效磷和速效钾测定具体测定方法见鲍士旦的《土壤农化分析法》^[18]。小麦籽粒蛋白质采用近红外光谱测定。

于 2018—2020 年小麦收获期,各小区选择生长一致的小麦个体,分别取 3 个重复测产,每个重复取 1 m² 的小麦,随机选择 10 穗小麦计算亩穗数、穗粒数和千粒重。

产量(kg/hm²)=穗粒数(粒)×千粒重(g)×公顷穗数(×10⁴/hm²)

小麦成熟期生物量=产量(kg/hm²)/收获指数^[19](HI)

地上部氮素吸收量(kg/hm²)=籽粒生物量(kg/hm²)×籽粒全氮含量(g/kg)/1000+秸秆生物量(kg/hm²)×秸秆全氮含量(g/kg)/1000

氮收获指数(NHI)=籽粒生物量(kg/hm²)×籽粒全氮含量(g/kg)/地上部氮素吸收量×100

收获指数(HI)=籽粒产量/地上部总干物质重^[20]

1.4 数据处理与分析

数据的计算和统计分析采用 SPSS 25.0、Microsoft Office 2010 软件,数据处理和绘图使用 Origin 2018 软件,处理间差异显著性利用单因素方差分

析 LSD 法检验,显著性差异水平为 $P\leq 0.05$;处理间和土层间的交互效应采用双因素方差分析比较,显著性差异水平为 $P\leq 0.05$ 和 $P\leq 0.01$ 。

2 结果与分析

2.1 不同轮作对土壤碱解氮的影响

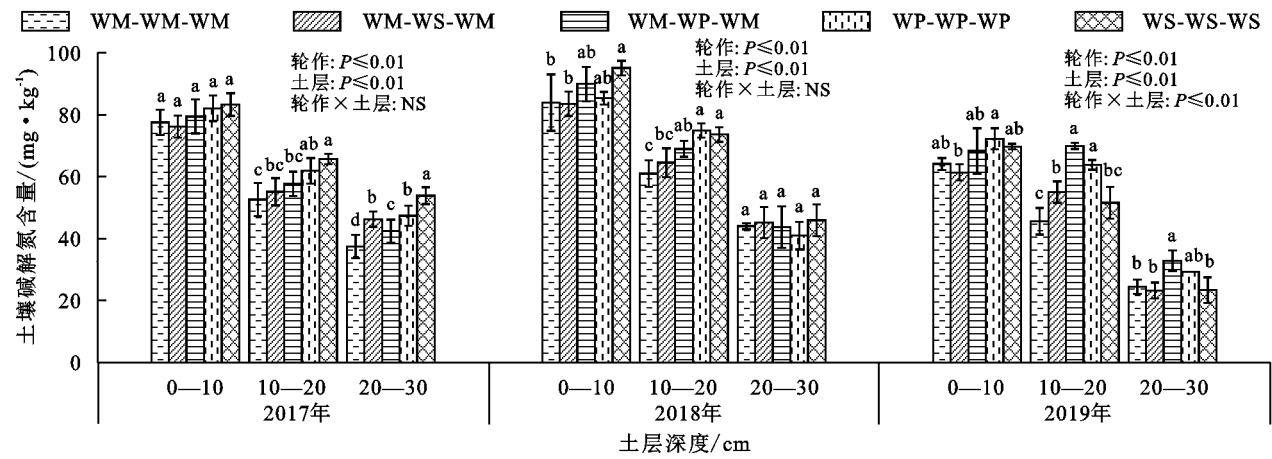
由图 2 可知,0—30 cm 土层中,土壤碱解氮含量在 0—20 cm 耕层土壤中高于 20—30 cm 土壤,随试验周期的增加,在不同土层各处理之间差异增加。2017 年 10—30 cm 土层中,WS—WS—WS 处理的碱解氮含量较 WM—WM—WM 处理显著高 17.6% 和 26.5%;2018 年 0—20 cm 土层中,均以 WS—WS—WS 处理碱解氮含量显著高于 WM—WM—WM 和 WM—WS—WM 处理;2019 年各处理的碱解氮含量相较前 2 年略有降低。0—10 cm 土层,各处理碱解氮含量显著高于 WM—WS—WM 处理;10—30 cm 土层,WM—WP—WM 土壤碱解氮含量较高,分别为 69.94,32.85 mg/kg,WM—WP—WM 和 WP—WP—WP 处理土壤碱解氮含量显著高于其他处理。整体上看,WP—WP—WP、WS—WS—WS 处理明显提高土壤碱解氮含量。从双因素分析数据可知,2017 年和 2018 年不同轮作方式和土层深度对土壤碱解氮含量有极显著影响,但交互作用不显著;2019 年不同轮作方式和土层深度都使得碱解氮含量有变化,且有极强的叠加作用。表明随着种植年限的增加,豆科作物的轮作方式提高 0—20 cm 土层土壤碱解氮含量,即不同轮作方式和土层深度共同影响土壤碱解氮含量。

2.2 不同轮作对土壤硝态氮的影响

由图 3 可知,0—30 cm 土层中,土壤硝态氮含量各处理间差异显著,且随试验周期增加,各处理硝态氮含量均呈增加趋势。2017 年,0—10 cm 土层 WP—WP—WP 处理硝态氮含量显著高于其他处理;10—20 cm 土层,WP—WP—WP 和 WS—WS—WS 处理的硝态氮含量较高;20—30 cm 土层,WS—WS—WS 处理硝态氮含量显著高于其他处理。2018 年,总体

上,相对2017年处理间差异稍有缩小,但处理间硝态氮含量均大于WM-WM-WM处理。0—10 cm 土层,其他各处理显著高于WM-WM-WM处理;10—20 cm 土层,WM-WP-WM、WP-WP-WP和WS-WS-WS处理高于其他处理;20—30 cm 土层,WP-WP-WP处理硝态氮含量显著高于其他处理。2019年,各处理的硝态氮含量均有增加。处理间的趋势与2018年类似,0—10 cm 土层,WM-WS-WM、WM-WP-WM和WS-WS-WS处理硝态氮含量显著高于其他处理;10—20 cm 土层,WM-

WP-WM和WP-WP-WP处理硝态氮含量显著高于其他处理;20—30 cm 土层,WP-WP-WP处理的硝态氮含量最高,为31.28 mg/kg,且显著高于其他处理。整体上看,WP-WP-WP、WS-WS-WS处理能明显提高土壤硝态氮含量。从双因素分析数据可知,2017—2019年,不同轮作方式和土层深度对土壤硝态氮含量有极显著影响,并且它们的交互作用极显著。表明随着种植年限的增加,豆科作物轮作方式提高0—30 cm 土层硝态氮含量,即不同轮作方式和土层深度共同影响土壤硝态氮含量。



注:不同小写字母表示同一土层不同处理之间差异显著($P<0.05$)。下同。

图2 不同处理不同土层土壤碱解氮含量

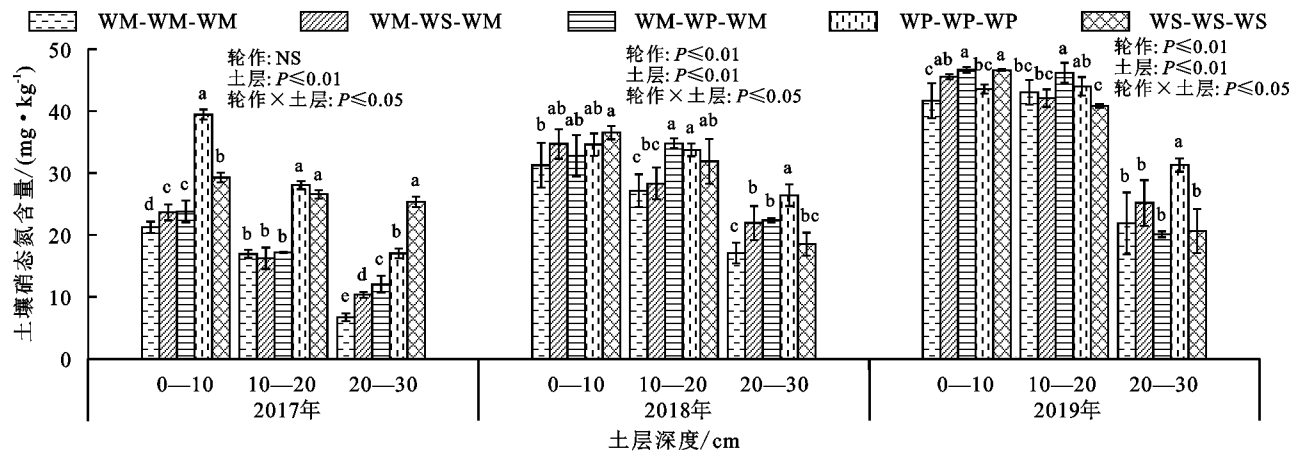


图3 不同处理不同土层土壤硝态氮含量

2.3 不同轮作对土壤铵态氮的影响

由图4可知,在不同轮作方式下,0—30 cm 土层土壤铵态氮含量在0—20 cm 耕层土壤中高于20—30 cm 土壤,且随着试验周期增加,各处理在各土层差异较低。2017年,0—10 cm 土层WP-WP-WP和WS-WS-WS处理铵态氮含量最高;10—20 cm 土层WM-WS-WM和WM-WP-WM处理铵态氮含量显著高于其他处理;20—30 cm 土层其他处理都优于WM-WM-WM处理。2018年,0—10 cm 土层WM-WS-WM、WM-WP-WM和WP-WP-WP处理间铵态氮含量显著高于其他处理;10—20 cm 土层各处理

铵态氮含量均显著高于WM-WM-WM处理。2019年,0—10 cm 土层与2017年差异相同;10—20 cm 土层各处理铵态氮含量都高于WM-WP-WM处理;20—30 cm 土层与2018年各处理差异相似。整体上,WP-WP-WP和WS-WS-WS处理铵态氮含量较高,说明这2种处理可明显提高土壤铵态氮含量。从双因素分析数据可知,2017—2019年,不同轮作方式和土层深度对土壤铵态氮含量有极显著影响,且它们的交互作用也极显著。表明豆科作物轮作模式提高耕层土壤铵态氮含量,即不同轮作方式和土层深度均可影响土壤铵态氮含量。

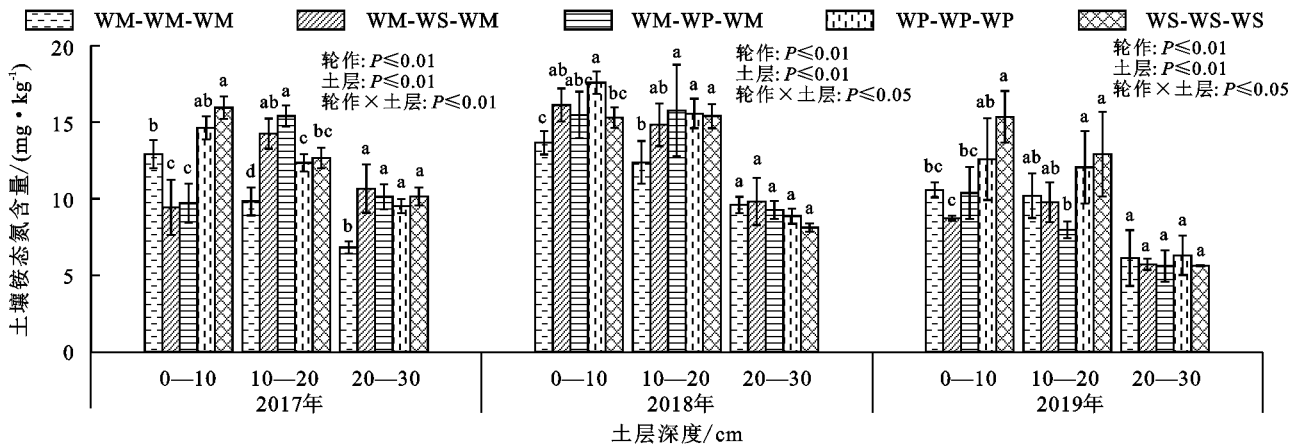


图 4 不同处理不同土层土壤铵态氮含量

2.4 不同轮作对土壤有效磷的影响

由图 5 可知,土壤有效磷含量在 0—20 cm 耕层土壤中高于 20—30 cm 土壤,且随试验周期增加,差异更加明显。2017 年,0—10 cm 土层 WM—WS—WM、WP—WP—WP 和 WS—WS—WS 处理间有效磷含量均较高;10—20 cm 土层各处理土壤有效磷含量均表现为高于 WM—WS—WM 处理;20—30 cm 土层 WM—WP—WM 和 WS—WS—WS 处理有效磷含量显著高于其他处理。2018 年,0—20 cm 土层 WM—WM—WM、WM—WP—WM 和 WP—WP—WP 处理有效磷含量均高于其他处理。2019 年,0—20 cm 土层 WM—WM—WM、WM—WS—WM 和 WP—WP—WP 处理间有效磷

含量均显著高于其他处理;20—30 cm 土层 WM—WS—WM 处理土壤有效磷含量最高,达到 8.02 mg/kg 。整体上,WP—WP—WP 处理有效磷含量最高,该处理能明显提高土壤有效磷含量。从双因素分析数据可知,2017 年轮作方式对土壤有效磷含量影响不显著,土层深度及轮作方式和土层深度的交互作用极显著;2018—2019 年,不同轮作方式和土层深度对土壤有效磷含量有极显著影响,并且它们的交互作用极显著。表明随着种植年限增加,豆科作物轮作模式下,表层土微生物较多提高土壤有效磷含量,而深层土则因土壤有机质和微生物较少,未提高甚至降低深层土壤有效磷含量,因此土层深度影响土壤有效磷含量。

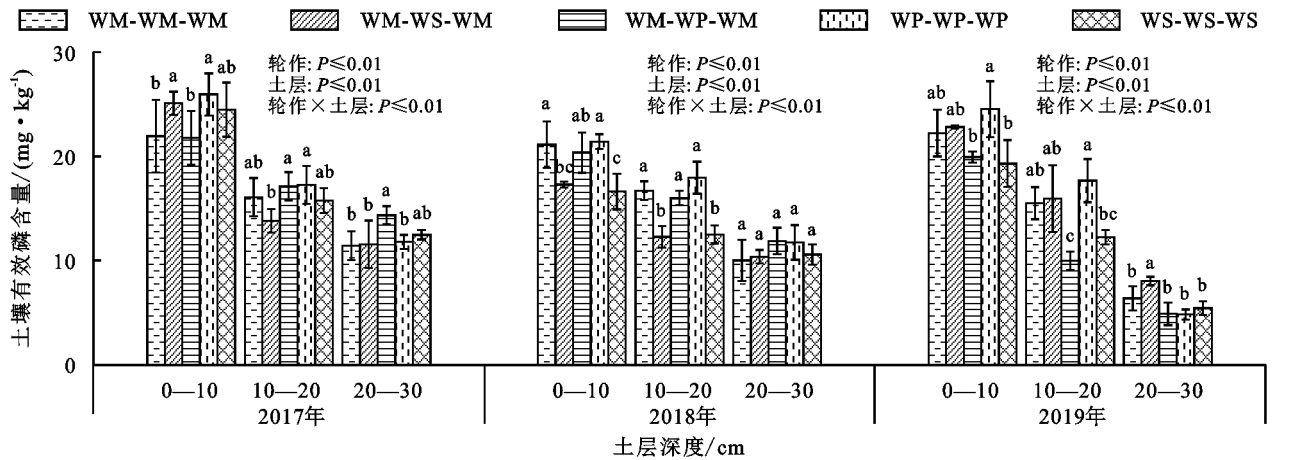


图 5 不同处理不同土层土壤有效磷含量

2.5 不同轮作对土壤速效钾的影响

由图 6 可知,土壤速效钾含量在 0—10 cm 土层中高于 10—20 cm 土层,且随试验周期增加,不同处理在各个土层中差异增加。2017 年,0—10 cm 土层 WS—WS—WS 处理土壤速效钾含量最高,达到 170.98 mg/kg ;20—30 cm 土层 WP—WP—WP 和 WS—WS—WS 处理速效钾含量显著高于其他处理。2018 年,0—10 cm 土层 WP—WP—WP 处理土壤速效钾含量最高,达到 172.80 mg/kg ;10—20 cm 土层 WM—WM—WM、WM—WS—WM 和 WM—WP—WM 处理间

速效钾含量都显著高于其他处理;20—30 cm 土层 WM—WS—WM 和 WP—WP—WP 处理速效钾含量高于其他处理。2019 年,0—10 cm 土层 WM—WS—WM 和 WM—WP—WM 处理间速效钾含量都显著高于其他处理;10—20 cm 土层 WM—WS—WM、WM—WP—WM 和 WP—WP—WP 处理速效钾含量显著高于其他处理;20—30 cm 土层各处理均显著高于 WM—WM—WM 处理。整体上,WM—WP—WM 和 WP—WP—WP 处理速效钾含量最高,这 2 种轮作模式下,有助于提高土壤速效钾含量。从双因素分析数据中

可知,2017—2019年中,不同轮作方式和土层深度对土壤速效钾含量有极显著影响,而且它们的交互作用也极显著。表明随着种植年限增加,不同轮作方式和土层深度共同影响土壤速效钾含量。

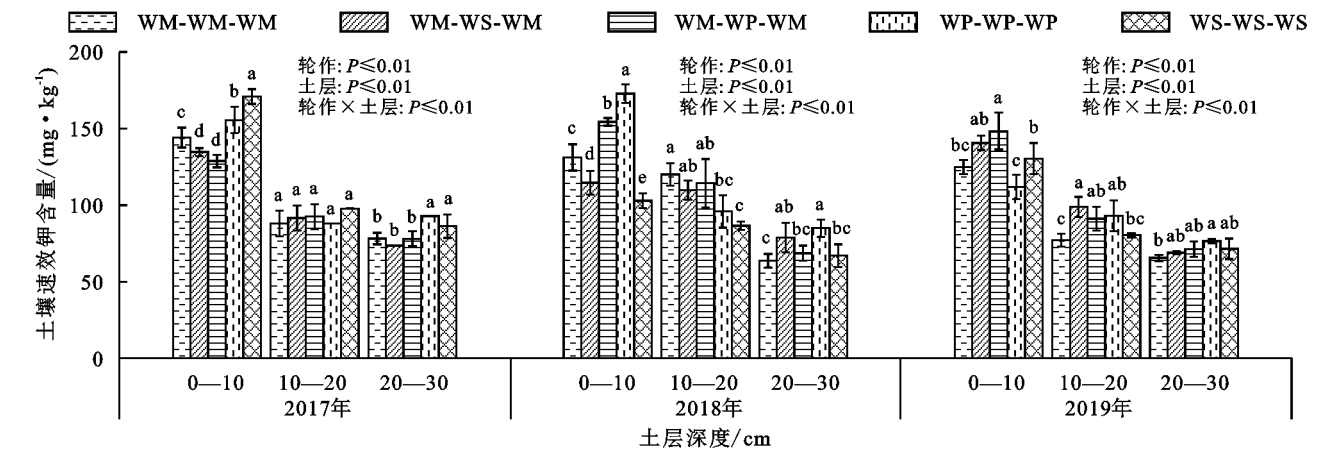


图6 不同处理不同土层土壤速效钾含量

2.6 不同轮作对地小麦籽粒蛋白质含量的影响

由图7可知,整体上小麦籽粒蛋白质含量随种植年限增加,各处理间差异逐渐减小。2018年,WM-WS-WM和WP-WP-WP处理小麦籽粒蛋白质含量显著高于其他处理,分别达到17.0%和17.8%。2019年,WM-WS-WM和WM-WP-WM处理小麦籽粒蛋白质含量最高,分别达到14.4%和15.0%。2020年,WP-WP-WP处理小麦籽粒蛋白质含量显著高于其他处理。从3年各处理小麦籽粒蛋白质含量平均值来看,表现为WP-WP-WP>WM-WS-WM>WM-WP-WM>WS-WS-WS>WM-WM-WM,说明采用连续小麦-夏花生轮作模式可以显著提高小麦籽粒蛋白质含量。

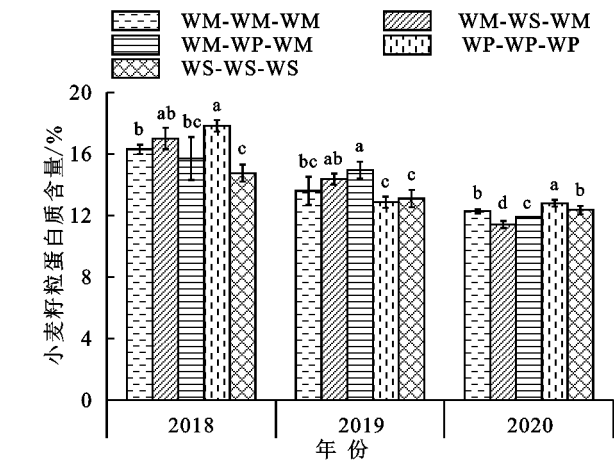


图7 不同年份小麦籽粒蛋白质含量

2.7 不同轮作对小麦成熟期生物量的影响

由图8可知,整体上小麦成熟期生物量随着种植年限增加各处理生物量逐渐增加,不同处理间差异增加。2018年,WS-WS-WM处理小麦成熟期生物量显著高于其他处理,最高达到15 543 kg/km²,且其他处理间差异不显著;2019年各处理都显著高于WM-WP-WM处理;2020年,WM-WS-WM、

WP-WP-WP和WS-WS-WM处理小麦成熟期生物量最高。

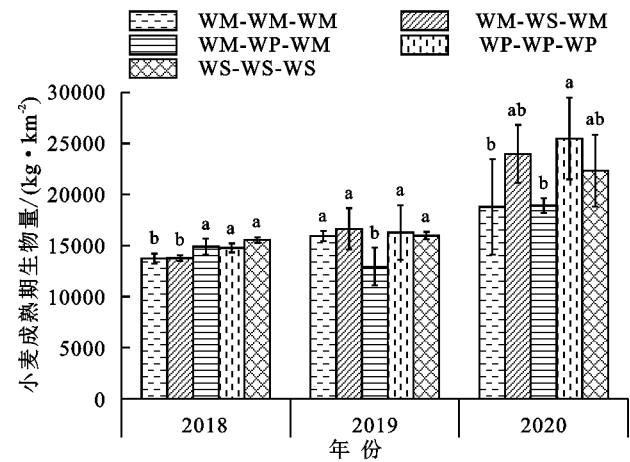


图8 不同处理不同年份小麦成熟期生物量

2.8 不同轮作对小麦收获指数和氮收获指数的影响

由图9可知,3年间小麦的氮收获指数(nitrogen harvest index, NHI)与收获指数(harvest index, HI)呈正相关关系,HI随着小麦NHI增加而升高。

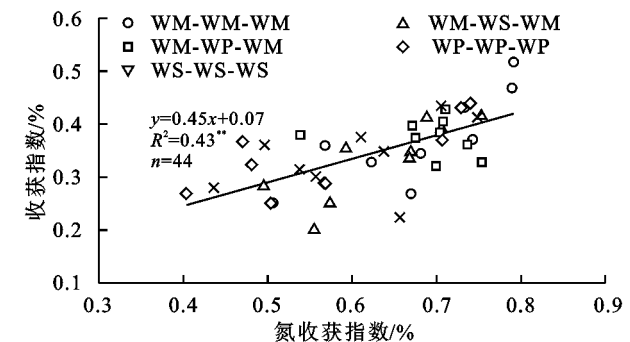


图9 小麦氮收获指数与收获指数的关系

2.9 不同轮作对小麦产量及后续作物经济效益的影响

由表2可知,2018年,WP-WP-WP处理小麦产量最高,达到6 341 kg/hm²,比WM-WS-WM处理提高13.6%。2019年,WM-WS-WM处理小麦产量显著高于其他处理,达到6 001 kg/hm²,比

WS—WS—WS 处理提高 25.8%。2020 年,WP—WP—WP 和 WS—WS—WS 处理小麦产量显著高于其他处理,分别达到 6 956 kg/hm²和 6 777 kg/hm²;从产量构成因素可知,2018—2019 年,各处理的穗粒数差异较小且亩穗数和千粒重无明显差异。2020 年,WS—WS—WS 处理的亩穗数显著高于其他处

理。WP—WP—WP 处理的穗粒数显著高于其他处理。WM—WS—WM 和 WM—WP—WM 处理间的千粒重显著高于其他处理。

综上可知,WP—WP—WP 处理通过提高穗粒数来提高产量,WS—WS—WS 处理通过提高小麦亩穗数来提高小麦产量。

表 2 2018—2020 年不同轮作模式下小麦产量及产量构成因素

年份	处理	穗数/	穗粒数/	千粒重/	产量/
		(万穗·hm ⁻²)	粒	g	(kg·hm ⁻²)
2018	WM—WM—WM	49.9±5.2a	25.7±2.1a	45.7±1.4a	6193±437a
	WM—WS—WM	48.7±1.2a	26.4±1.3a	46.6±0.6a	5581±80b
	WM—WP—WM	52.3±6.0a	27.3±1.3a	46.4±2.2a	6336±539a
	WP—WP—WP	51.6±4.4a	27.6±6.0a	47.8±1.0a	6242±110a
	WS—WS—WS	47.3±8.9a	22.4±4.6a	47.9±0.4a	6341±362a
2019	WM—WM—WM	38.9±2.0a	28.4±3.7ab	41.9±1.3a	5603±57b
	WM—WS—WM	37.6±0.4a	26.7±2.9b	43.3±1.3a	6001±238a
	WM—WP—WM	35.2±2.0a	31.6±1.6a	40.6±1.6a	5198±332c
	WP—WP—WP	34.3±5.0a	31.5±0.7a	41.7±1.4a	5100±57c
	WS—WS—WS	34.0±2.9a	27.7±1.0ab	42.6±2.2a	4770±200d
2020	WM—WM—WM	38.4±3.9b	30.0±5.2b	56.2±0.7b	6218±347b
	WM—WS—WM	33.2±3.3c	32.2±1.6b	57.6±0.7a	5805±841b
	WM—WP—WM	37.1±1.8b	30.6±1.6b	58.3±0.2a	6150±495b
	WP—WP—WP	38.7±1.8b	34.2±0.2a	56.5±1.0b	6956±628a
	WS—WS—WS	40.0±1.5a	30.5±1.8b	56.1±0.5b	6777±766a

注:表中数据为平均值±标准差;同列不同小写字母表示不同处理间差异显著(P<0.05)。下同。

从表 3~表 5 可以看出,2018—2020 年小麦季,WM—WM—WM、WP—WP—WP 和 WS—WS—WS 处理轮作周期内总经济效益最高。2018—2020 年秋季作物收获季,WP—WP—WP 处理 3 年轮作周期内收益最高,达到 125 400 元/hm²。2018—2020 年总经济效益以 WP—WP—WP 处理最高,达到 167

486 元/hm²。

从不同处理 3 年各轮作周期内可知,WP—WP—WP 处理的各轮作周期内经济效益最高。不同处理 3 年各轮作周期内经济效益均表现为 WP—WP—WP>WM—WP—WM>WS—WS—WS>WM—WS—WM>WM—WM—WM。

表 3 2018—2020 年不同轮作模式下小麦经济效益

年份	处理	投入/(元·hm ⁻²)						产出			收益/ (元·hm ⁻²)
		麦种	除虫 除草剂	施肥	耗油	人力	共计	产量/ (kg·hm ⁻²)	单价/ (元·kg ⁻¹)	合计/ 元	
2018	WM—WM—WM	1125	675	2040	525	900	5265	6193±437a	2.3	14244a	8979±1004a
	WM—WS—WM	1125	675	2040	525	900	5265	5581±80a	2.3	12836b	7571±186a
	WM—WP—WM	1125	675	2040	525	900	5265	6337±539a	2.3	14574a	9309±1241a
	WP—WP—WP	1125	675	2040	525	900	5265	6242±110a	2.3	14357a	9092±251a
	WS—WS—WS	1125	675	2040	525	900	5265	6341±362a	2.3	14584a	9319±833a
2019	WM—WM—WM	1125	675	2040	525	900	5265	5603±57b	2.3	12886b	7283±131b
	WM—WS—WM	1125	675	2040	525	900	5265	6001±238a	2.3	13803a	8538±546a
	WM—WP—WM	1125	675	2040	525	900	5265	5198±332c	2.3	11955c	6757±763c
	WP—WP—WP	1125	675	2040	525	900	5265	5100±57c	2.3	11729c	6464±132c
	WS—WS—WS	1125	675	2040	525	900	5265	4770±200d	2.3	10971d	6201±459d
2020	WM—WM—WM	1125	675	2040	525	900	5265	6218±347b	2.3	14301b	8083±347b
	WM—WS—WM	1125	675	2040	525	900	5265	5805±84b	2.3	13352c	8087±841b
	WM—WP—WM	1125	675	2040	525	900	5265	6150±495b	2.3	14146b	7996±495b
	WP—WP—WP	1125	675	2040	525	900	5265	6956±628a	2.3	16000a	10735±628a
	WS—WS—WS	1125	675	2040	525	900	5265	6777±766a	2.3	15587b	10322±766a

表 4 2018—2020 年不同轮作模式下秋季作物经济效益

年份	处理	投入/(元·hm ⁻²)						产出			收益/ (元·hm ⁻²)
		麦种	除虫 除草剂	施肥	耗油	人力	共计	产量/ (kg·hm ⁻²)	单价/ (元·kg ⁻¹)	合计/ 元	
2018	WM—WM—WM	750	675	1957	525	900	4807	11169±186a	1.4	15636c	10829±186c
	WM—WS—WM	720	675	401	0	900	2726	3538±229b	5.8	20520b	17794±229b
	WM—WP—WM	3360	675	653	0	900	5588	2721±123c	12	32652a	27064±123a
	WP—WP—WP	3360	675	653	0	900	5588	2893±398c	12	34716a	29128±398a
	WS—WS—WS	720	675	401	0	900	2726	3288±446b	5.8	19070c	16344±446b
2019	WM—WM—WM	750	675	1957	525	900	4807	14271±118a	1.4	19979a	15172±118b
	WM—WS—WM	750	675	1957	525	900	4807	15130±195a	1.4	21182a	16375±195b
	WM—WP—WM	750	675	1957	525	900	4807	14946±503a	1.4	20924a	16117±503b
	WP—WP—WP	3360	675	653	0	900	5588	4351±61c	12	52212b	46624±61a
	WS—WS—WS	720	675	401	0	900	2726	2906±161c	5.8	16854b	13948±161c
2020	WM—WM—WM	750	675	1957	525	900	4807	13428±137a	1.4	18799b	13992±137d
	WM—WS—WM	720	675	401	0	900	2726	3509±149b	5.8	20352c	17626±149c
	WM—WP—WM	3360	675	653	0	900	5588	2853±163c	12	34236b	28648±163b
	WP—WP—WP	3360	675	653	0	900	5588	3206±31b	12	38472a	35266±31a
	WS—WS—WS	720	675	401	0	900	2726	3435±417b	5.8	19923b	17197±417c

注:表 3、表 4 中当季作物收购价为玉米当季收购价为 1.4 元/kg,花生当季收购价为 12.0 元/kg,大豆当季收购价为 5.8 元/kg。

表 5 2018—2020 年不同轮作模式下轮作周期内
作物经济效益

处理	2018—2020 年	2018—2020 年	2018—2020 年
	小麦季收益	秋季作物收益	总收益
WM—WM—WM	41431a	54414d	95845c
WM—WS—WM	39991b	62054c	102045c
WM—WP—WM	40675b	87812b	128487b
WP—WP—WP	42086a	125400a	167486a
WS—WS—WS	41142a	55847d	96989c

3 讨论

3.1 不同轮作对麦田后季作物土壤养分的影响

小麦与豆科作物轮作模式对于土壤养分含量积累有着重要的作用。前人^[21-24]研究表明,小麦—豆科作物轮作体系下,减少氮肥投入,土壤碱解氮含量仍能保持较高水平,这与本研究的结果相同。由于豆科作物具有自身固氮的作用,可以将空气中的氮转化为作物所需的氮素,所以对于提高土壤碱解氮含量起着重要作用。从双因素分析可知,轮作模式和土层深度共同影响碱解氮含量。本研究发现,连续的小麦—夏花生和大豆轮作模式下比非豆科作物轮作更能提高土壤碱解氮含量,这对于豆科作物提高土壤氮素有一定借鉴意义;同时,与豆科作物轮作的小麦深层的土壤碱解氮含量也高于与玉米轮作的土壤碱解氮含量,这是因为豆科作物根系较长,可以提高深层土壤碱解氮含量,对于培肥土壤具有一定作用。

土壤硝态氮、铵态氮是供给作物氮素的重要途径之一。李娟等^[25]研究表明,在胶原土壤上种植 9 种

豆科作物对于土壤硝态氮和铵态氮含量提高有促进作用,这与本研究结果类似。本研究中发现,连续小麦—大豆和花生轮作模式下,土壤硝铵态氮含量明显高于小麦与玉米轮作模式下土硝铵态氮含量,但是 1 个周期小麦—玉米+1 个周期小麦—豆科作物轮作模式下土壤硝铵态氮含量并没有提高,或者提高较少,这可能是由于豆科作物没有连年种植,土壤中很难富集空气中的氮源,进而导致土壤氮素提高不明显。

土壤有效磷含量提高对于促进作物生长发育具有重要作用。Feiziene 等^[9]研究表明,豆科作物在有机轮作模式中,可以有效提高土壤有效磷含量。本试验中,采用连续小麦—夏花生轮作模式下土壤有效磷含量最高,这可能是由于花生相对于禾本科植物更能吸收磷素养分,而花生相对于大豆能分泌更多的有机酸,并且吸收钙能力强,因此吸收磷能力也强。从双因素分析可知,土层深度可以单独影响土壤有效磷含量,随土层深度增加,有效磷含量逐渐降低,不同处理也间接影响土壤有效磷含量,这可能是由于豆科作物根系附着有根瘤菌,根瘤菌以磷固氮作用使得土壤磷素都聚集在豆科作物根系周围,进而使得深层土壤有效磷含量较低。

土壤速效钾含量对于作物生长发育及提高小麦等作物的抗逆性具有重要作用。翁颖等^[26]和庞泰春^[27]研究表明,豆科作物对于钾素养分的需求较高;韩晓增等^[28]研究表明,豆科作物对于钾素需求较高,并且从土壤胶体中析出大量的钾素养分。本研究发

现,与豆科作物轮作的小麦土壤钾素养分高于与玉米轮作模式下的土壤钾素养分。由于豆科作物根瘤菌固氮作用,对于钾素养分需求较高,将土壤中钾素解离出来,提高土壤速效钾含量。从双因素分析可知,轮作方式和土层深度共同影响土壤速效钾含量,这也说明豆科作物对于钾素养分的需求较高,使得土壤速效钾含量较高。由于豆科作物在固定土壤氮素养分时,需要吸收土壤钾素,可能使得深层土壤速效钾含量较低。

3.2 不同轮作对小麦生物量及产量与效益的影响

豆科作物与小麦轮作被看做是一种促进小麦生长发育以及提高产量的重要轮作方式。张积攀^[29]研究认为,合理化的小麦—花生轮作模式下可以提高花生和小麦的产量,推动农业的现代化发展;董士刚^[30]研究表明,小麦—夏花生和小麦—大豆处理提高后茬作物小麦的产量,达到增产效果。本研究中有类似的结果。Varvel^[31]研究发现,多作物轮作相对于单一作物轮作下更能降低产量波动,有利于农民稳产稳收,这与本研究结果相同。本研究中发现,与豆科作物轮作后年季间小麦产量的波动明显降低。从小麦产量构成因素分析,3 年数据表明麦季通过亩穗数和穗粒数影响最终产量。穗粒数以 WP—WP—WP 处理最高,亩穗数以 WS—WS—WS 处理达到最高,表明小麦与豆科作物轮作可通过增加亩穗数和穗粒数来提高产量。而亩穗数又取决于分蘖数的多少,氮素含量直接影响小麦分蘖数的多少,因为豆科作物能够提高土壤氮素含量,所以可以使小麦增产。因此,豆科作物与小麦轮作可以通过提高小麦分蘖数来实现产量提高。

小麦与豆科作物轮作可以通过提高小麦季作物产量的方式提高轮作周期内的经济效益。Cheng 等^[32]研究发现,小麦连作体系下,增加豆科作物轮作后可以提高小麦产量,进而增加小麦季经济效益。本研究也发现,豆麦轮作可以提高土壤氮素养分供给小麦吸收,从而提高小麦产量,使得小麦季经济效益提高。从玉米季各处理的经济效益可知,与夏花生轮作条件下的收益最高,分析可知,夏花生的收购价高于其他作物,对于农民增加收入具有良好的促进作用。

3.3 不同轮作对小麦蛋白质含量的影响

小麦蛋白质含量主要受氮素养分供应的影响。郭兴凤等^[33]研究表明,小麦籽粒蛋白质含量受到各种环境认为因素的影响,其中栽培管理措施成为改变小麦籽粒蛋白质含量的重要方法之一。采用与豆科作物轮作的方法可以提高土壤氮素养分,这是提高小麦籽粒蛋白质含量的方法之一。Smith 等^[34]研究表

明,利用豆科作物与小麦的轮作方式下,豆科作物绿肥施入土壤与其他休耕轮作方式相比可显著提高小麦蛋白质含量。蔡艳等^[35]研究表明,小麦—豆科作物轮作体系下,通过测定小麦籽粒蛋白质品质可知,与豆科作物轮作的后茬小麦,蛋白质含量较高,且与土壤变化水平趋于一致。本研究中也得到相同的结果,尤其是连续小麦—夏花生轮作模式可以显著提高小麦籽粒蛋白质含量,这也是由于豆科作物的固氮作用,使得后茬小麦可以从土壤吸收更多的氮素养分,供给籽粒形成,提高小麦品质。

4 结 论

(1)小麦与豆科作物轮作促进土壤中速效养分的积累,增加土壤氮素的积累,进而提高氮素利用效率,实现小麦季的增产增收。

(2)3 年秋季作物成熟期土壤速效养分测定结果以连续小麦—夏花生轮作模式最高;小麦季产量以连续的小麦—夏花生和连续的小麦—大豆轮作模式最高。

(3)从产量及产量构成因素分析可知,连续小麦—夏花生和连续小麦—大豆轮作模式可以通过提高亩穗数和穗粒数来提高小麦产量。

综上所述,以夏花生、大豆等豆科作物与小麦轮作的模式可以显著提高土壤速效养分含量,并能实现增产。

参考文献:

[1] 杨思,张晓琪,徐家瑞,等.灌水时期对冬小麦生长发育及耗水特性的影响[J].灌溉排水学报,2021,40(6):36-44.

[2] 马忠明,徐生明.玉米的耗水特性及节水增产栽培措施[J].甘肃农业科技,1993(5):33-34.

[3] 汪顺生,刘东鑫,王康三,等.不同沟灌方式对夏玉米耗水特性及产量影响的模糊综合评判[J].农业工程学报,2015,31(24):89-94.

[4] 曾昭海.豆科作物与禾本科作物轮作研究进展及前景[J].中国生态农业学报,2018,26(1):57-61.

[5] 夏玄,龚振平.氮素与豆科作物固氮关系研究进展[J].东北农业大学学报,2017,48(1):79-88.

[6] 符小文,张永杰,杜孝敬,等.麦—豆轮作体系周年施氮量对夏大豆氮素利用效率和产量的影响[J].植物营养与肥料学报,2020,26(3):453-460.

[7] 陈昱利,杨平,巩法江,等.大豆氮素效应研究综述[J].农业科技通讯,2020(8):216-218.

[8] 周春来.豆科作物轮作的培肥增产效果研究[J].西南农业学报,1991(1):91-97.

[9] Feiziene D, Feiza V, Povilaitis V, et al. Soil sustainability changes in organic crop rotations with diverse crop species and the share of legumes[J].Acta Agriculturae Scandinavica, Section B-Soil and Plant Science,

- 2016,66(1):36-51.
- [10] 李军贤.豆科作物轮作对半干旱地区农作系统氮平衡和生产力的影响[D].兰州:甘肃农业大学,2019.
- [11] 严君,韩晓增.长期不同种植制度对大豆根瘤菌丰度和多样性的影响[A].中国土壤学会土壤生物与生物化学专业委员会、中国土壤学会土壤生态专业委员会.第七次全国土壤生物与生物化学学术研讨会暨第二次全国土壤健康学术研讨会论文集[C].中国土壤学会土壤生物与生物化学专业委员会、中国土壤学会土壤生态专业委员会:中国土壤学会土壤生物和生物化学专业委员会,2014.
- [12] Tamm I, Tamm U, Ingver A, et al. Different leguminous pre-crops increased yield of succeeding cereals in two consecutive years[J].*Soil and Plant Science*, 2016, 66(7): 593-601.
- [13] 杨宁,赵护兵,王朝辉,等.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[J].*生态学报*, 2012, 32(15): 4827-4835.
- [14] Zhao J, Yang Y D, Zhang K, et al. Does crop rotation yield more in China? A meta-analysis[J].*Field Crops Research*, 2020, 245: 1-5.
- [15] Ma B L, Liang B C, Biswas D K, et al. The carbon footprint of maize production as affected by nitrogen fertilizer and maize-legume rotations[J].*Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2012, 94(1): 15-31.
- [16] Gan Y T, Hamel C, Cutforth H, et al. Diversifying crop rotations with pulses enhances system productivity[J].*Crops and Soils*, 2016, 49(4): 6-10.
- [17] 石柯,董士刚,申凤敏,等.小麦播量与减氮对潮土微生物量碳氮及土壤酶活性的影响[J].*中国农业科学*, 2019, 52(15): 2646-2663.
- [18] 鲍士旦.土壤农化分析[M].3 版.北京:中国农业出版社,2008:56-106.
- [19] 马小龙,余旭,王朝辉,等.旱地小麦产量差异与栽培、施肥及主要土壤肥力因素的关系[J].*中国农业科学*, 2016, 49(24): 4757-4771.
- [20] 鲁艳红,聂军,廖育林,等.氮素抑制剂对双季稻产量、氮素利用效率及土壤氮平衡的影响[J].*植物营养与肥料学报*, 2018, 24(1): 95-104.
- [21] 徐国伟,吴长付,刘辉,等.秸秆还田与氮肥管理对水稻养分吸收的影响[J].*农业工程学报*, 2007, 23(7): 191-195.
- [22] 温延臣,李海燕,袁亮,等.长期定位施肥对潮土剖面养分分布的影响[J].*中国农业科学*, 2020, 53(21): 4460-4469.
- [23] 朱梓弘,朱同彬,杨霖,等.中国土壤碱解氮含量与影响因子的空间关系研究[J].*生态环境学报*, 2019, 28(11): 2199-2207.
- [24] 张苏芮,李一鸣.小麦—玉米轮作体系下长期秸秆还田对土壤养分含量的影响综述[J].*现代农业科技*, 2020(7): 189, 192.
- [25] 李娟,林位夫,周立军,等.成龄胶园间作不同豆科作物对土壤养分的影响[J].*热带农业科学*, 2014, 34(7): 5-11.
- [26] 翁颖,许映君,崔萌萌,等.菜用大豆不同施肥处理试验初报[J].*浙江农业科学*, 2018, 59(12): 2295-2297.
- [27] 庞泰春.不同施钾水平对大豆生长及产量的影响[J].*现代农业科技*, 2017(15): 7-8.
- [28] 韩晓增,胡国华,邹文秀.东北地区不同轮作方式下大豆产量对施钾的响应[J].*土壤与作物*, 2014, 3(4): 157-161.
- [29] 张积攀.小麦套种花生双高产栽培技术研究[J].*种子科技*, 2019, 37(17): 52-53.
- [30] 董士刚.轮作模式及小麦增密减氮对潮土理化性状及作物产量的影响[D].郑州:河南农业大学,2019.
- [31] Varvel G E. Monoculture and rotation system effects on precipitation use efficiency of corn[J].*Agronomy Journal*, 2003, 95: 233-244.
- [32] Cheng C, Neill K, Burgess M, et al. Agronomic benefit and economic potential of introducing fall-seeded pea and lentil into conventional wheat-based crop rotations[J].*Agronomy Journal*, 2012, 104(2): 215-224.
- [33] 郭兴凤,张莹莹,任聪,等.小麦蛋白质的组成与面筋网络结构、面制品品质关系的研究进展[J].*河南工业大学学报(自然科学版)*, 2018, 39(6): 119-124.
- [34] Smith E G, Robert P Z, Con A C, et al. Long-term crop rotation effects on production, grain quality, profitability, and risk in the Northern Great Plains[J].*Agronomy Journal*, 2017, 109(3): 957-967.
- [35] 蔡艳,郝明德.长期轮作对黄土高原旱地小麦籽粒蛋白质营养品质的影响[J].*应用生态学报*, 2013, 24(5): 1354-1360.