

秸秆还田替代施钾对旱地玉—麦轮作体系 作物生产力和土壤硝态氮的影响

侯园泉¹, 黄明¹, 付国占¹, 李友军¹, 田文仲^{2,3}, 李俊红^{2,3},
吴金芝¹, 赵凯男¹, 张振旺¹, 赵志明¹, 吕军杰^{2,3}, 姚宇卿^{2,3}

(1.河南科技大学农学院,河南 洛阳 471023;2.洛阳农林科学院,
河南 洛阳 471023;3.中国农业科学院洛阳旱农试验基地,河南 洛阳 471023)

摘要:为探明秸秆还田替代施钾对旱地玉—麦轮作体系的影响,2015—2020 年,基于中国农业科学院洛阳旱农试验基地始于 2007 年的长期定位试验,选取不施肥(CK)、施氮磷肥(NP)、施氮磷钾肥(NPK)、施氮磷肥+秸秆还田(NPS)4 个处理,研究了夏玉米—冬小麦轮作体系的产量、水肥利用效率,以及 2020 年小麦成熟期 0—60 cm 土层的土壤有机质、全氮、速效磷钾含量和 0—260 cm 土层土壤硝态氮累积量。结果表明:与 NP 相比,NPK 可显著提高 0—60 cm 各土层的土壤速效钾含量,但对夏玉米和冬小麦的产量和水肥利用效率均无影响,而 NPS 不仅利于改善土壤养分,而且可显著提高夏玉米和周年的产量、水肥利用效率。与 NPK 相比,NPS 的 0—20 cm 土层土壤有机质含量显著提高 10.68%,夏玉米和周年的产量、水分利用效率、氮(磷)肥农学效率分别显著提高 20.91%,33.77%,114.39%和 13.60%,13.63%,65.41%,但 0—20 cm 土层土壤速效磷含量和 0—60 cm 土层土壤速效钾含量分别显著降低 7.43%和 14.31%。NPS 较 NP 和 NPK,土壤硝态氮累积量在 0—100 cm 土层分别提高 37.14%和 25.92%,在 160—260 cm 土层分别降低 32.33%和 21.64%。综上,在施氮磷肥的基础上用秸秆还田替代施钾既能提高 0—20 cm 土层土壤有机质、全氮含量以及 0—100 cm 土层土壤硝态氮累积量,又能提高夏玉米和周年产量、水肥利用效率,还可降低土壤硝态氮向深层淋溶的风险,是适宜于旱地玉—麦轮作区的施肥措施,但其降低土壤速效磷和速效钾含量的问题应被重视。

关键词:旱地;玉—麦轮作;秸秆还田;产量;土壤养分;效率

中图分类号:S147.5;S158.3

文献标识码:A

文章编号:1009-2242(2022)05-0311-08

DOI:10.13870/j.cnki.stbcbx.2022.05.038

Effects of Straw Return Replacing the Application of Potassium Fertilizer on Crop Productivity and Soil Nitrate Accumulation in Dryland Summer Maize-Winter Wheat Rotation System

HOU Yuanquan¹, HUANG Ming¹, FU Guozhan¹, LI Youjun¹, TIAN Wenzhong^{2,3}, LI Junhong^{2,3},
WU Jinzhi¹, ZHAO Kainan¹, ZHANG Zhenwang¹, ZHAO Zhiming¹, LÜ Junjie^{2,3}, YAO Yuqing^{2,3}

(1.School of Agriculture, Henan University of Science and Technology, Luoyang, Henan 471023;

2.Luoyang Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Luoyang, Henan 471023;

3.Luoyang Dryland Agriculture Test Site, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Luoyang, Henan 471023)

Abstract: In order to explore the regulation effects of straw return replacing the application of potassium fertilizer on dryland summer maize—winter wheat rotation system, four treatments including no fertilizer (CK), nitrogen and phosphorus fertilizer (NP), nitrogen, phosphorus and potassium fertilizer (NPK), nitrogen and phosphorus fertilizer plus straw returning (NPS) were selected based on the long-term located field experiment which started in 2007 at dry farming platform (Luoyang) of Chinese Academy of Agricultural Sciences. We investigated the grain yield, water and fertilizer use efficiency of summer maize and winter wheat rotation system from 2015 to 2020, as well as the content of organic matter, total nitrogen, available

收稿日期:2022-01-03

资助项目:国家重点研发计划项目(2018YFD0300700);河南科技大学博士科研启动基金项目(13480082)

第一作者:侯园泉(1996—),男,在读硕士研究生,主要从事旱作节水农业研究。E-mail:18338219635@163.com

通信作者:黄明(1980—),男,博士,副教授,主要从事旱作节水农业研究。E-mail:huangming_2003@126.com

付国占(1963—),男,博士,教授,主要从事旱作节水农业研究。E-mail:fuguo-zhan@163.com

phosphorus and available potassium in 0—60 cm soil layer, and soil nitrate accumulation in 0—260 cm soil layer at harvest of winter wheat in 2020. Compared with NP, NPK significantly increased the content of available potassium in the 0—60 cm soil layer, but did not change the grain yield, water and fertilizer use efficiency of summer maize and winter wheat rotation system, while NPS was beneficial to improve soil nutrient, and significantly increased the grain yield, water and fertilizer use efficiency in summer maize and whole year. Compared with NPK, NPS significantly increased the organic matter content by 10.68% in 0—20 cm soil layer, the grain yield, water use efficiency, and the agronomic efficiency of N(P) fertilizer in summer maize and whole year increased by 20.91%, 33.77%, 114.39% and 13.60%, 13.63%, 65.41%, respectively, but significantly decreased the available phosphorus content by 7.43% in 0—20 cm soil layer and the available potassium content by 14.31% in 0—60 cm soil layer. Compared with NP and NPK, the nitrate accumulation in NPS was increased by 37.14% and 25.92% in 0—100 cm soil layer, and decreased by 32.33% and 21.64% in 160—260 cm soil layer. In conclusion, straw return could be used for replacing the application of potassium fertilizer on the basis of N and P fertilizer, because it could not only increase the content of organic matter and total nitrogen in 0—20 cm soil layer and nitrate accumulation in 0—100 cm soil layer, thereby improving the grain yield, water and fertilizer use efficiency in summer maize and whole year, but also reduced the risk of soil nitrate leaching to deep layer. Therefore, NPS was a suitable measure in dryland summer maize—winter wheat rotation system, but it should be paid more attention to the problems of the decrease of available phosphorus and available potassium in soil.

Keywords: dryland; summer maize and winter wheat rotation; straw return; yield; soil nutrient; efficiency

旱地占我国耕地总面积的 54.4%, 是我国三大粮食作物中玉米和小麦的主要生产阵地^[1]。夏玉米—冬小麦(简称“玉—麦”)轮作是半湿润旱作区重要的种植制度之一, 这一生产体系普遍遭受干旱和土壤贫瘠的双重胁迫^[2]。此外, 旱地作物生产中相对粗放的管理措施已经引发了土壤硝态氮高量残留等环境问题^[3]。因此, 如何采取有效措施培肥土壤、蓄水保墒, 进而提高旱地玉—麦轮作体系的生产力并实现环境友好生产具有重要意义。施肥和秸秆还田是土壤培肥和作物增产增效的有效措施^[4-5]。氮磷钾是作物生长发育的三大必需元素, 但人们对钾肥的研究与应用远不如氮磷肥, 特别是在土壤钾含量较高的旱作区更为突出。有研究^[6]表明, 在晋南旱地, 施钾可使小麦产量显著提高 24.05%, 且以施钾肥 75 kg/hm² 时效果最优。在可以灌溉的冬小麦—夏玉米轮作区, 在施用氮磷肥条件下长期不施钾已经造成土壤缺钾^[7], 每 16 年应补充钾肥 150~225 kg/hm²^[8]。亦有研究^[9]表明, 施钾可显著提高土壤速效钾含量, 但增产效果甚微, 其原因主要是水分不足。秸秆富含钾素, 将秸秆还田既可替代施钾补充土壤钾素^[10], 又可蓄水保墒, 充分发挥培肥、保水、增产、增效的作用。如在重庆北碚区使土壤综合肥力指数增加 11.60%, 增产 4.15%^[11]; 在北京大兴使夏玉米产量、水分利用效率和肥料偏生产力分别增加 8.11%~16.60%, 14.21%~29.89% 和 5.79%~16.80%^[12]; 在青海半量秸秆还田即可替代钾肥保持春小麦产量和品质^[13], 这些结果说明秸秆还田具有

替代施钾的作用。秸秆还田对土壤硝态氮的影响效应尚无定论, 在陕西杨凌^[14] 和河南洛阳^[15] 可显著降低土壤硝态氮深层累积量, 但在陕西周至却会使土壤硝态氮残留增加^[16]。然而, 前人有关施钾和秸秆还田的研究主要以旱地玉米或旱地小麦单作以及灌区麦—玉轮作体系为对象展开, 有关施钾和秸秆还田替代施钾影响作物生产和土壤硝态氮的研究较少, 特别是对旱地玉—麦轮作区作物产量、效率和土壤硝态氮的影响效应尚未见报道。因此, 本研究利用中国科学院洛阳旱农试验基地始于 2007 年的长期定位试验, 研究不施肥(CK)、施氮磷肥(NP)、施氮磷钾肥(NPK)、施氮磷肥+秸秆还田(NPS)对旱地夏玉米—冬小麦产量、水肥利用效率、土壤养分和硝态氮累积量的影响, 以期优化旱地玉—麦轮作区的施肥技术提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地位于黄土高原东南边缘的中国农业科学院洛阳旱农试验基地(34°37'12"N, 112°27'36"E), 海拔 130 m, 属典型的温带半湿润偏旱季风气候, 年均气温 14.6 °C, 平均干旱频率>40%, 干燥度>1.3, 无霜期 200~219 天, 年均降水量 549 mm, 年均蒸发量 1 870 mm。玉—麦轮作为当地主要的种植制度。土壤为黄棕壤土, 试验开始前田间持水量为 27%, 耕层土壤容重为 1.53 g/cm³, pH 为 7.30。0—20 cm 土层中>0.2 mm 的沙粒 302 g/kg, 0.002~0.2 mm 的粉

粒 416 g/kg, <0.002 mm 的黏粒 282 g/kg, 0—20 cm 土层土壤含有有机质 15.80 g/kg, 全氮 0.95 g/kg, 有效磷 10.39 mg/kg, 速效钾 166.0 mg/kg, 土壤阳离子交换量为 19.90 c mol/kg。2015—2020 年, 夏玉米和冬小麦生育期的降水量见图 1。

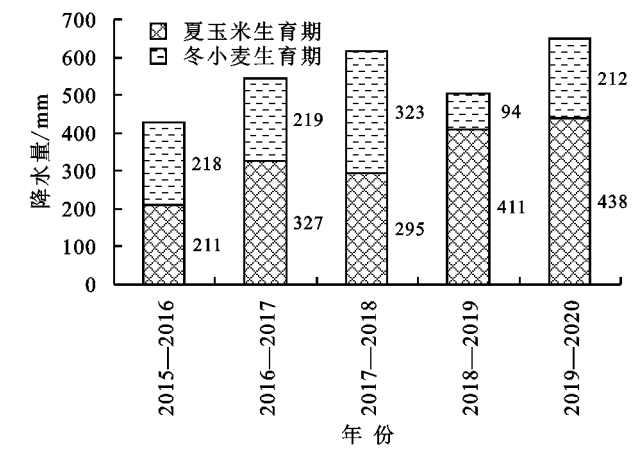


图 1 2015—2020 年夏玉米和冬小麦生育期的降水量

1.2 试验设计

试验始于 2007 年 10 月, 采用随机区组设计, 共 4 个处理, 分别为: (1) CK, 不施用任何肥料, 秸秆不还田; (2) NP, 按照当地农户习惯用量, 玉米季在拔节期遇降水均匀撒施 N 207 kg/hm², 小麦季在翻地前均匀撒施 N 150 kg/hm²、P₂O₅ 120 kg/hm², 秸秆不还田; (3) NPK, 小麦季在施 N 150 kg/hm²、P₂O₅ 120 kg/hm²的基础上根据当地高产田推荐标准施 K₂O 90 kg/hm², 其他管理同 NP; (4) NPS, 施肥管理同 NP, 玉米播种前将 100% 的前茬小麦秸秆覆盖还田, 小麦生长季翻地前将 50% 的前茬玉米秸秆粉碎成 5~10 cm 段, 然后均匀还田并随氮磷肥一起翻入土壤。小区面积 16 m², 3 次重复。所用肥料分别为尿素(含 N 46%)、过磷酸钙(含 P₂O₅ 12%)和氯化钾(含 K₂O 60%)。2015—2020 年, 供试玉米品种为“洛玉 114”, 每年 6 月上旬播种, 9 月下旬收获, 种植密度 45 000 株/hm²; 供试小麦品种为“洛早 7 号”, 每年 10 月上中旬播种, 翌年 5 月下旬或 6 月初收获, 播量为 135 kg/hm²。试验期间未进行任何灌溉, 其他管理同当地丰产田。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 土壤水分 分别在每季作物播种前和收获后的 3~5 天, 利用直径 4 cm 土钻, 从每个小区采集 0—200 cm 土层土样, 每层 20 cm, 取(50±5)g 鲜土, 于 105 ℃烘至恒重并称量, 计算含水量。按照黄明等^[17]描述的方法计算 0—200 cm 土层土壤贮水量和作物生育期耗水量。

$$SWS = W_i \times D_i \times H_i / 10$$
式中: SWS 为土壤贮水量(mm); W_i 为某一土层土壤

含水量(%); D_i 为该土层土壤容重(g/cm³); H_i 为该土层厚度(cm)。

$$ET = P + U - R - F - \Delta SWS$$

式中: ET 为作物生育期耗水量(mm); P 为作物生长期总降雨量(mm); R 为径流量(mm); U 为地下水补给量(mm); F 为深层渗漏量(mm); ΔSWS 为作物播种时 0—200 cm 土层土壤贮水量与作物收获时 0—200 cm 土层土壤贮水量之差(mm)。当地下水埋深大于 2.5 m 时, U 值可以忽略不计, 本试验地地下水埋深 3.5 m, 小麦生育期内无灌水, 故 U、F 和 R 值均为 0。

1.3.2 土壤养分 在 2020 年小麦收获期, 用直径 4 cm 的土钻在每个小区采集 0—60 cm 土层土壤, 每层 20 cm, 每个小区采集 3 个样点, 同层混合均匀后留取 300 g 左右, 迅速装入预先标记好的塑料袋并系紧袋口, 带回实验室自然风干, 并分别研磨过 1.00, 0.15 mm 土筛, 保存, 待测。土壤养分含量参照鲍士旦^[18]的方法测定: 有机质含量采用重铬酸钾外加热法, 全氮含量采用凯氏定氮法, 速效磷含量采用钼锑抗比色法, 速效钾含量采用火焰光度计法。

1.3.3 土壤硝态氮 在 2020 年小麦收获期, 用直径 4 cm 的土钻在每个小区采取 0—260 cm 土层土壤, 0—200 cm 每层 20 cm, 200—260 cm 每层 30 cm, 每层土壤混合均匀后留取 300 g 左右, 迅速装入预先标记好的塑料袋并系紧袋口, 带回实验室称取 5.00 g 鲜土, 用 50 mL 1 mol/L KCl 溶液振荡浸提 1 h, 用 AA3 连续流动分析仪(SEAL 公司, 德国)测定土壤硝态氮含量(以干重计)。土壤硝态氮累积量用黄明等^[15]描述的方法计算。

$$NA = C_i \times H_i \times D_i \times 10 / 100$$

式中: NA 为土壤硝态氮累积量(kg/hm²); C_i 为某一土层硝态氮含量(mg/kg); H_i 为该土层厚度(cm); D_i 为该土层土壤容重(g/cm³)。

1.3.4 作物产量 在每季作物的收获期, 人工全区收获并脱粒称重, 然后换算成单位面积产量。

1.3.5 水肥利用效率 水分利用效率^[19]:

$$WUE = Y / ET$$

肥料农学效率^[19]:

$$AE_N = (Y_N - Y_0) / F_N$$

$$AE_P = (Y_P - Y_0) / F_P$$

式中: WUE 为水分利用效率[kg/(hm²·mm)]; Y 为籽粒产量(kg/hm²); ET 为全生育期作物耗水量(mm); AE_N 和 AE_P 为氮、磷肥农学效率(kg/kg); Y_N 和 Y_P 为施氮和施磷区产量(kg/hm²); Y_0 为不施肥区产量(kg/hm²); F_N 和 F_P 分别为施氮和施磷量(kg/hm²)。

1.4 数据处理

采用 Microsoft Excel 2019 和 SPSS 25 软件处理

数据和绘图,用 LSD 法进行显著性检验。

2 结果与分析

2.1 不同处理对旱地玉—麦轮作体系小麦收获期土壤养分的影响

由表 1 可知,与 CK 相比,除 NPK 的 20—40 cm 土层土壤全氮含量和各处理 40—60 cm 土层土壤全氮含量无显著差异外,3 个施肥处理各土层的土壤有机质、全氮、速效磷和速效钾含量均显著提高。与 NP 相比,NPK 显著提高了各土层土壤速效钾含量,NPS 显著提高了 0—20 cm 土层土壤有机质、全氮和速效钾含量,以及 40—60 cm 土层土壤速效磷和速效钾含量。与 NPK 相比,NPS 的 0—20 cm 土层土壤有机质含量和 40—60 cm 土层土壤速效磷含量分别显著提高 10.68%和 24.96%,但 0—20 cm 土层土壤速效磷含量和 0—20,20—40,40—60 cm 土层土壤速效钾含量分别显著降低 7.43%,17.54%,15.15%和 6.52%。说明采用秸秆还田的方式替代施钾可提高土壤全氮和有机质含量,但会降低土壤速效钾和表层土壤速效磷含量。

表 1 不同处理对 2020 年小麦收获期土壤养分的影响					
土层 深度/cm	处理	有机质/ (g·kg ⁻¹)	全氮/ (g·kg ⁻¹)	速效磷/ (mg·kg ⁻¹)	速效钾/ (mg·kg ⁻¹)
0—20	CK	12.76c	0.71c	3.87d	164.24d
	NP	21.23b	0.94b	11.01ab	233.62c
	NPK	21.55b	0.97ab	11.61a	331.57a
	NPS	23.85a	1.03a	10.75b	273.41b
	CK	8.94b	0.54b	2.01b	125.92c
20—40	NP	19.12a	0.61a	6.85a	174.47b
	NPK	18.17a	0.59ab	7.05a	212.91a
	NPS	18.72a	0.63a	7.15a	180.66b
	CK	5.66b	0.43a	1.30c	99.04d
40—60	NP	15.97a	0.52a	4.45b	131.92c
	NPK	15.85a	0.50a	4.39b	160.36a
	NPS	15.61a	0.48a	5.49a	149.90b
	处理	400.169**	21.394**	722.090**	106.013**
F 值	土层	240.834**	299.404**	1050.660**	251.334**
	处理×土层	3.316*	5.943**	37.345**	10.193**

注:同列不同小写字母表示不同处理间差异显著($p<0.05$);* 和 ** 分别表示在 $p<0.05$ 和 $p<0.01$ 水平显著。下同。

2.2 不同处理对旱地玉—麦轮作体系作物产量的影响

由表 2 可知,与 CK 相比,NP、NPK 和 NPS 夏玉米、冬小麦和周年的产量多数年份表现为显著增加,5 年均值都表现为显著增加,说明施肥可显著提高旱地玉—麦轮作体系的产量,但影响效应因年份和作物而异。对于夏玉米而言,与 NP 相比,NPK 的产量连续 5 年均无显著变化,而 NPS 除 2018 年外均表现为显著增产,增幅为 19.29%~215.25%;与 NPK 相比,

NPS 的产量除 2018 年外均显著提高,增幅为 16.03%~154.70%,5 年平均增产 20.91%。对于冬小麦而言,与 NP 相比,NPK 的产量在 2015—2016 年和 2016—2017 年无显著变化,在 2017—2018 年和 2018—2019 年分别显著降低 10.25%和 27.09%,在 2019—2020 年显著增加 7.00%,而 NPS 较 NP 连续 5 年均无显著差异;与 NPK 相比,NPS 的产量在 2015—2016 年和 2017—2018 年分别显著增加 9.20%和 11.93%,但 5 年平均产量的增幅并不显著。从周年产量来看,与 NP 相比,NPK 除在 2018—2019 年显著降低 9.46%外无显著差异,而 NPS 在 2015—2016 年、2017—2018 年和 2019—2020 年分别显著提高 20.83%,17.13%和 12.77%,5 年平均增产 9.99%;与 NPK 相比,NPS 除 2018—2019 年外均显著增加,5 年平均增产 13.60%。可见,施钾对玉—麦轮作体系的产量的调控效应不稳定,用秸秆还田替代施钾可有效提高作物产量,但其作用主要发生在玉米季。

表 2 不同处理对旱地玉—麦轮作体系作物产量的影响
单位:kg/hm²

年份	处理	夏玉米	冬小麦	周年
2015—2016(2015)	CK	4161.46ab	3404.69a	7566.15ab
	NP	3473.96b	3316.25ab	6790.21bc
	NPK	3423.61b	3198.54b	6622.15c
	NPS	4711.81a	3492.71a	8204.51a
	CK	3960.94c	2868.75b	6829.69c
2016—2017(2016)	NP	4265.63b	4252.08a	8517.71ab
	NPK	4385.42b	4021.88a	8407.29b
	NPS	5088.54a	4096.88a	9185.42a
2017—2018(2017)	CK	506.25b	3876.75b	4383.00c
	NP	403.13b	4791.50a	5194.63b
	NPK	498.96b	4300.50b	4799.46bc
	NPS	1270.83a	4813.50a	6084.33a
2018—2019(2018)	CK	3735.91b	2108.25c	5844.16c
	NP	6041.82a	3693.00a	9734.82a
	NPK	6121.46a	2692.50b	8813.96b
	NPS	6238.30a	3184.50ab	9422.80ab
2019—2020(2019)	CK	5354.17c	3196.88c	8551.04c
	NP	7423.61b	5591.67b	13015.28b
	NPK	7253.47b	5983.33a	13236.81b
	NPS	8907.99a	5768.75ab	14676.74a
	CK	3543.74c	3091.06b	6634.81c
	NP	4321.63b	4328.90a	8650.53b
	NPK	4336.58b	4039.35a	8375.93b
均值	NPS	5243.49a	4271.27a	9514.76a

注:年份列括号中数字表示玉米生长年份。下同。

2.3 不同处理对旱地玉—麦轮作体系作物水分利用效率的影响

施肥和秸秆还田对旱地玉—麦轮作体系作物水

分利用效率的影响因作物和年份而异(表 3)。对夏玉米水分利用效率而言,与 CK 相比,NP 在 2018 年和 2019 年分别显著提高 62.78%和 51.67%,5 年均值显著提高 22.66%;NPK 在 2015 年和 2016 年显著降低 24.78%和 6.86%,在 2018 年和 2019 年分别显著提高 39.72%和 60.83%,5 年均值提高 15.04%;NPS 在 2016—2019 年均显著提高,增幅为 32.75%~150.10%,5 年平均提高 53.89%。与 NP 相比,NPK 的水分利用效率在 2016 年和 2018 年分别显著降低 10.84%和 14.17%,5 年均值无显著变化;NPS 在 2016 年、2017 年和 2019 年分别显著提高 27.08%,247.53%和 44.89%,5 年均值显著提高 25.47%。与 NPK 相比,NPS 的水分利用效率 5 年均显著提高,增幅为 16.90%~127.05%,5 年平均提高 33.77%。对冬小麦而言,与 CK 相比,NP 的水分利用效率在 2016—2020 年显著提高 21.18%~61.39%;NPK 在 2015—2016 年、2016—2017 年、2019—2020 年分别提高 16.97%,39.66%和 71.71%;NPS 连续 5 年均显著提高,平均增幅为 30.42%。与 NP 相比,NPK 的水分利用效率在 2015—2016 年和 2019—2020 年分别显著提高 18.09%和 7.72%,在 2016—2019 年显著降低 12.94%~17.95%;NPS 在 2015—2016 年显著提高 13.18%,在 2016—2017 年显著降低 15.08%;与 NPK 相比,NPS 的水分利用效率在 2015—2016 年和 2019—2020 年分别显著降低 4.16%和 8.37%,在 2017—2018 年显著提高 14.38%,5 年均值无显著变化。从周年效应来看,与 CK 相比,NP、NPK 和 NPS 的水分利用效率在 2016—2017 年、2018—2019 年和 2019—2020 年均显著提高,2017—2018 年仅 NPS 显著提高,5 年均值分别显著提高 27.83%,22.94%和 39.69%。与 NP 相比,NPK 的水分利用效率在 2016—2017 年和 2018—2019 年分别显著降低 12.08%和 11.66%;NPS 在 2017—2018 年和 2019—2020 年分别显著提高 21.31%和 20.02%,5 年均值显著提高 9.28%。与 NPK 相比,NPS 的水分利用效率在 2016—2017 年、2017—2018 年和 2019—2020 年分别显著提高 18.20%,22.93%和 13.09%,5 年均值显著提高 13.63%。可见,施肥可显著提高旱地玉—麦轮作体系作物水分利用效率,在施氮磷的基础上,施钾并不能提高水分利用效率,但秸秆还田可显著提高作物水分利用效率,且其作用主要表现在玉米季。

2.4 不同处理对旱地玉—麦轮作体系作物肥料农学效率的影响

由表 4 可知,不同处理对旱地玉—麦轮作体系作

物肥料农学效率的影响因作物而异,且对氮磷肥效率的影响规律相同。对夏玉米而言,NPS 连续 5 年的氮肥农学效率均最高,5 年均值较 NPK 显著提高 114.39%,较 NP 显著提高 118.51%,而 NPK 与 NP 之间 5 年均无显著差异。对冬小麦而言,除 2018—2019 年 NPK 和 NPS 较 NP 分别显著降低 63.13%和 32.09%,2015—2016 年 NPS 较 NP 和 NPK 分别显著提高 199.53%和 142.70%外,NP、NPK、NPS 间的氮(磷)肥农学效率无显著差异。不同处理对玉—麦轮作体系周年氮(磷)肥农学效率的影响规律与夏玉米相同,以 NPS 最高,5 年均值较 NPK 高 65.41%,较 NP 高 42.87%。说明在施用氮磷肥的基础上,秸秆还田较施钾能显著提高玉—麦轮作体系中玉米季和周年的肥料农学效率。

表 3 不同处理对旱地玉—麦轮作体系作物水分利用效率的影响

		单位:kg/(hm ² ·mm)		
年份	处理	夏玉米	冬小麦	周年
2015—2016(2015)	CK	16.81a	12.57c	14.60a
	NP	14.83ab	12.45c	13.56a
	NPK	12.65b	14.71a	13.56a
	NPS	15.79a	14.09b	15.02a
2016—2017(2016)	CK	17.50b	11.04c	14.05c
	NP	18.28b	17.82a	18.05a
	NPK	16.30c	15.42b	15.87b
	NPS	23.24a	15.13b	18.76a
2017—2018(2017)	CK	2.08b	10.90b	7.32b
	NP	1.50b	13.21a	8.22b
	NPK	2.29b	11.50b	8.11b
	NPS	5.21a	13.16a	9.97a
2018—2019(2018)	CK	13.47c	7.85c	10.70c
	NP	21.93a	11.76a	16.51a
	NPK	18.82b	9.65bc	14.59b
	NPS	22.00a	9.94ab	15.61ab
2019—2020(2019)	CK	15.96c	10.85c	13.57c
	NP	24.20b	17.29b	20.66b
	NPK	25.67b	18.63a	21.92b
	NPS	35.07a	17.07b	24.79a
均值	CK	13.17c	10.64b	12.05c
	NP	16.15b	14.51a	15.40b
	NPK	15.15b	13.98a	14.81b
	NPS	20.26a	13.88a	16.83a

2.5 不同处理对旱地玉—麦轮作体系土壤硝态氮累积量的影响

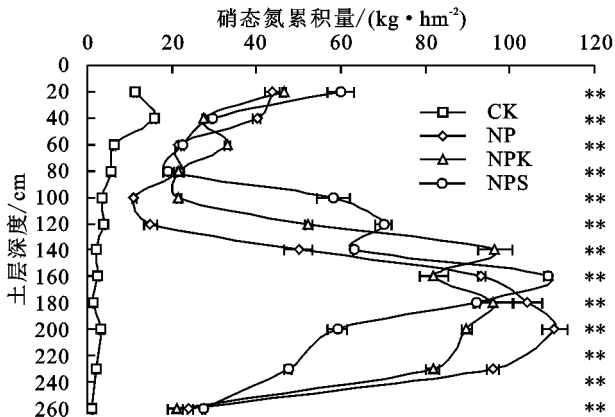
分析 0—260 cm 土层土壤硝态氮累积量(图 2)可知,连续 13 年不施肥(CK)条件下各土层的土壤硝态氮累积量处于较低水平。随着土层的加深,3 个施肥处理 0—260 cm 土层的土壤硝态氮累积量均呈“降—升—降”的变化趋势,总量均超过 630 kg/hm²,且均主

要累积在 140—230 cm 土层中,占总累积量的46.77%~64.01%,以 NPS 占比最低,这主要是因为 200—230 cm 土层表现为 NP>NPK>NPS,处理间差异达到极显著水平。进一步分析发现,NPS 有 28.81%的土壤硝态氮累积在 0—100 cm 土层,较 NP 和 NPK 分别显著提高 37.14%和 25.92%,其中在 0—40 cm 土层分别提高 8.64%和 5.08%,在 40—100 cm 土层分别提

高 83.51%和 31.01%,说明 NPS 能够提高 0—100 cm 土层的土壤硝态氮累积量,这对作物吸收利用土壤氮素有利。在 140—230 cm 土层,NPS 的土壤硝态氮累积量较 NP 和 NPK 分别显著降低 23.82%和 11.98%。说明与施钾相比,秸秆还田使硝态氮富集在上层土壤中,不仅利于作物吸收,而且可在一定程度上阻控硝态氮向深层淋溶。

表 4 不同处理对旱地玉一麦轮作体系作物肥料农学效率的影响 单位:kg/kg

年份	处理	氮肥农学效率			磷肥农学效率	
		夏玉米	冬小麦	周年	冬小麦	周年
2015—2016(2015)	NP	−3.32b	−0.59b	−2.17b	−0.74b	−6.47b
	NPK	−3.56b	−1.37b	−2.64b	−1.72b	−7.87b
	NPS	2.66a	0.59a	1.79a	0.73a	5.32a
2016—2017(2016)	NP	1.47b	9.22a	4.73b	11.53a	14.07b
	NPK	2.05b	7.69a	4.42b	9.61a	13.15b
	NPS	5.45a	8.19a	6.60a	10.23a	19.63a
2017—2018(2017)	NP	−0.50b	6.10a	2.27b	7.62a	6.76b
	NPK	−0.04b	2.83a	1.17b	3.53a	3.47b
	NPS	3.69a	6.25a	4.77a	7.81a	14.18a
2018—2019(2018)	NP	11.14a	10.57a	10.90a	13.21a	32.42a
	NPK	11.52a	3.90b	8.32a	4.87b	24.75a
	NPS	12.09a	7.18b	10.02a	8.97b	29.82a
2019—2020(2019)	NP	10.00b	15.97a	12.50b	19.96a	37.20b
	NPK	9.18b	18.58a	13.13b	23.22a	39.05b
	NPS	17.17a	17.15a	17.16a	21.43a	51.05a
均值	NP	3.76b	8.25a	5.65b	10.32a	16.80b
	NPK	3.83b	6.32a	4.88b	7.90a	14.51b
	NPS	8.21a	7.87a	8.07a	9.84a	24.00a



注: * * 表示在同一土层处理间差异极显著($p<0.01$)。

图 2 不同处理对 2020 年小麦收获期土壤硝态氮累积量的影响

3 讨论

3.1 施肥和秸秆还田对旱地玉一麦轮作体系土壤养分的影响

土壤养分含量是评价土壤肥力可持续性和作物生产稳定性的重要指标,如何提高或维持适宜的土壤

养分含量是提高耕地质量的重要内容。本研究表明,与 CK 相比,NP、NPK、NPS 的土壤有机质、全氮、速效磷和速效钾含量多表现为成倍增加,以土壤有机质和速效磷的增幅最大,说明施肥是提高旱地玉一麦轮作体系土壤养分的有效途径。在施氮磷的基础上,施钾并不能提高土壤有机质和全氮含量,而秸秆还田可显著提高 0—20 cm 土层土壤有机质和全氮含量,主要是因为秸秆中所含的碳水化合物和多种营养元素在还田后可逐步释放到土壤中所致。孙星等^[20]研究表明,秸秆还田后 0—40 cm 土层土壤有机质和全氮含量分别显著提高 9.05%和 10.32%。本研究还表明,NPS 0—20 cm 土层土壤速效磷含量较 NP 和 NPK 分别降低 2.39%和 7.43%,说明本试验条件下秸秆还田会加速土壤磷素的消耗,这与秸秆还田使作物产量增加,籽粒收获从土壤中携出磷素量增加有关,也在一定程度上说明秸秆还田后应该适当增施磷肥,以避免土壤磷素亏缺。有研究^[7]表明,旱地作物生产中不施钾,已经造成土壤钾含量呈降低趋势。在本试验条件下,0—60

cm 土层土壤速效钾含量以 NPK 最高, NPS 次之, NP 最低。说明秸秆还田虽然可提高土壤速效钾含量,是提高农田钾含量的有效措施,但其效应不如施钾,因而从提高土壤速效钾含量的角度考虑,秸秆还田并不能完全替代施钾,在秸秆还田条件下还应适时适量施钾,如在河北曲周小麦—玉米轮作区的研究推荐应该每 16 年补充钾肥 $150\sim 225\text{ kg/hm}^2$ [8]。

3.2 施肥和秸秆还田对旱地玉—麦轮作体系作物产量和水肥利用效率的影响

研究普遍认为,合理的施肥和秸秆管理可提高作物产量和水肥利用效率。化肥和秸秆还田配合可使小麦增产 3.51% [21],且秸秆还田能显著提高玉米产量和水分利用效率 [22]。亦有研究 [23] 表明,秸秆还田会导致小麦减产。本试验条件下,从 5 年效应来看, NPK 较 NP 相比,夏玉米、冬小麦的产量和效率多无显著差异,说明在施氮磷肥的基础上施钾对旱地玉—麦轮作体系的增产增效作用较小。然而,在施氮磷肥的基础上秸秆还田可使轮作体系中夏玉米、周年的产量和水肥利用效率显著提高,这与夏玉米季降雨相对充沛,覆盖还田的小麦秸秆能够有效减少蒸发,保持较高的土壤含水量,从而为玉米生长发育提供相对充足的水分,进而促进夏玉米对水肥的吸收利用,最终提高产量和效率。在冬小麦季, NPS 较 NP 和 NPK 甚至会降低水肥利用效率,其水分利用效率在 2016—2017 年较 NP 降低 15.08% ,在 2015—2016 年和 2019—2020 年较 NPK 降低 4.16% 和 8.37% ;氮(磷)肥农学效率在 2018—2019 年较 NP 降低 32.09% ,说明在施氮磷肥的基础上秸秆还田并不能提高冬小麦的水肥利用效率,这可能是由于小麦生育期长且易发生冬春连旱,秸秆还田蓄水保墒效果被弱化所致。

3.3 施肥和秸秆还田对旱地玉—麦轮作体系土壤硝态氮累积量的影响

硝态氮是最易被旱地作物吸收利用的氮素形态 [13],但其在土壤中的移动性较强,若高量累积会加速含氮温室气体排放、地表水富营养化、地下水硝酸盐含量超标,导致环境污染。旱地土壤硝态氮累积量既受降雨等环境因素的影响,也受施肥、秸秆还田等栽培管理的影响 [15]。当前,不合理的施肥和栽培措施已造成旱地土壤硝态氮高量累积,如北方旱地麦田 0—400 cm 土层的平均硝态氮累积量为 459 kg/hm^2 ,最高达 $1\,880\text{ kg/hm}^2$ [24]。本试验中, NP、NPK 和 NPS 小麦收获后 0—260 cm 土层土壤硝态氮累积量分别为 $631.28, 670.41, 658.15\text{ kg/hm}^2$,且有超过 60% 累积在 100—260 cm 土层,说明施肥在促进作物增产的

同时,已引起深层土壤硝态氮的高量累积,并且已经淋溶至 1 m 以下土层,不利于作物根系吸收,也增加了硝态氮污染地下水的风险。与 NP 和 NPK 相比, NPS 的土壤硝态氮呈现“上层富集、深层降低”的趋势。在黄土旱塬也有秸秆还田后 0—40 cm 土层的土壤硝态氮较单施化肥增加 30.99% 的报道 [25]。说明在玉—麦轮作区,秸秆还田替代施钾既有助于硝态氮在上层土壤中累积,促进作物根系对氮素的吸收利用,也能在一定程度上阻控硝态氮向深层土壤淋溶,减小地下水污染的风险。

4 结论

施肥和秸秆还田可显著调控旱地玉—麦轮作体系的生产力,但对产量和效率的调控效应主要发生在玉米季。与 NP 相比, NPK 可提高土壤速效钾含量,但对产量和效率无显著影响。 NPS 较 NP 显著提高 0—20 cm 土层土壤有机质、全氮和速效钾含量,较 NPK 显著提高 0—20 cm 土层土壤有机质含量和 40—60 cm 土层土壤速效磷含量,较 NP 和 NPK 有利于提高夏玉米以及周年的产量和水肥利用效率,且土壤硝态氮累积量表现为上层增加深层降低,可在一定程度上阻控土壤硝态氮向深层淋溶。从产量、效率和环境友好角度考虑,在旱地玉—麦轮作区,可采用秸秆还田的方式替代施钾。

参考文献:

- [1] 樊志龙,柴强,曹卫东,等.绿肥在我国旱地农业生态系统中的服务功能及其应用[J].应用生态学报,2020,31(4):1389-1402.
- [2] 彭小瑜,吴喜慧,吴发启,等.陕西关中地区冬小麦—夏玉米轮作系统生命周期评价[J].农业环境科学学报,2015,34(4):809-816.
- [3] 山立,邹宇锋.我国旱区农业的地位和发展潜力及政策建议[J].农业现代化研究,2013,34(4):425-430.
- [4] 李廷亮,王宇峰,王嘉豪,等.我国主要粮食作物秸秆还田养分资源量及其对小麦化肥减施的启示[J].中国农业科学,2020,53(23):4835-4854.
- [5] 金欣,姚珊,Batbayar J,等.冬小麦—夏休闲体系作物产量和土壤磷形态对长期施肥的响应[J].植物营养与肥料学报,2018,24(6):1660-1671.
- [6] 李廷亮,洪坚平,谢英荷,等.施钾量对晋南旱地冬小麦的影响[J].灌溉排水学报,2013,32(2):37-40.
- [7] 魏建林,崔荣宗,江丽华,等.潮土区小麦—玉米轮作周年秸秆还田及施钾效应研究[J].山东农业科学,2018,50(9):61-65.
- [8] Li J Y, Niu L A, Zhang Q C, et al. Impacts of long-term lack of potassium fertilization on different forms of soil potas-

- sium and crop yields on the North China Plains [J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2017, 17(6):1607-1617.
- [9] 刘强, 穆兴民, 王新民, 等. 长期不同施肥方式对旱地轮作土壤养分和作物产量的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2021, 39(3):122-128.
- [10] 贾良良, 韩宝文, 刘孟朝, 等. 河北省潮土长期定位施钾和秸秆还田对农田土壤钾素状况的影响[J]. *华北农学报*, 2014, 29(5):207-212.
- [11] 陈轩敬, 赵亚南, 柴冠群, 等. 长期不同施肥下紫色土综合肥力演变及作物产量响应[J]. *农业工程学报*, 2016, 32(增刊 1):139-144.
- [12] 张婉晴, 王秀茹, 周杨. 滴灌条件下秸秆覆盖与施肥对夏玉米水肥利用效率的影响[J]. *水土保持学报*, 2016, 30(6):139-146.
- [13] 张亚丽, 吕家珑, 金继运, 等. 施肥和秸秆还田对土壤肥力质量及春小麦品质的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2012, 18(2):307-314.
- [14] Meng X P, Guo Z Y, Yang X N, et al. Straw incorporation helps inhibit nitrogen leaching in maize season to increase yield and efficiency in the Loess Plateau of China[J]. *Soil and Tillage Research*, 2021, 211:e105006.
- [15] 黄明, 吴金芝, 李友军, 等. 耕作方式和秸秆覆盖对旱地麦豆轮作下小麦籽粒产量、蛋白质含量和土壤硝态氮残留的影响[J]. *草业学报*, 2018, 27(9):34-44.
- [16] 李亚鑫, 张娟霞, 刘伟刚, 等. 玉米秸秆还田配施氮肥对冬小麦产量和土壤硝态氮的影响[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2018, 46(7):38-44.
- [17] 黄明, 王朝辉, 罗来超, 等. 膜侧施肥对旱地小麦产量、籽粒蛋白质含量和水分利用效率的影响[J]. *作物学报*, 2017, 43(6):899-911.
- [18] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [19] 张建军, 党翼, 赵刚, 等. 控释氮肥全量基施对旱地玉米产量形成和水肥利用效率的影响[J]. *水土保持学报*, 2021, 35(2):170-177.
- [20] 孙星, 刘勤, 王德建, 等. 长期秸秆还田对剖面土壤肥力质量的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2008, 16(3):587-592.
- [21] 房静静, 丁维婷, 武雪萍, 等. 长期秸秆配施化肥对土壤养分及小麦产量、品质的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2020(5):141-146.
- [22] 张丽华, 徐晨, 于江, 等. 半湿润区秸秆还田对土壤水分、温度及玉米产量的影响[J]. *水土保持学报*, 2021, 35(4):299-306.
- [23] 陈素英, 张喜英, 孙宏勇, 等. 华北平原秸秆覆盖冬小麦减产原因分析[J]. *中国生态农业学报*, 2013, 21(5):519-525.
- [24] Zhou J Y, Gu B J, Schlesinger W H, et al. Significant accumulation of nitrate in Chinese semi-humid croplands[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6(1):e25088.
- [25] 王淑英, 樊廷录, 丁宁平, 等. 长期施肥下黄土旱塬黑垆土供氮能力的变化[J]. *植物营养与肥料学报*, 2015, 21(6):1487-1495.
- (上接第 310 页)
- [24] Sheng H, Zhou P, Zhang Y Z, et al. Loss of labile organic carbon from subsoil due to land-use changes in subtropical China[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2015, 88:148-157.
- [25] 季波, 何建龙, 吴旭东, 等. 宁夏典型天然草地土壤有机碳及其活性组分变化特征[J]. *草业学报*, 2021, 30(1):24-35.
- [26] 张丽华, 崔东, 杨海军, 等. 海拔对伊犁河谷草原苦豆子种群土壤活性有机碳特征的影响[J]. *草地学报*, 2020, 28(1):200-206.
- [27] 殷有, 刘源跃, 井艳丽, 等. 辽东山区 3 种典型林型土壤有机碳及其组分含量[J]. *生态学杂志*, 2018, 37(7):2100-2106.
- [28] 王文颖, 王启基, 鲁子豫. 高寒草甸土壤组分碳氮含量及草甸退化对组分碳氮的影响[J]. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2009, 39(5):647-654.
- [29] 闫丽娟, 李广, 吴江琪, 等. 黄土高原 4 种典型植被对土壤活性有机碳及土壤碳库的影响[J]. *生态学报*, 2019, 39(15):1-9.
- [30] 白义鑫, 盛茂银, 肖海龙, 等. 典型石漠化治理措施对土壤有机碳、氮及组分的影响[J]. *水土保持学报*, 2020, 34(1):170-177.
- [31] 徐广平, 李艳琼, 沈育伊, 等. 桂林会仙喀斯特湿地水位梯度下不同植物群落土壤有机碳及其组分特征[J]. *环境科学*, 2019, 40(3):1491-1503.
- [32] 李涛, 于蕾, 万广华, 等. 近 30 年山东省耕地土壤 pH 时空变化特征及影响因素[J]. *土壤学报*, 2021, 58(1):180-190.