

有机无机肥配施对连作高粱产量、养分利用及土壤理化性状的影响

梁晓红,曹雄,黄敏佳,张瑞栋,刘静,南怀林,王颂宇

(山西农业大学经济作物研究所,山西太原030031)

摘要:以‘汾酒梁1号’酿造高粱为供试作物,于2018—2021年开展田间定位试验,设置不施肥(CK)、单施化肥(NPK)、农家肥羊粪(S)、商品有机肥(C)、S+NPK(SNPK)、C+NPK(CNPK)共6个处理,分析不同施肥处理对连作高粱产量、氮磷钾累积量以及土壤容重、pH值、土壤全氮、有机质、有效磷、速效钾含量的影响。结果表明:连作4年NPK、S、SNPK处理的高粱产量较不施肥处理显著提高4.45%~33.60%;随着连作年限的增加,施用农家肥处理的增产效应逐渐明显,连作第4年S处理的高粱产量较其他施肥处理显著增产6.47%~28.69%。S和SNPK处理的产量变异系数较NPK处理显著降低10.64%和6.38%,可持续性指数值分别提高2.53%和1.27%,表明S和SNPK处理具有较好的稳产性和可持续性。连作第4年S和SNPK处理较NPK处理地上部氮累积量、钾累积量分别提高8.36%、3.31%和3.48%、21.45%,磷的累积量无明显差异,仅分别增加2.22%和0.70%。与NPK处理相比,连作第4年S和SNPK处理的0~20、20~40 cm土层容重分别下降3.78%、4.55%和7.29%、4.31%;SNPK处理明显降低0~40 cm土层土壤pH值;0~20 cm土层土壤有机质和有效磷含量在SNPK处理下分别增加22.18%~36.71%和9.07%~25.62%;20~40 cm土层土壤有机质和有效磷含量在S处理下分别增加15.00%~22.37%和41.08%~43.91%。然而连作第4年各施肥处理高粱产量、氮磷累积量出现明显下降,其中产量降低15.57%~32.76%,氮累积量下降12.89%~27.90%,磷累积量下降5.89%~25.82%。综上所述,施用农家肥或农家肥配施无机肥有利于本地区连作高粱的产量稳产和土壤肥力的改善,但以连作年限在3年内为佳。农家肥配施无机肥有利于提高0~20 cm耕层土壤的肥力水平和连作2年内高粱的产量,施用农家肥处理更有利于提高20~40 cm土层土壤肥力水平和连作3年以上的高粱产量。

关键词:高粱;有机无机肥配施;连作;产量;养分利用;土壤理化性状

中图分类号:S514; S365; S151.9 **文献标志码:**A

Effects of combined application of organic and inorganic fertilizers on yield, nutrient utilization, and soil physicochemical properties in continuous cropping of sorghum

LIANG Xiaohong, CAO Xiong, HUANG Minjia, ZHANG Ruidong, LIU Jing, NAN Huailin, WANG Songyu
(Institute of Economic Crops, Shanxi Academy of Agricultural Sciences, Taiyuan, Shanxi 030031, China)

Abstract: Taking brewing sorghum ‘Fenjiuliang No. 1’ as the test material, field experiments were carried out from 2018 to 2021. Six treatments were established: no fertilizer (CK), chemical fertilizer (NPK), farmyard manure (S), commercial organic manure (C), a combination of farmyard manure and NPK (SNPK), and a combination of commercial organic manure and NPK (CNPK). The yield, nitrogen, phosphorus and potassium accumulation in continuous sorghum were obtained together with soil bulk density (BD), pH value, organic matter content (OC), total nitrogen content (TN), available phosphorus (AP) and potassium content (AK) content of the soil. The results showed increases of 4.45% to 33.60% in the sorghum yield over continuous cropping for four years under treatments with NPK, S, and SNPK as compared to unfertilized crops. The yield increasing effect of the S treatment increased as continuous cropping continued, with a significant increase of 6.47% to 28.69% observed in

收稿日期:2024-03-27

修回日期:2024-08-03

基金项目:财政部和农业农村部国家现代农业(谷子高粱)产业技术体系(CARS-06-14.5-B10);山西省现代农业杂粮产业技术体系(CYJSTX03-17);吕梁市校地合作重点研发专项(2023XDHZ07)

作者简介:梁晓红(1982-),女,山西柳林人,副研究员,主要从事高粱水肥高效利用研究。E-mail:lxh19821212@163.com

通信作者:曹雄(1969-),男,山西石楼人,研究员,主要从事高粱育种及栽培技术研究。E-mail:cxxp1969@163.com

the fourth year as compared to the other fertilizer treatments. Compared to NPK, significant reductions of 10.64% and 6.38% were observed in the coefficient of yield variation values of the S and SNPK treatments, respectively, while increases of 2.53% and 1.27% in the yield sustainability index values indicated improved stability and higher sustainability. Nitrogen accumulation was 8.36% and 3.31% higher under S and SNPK treatments, respectively, as compared to NPK, along with respective fourth year increases of 3.48% and 21.45% for potassium accumulation and only 2.22% and 0.70% for phosphorus accumulation. S and SNPK treatments also led to BD decreases of 3.78% and 4.55% in the 0~20 cm and 7.29% and 4.31% in the 20~40 cm soil layers, respectively, as compared to NPK treatment. SNPK significantly and steadily reduced the pH value in the 0~40 cm soil layer and led to a significant increase of 22.18% to 36.71% in soil OC and 9.07% to 25.62% in soil AP for the 0~20 cm soil layer as compared to NPK, while S increased the soil OC by 15.00% to 22.37% and soil AP by 41.08% to 43.91% in the 20~40 cm soil layer. However, significant decreases were observed in terms of yield and nitrogen and phosphorus accumulation under fertilizer application treatments in the fourth year of continuous cropping, with yield decreasing by 15.57% to 32.76%, nitrogen accumulation decreasing by 12.89% to 27.90%, and phosphorus accumulation decreasing by 5.89% to 25.82%. The results indicated that applying farmyard manure and farmyard manure combined with chemical fertilizer could stabilize the yield and maintain the soil fertility level; however, continuous cropping should be continued for only three years. The application of farmyard manure combined with chemical fertilizer (SNPK) is likely beneficial for improving the fertility level in the 0~20 cm soil layer and the sorghum yield over two years, while farmyard manure (S) is beneficial for improving the fertility level in the 20~40 cm soil layer and the sorghum yield over three years of continuous cropping.

Keywords: sorghum; combined application of organic and inorganic fertilizers; continuous cropping; yield; nutrient utilization; soil physicochemical property

化肥对农作物的增产效应毋庸置疑,对我国粮食产量的贡献率达到 40.8%^[1],但长期过量施用化肥面临肥料效率下降、土壤严重污染等问题,从而引发土壤质量退化,对作物的高产稳产构成威胁^[2-3]。针对上述问题,2015 年农业农村部提出“到 2020 年化肥农药使用量零增长行动”,实施化肥减量增效。为实现化肥减量增效、改善土壤质量,有机肥因其养分特性及营养作用被认为可以替代部分化肥来实现此目标^[4-5]。因此,有机无机肥配施对水稻、小麦、玉米等大田作物的产量、品质及土壤肥力的影响成为研究热点。诸多研究表明,有机肥替代比例在 25%~60%时可提高水稻干物质积累和产量^[6-8],在一定比例的有机无机配施下水稻的氮肥利用率可达 36%左右^[9]。通过 20%有机肥替代氮肥,小麦的穗粒数和产量得到了显著提高,同时小麦对氮素的吸收利用也得以增加^[10];有机无机肥配施同时能显著提高麦田 0~20 cm 土层的土壤养分有效性及土壤酶活性,提升小麦综合品质^[4,11]。有机无机肥配施可使不同区域的玉米产量提高 4%~10.3%^[12]。高洪军等^[13]研究证实,农家肥无机肥配施较单施化肥可显著增加玉米成熟期的植株氮素总累积量 3.62%。

有机无机肥配施已被证实可有效改善土壤肥力及土壤质量、促进作物养分吸收^[4-5,7-9,12],而作物连作障碍发生的根本原因在于连作导致土壤养分失衡、土壤理化性状恶化、土传病虫害加重、土壤微生物群落结构改变等问题^[14],通过施用有机肥及有机无机肥配施缓解连作障碍在多种连作作物中已有报道^[15-18]。危峰等^[15]研究指出与单施化肥相比,长期单施有机肥、有机无机肥配施显著提高了连作多年小麦 0~20 cm 土层的土壤有机质、全氮、速效磷和速效钾含量。农家肥鸡粪能够有效缓解大豆因连作障碍导致的产量降低等问题,较单施化肥提高了连作大豆土壤中碱解氮、速效钾、有机质含量^[16]。配施 20%有机肥氮的玉米产量较单施化肥处理显著增加 10.5%^[17]。徐赛等^[18]研究发现 40%有机肥+60%化肥配施处理使连作番茄土壤 pH 值维持在 7.19~7.22,有机质和速效钾含量维持在中等水平(分别为 49.70~59.21 g·kg⁻¹和 536.1~605.5 mg·kg⁻¹),有效磷维持在高水平(680.4~783.0 mg·kg⁻¹)。高粱属于不宜连作作物^[19],在高粱种植生产实践中,由于标准化、产业化的推进,高粱主产区大面积种植单一作物导致出现连作障碍。连作会阻碍高粱生长,土壤环境恶化,病虫害加重,产量

和品质下降,前人研究发现高粱连作三茬较第二年产量显著降低 32.27%^[19]。目前关注轮作对连作高粱产量、微生物群落结构及农艺性状影响的研究较多,而关于施肥对酿造高粱连作障碍影响的研究较少。因此,本研究以酿造高粱‘汾酒梁1号’为研究对象,通过连续4 a田间定位试验,分析单施化肥、施用有机肥、有机无机肥配施对连作酿造高粱产量、养分吸收及土壤理化性状的影响,以期为当地酿造高粱实现化肥减量增效、改善土壤质量提供技术支撑。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

于2018—2021年在山西省吕梁地区汾阳市山西农业大学经济作物研究所高粱试验基地(111.47°E,37.15°N,海拔747.7 m)开展田间试验,试验区气候类型为典型的温带大陆性气候,年均降雨量424.7 mm,年平均气温10.9℃,年日照时数2353.5 h,一年一熟制。供试土壤为砂壤土,试验开始前耕层土壤(0~20 cm土层)全氮含量为1.07 g·kg⁻¹、有机质22.10 g·kg⁻¹、pH值8.78、有效磷27.06 mg·kg⁻¹、速效钾111.60 g·kg⁻¹;20~40 cm土层的土壤全氮含量为1.30 g·kg⁻¹、有机质18.41 g·kg⁻¹、pH值8.71、有效磷23.89 mg·kg⁻¹、速效钾122.50 mg·kg⁻¹。

1.2 试验设计

试验采用随机区组设计,供试酿造高粱品种为‘汾酒梁1号’。试验设置6个处理:(1)不施肥(CK);(2)单施化肥(NPK,N:225 kg·hm⁻²;P₂O₅:75 kg·hm⁻²;K₂O:75 kg·hm⁻²);(3)农家肥羊粪(S,3×10⁴ kg·hm⁻²);(4)商品有机肥(C,600 kg·hm⁻²);(5)S+NPK(SNPK,NPK用量比单施化肥处理减施20%+羊粪6×10³ kg·hm⁻²);(6)C+NPK(CNPK,NPK用量比单施化肥处理减施20%+商品有机肥120 kg·hm⁻²)。单施化肥处理为本地高粱种植的常见施肥方式,农家肥和商品肥用量按当地施肥习惯(有机无机配施按无机肥占比20%,有机肥占比80%)进行配比。所有处理重复3次,南北向种植,小区面积30 m²(5 m×6 m)。有机肥处理总施肥量与常规施肥处理一致,有机肥施用量以施氮量为基准进行计算,磷肥和钾肥施用量根据有机肥中磷和钾含量计算施入。

试验中所用氮肥为长效尿素(N:46%),磷肥为过磷酸钙(P₂O₅:12%),钾肥为硫酸钾(K₂O:45%);

农家肥为腐熟羊粪,其全氮含量5.85 g·kg⁻¹,有机质353.20 g·kg⁻¹,pH值8.01,有效磷含量333.40 mg·kg⁻¹,速效钾含量976.45 mg·kg⁻¹;商品有机肥为山西施能富生物科技有限公司生产,氮磷钾含量≥5%,有机质含量≥45%。各处理肥料结合春季旋耕作基肥一次性施入,2018年、2019年、2020年、2021年分别于5月5日、5月6日、5月4日、5月7日播种,行距50 cm,种植密度150 000株·hm⁻²,分别于9月27日、9月27日、9月25日、9月28日收获。4 a大田试验中施肥旋耕前灌溉一次,足墒播种,生育期间未灌溉,其他正常田间管理。

1.3 样品采集与测定

1.3.1 植株样品 每个小区在高粱成熟期进行实收测产,产量按标准含水量14%进行折算。在每个小区选取有代表性的5株高粱进行室内考种,对穗长、穗粒重、千粒重进行测量;植株干物质量的测定在烘干后进行,并将秸秆、籽粒粉碎后保存,测定其氮、磷、钾含量。用H₂SO₄-H₂O₂对植物样品进行消煮,火焰光度法测定钾含量,钼锑抗比色法测定磷含量,凯氏定氮法测定氮含量^[20],并计算植株各器官的养分累积量。

$$\text{植株氮磷钾养分累积量} = Y_g \times N_g + Y_s \times N_s \quad (1)$$

式中, Y_g 为籽粒产量(kg·hm⁻²); N_g 为籽粒氮磷钾养分含量(%); Y_s 为秸秆产量(kg·hm⁻²); N_s 为秸秆氮磷钾养分含量(%)。

$$\text{产量可持续性指数}(SYI)^{[21]} = (\bar{y} - \sigma_{(n-1)}) / Y_{\max} \quad (2)$$

式中, \bar{y} 为平均产量(kg·hm⁻²); $\sigma_{(n-1)}$ 为标准差(kg·hm⁻²); Y_{\max} 为该试验点的最高产量(kg·hm⁻²)。

作物产量稳定性以统计学上的变异系数(CV)表示:

$$CV^{[22]} = \sigma / \bar{y} \quad (3)$$

式中, σ 为标准差(kg·hm⁻²); \bar{y} 为平均产量(kg·hm⁻²)。

1.3.2 土壤样品 在高粱收获后,在0~20 cm和20~40 cm土层采用五点交叉取样法取土,混匀并剔除杂质后,通过四分法保留1 kg土壤样品,进行风干、研磨、过筛。使用pH计测定土壤样品pH值,凯氏定氮法测定全氮含量,重铬酸钾容量法-外加加热法测定有机质含量,碳酸氢钠浸提-钼锑抗比色法测定有效磷含量,速效钾通过乙酸铵浸提-火焰光度法测定^[20],环刀法测定土壤容重(0~20、20~40 cm土层)。

1.4 数据处理及统计分析

采用 Microsoft Excel 2007、R 语言 ggplot 包和 SPSS 24.0 进行相关数据的计算、统计分析和作图；使用 Duncan 新复极差法进行多重比较 ($P < 0.05$)。

2 结果与分析

2.1 不同有机无机肥配施对高粱产量的影响

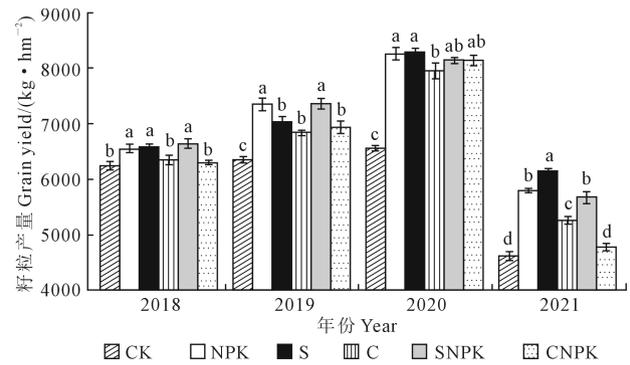
2.1.1 不同有机无机肥配施对高粱产量及构成因素的影响 高粱产量构成因素如表 1 所示,除 2018 年 SNPK 处理的千粒重显著高于 CK 处理外,不同处理间高粱的千粒重差异均不显著。不同施肥处理对高粱穗粒重的影响显著,4 a 试验间 NPK、S、SNPK 处理的穗粒重差异不显著,且均显著高于 CK;连作第 4 年 S、SNPK 处理的穗粒重较 NPK 处理分别提高 17.02% 和 0.61%。随着连作年限的增加,各处理高粱的穗粒重整体呈先升高后下降趋势,并在连作第 4 年明显降低。与连作前 3 年各对应处理的高粱平均穗粒重相比,各处理连作第 4 年高粱穗粒重下降 27.11%~48.79%,CK 处理下降幅度最大、NPK 和 SNPK 处理次之、S 处理下降幅度最小。

4 年间各施肥处理的高粱产量均高于不施肥处理。与 C、CNPK 处理相比,NPK、S、SNPK 处理的高粱产量在 2018 和 2021 年显著提高,NPK、SNPK 处理的高粱产量在 2019 年显著提高。2020 年 NPK、S 处理的高粱产量显著高于 C 处理,高于 SNPK 和 CNPK 处理(图 1)。与 CK 相比,种植第 1 年 NPK、S、SNPK 处理高粱产量分别显著提高 4.45%、5.28%、6.18%,各处理以 SNPK 处理的产量最高,为 6 647 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$;连作第 2 年 NPK、S、SNPK 处理产量分别显著提高 15.80%、10.76%、16.08%,SNPK 处理产量最高,为 7 381 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$;连作第 3 年 NPK、S、SNPK 处理产量显著提高 25.88%、26.42%、分别

24.02%,其中 S 处理的产量最高,为 8 304 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$;连作第 4 年,S 处理的高粱产量表现为最高,显著高于其余各处理,其中较 CK 产量显著提高 33.60%,比其他施肥处理显著增产 6.47%~28.69%。

不同处理的高粱产量随着连作年限的增加呈先升高后下降趋势,表现为连作第 3 年产量最高,连作第 4 年产量显著下降。与前两年各对应处理的平均产量相比,连作第 3 年 CK、NPK、S、C、SNPK、NPK 处理的高粱产量分别提高 4.11%、18.96%、21.82%、20.55%、16.15%、22.93%。与前 3 年各对应处理的平均产量相比,连作第 4 年 CK、NPK、S、C、SNPK、CNPK 处理的高粱产量分别降低 27.74%、21.53%、15.57%、25.46%、22.80%、32.76%;其中,S 处理降低幅度最低,其次是 NPK 和 SNPK 处理。

2.1.2 不同施肥处理高粱产量的稳定性和可持续性 与 CK 处理相比,各不同施肥处理均显著提高连作 4 a 高粱的平均产量,NPK、S、C、SNPK、CNPK 处理连作 4 a 高粱的平均产量比 CK 处理分别提高



注:不同小写字母表示相同年份处理间在 $P < 0.05$ 水平上差异显著。

Note: Different lowercase letters indicate significant differences between treatments at the $P < 0.05$ level in the same year.

图 1 不同年份各处理高粱籽粒产量

Fig.1 Sorghum yield of different treatments during 2018–2021

表 1 不同有机无机肥配施对高粱产量构成因素的影响

Table 1 Effects of different organic manures application combined with chemical fertilizer on yield compositions of sorghum

处理 Treatment	穗粒重 Spike weight/g				千粒重 1000-grain weight/g			
	2018	2019	2020	2021	2018	2019	2020	2021
CK	62.75±2.75c	64.59±6.57b	62.71±5.88b	32.44±3.23c	20.76±0.87b	25.11±2.62a	23.40±1.06a	22.58±1.55a
NPK	69.83±2.57ab	74.68±4.64a	79.54±9.63a	45.76±5.82ab	21.61±1.60ab	25.10±3.99a	26.25±0.27a	25.78±4.79a
S	68.83±2.02b	74.48±2.54a	77.10±0.37a	53.55±0.09a	22.30±0.77ab	24.20±1.56a	26.89±1.21a	22.30±2.91a
C	69.50±2.65ab	69.36±6.54ab	72.46±4.76ab	41.10±7.92bc	21.30±1.28ab	24.37±1.08a	26.59±0.97a	21.97±2.73a
SNPK	74.50±3.46a	75.60±3.71a	77.78±4.61a	46.04±3.76ab	23.21±0.78a	25.82±0.50a	26.24±0.94a	23.34±1.08a
CNPK	74.67±1.04a	74.87±1.55a	78.07±1.97ab	39.90±1.00bc	20.70±0.79b	23.86±1.17a	25.36±2.74a	24.79±1.39a

注:表中数据为“均值±标准差”,同列不同小写字母表示相同年份处理间在 $P < 0.05$ 水平差异显著。下同。

Note: The data are “mean ± standard error”. Different lowercase letters in the same year and column indicate significant differences between treatments ($P < 0.05$). The same below.

17.49%、18.08%、11.14%、17.10%、10.06% (表2)。高粱产量的变异系数(CV值)越低表示产量的变异越小,产量越稳定。各施肥处理的CV值均低于CK处理,其中S和SNPK处理的CV值显著低于其他处理;与NPK处理比,S和SNPK处理的CV值分别显著降低10.64%和6.38%。S和SNPK处理的SYI值均高于其他处理,较CK处理分别显著提高47.27%、45.45%,较NPK处理分别提高2.53%、1.27%。

表2 不同施肥处理下高粱产量平均值、变异系数和可持续性指数差异性比较

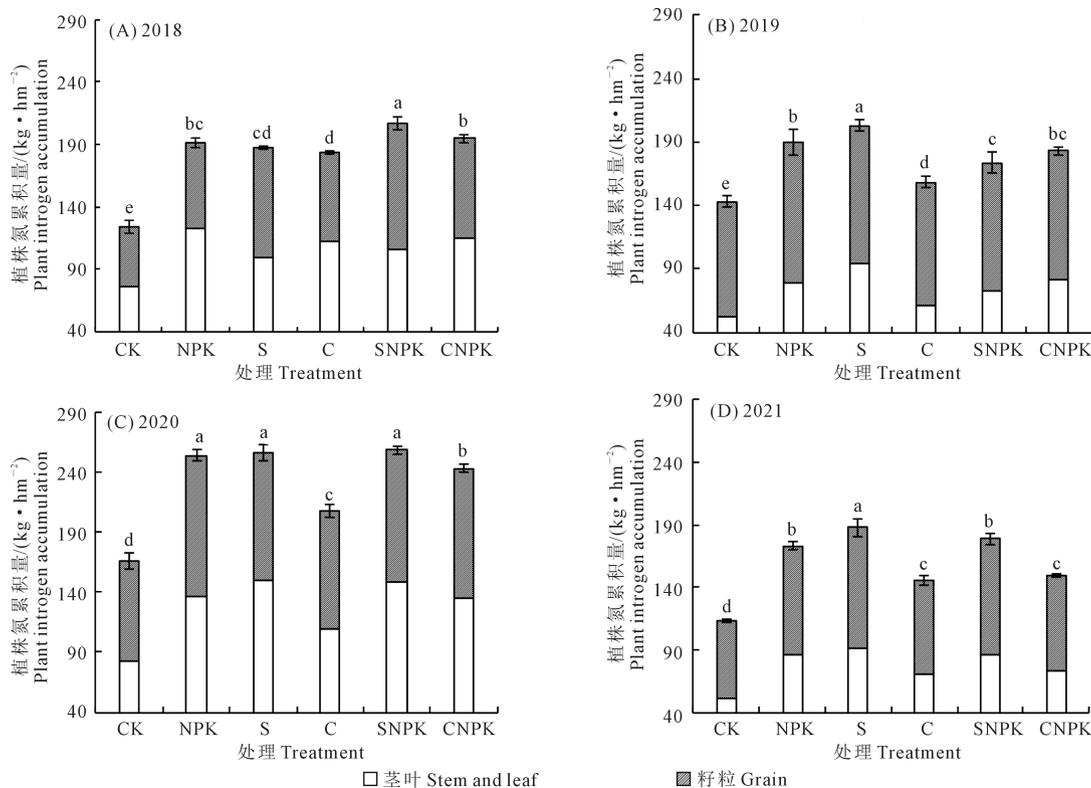
Table 2 Comparison of differences in the average, coefficient of variation and sustainability index of sorghum yield of different fertilization treatments

处理 Treatment	平均产量 Average yield /(kg·hm ⁻²)	变异系数 CV/%	产量可持续性 指数 SYI
CK	5952±896b	6.1±0.3a	0.55±0.02b
NPK	6993±1064a	4.7±0.2a	0.79±0.01a
S	7028±922a	4.2±0.1b	0.81±0.01a
C	6615±1124a	5.3±0.2a	0.61±0.02a
SNPK	6970±1041a	4.4±0.2b	0.80±0.03a
CNPK	6551±1394a	5.1±0.2a	0.61±0.02a

2.2 不同有机无机肥配施对高粱氮磷钾养分积累量的影响

2.2.1 有机无机肥配施对高粱氮积累量的影响 由图2可知,不同处理的高粱氮积累量存在显著差异;与CK处理相比,4 a间各施肥处理的高粱植株氮积累量均显著升高。种植第1年SNPK处理比其他施肥处理的氮积累量显著增加6.42%~13.04%;连作第2年和第4年S处理的氮积累量较其他施肥处理分别显著提高6.65%~28.07%和4.89%~28.64%;连作第3年NPK、S、SNPK处理的氮积累量差异不显著,但均显著高于C和CNPK处理;连作第4年,与NPK处理相比,S和SNPK处理的氮积累量分别增加8.36%和3.31%。

各处理的植株氮积累量随着连作年限增加整体呈先升高后下降趋势,在连作第4年显著下降,主要是茎叶中的氮积累量下降明显。与前3年各对应处理的高粱平均植株氮积累量相比,连作第4年CK、NPK、S、C、SNPK、CNPK处理的高粱植株氮积累量分别降低21.49%、18.15%、12.89%、20.34%、16.10%、27.90%;S、SNPK处理较NPK处理的下降幅度分别减少28.99%、11.33%。



注:不同小写字母表示相同年份不同处理间在 $P<0.05$ 水平上差异显著。下同。

Note: Different lowercase letters indicate significant differences between treatments at the $P<0.05$ level. The same below.

图2 不同年份各处理高粱氮积累量

Fig.2 Nitrogen accumulation in sorghum under different treatments during 2018–2021

2.2.2 有机无机肥配施对高粱磷累积量的影响 各施肥处理的高粱磷累积量均高于 CK 处理,连作第3年各施肥处理的磷累积量存在一定差异,其余年份 S 和 SNPK 处理的高粱磷累积量较 NPK 并无明显差异(图 3)。与 NPK 处理相比,连作第3年 S、C、SNPK 处理的磷累积量分别显著降低 8.78%、25.61%、13.54%,CNPK 处理的磷累积量仅提高 0.29%;连作第4年仅 CNPK 处理的磷累积量显著降低 13.21%,其余施肥处理间差异不显著。

随着连作年限的增加各处理植株磷累积量整体呈先升高后下降趋势,在连作第4年显著下降,主要是由于籽粒中的磷累积量明显下降。连作第4年 CK、NPK、S、C、SNPK、CNPK 处理高粱植株磷累积量较前3年各对应处理的平均值分别降低 22.87%、15.86%、8.81%、5.89%、9.37%、25.82%;S、C、SNPK 处理较 NPK 处理的高粱植株磷累积量下降幅度分别减少 7.05%、9.97%、6.49%。

2.2.3 有机无机肥配施对高粱钾累积量的影响 4 a 各施肥处理的高粱钾累积量均显著高于 CK 处理;种植第1年、第2年、第4年 SNPK 和 CNPK 处理的钾累积量均高于 S 处理,且显著高于 NPK 和 C 处理(图 4)。与 NPK 处理相比,S、SNPK、CNPK 处理钾累积量种植第1年分别提高 21.67%、26.83%、23.07%;连作

第2年分别提高 3.39%、5.37%、5.93%;连作第4年分别提高 3.48%、21.45%、23.68%;而连作第3年分别下降 7.74%、9.84%、9.93%,降幅小于 10%。

随着连作年限的增加各处理的植株钾累积量呈先升高后下降趋势,第3年开始出现下降,籽粒中的钾累积量呈下降趋势。与前3年各对应处理的平均植株钾累积量相比,连作第4年 CK、NPK、S、C、SNPK、CNPK 处理的高粱植株钾累积量分别降低 23.25%、19.80%、20.74%、20.54%、8.28%、5.83%;有机无机肥配施处理 SNPK 和 CNPK 较 NPK 处理下降幅度分别减少 58.21%和 70.55%。

2.3 不同有机无机肥配施对土壤理化性状的影响

2.3.1 有机无机肥配施对土壤容重的影响 如图 5 所示,各施肥处理的土壤容重均低于 CK 处理。连作第4年,CK 处理 0~20 cm、20~40 cm 土层土壤容重分别为 1.36、1.44 $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$;各施肥处理 0~20 cm 土层土壤容重较 CK 处理降低 2.98%~7.40%,20~40 cm 土层土壤容重较 CK 处理降低 4.80%~12.17%。与 NPK 处理相比,在 0~20 cm 土层,S、C、SNPK、CNPK 处理土壤容重分别降低 3.78%、3.47%、4.55%、2.92%;在 20~40 cm 土层,S、C、SNPK、CNPK 处理土壤容重分别降低 7.29%、7.74%、4.31%、2.33%。各处理 0~20、20~40 cm 土层土壤

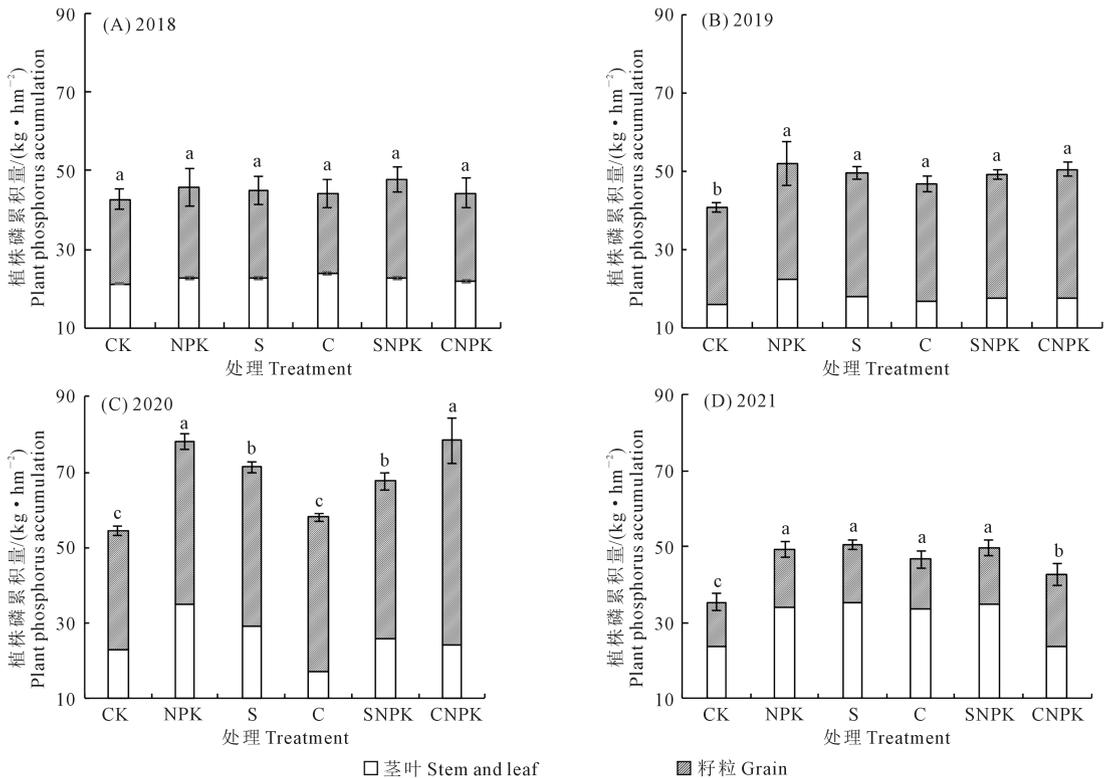


图3 不同年份各处理高粱磷累积量

Fig.3 Phosphorus accumulation in sorghum under different treatments during 2018-2021

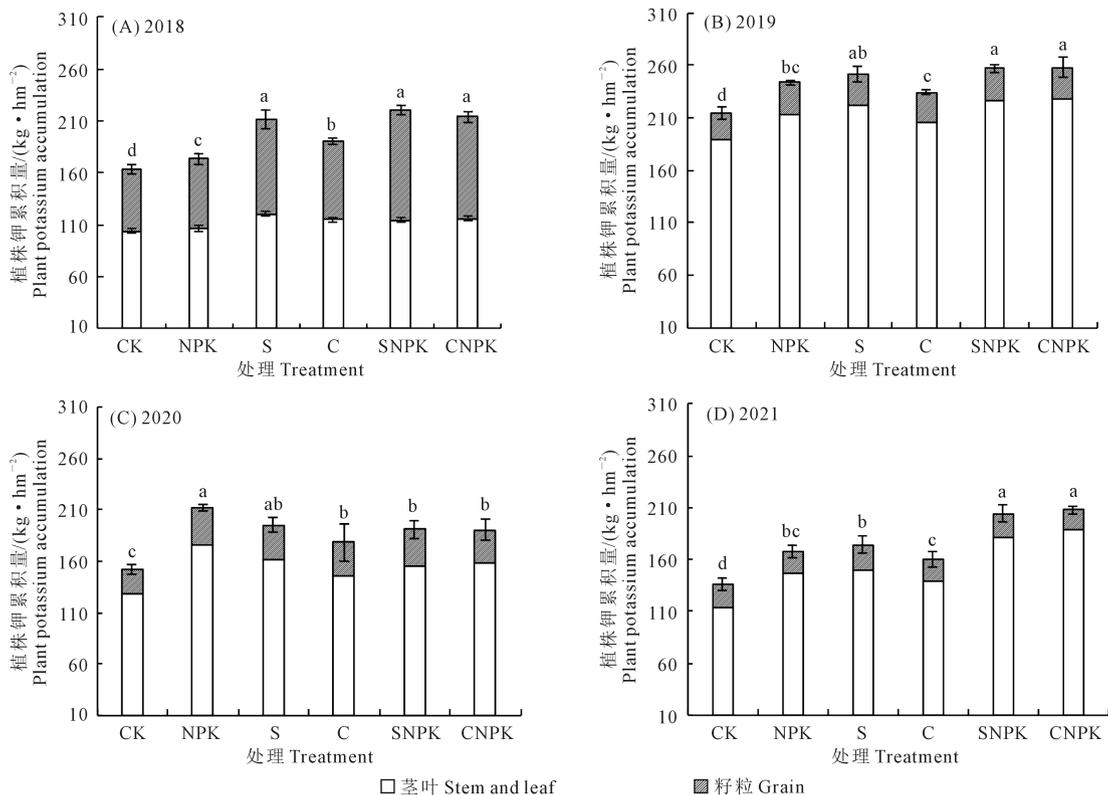


图 4 不同年份各处理高粱钾累积量

Fig.4 Potassium accumulation in sorghum under different treatments during 2018–2021

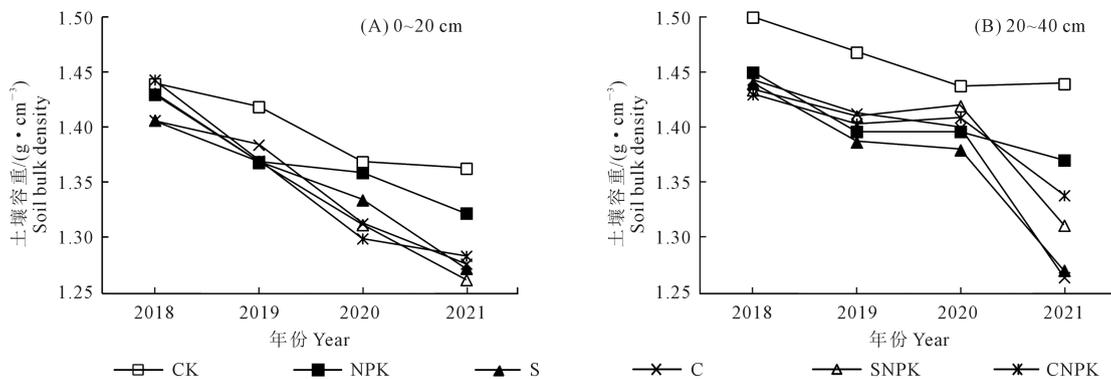


图 5 不同处理 0~40 cm 土层土壤容重的变化

Fig.5 Changes in soil bulk density for the 0~40 cm soil layer of different treatments during 2018–2021

容重均随连作年限增加整体呈下降趋势。CK 处理连作第 3 年与第 4 年的土壤容重变化平缓;连作第 4 年各处理 0~20 cm 土层的土壤容重较第 1 年下降 5.32%~11.80%,SNPK 处理的土壤容重下降幅度最大;20~40 cm 土层的土壤容重较第 1 年下降 4.02%~12.39%,S、C 处理下降幅度明显高于其他处理。

2.3.2 有机无机肥配施对土壤 pH 值的影响 如图 6 所示,与 CK 处理相比,种植第 1 年 NPK 处理 0~40 cm 土层土壤 pH 值显著降低。连作第 2 年,S、C、SNPK、CNPK 处理均显著降低 0~40 cm 土层土壤 pH 值;在 0~20 cm 土层,SNPK 处理土壤 pH 值降幅最大,为 1.97%,在 20~40 cm 土层,S 处理土壤 pH

值降幅最大,为 3.41%。连作第 3 年,NPK、SNPK 处理 0~20 cm 土层土壤 pH 值低于 CK 处理,其中 SNPK 处理较 CK 处理显著降低 1.02%;各施肥处理均显著降低 20~40 cm 土层土壤 pH 值,SNPK、CNPK 处理降幅最大,分别较 CK 处理显著降低 2.16%、2.08%。连作第 4 年,NPK、C、SNPK 处理 0~20 cm 土层土壤 pH 值较 CK 处理显著降低,SNPK 处理土壤 pH 值降低 0.90%,降低幅度最大,20~40 cm 土层土壤 pH 值在各施肥处理下均显著低于 CK 处理,其中 SNPK 处理降低 2.36%,降幅最大。随着连作年限的增加,CK 处理 0~40 cm 土层土壤 pH 值先小幅升高后下降最终趋于稳定;NPK 处理 0~20

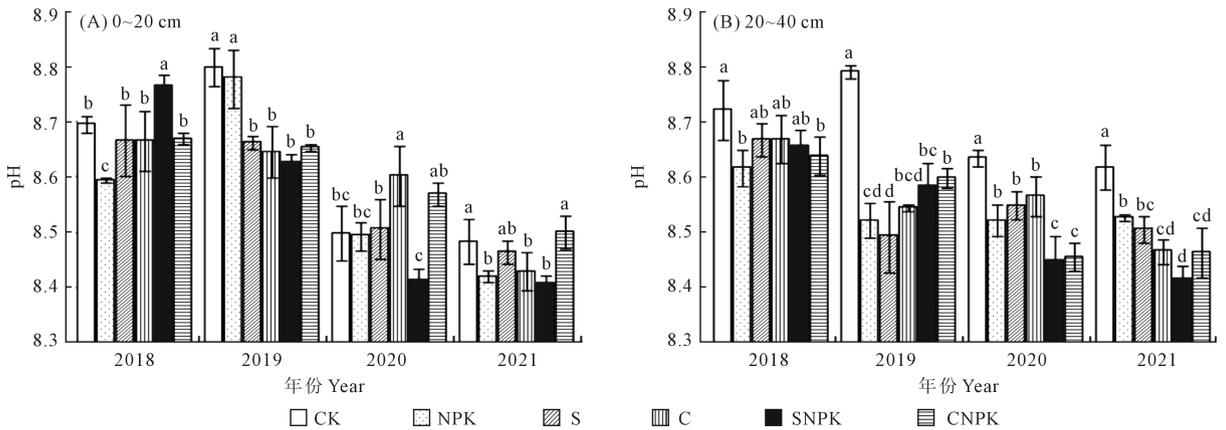
cm 土层土壤 pH 值先升高后下降, 20~40 cm 土层土壤 pH 值呈下降趋势; S、C、SNPK、CNPK 处理 0~40 cm 土层土壤 pH 值明显降低, 连作第 4 年 0~20 cm 土层的土壤 pH 值较种植第 1 年分别下降 2.35%、2.73%、4.11%、1.96%, 20~40 cm 土层土壤 pH 值分别降低 1.88%、2.35%、2.77%、2.04%。

2.3.3 有机无机肥配施对土壤有机质含量的影响 S、C、SNPK 处理 4 a 试验期间的 0~40 cm 土层土壤有机质含量较 CK 处理均显著提高 (图 7)。在 0~20 cm 土层, 与 NPK 处理相比, S、C、SNPK、CNPK 处理 4 a 间土壤有机质含量分别提高 10.45%~33.35%、7.56%~30.83%、22.18%~36.71%、8.57%~21.97%; 与 S 处理相比, SNPK 处理除连作第 4 年的土壤有机质含量降低 1.27%, 连作前 3 年分别提高 2.52%、8.92%、1.39%。在 20~40 cm 土层, S、SNPK 处理土壤有机质含量在不同年度间均明显高于 NPK 处理, 分别增加 15.00%~22.37%、10.70%~

19.48%; S 处理的土壤有机质含量比 SNPK 处理提高 1.61%~9.39%。

CK 处理 0~20 cm 土层土壤有机质含量随连作年限的增加先降低后升高最终趋于稳定; 20~40 cm 土层土壤有机质含量持续降低, 连作第 4 年比种植第 1 年降低 23.79%。各施肥处理 0~20 cm 土层土壤有机质含量随连作年限的增加变化不显著, 施用有机肥及其配施处理的土壤有机质含量维持在中上水平; 各施肥处理 20~40 cm 土层的有机质含量整体呈下降趋势, C、S 处理下降幅度较小, 连作第 4 年的土壤有机质含量比种植第 1 年分别降低 1.45%、8.70%。

2.3.4 有机无机肥配施对土壤全氮含量的影响 由图 8 可知, 与 CK 处理相比, 各施肥处理均提高 0~20 cm 土层土壤全氮含量。2018—2021 年 S 处理 0~20 cm 土层土壤全氮含量较 NPK 处理分别增加 7.09%、6.92%、1.71%、15.39%; 在 20~40 cm 土层, NPK、



注: 不同小写字母表示不同土层相同年份处理间在 $P < 0.05$ 水平上差异显著。下同。

Note: Different lowercase letters indicate that differences in the soil layers observed for the various treatments reach a significance level at the $P < 0.05$ level in the same year. The same below.

图 6 不同处理 0~40 cm 土层土壤 pH 值的变化

Fig.6 Changes in soil pH for the 0~40 cm soil layer of different treatments during 2018–2021

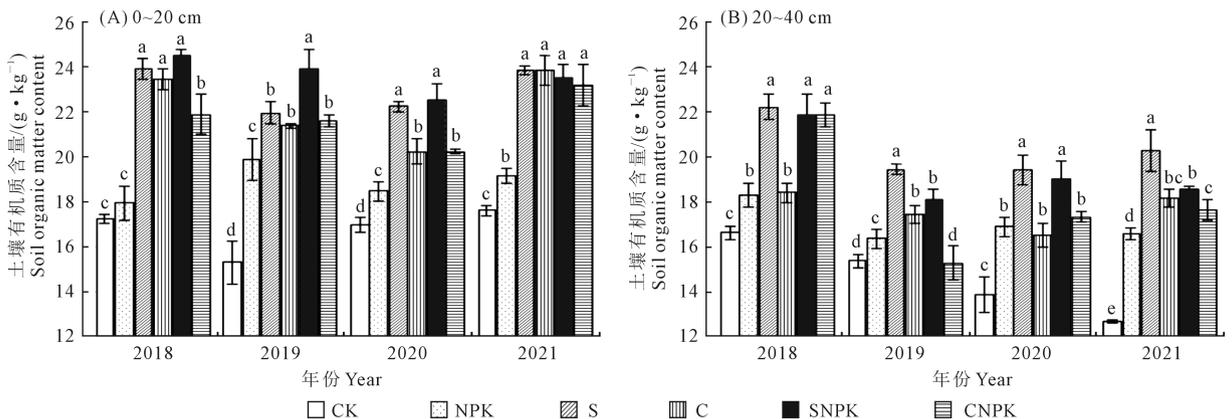


图 7 不同处理 0~40 cm 土层土壤有机质含量的变化

Fig.7 Changes in soil organic matter content for the 0~40 cm soil layer of different treatments during 2018–2021

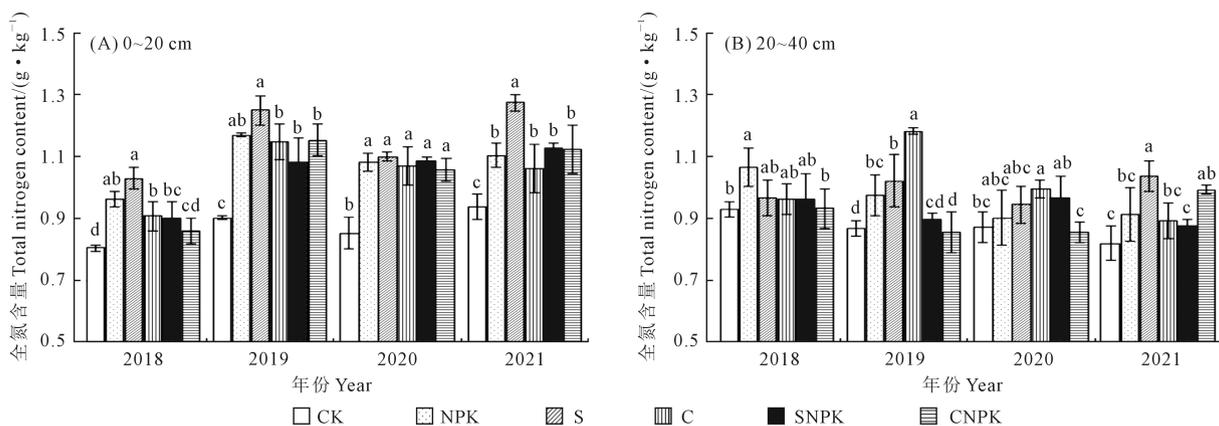


图8 不同处理0~40 cm 土层土壤全氮含量的变化

Fig.8 Changes in soil total nitrogen content for the 0~40 cm soil layer of different treatments during 2018–2021

S、C、SNPK 处理土壤全氮含量较 CK 处理 4 a 间分别提高 3.55%~14.61%、4.07%~26.32%、3.59%~35.94%、3.15%~10.92%。与 NPK 处理相比,种植第 1 年 S、C、SNPK 处理 20~40 cm 土层土壤全氮含量有所减少,但差异不显著;连作第 2 年 S 处理增加 4.88%,C 处理显著增加 21.34%;连作第 3 年 S、C 处理分别提高 4.80%、10.27%,但差异不显著;连作第 4 年 S 处理显著增加 13.51%,C 处理略有减少。

随着连作年限的增加,CK 处理 0~20 cm 土层土壤全氮含量略有增加,20~40 cm 土层全氮含量整体表现出减少趋势。各施肥处理 0~20 cm 土层土壤全氮含量先上升后趋于稳定,S、C、SNPK、CNPK 处理连作第 4 年的土壤全氮含量比种植第 1 年分别提高 23.69%、16.94%、25.37%、30.88%。在 20~40 cm 土层,NPK 处理土壤全氮含量随连作年限的增加呈下降趋势,SNPK、CNPK 处理变化幅度不明显,C 处理表现出先增加后下降趋势,S 处理呈增加趋势,在连作第 4 年土壤全氮含量比种植第 1 年增加 7.25%。

2.3.5 有机无机肥配施对土壤有效磷含量的影响 与 CK 处理相比,NPK、S、C、SNPK 处理显著提高 0~20 cm 土层土壤有效磷含量;S、C、SNPK、CNPK 处理明显增加 20~40 cm 土层有效磷含量(图 9)。在 0~20 cm 土层,与 NPK 处理相比,S、SNPK 处理土壤有效磷含量种植第 1 年、连作第 2 年、连作第 3 年、连作第 4 年分别提高 2.44%、9.46%、28.55%、23.64%、2.97%、9.07%、16.19%、25.62%。SNPK 处理土壤有效磷含量在种植第 1 年、连作第 3 年及连作第 4 年均高于 S 处理,但 4 a 间差异均不显著;在 20~40 cm 土层,S、C、SNPK、CNPK 处理 4 a 间的土壤有效磷含量较 NPK 处理分别提高 41.08%~43.91%、5.55%~19.97%、12.33%~26.87%、1.23%~28.86%,

其中以 S 处理的增加量最高。

随着连作年限的增加,各处理 0~20 cm 土层土壤有效磷含量变化不明显,S、SNPK 处理连作第 4 年的土壤有效磷含量较种植第 1 年分别提高 2.50%、3.72%,其他处理均出现小幅下降;20~40 cm 土层土壤有效磷含量在连作第 2 年就出现了明显减少,连作 4 年后,各处理中以不施肥处理的土壤有效磷含量下降最明显,较种植第 1 年下降 64.02%。

2.3.6 有机无机肥配施对土壤速效钾含量的影响 由图 10 可知,各施肥处理均显著增加 0~40 cm 土层土壤速效钾含量。4 a 间,S 处理 0~20 cm 土层土壤速效钾含量显著高于 NPK、C、CNPK 处理,20~40 cm 土层土壤速效钾含量均显著高于其他施肥处理。S 处理 0~20、20~40 cm 土层土壤速效钾含量较 NPK 处理分别显著增加 9.52%~22.75%、8.30%~49.20%。在 0~20 cm 土层,种植第 1 年 SNPK 和 NPK 处理的土壤速效钾含量无显著差异,C、CNPK 处理的土壤速效钾含量较 NPK 分别显著降低 2.57%、4.08%;与 NPK 处理相比,连作第 2 年 C、SNPK、CNPK 处理土壤速效钾含量分别显著增加 7.18%、8.02%、6.34%,连作第 3 年 SNPK 处理土壤速效钾含量显著增加 20.09%,C、CNPK 处理与其他处理差异不显著;连作第 4 年 SNPK、C 处理土壤速效钾含量与 NPK 处理无显著差异,CNPK 比 NPK 处理显著降低 9.55%。在 20~40 cm 土层,与 NPK 处理相比,种植第 1 年和连作第 2 年 C、SNPK、CNPK 处理土壤速效钾含量显著上升,其中 SNPK 处理土壤速效钾含量上升最多,分别增加 19.61% 和 39.63%;连作第 3 年 SNPK 与 NPK 处理土壤速效钾含量无统计学差异,CNPK 处理速效钾含量较 NPK 处理显著降低,C 处理显著提升;连作第 4 年 C 与 NPK 处理的速效钾含量无显著差异,SNPK、CNPK 处

理速效钾含量比 NPK 处理显著提高 2.37%、4.62%。

不施肥处理连作 4 年后 0~40 cm 土层土壤速效钾含量均低于种植第 1 年, 0~20 cm、20~40 cm 土层连作第 4 年的土壤速效钾含量分别减少 9.78%、4.88%。连作第 4 年 NPK、S、C、SNPK 处理 0~20 cm 土层土壤速效钾含量均高于种植第 1 年, 分别提高 3.10%、15.56%、2.90%、6.92%, 其中以农家肥 S 处理提高幅度最大; 20~40 cm 土层土壤速效钾含量随连作年限的增加呈先增加后减少趋势。

2.3.7 土壤理化指标相关性分析 将 2018—2021 年土壤各理化指标间进行相关性分析(图 11), 20~40 cm 土层土壤容重与同一层土壤有机质(2018 年)、0~20 cm 土层土壤容重与 0~40 cm 土层土壤有机质(2021 年)表现出显著负相关关系; 20~40 cm 土层土壤容重与 0~20 cm 土层土壤有机质含量表现出极显著负相关关系(2021 年); 0~20 cm 土层土壤容重与 0~20 cm 土层土壤全氮、速效钾(2018 年)、有效磷(2021 年)含量表现出显著负相关关系。

0~20 cm 土层土壤有机质含量与 20~40 cm 土层土壤有效磷和速效钾含量呈显著正相关关系(2018 年、2019 年), 与 0~20 cm 土层土壤有效磷和速效钾含量呈显著正相关关系(2019 年、2020 年)。4 a 间 20~40 cm 土层土壤有机质含量与 0~20 cm 土层土壤有效磷含量呈显著正相关关系。综上, 土壤容重的降低有利于土壤有机质含量的提高, 而有机质含量的提升有利于土壤有效磷和速效钾含量的增加。

3 讨论

3.1 有机无机肥配施对连作高粱产量及养分吸收的影响

连作障碍会导致植株长势变弱, 从而导致作物养分利用率及产量降低^[14], 有机肥或有机无机肥的合理配施可有效缓解连作障碍^[23-25]。本研究表明, 随着连作年限的增加, 各处理高粱的穗粒重、产量、氮磷钾累积量均呈先升高后下降趋势, 但不施肥处理的高粱穗粒重和产量前 3 年年度间变化稳定, 但其

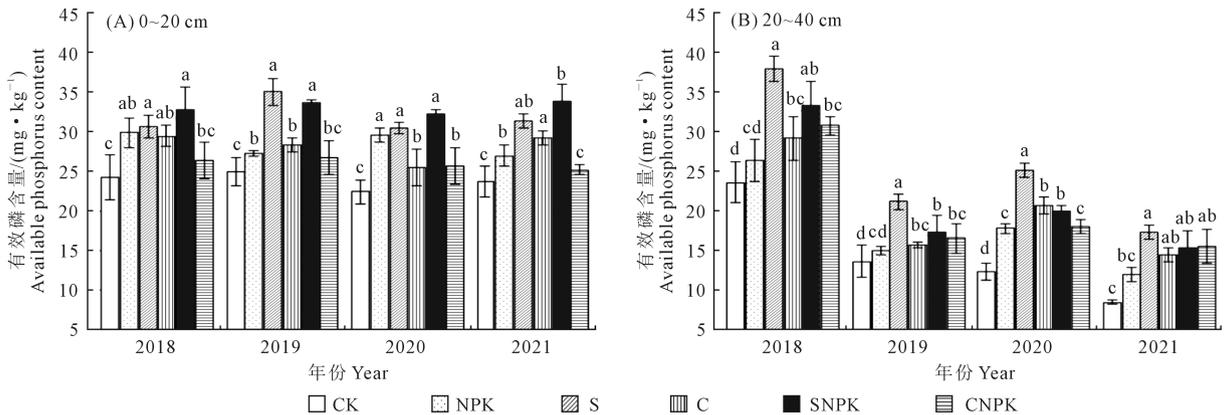


图 9 不同处理 0~40 cm 土层土壤有效磷含量的变化

Fig.9 Changes in available phosphorus content for the 0~40 cm soil layer of different treatments during 2018–2021

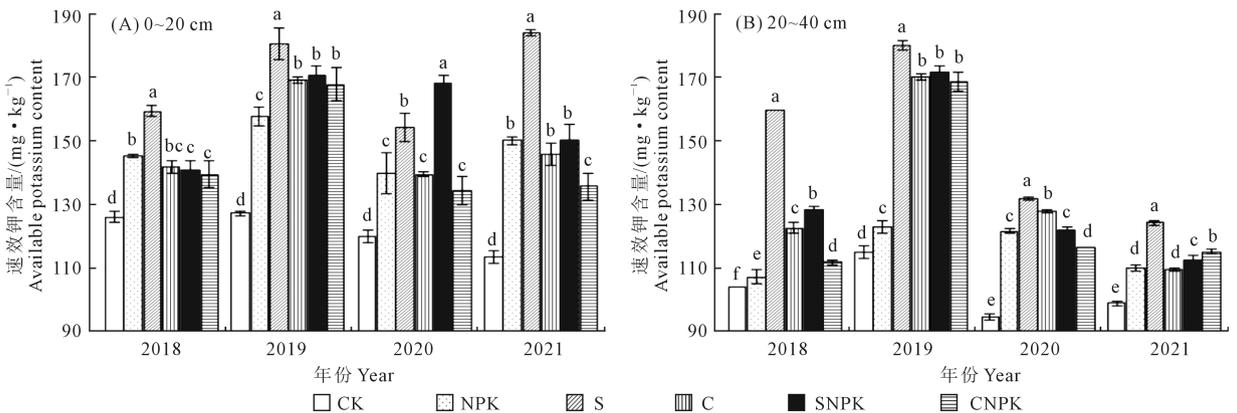
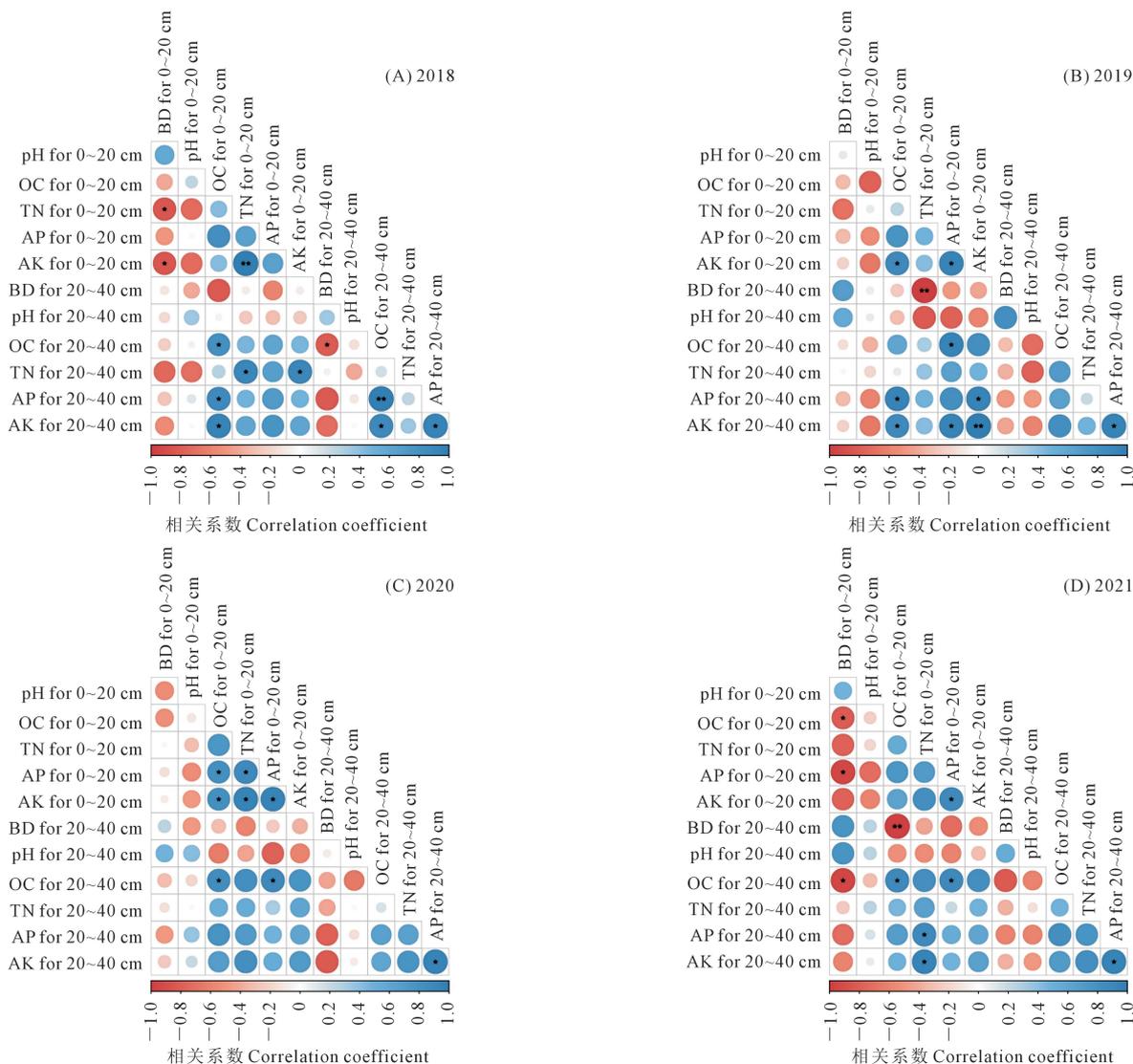


图 10 不同处理 0~40 cm 土层土壤速效钾含量的变化

Fig.10 Changes in available potassium content for the 0~40 cm soil layer of different treatments during 2018–2021



注:颜色越深表示相关系数绝对值越大,蓝色表示正相关,红色表示负相关。* * 表示差异水平为 $P < 0.01$, * 表示差异水平为 $P < 0.05$ 。BD for 0~20 cm、pH for 0~20 cm、OC for 0~20 cm、TN for 0~20 cm、AP for 0~20 cm、AK for 0~20 cm 分别表示 0~20 cm 土层的土壤容重、pH 值、有机质、全氮、有效磷、速效钾含量;BD for 20~40 cm、pH for 20~40 cm、OC for 20~40 cm、TN for 20~40 cm、AP for 20~40 cm、AK for 20~40 cm 分别表示 20~40 cm 土层的土壤容重、pH 值、有机质、全氮、有效磷、速效钾含量。

Note: The darker the color means the greater the absolute value of the correlation coefficient. The blue indicates a positive correlation, and the red indicates a negative correlation. * * indicates significance at $P < 0.01$ and * indicates significance at $P < 0.05$. BD for 0~20 cm, pH for 0~20 cm, OC for 0~20 cm, TN for 0~20 cm, AP for 0~20 cm, and AK for 0~20 cm indicate the index of soil bulk density, pH, organic matter, total nitrogen, available phosphorus, and available potassium for 0~20 cm soil layer, respectively. BD for 20~40 cm, pH for 20~40 cm, OC for 20~40 cm, TN for 20~40 cm, AP for 20~40 cm, and AK for 20~40 cm indicate the index of soil bulk density, pH, organic matter, total nitrogen, available phosphorus, and available potassium for 20~40 cm soil layer, respectively.

图 11 土壤各指标相关分析

Fig.11 Correlation analysis of various soil indicators

穗粒重和产量均显著低于其他施肥处理,这与刘志平等^[26]研究结果相似;不施肥处理高粱植株的氮磷钾养分累积量也显著低于其他施肥处理(除 2018 年磷累积量外);且连作第 4 年不施肥处理的穗粒重、产量、氮磷钾累积量较前 3 年显著降低。4 a 间 NPK、S、SNPK 处理较不施肥处理均显著提高了高

粱穗粒重、产量及植株氮钾吸收量;S、SNPK 处理较 NPK 处理增强了产量的稳定性和持续性,氮磷养分吸收量下降幅度更低。表明施用农家肥及农家肥配施无机肥减轻了连作对高粱养分吸收的影响,从而实现了高粱高产稳产。

4 a 连作过程中,种植前两年中 SNPK 处理的产

量较 NPK 和 S 处理有所提高,但与 NPK 处理差异不显著;白玲等^[27]研究也表明各配施处理与单施化肥处理的产量差异不显著,但本试验中,SNPK 处理的产量变异系数较单施化肥处理显著降低,有利于维持高粱稳产。在连作第 3 年和第 4 年单施农家肥处理的产量较 NPK 和 SNPK 处理保持较高的产量,产量变异系数也显著低于单施化肥处理,施用农家肥的增产效应随着连作年限的增加逐渐明显,这可能是由于种植前两年有机肥配施无机肥和单施化肥处理中无机肥可迅速释放养分而短期内提高了土壤主要养分的浓度满足了农作物当季的生长需要^[5],而农家肥养分释放期长,经过长期施用,土壤本身的肥力得到不断积累,在连作第 3 年和第 4 年能更好地满足高粱生长期的养分吸收而提高了产量。

同一作物的产量对肥料的响应受土壤性质和气候条件等多方面的影响^[28],而水分是决定作物养分吸收和产量的关键因子^[21],在本试验中,2018—2021 年高粱需水关键期拔节至高粱开花灌浆期(7 月中旬至 8 月底)降雨量分别为 192.0、138.7、256.0、129.4 mm,连作第 3 年(2020 年)水分充足,有利于土壤及肥料中养分的释放和转运,促进了高粱植株群体的生长发育,各施肥处理均更好地提升了产量和氮磷养分的吸收,最大程度地发挥了肥料对连作障碍的缓解作用;连作第 4 年(2021 年)产量显著下降,一方面由于 2021 年干旱较严重影响了高粱群体植株对土壤及肥料中的养分利用;而该年度与 2019 年水分供应相近,但产量显著低于 2019 年,表明干旱条件下连作障碍加重,连作第 4 年 S 处理的产量和氮吸收量显著高于其他施肥处理,SNPK 处理的钾累积量显著高于 NPK、S、C 处理。说明不论在充足的降水还是干旱的条件下,施用农家肥和农家肥配施无机肥比其他施肥处理都能更稳定地缓解连作障碍。

3.2 有机无机肥配施对连作高粱土壤理化性状的影响

连作障碍是植物本身和土壤生态系统中多种因素共同作用的结果,长期种植一种作物和化肥的不合理施用导致的土壤理化性质劣变被认为是引起连作障碍的重要因素之一^[14]。在本试验中,连续种植高粱 4 a 的不施肥处理 0~40 cm 土层土壤容重与连作第 3 年基本保持不变,均大于 $1.35 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$,且高于其他施肥处理;0~20 cm 土层土壤有机质含

量、全氮含量、有效磷含量、速效钾含量与种植第 1 年变化小,但均显著低于其他施肥处理;20~40 cm 土层土壤有机质含量、有效磷含量较种植第 1 年显著下降,分别降低 23.79%、64.02%,土壤有机质和速效钾含量显著低于其他施肥处理。表明连作确实引起高粱土壤紧实,耕层土壤肥力低下,20~40 cm 土层的土壤养分失衡,这与石程仁等^[29]研究结果一致。

施肥作为一种有效的田间管理实践,可通过改变土壤的化学、物理和生物过程对土壤质量健康产生深远的影响^[30]。通过施用有机肥及有机无机肥配施的措施提高土壤质量,从而防控连作障碍已有众多研究^[15-18,31-32]。李猛等^[31]研究表明,施加有机肥羊粪和羊粪+化肥 8 a 的农田 0~10 cm 土层土壤容重分别降低 10.1%和 10.0%。本试验结果与前人研究结果一致,连作第 4 年施用有机肥及其配施处理较单施化肥处理 0~20 cm、20~40 cm 土层的土壤容重分别降低 2.92%~4.55%,2.33%~7.74%,SNPK 处理对 0~20 cm 土层土壤容重以及 S、C 处理对 20~40 cm 土层土壤容重的改善效果较好,土壤容重的降低有利于作物对土壤养分和水分的吸收利用。土壤 pH 值影响着土壤各种生物化学过程,随着连作年限的增加土壤 pH 值会显著下降^[14],本试验中各处理的 pH 值均随着连作年限的延长而下降,施用粪肥比单施化肥能更好地保持土壤 pH 值稳定^[30],但在本试验中各施肥处理并不能更好地缓解连作导致的 pH 值下降,且 SNPK 处理比其他施肥处理连续稳定地降低了 0~40 cm 土层土壤 pH 值,这更好地改善了本试验区强碱性($\text{pH}>8.7$)土壤,出现这一现象的原因可能是无机肥中磷肥过磷酸钙属于酸性化学肥料加之农家肥中有机酸的解离作用^[14],降低了该试验地碱性土壤的 pH 值。

土壤有机质和氮磷钾含量是表征土壤肥力水平的重要指标,不同的施肥模式对其产生显著影响。林昕等^[32]研究表明,连作高粱土壤中施用有机肥处理的耕层土壤有效磷、速效钾的含量较不施肥处理分别增加 141.44%、7.74%,较单施化肥处理分别增加 76.32%、15.08%;各处理的土壤全氮含量无显著差异。在本研究中,连作 4 a 间施用农家肥及农家肥配施无机肥较不施肥和单施化肥处理均显著提高了 0~40 cm 土层土壤有机质含量,这与李猛等^[31]研究结果一致;较其他施肥处理也能更有效地提升土壤有机质、有效磷和速效钾含量。然而不同

土层的土壤养分受各施肥处理的影响不同,4 a 间SNPK 处理较单施化肥和农家肥更有利于提高耕层土壤的有机质和有效磷含量;S 处理较单施化肥和SNPK 处理更利于提高 20~40 cm 土层土壤有机质和有效磷含量,增加了 0~40 cm 土层土壤速效钾含量。分析认为可能是化肥和农家肥的供肥模式不同导致的,有机无机肥配施处理中无机肥养分释放快,被作物吸收后剩余的养分尚未下渗即被地表径流和淋溶等作用带走,只有一部分有机肥释放的养分留在土壤中;而单施有机肥的养分释放慢,更多的养分缓慢随雨水下渗到深层的土壤,养分供给持续时间长^[5],连作第 4 年农家肥处理的产量显著高于其他施肥处理的结果即证实了这一点;农家肥羊粪中本身速效钾养分含量高,因此有效提高了 0~40 cm 土层土壤速效钾含量。各土壤理化指标相关性分析表明,土壤结构的改善有利于土壤有机质含量的提高,而有机质含量的提升有利于土壤有效磷和速效钾含量的增加。施用农家肥、农家肥配施无机肥中农家肥的投入必然会增加土壤有机质含量,有机质中所包含的大量微生物和分解产生的有机酸一方面能吸收固定无机磷,促进无机磷向有机磷的转化,提高土壤有效磷的含量;另一方面促进了土壤中钾的释放和化肥中钾的利用,提高了土壤速效钾含量,进而增加了土壤肥力和土地生产力^[33-34],提高了作物产量。

在高粱种植生产实践中,可根据土壤基础肥力水平和连作年限选择适宜的施肥方式,在耕层土壤肥力水平低的耕作环境下连作 2 a 内的高粱适宜采取农家肥配施无机肥(NPK 用量比配方施肥处理减少 20%)。此外,本研究也发现,随着连作年限的递增,施用农家肥羊粪及农家肥配施无机肥对 20~40 cm 土层土壤有机质、有效磷和速效钾含量的提升效果不佳。因此,为了更好地发挥农家肥改善深层土壤质量的效果,消减连作高粱障碍,农家肥与化肥的配施比例及肥效发挥机制有待进一步挖掘。

4 结 论

连续种植高粱会导致土壤容重较高,耕层土壤肥力水平低下,高粱对氮磷钾养分的吸收量显著下降,产量保持较低水平。单施农家肥和农家肥配施无机肥处理较单施化肥处理在连作第 4 年可提高高粱植株的氮钾累积量;明显降低 0~40 cm 土层土壤容重,改善土壤结构;提高土壤有机质、有效磷和速

效钾含量。农家肥配施无机肥处理对 0~20 cm 土层的肥力水平以及单施农家肥对 20~40 cm 土层的肥力水平的改善效果显著,4 a 试验期间农家肥配施无机肥处理较单施化肥提高 0~20 cm 土层土壤有机质含量 22.18%~36.71%、提高土壤有效磷含量 9.07%~25.62%;单施农家肥处理较单施化肥处理提高 20~40 cm 土层土壤有机质含量 15.00%~22.37%、提高土壤有效磷含量 41.08%~43.91%,显著增加 0~40 cm 土层土壤速效钾含量 8.30%~49.20%。综上所述,施用农家肥和农家肥配施无机肥可通过促进高粱植株对氮钾养分吸收和提升土壤养分状况来有效减轻高粱连作障碍,从而显著降低连作高粱产量年际间波动,维持连作高粱的稳产性和可持续性。

参 考 文 献:

- [1] 石元亮,王玲莉,刘世彬,等.中国化学肥料发展及其对农业的作用[J].土壤学报,2008,45(5):852-864.
SHI Y L, WANG L L, LIU S B, et al. Development of chemical fertilizer industry and its effect on agriculture of China[J]. Acta Pedologica Sinica, 2008, 45(5): 852-864.
- [2] 张福锁,张朝春,陈新平.高产高效养分管理技术创新及应用[M].北京:中国农业大学出版社,2017:124-138.
ZHANG F S, ZHANG C C, CHEN X P. Innovation and application of nutrient management technology for double high agriculture[M]. Beijing: China Agricultural University Press, 2017: 124-138.
- [3] 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, 2022, 142: 126641.
- [4] 梁路,马臣,张然,等.有机无机肥配施提高旱地麦田土壤养分有效性及酶活性[J].植物营养与肥料学报,2019,25(4):544-554.
LIANG L, MA C, ZHANG R, et al. Improvement of soil nutrient availability and enzyme activities in rainfed wheat field by combined application of organic and inorganic fertilizers[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2019, 25(4): 544-554.
- [5] 李燕青,赵秉强,李壮.有机无机结合施肥制度研究进展[J].农学报,2017,7(7):22-30.
LI Y Q, ZHAO B Q, LI Z. Research progress of organic-inorganic fertilizer combined application system[J]. Journal of Agriculture, 2017, 7(7): 22-30.
- [6] 杨胜玲,黄兴成,李渝,等.长期有机无机肥配施对水稻生长、干物质积累及产量的影响[J].浙江农业学报,2022,34(9):1815-1825.
YANG S L, HUANG X C, LI Y, et al. Effects of long-term organic and inorganic fertilizer application on growth, dry matter accumulation and yield of rice[J]. Acta Agriculturae Zhejiangensis, 2022, 34(9): 1815-1825.

- [7] 任科宇, 陆东明, 邹洪琴, 等. 有机替代对长江流域水稻产量和籽粒含氮量的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2022, 39(4): 716-725. REN K Y, LU D M, ZOU H Q, et al. Effects of substituting manure for fertilizer on yield and nitrogen content of rice grain in the Yangtze River basin[J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2022, 39(4): 716-725.
- [8] LIU J A, SHU A P, SONG W F, et al. Long-term organic fertilizer substitution increases rice yield by improving soil properties and regulating soil bacteria[J]. Geoderma, 2021, 404: 115287.
- [9] 徐明岗, 李冬初, 李菊梅, 等. 化肥有机肥配施对水稻养分吸收和产量的影响[J]. 中国农业科学, 2008, 41(10): 3133-3139. XU M G, LI D C, LI J M, et al. Effects of organic manure application combined with chemical fertilizers on nutrients absorption and yield of rice in Hunan of China[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2008, 41(10): 3133-3139.
- [10] 吕丽华, 姚海坡, 曹志敏, 等. 有机肥替代化肥对小麦产量、品质及氮素效率的影响[J]. 华北农学报, 2020, 66(3): 4-6. LV L H, YAO H P, CAO Z M, et al. Effects of organic fertilizer instead of chemical fertilizer on yield, quality and nitrogen efficiency of wheat[J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2020, 66(3): 4-6.
- [11] 丁维婷, 武雪萍, 张继宗, 等. 长期有机无机配施对暗棕壤土壤酶活性及春麦产量品质的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2020, (6): 1-8. DING W T, WU X P, ZHANG J Z, et al. Effects of long-term organic-inorganic combined application on enzyme activity of dark brown soil and yield, quality of spring wheat[J]. Soils and Fertilizers Sciences in China, 2020, (6): 1-8.
- [12] 吴得峰. 基于不同农业区划的有机-无机肥配施对玉米产量及土壤质量研究文献综述[J]. 土地开发工程研究, 2019, 4(8): 71-76. WU D F. Literature review on maize yield and soil quality by combined application of organic and inorganic fertilizer based on different agricultural regionalization[J]. Land Development and Engineering Research, 2019, 4(8): 71-76.
- [13] 高洪军, 朱平, 彭畅, 等. 等氮条件下长期有机无机配施对春玉米的氮素吸收利用和土壤无机氮的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(2): 318-325. GAO H J, ZHU P, PENG C, et al. Effects of partially replacement of inorganic N with organic materials on nitrogen efficiency of spring maize and soil inorganic nitrogen content under the same N input[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2015, 21(2): 318-325.
- [14] 苏浩, 张锐澎, 吴思炫, 等. 连作障碍产生机理及防控现状[J]. 土壤, 2024, 56(2): 242-254. SU H, ZHANG R P, WU S X, et al. Mechanisms of continuous cropping obstacles and current situation of prevention and control[J]. Soils, 2024, 56(2): 242-254.
- [15] 危锋, 郝明德. 黄土旱塬长期施肥对小麦连作土壤养分和水分的影响[J]. 中国水土保持科学, 2011, 9(4): 104-109, 116. WEI F, HAO M D. Effects of long-term fertilization on soil water and nutrient with *Triticum aestivum* L. succession in dryland of Loess Plateau[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2011, 9(4): 104-109, 116.
- [16] 王笃超. 不同有机物料对连作大豆土壤肥力及生物学性质的影响[D]. 长春: 吉林农业大学, 2018. WANG D C. Effects of different organic materials on soil fertility and biological properties of continuous cropping soybean soil[D]. Changchun: Jilin Agricultural University, 2018.
- [17] 张婉婷, 金成功, 张欢, 等. 有机无机肥料配施对连作区玉米土壤微生物及养分含量的影响[J]. 作物杂志, 2016, (3): 110-115. ZHANG W T, JIN C G, ZHANG H, et al. Effects of combination of organic and inorganic fertilizer on soil microbial and nutrient content of continuous cropping of maize[J]. Crops, 2016, (3): 110-115.
- [18] 徐赛, 杨延杰, 圣亚男, 等. 有机无机肥配施对日光温室番茄连作土壤微生物的影响[J]. 土壤通报, 2022, 53(4): 897-906. XU S, YANG Y J, SHENG Y N, et al. Effects of combined application of organic and inorganic fertilizers on soil microorganisms in continuous cropping in solar greenhouse[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2022, 53(4): 897-906.
- [19] 樊芳芳, 王劲松, 董二伟, 等. 连作对高粱生长及根区土壤环境的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2016, (3): 127-133. FAN F F, WANG J S, DONG E W, et al. Effects of sorghum continuous cropping on the growth of sorghum and soil environment[J]. Soil and Fertilizer Science in China, 2016, (3): 127-133.
- [20] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000: 264-271. BAO S D. Soil and agricultural chemistry analysis[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2000: 264-271.
- [21] 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. LIU Q, MU X M, WANG X M, et al. Effects of different long-term fertilization on crop yield and soil nutrients under rotation planting in arid region[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2021, 39(3): 122-128.
- [22] SMITH R G, MENALLED F D, ROBERTSON G P. Temporal yield variability under conventional and alternative management systems[J]. Agronomy Journal, 2007, 99(6): 1629-1634.
- [23] ZHANG H Q, ZHANG X Q, WANG X T, et al. Effect of fertilization regimes on continuous cropping growth constraints in watermelon is associated with abundance of key ecological clusters in the rhizosphere[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2022, 339: 108135.
- [24] 高欣, 赵雪淞, 赵凤艳, 等. 有机培肥对连作花生土壤肥力及活性有机碳库的影响[J]. 土壤通报, 2023, 54(1): 67-76. GAO X, ZHAO X S, ZHAO F Y, et al. Effect of organic fertilizer on soil fertility and active organic carbon pool in monocultured peanut fields[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2023, 54(1): 67-76.
- [25] 卢合全, 唐薇, 罗振, 等. 商品有机肥替代部分化肥对连作棉田土壤养分、棉花生长发育及产量的影响[J]. 作物学报, 2021, 47(12): 2511-2521. LU H Q, TANG W, LUO Z, et al. Effects of commercial organic fertilizer substituting chemical fertilizer partially on soil nutrients, plant development, and yield in cotton[J]. Acta Agronomica Sinica, 2021,

- 47(12): 2511-2521.
- [26] 刘志平, 马晓楠, 解文艳, 等. 山西典型旱地玉米产量及水分利用效率对长期不同施肥模式的响应[J]. 干旱地区农业研究, 2023, 41(4): 61-70.
- LIU Z P, MA X N, XIE W Y, et al. Responses of maize yield and water use efficiency to long-term fertilization patterns in dryland of Shanxi province[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2023, 41(4): 61-70.
- [27] 白玲, 李俊华, 褚贵新, 等. 有机无机肥配施对棉花养分吸收及氮素效率的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2014, 32(5): 143-148.
- BAI L, LI J H, CHU G X, et al. Effects of organic manure application combined with chemical fertilizers on nutrients absorption and nitrogen efficiency of cotton in Xinjiang, China[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2014, 32(5): 143-148.
- [28] 任科宇, 徐明岗, 张露, 等. 我国不同区域粮食作物产量对有机肥施用的响应差异[J]. 农业资源与环境学报, 2021, 38(1): 143-150.
- REN K Y, XU M G, ZHANG L, et al. Response of grain crop yield to manure application in different regions of China[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2021, 38(1): 143-150.
- [29] 石程仁, 禹山林, 杜秉海, 等. 连作花生土壤理化性质的变化特征及其与土壤微生物相关性分析[J]. 花生学报, 2018, 47(4): 1-6, 18.
- SHI C R, YU S L, DU B H, et al. The characteristics variation of soil physical and chemical properties and its correlation with soil microorganisms under continuous peanut cropping[J]. *Journal of Peanut Science*, 2018, 47(4): 1-6, 18.
- [30] LI X, QIAO L, HUANG Y P, et al. Manuring improves soil health by sustaining multifunction at relatively high levels in subtropical area[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2023, 353: 108539.
- [31] 李猛, 何永涛, 孙维, 等. 不同施肥模式下西藏农田土壤质量的变化[J]. 干旱地区农业研究, 2018, 36(3): 144-148.
- LI M, HE Y T, SUN W, et al. Soil quality change under different fertilization patterns on the Tibetan plateau farmland[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2018, 36(3): 144-148.
- [32] 林昕, 陈雪丽, 万书明, 等. 施肥对不同杂粮作物连作土壤化学特性及酶活性的影响[J]. 土壤与作物, 2022, 11(2): 226-234.
- LIN X, CHEN X L, WAN S M, et al. Effects of different small grain crops and fertilizations on soil nutrients and soil enzyme activities[J]. *Soil and Crop*, 2022, 11(2): 226-234.
- [33] LUSIBA S, ODHAMBO J, OGOLA J. Effect of biochar and phosphorus fertilizer application on soil fertility: soil physical and chemical properties[J]. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 2016, 63: 1218477.
- [34] 且天真, 武迪, 张德健, 等. 不同年限施用有机肥对土壤理化性质的影响[J]. 安徽农业科学, 2023, 51(12): 135-141, 170.
- JU T Z, WU D, ZHANG D J, et al. Effects of different years of application of organic fertilizer on physical and chemical properties of soil[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2023, 51(12): 135-141, 170.

(上接第260页)

- [29] 李艳春, 杜国强, 师校欣, 等. 摘叶与铺反光膜对赤霞珠葡萄结果部位叶片光合性能的影响[J]. 安徽农业科学, 2009, 37(22): 10470-10471, 10502.
- LI Y C, DU G Q, SHI J X, et al. Effects of leaf picking and paving reflecting film on photosynthetic characteristics of leaves in setting fruit position in *Cabernet Sauvignon* grapes[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2009, 37(22): 10470-10471, 10502.
- [30] 孔建国, 张晓娟. 氮肥不同用量对甜高粱生长及产量的影响[J]. 农业科学研究, 2015, (4): 37-40.
- KONG J G, ZHANG X J. Effects of nitrogen rates on the growth and yield of sweet sorghum[J]. *Journal of Agricultural Sciences*, 2015, (4): 37-40.
- [31] 吴玉娥, 薛香, 郜庆炉, 等. 行距对超高产小麦产量和品质的影响[J]. 麦类作物学报, 2004, 24(3): 84-86.
- WU Y E, XUE X, GAO Q L, et al. Effect of row spacing on grain yield and quality of super-high yielding wheat[J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2004, 24(3): 84-86.
- [32] 杨帆, 刘卓, 韩旭彪, 等. 宁夏雨养区拉巴豆与甜高粱混播对草地产量和牧草品质的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2021, 49(5): 24-30.
- YANG F, LIU Z, HAN X B, et al. Effects of mixed planting of *La-*
blab purpureus (L.) sweet and *Sorghum dochna* (Forssk.) snowden on grassland yield and quality of forage grass in Ningxia rain fed region[J]. *Journal of Northwest A&F University(Natural Science Edition)*, 2021, 49(5): 24-30.
- [33] 刘秋霞, 董二伟, 黄晓磊, 等. 不同生态区高粱籽粒产量和品质对氮肥施用的响应[J]. 作物学报, 2023, 49(10): 2766-2776.
- LIU Q X, DONG E W, HUANG X L, et al. Response of sorghum grain yield and quality to nitrogen application in different ecozones[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2023, 49(10): 2766-2776.
- [34] 曹晓燕, 武爱莲, 王劲松, 等. 施氮量对高粱产量、品质及氮利用效率的影响[J]. 作物杂志, 2021, (2): 108-115.
- CAO X Y, WU A L, WANG J S, et al. Effects of nitrogen fertilization on yield, quality and nitrogen utilization efficiency of sorghum[J]. *Crops*, 2021, (2): 108-115.
- [35] 王劲松, 董二伟, 武爱莲, 等. 不同肥力条件下施肥对粒用高粱产量、品质及养分吸收利用的影响[J]. 中国农业科学, 2019, 52(22): 4166-4176.
- WANG J S, DONG E W, WU A L, et al. Responses of fertilization on sorghum grain yield, quality and nutrient utilization to soil fertility[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2019, 52(22): 4166-4176.