

宁夏沙地增施奶牛粪肥对玉米生长及增产效应的研究

刘少泉, 王 晶, 田 超, 刘 智, 李东利, 万佳森, 孙 权*

(宁夏大学农学院, 宁夏 银川 750021)

摘 要: 宁夏西北贫瘠沙地养分不足, 限制了玉米的生长, 利用周边养殖场的奶牛粪肥可有效改善土壤质量, 促进玉米的健康生长和产量形成。掌握合理的农田粪污消纳能力, 既可促进农田生产能力的提高, 又可实现玉米生产的最大效益。以饲料玉米“绿博6号”为研究对象, 在水肥一体化滴灌追肥的前提下分别基施 3750 (T1)、7500 (T2)、11250 (T3)、15000 kg·hm⁻² (T4) 的奶牛粪肥, 以不施肥为对照 (CK)。结果表明, 增施奶牛粪肥后玉米株高及茎粗较 CK 分别增长 27.50% ~ 41.08% 及 50.00% ~ 61.36%; 施用 15000 kg·hm⁻² 时, 玉米株高及茎粗增幅最大; 施用奶牛粪肥对玉米抽雄期光合特性有显著的作用, 净光合速率、气孔导度、胞间 CO₂ 浓度、蒸腾速率、叶绿素较 CK 分别增加 1.42% ~ 15.49%、40% ~ 60%、29.02% ~ 65.70%、21.73% ~ 55.59%、12.79% ~ 44.23%; 施用 15000 kg·hm⁻² 时, 玉米抽雄期光合参数表现较为突出; 施用 11250 kg·hm⁻² 时玉米根系发育最好, 鲜根重、总根长、根表面积、根系直径、根体积较 CK 分别增长 115.80%、103.78%、104.06%、4.63%、101.83%; 增施粪肥对玉米农艺性状有显著性作用, 穗行数、行粒数、穗长、穗粗较对照分别增加 20.03% ~ 30.00%、14.63% ~ 31.49%、28.16% ~ 50.74%、62.57% ~ 72.28%, 秃尖长较 CK 降低 39.88% ~ 53.99%; 施用 11250 kg·hm⁻² 时, 行粒数、穗长、穗粗及秃尖长表现最好; 施用奶牛粪肥显著增加了玉米穗粒数和百粒重, 各施粪肥处理穗粒数之间无显著差异, 产量为 11878.95 ~ 18897.90 kg·hm⁻², 较 CK 增产 63.85% ~ 160.67%, 经济效益增加 166.53% ~ 401.90%; 沙地玉米田有必要通过补充适宜的有机质用于改善土壤的同时促进玉米产量的提升, 从综合施肥成本和效益来看, 在宁夏沙地玉米增施 11250 kg·hm⁻² 的奶牛粪肥即可有效消纳养殖粪污, 还可促进当地玉米的优质高效生产。

关键词: 奶牛粪肥; 玉米; 根系; 生长发育; 产量; 滴灌

人民生活水平日渐提升, 对畜禽产品的需求显著增加, 从而增快了畜禽养殖业规模化、集约化发展, 造成畜禽粪便排放量迅速增加, 2016 年根据有关测算标准以及畜禽排污系数测算, 宁夏回族自治区畜禽粪便排放量达到 747.02 万 t^[1], 环境问题日渐突出。与此同时, 西北广袤的土地由于肥力瘠薄, 生产力水平低下, 有限的绿洲农业区只能通过大水大肥的模式发展农业生产, 造成有限水肥资源的浪费。为提高水肥利用率, 减少化肥的施用, 降低环境风险, 自 2015 年开始, 国家农业部提出“一控两减三基本”行动, 通过推进农业废弃物的循环利用实现控水减肥减药的同时不减产。其中最核心的技术是通过畜禽粪污的肥料化利用而逐步替

代化肥的施用。

畜禽粪肥中含有作物生长所需的氮、磷等营养元素, 是农业发展可利用的宝贵资源; 畜禽粪肥养分全面, 含有大量有机质和多种植物体必需元素, 既可以培肥土壤, 又促进植物生长发育, 同时还可提高产量^[2], 因此畜禽粪肥施用对农业良性循环发展具有重要意义。张鸣等^[3]研究表明, 在同样氮磷钾施用情况下, 牛粪与化肥配施能显著增加春小麦籽粒和秸秆产量。邱吟霜等^[4]研究发现, 在砂性壤土施用低量牛粪有机肥玉米产量和经济效益最优, 较常规施肥分别提高 48.60% 和 33.75%。左文刚等^[5]研究发现, 施用牛粪的处理黑麦草幼苗株高较对照提升了 46.1% ~ 74.2%。李燕青等^[6-7]研究发现, 牛粪与 75% 左右的化肥配施可实现与化肥相当的玉米产量, 同时减少农田氮肥气态损失, 还可实现与常规施肥相当的氮素利用效率, 同时提升土壤肥力。孟艳等^[8]研究表明, 牛粪 4835 kg·hm⁻² 与秸秆 3000 kg·hm⁻² 混合还田,

收稿日期: 2020-05-05; 录用日期: 2020-06-04

基金项目: 宁夏重点研发计划重大项目 (2019BCF01001、2018BBF02021)。

作者简介: 刘少泉 (1996-), 男, 宁夏中宁人, 硕士研究生, 研究方向为农业资源利用。E-mail: 1720112544@qq.com。

通讯作者: 孙权, E-mail: sqnxu@sina.com。

玉米叶片光合速率、气孔导度和蒸腾速率显著高于不还田处理。徐大兵等^[9]研究发现,施用牛粪与单施化肥相比,土地整治区施用牛粪玉米增产7.2%~29.9%,千粒重增加2.5%~18.2%。有学者研究发现,粪肥或有机肥与化肥配施可增加土壤有机质,促进作物生长发育及提升产量^[10-11]。前人对粪肥与化肥配施对土壤肥力及作物生长等方面研究较多,但粪肥在改良型沙土中的研究报道较少。

为响应农业部提出“一控两减三基本”的行动和减轻粪污排放压力,通过奶牛粪肥还田培肥地力和有机替代无机的方法而不减产。以宁夏半干旱风沙土区玉米为对象,通过田间试验研究奶牛粪肥还田对玉米生长及增产效应的研究,明确奶牛粪肥的合理施用量及经济效益,为落实2020年化肥施用零增长和有机肥替代化肥,为实现农业健康可持续发展提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本试验于2018年5月至9月在宁夏银川市月牙湖乡(38°60' N, 106°57' E)进行,该区属于中温带大陆性干旱气候区,大风、多沙、干燥,海拔为1150 m,年均气温8.6℃,全年 $\geq 10^\circ\text{C}$ 的积温约为3300℃,无霜期为140~160 d,平均日照时数约为3000 h,年降水量200 mm,光热充足,昼夜温差大,有利于作物生长发育和淀粉积累。

1.2 供试材料

供试作物为玉米,品种为饲料用“绿博6号”,产量高、抗病性强。

供试土壤类型为毛乌素沙地边缘风沙土,土壤质地为砂壤,垂直剖面层次分化不明显,总体呈浅黄色,土壤表层颜色带灰,弱团块状结构,砂粒含量84.62%,粉粒含量10.53%,粘粒含量4.85%,0~20 cm土层土壤基本化学性质为土壤pH值8.26,有机质5.62 g·kg⁻¹,碱解氮67.72 mg·kg⁻¹,有效磷34.16 mg·kg⁻¹,速效钾112.55 mg·kg⁻¹,全盐0.46 g·kg⁻¹。

试验选用半腐熟奶牛粪肥,其基本理化性质为有机质36.09%,全氮20.26 g·kg⁻¹,全磷13.22 g·kg⁻¹,全钾8.15 g·kg⁻¹,pH值7.62,全盐13.12 g·kg⁻¹。

1.3 试验设计

试验采用单因素多水平随机区组设计,试验设置5个粪肥的处理:分别为0 kg·hm⁻²(CK)、

3750 kg·hm⁻²(T1)、7500 kg·hm⁻²(T2)、11250 kg·hm⁻²(T3)、15000 kg·hm⁻²(T4),每个处理3次重复,共有15个小区,小区大小11 m×30 m。所有奶牛粪肥全部基施,播前整地,规划小区,称量小区粪肥量,均匀撒施于地表,翻耕,耙磨;气吸式精量播种机单粒播种,宽窄行播种,宽行70 cm,窄行40 cm,平均行距55 cm,株距20 cm,在窄行铺设1根滴灌带,生育期全程采用滴灌,共滴水14次,总滴灌量3600 m³·hm⁻²,每次滴灌量为15~25 m³;根据玉米生育期施用不同配方滴灌专用肥,共追施7次,总追肥量600 kg·hm⁻²,包括苗期肥(15-25-10+TE)、拔节肥(20-5-25+TE)、穗肥(25-8-17+TE)、粒肥(35-10-5+TE),其N+P₂O₅+K₂O $\geq 50\%$ 、TE(Fe+Zn+Mn+Cu+B) $\geq 0.5\%$,前4次各追施72.37 kg·hm⁻²,第5及第6次各追施120.20 kg·hm⁻²,第7次追施72.37 kg·hm⁻²;4~6叶期喷洒除草剂一次,整个生育期喷洒农药3次,预防蚜虫、红蜘蛛及茎腐病等;成熟后,在2018年9月22日进行籽粒收获及考种。

1.4 样品测定及方法

1.4.1 土壤和粪肥样品养分含量的测定

有机质采用重铬酸钾容量法-外加热法测定^[12];全氮采用半微量凯氏定氮法测定^[12];全磷采用钼锑抗比色法测定^[12];碱解氮采用碱解扩散法测定^[12];有效磷采用0.5 mol·L⁻¹ NaHCO₃浸提-钼锑抗比色法测定^[12];速效钾采用1 mol·L⁻¹ NH₄OAc溶液浸提-火焰光度法(FP 6400型)测定^[12];pH值(水土比为5:1)采用SH-3精密酸度计测定^[12];全盐采用DDS-11电导率仪测定^[12]。

参照农业部NY 525-2012《有机肥料》养分测定方法进行粪肥养分含量测定。有机质采用重铬酸钾容量法测定^[12];全氮采用浓硫酸消煮法和凯氏定氮仪测定^[12];全磷测定采用钒钼黄比色法^[12];全钾测定采用火焰光度法^[12];pH值和全盐含量按肥水比1:10(w/v)混合,振荡30 min,静止1 h后,用pH计测定pH值,用电导率仪测定全盐含量^[12]。

1.4.2 玉米生长指标测定

抽雄后株高采用钢卷尺测量根基部到茎顶部距离,茎粗采用数显游标卡尺(0.01 mm)测定近地面茎粗,每次测量10株,叶绿素用SPAD-502便携式叶绿素仪测量,每片叶子测定其基部、中部、尖部的叶绿素含量,取其平均值。

1.4.3 光合参数的测定

选择晴天 9:00 ~ 11:00, 采用 CI-6400 便携式光合测量仪测定光合速率、蒸腾速率、胞间 CO₂ 浓度、气孔导度, 每个处理测定 3 株, 每株读取 5 个数值, 取其平均数。

1.4.4 根系状况的测定

玉米收获时, 各处理选取长势基本一致、有代表性的 3 株, 采用完全采样法采集完整根系, 根系样本冲洗干净后, 电子秤称量鲜根重, 用 WinRHIZO 根系图像系统分析计算根系长度、直径、面积、体积指标。

1.4.5 产量的测定

玉米生理成熟后, 各处理除去两边行及两端各 1 m 取中间 8 行, 进行田间综合性状调查。现场调查统计收获株数和果穗数, 各小区连续取 20 株玉米的果穗进行室内考种。采用 PM-8188 谷物水分测定仪测定籽粒含水率, 10 次重复, 取平均数, 按 14% 含水量计算产量, 计算不同处理小区产量, 最后折算成公顷产量。测产指标包括: 穗

长 (cm)、穗粗 (mm)、穗行数、行粒数、秃尖长 (cm)、穗粒数、百粒重 (g) 等指标, 其中穗长用直尺测量, 穗粗和秃尖用数显游标卡尺测定, 百粒重用电子天平测定。

1.5 数据整理与统计

采用 Excel 2010 整理数据和作图, 用 SPSS 22.0 软件进行显著性检验和相关性分析及综合评价, 显著性水平为 0.05 ($n=5$)。

2 结果与分析

2.1 不同奶牛粪肥施用量对玉米株高及茎粗的影响

如图 1 所示, 施用奶牛粪肥显著影响玉米株高和茎粗, 随粪肥施用量的增加, 玉米株高和茎粗也呈现递增趋势, T4 处理的株高最高, 茎粗最粗, CK 处理株高最低, 茎粗最细, 施用奶牛粪肥的处理株高和茎粗均高于 CK。奶牛粪肥施用量为 15000 kg·hm⁻² 时, 株高最高, 茎粗最粗, 株高为 361.01 cm, 茎粗为 3.55 cm, 较不施粪肥 CK 处理, 增幅分别为 27.50% ~ 41.08% 及 50.00% ~ 61.36%。

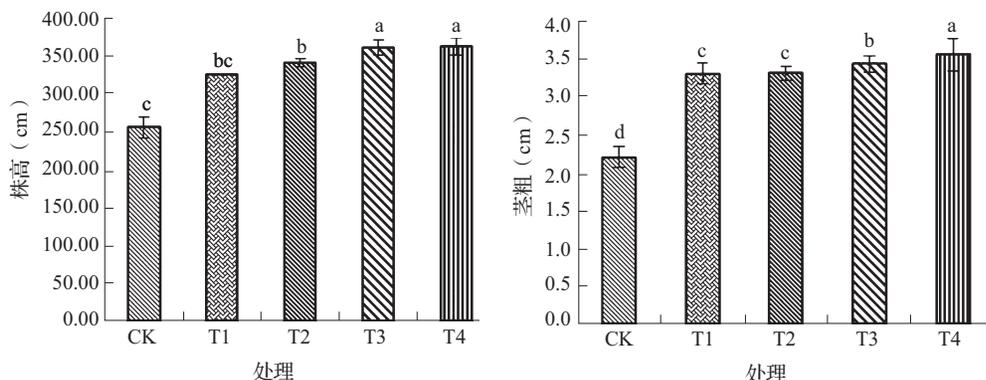


图 1 不同奶牛粪肥施用量对玉米株高及茎粗的影响

注: 图中不同小写字母表示差异在 0.05 水平下显著 ($n=5$)。下同。

2.2 不同奶牛粪肥施用量对玉米抽雄期光合参数及叶绿素的影响

净光合速率是指绿色植物实际光合作用减去呼吸消耗所得干物质积累量, 是叶片光合性能优劣的最终体现。如表 1 所示, 随奶牛粪肥施用量的增加净光合速率呈先增加后降低的趋势, 较 CK 处理相比, T1 净光合速率增幅最大, 增幅为 15.49%, 各处理净光合速率均高于 CK 处理, 说明奶牛粪肥施用量越多越会限制净光合速率; 气孔导度表示气孔的张开程度, 影响光合作用、呼吸作用、蒸腾作用。随粪肥施用量的增加玉米叶片气孔导度呈现先

降低后增加的趋势, 表现为 T4>T3>T2>CK>T1, 较 CK 不施粪肥相比, 提升了 T2、T3、T4 处理玉米叶片气孔导度, 增幅分别为 40%、44%、60%, 说明奶牛粪肥施用量越多叶片气孔张开程度越大; 随奶牛粪肥施用量的增加胞间 CO₂ 浓度和蒸腾速率大致呈先降低后升高的趋势, 较 CK 相比, T2、T3、T4 增施奶牛粪肥的处理, 玉米长势较好, 胞间 CO₂ 浓度和蒸腾速率明显提升, T4 处理的气孔导度、胞间 CO₂ 浓度、蒸腾速率都为各处理最大值, 而 T1 净光合速率为最大值, 说明随奶牛粪肥施用量增加会减缓光合物质输出, 降低光合速率; 叶绿素

是玉米进行光合作用的主要色素, 对其生长和能量传递作用巨大, 随奶牛粪肥施用量的增加叶绿素含量呈先增加后降低的趋势, 各处理叶绿素含量均高

于CK处理, T3处理叶绿素含量最高, 玉米植株光合作用最强, 说明适宜的粪肥施用量会促进玉米生长发育。

表1 不同奶牛粪肥施用量对玉米抽雄期光合参数和叶绿素的影响

处理	净光合速率 ($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	气孔导度 ($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	胞间 CO_2 浓度 ($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2}$)	蒸腾速率 ($\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$)	SPAD 值
CK	30.22 ± 0.48c	0.25 ± 0.02bc	136.80 ± 15.35c	3.13 ± 0.11bc	33.07 ± 1.57e
T1	34.90 ± 1.03a	0.21 ± 0.01c	86.10 ± 8.94d	2.87 ± 0.10c	37.30 ± 9.42d
T2	33.13 ± 1.55a	0.35 ± 0.04ab	176.50 ± 11.20b	4.00 ± 0.29b	45.90 ± 3.53b
T3	32.10 ± 0.77ab	0.36 ± 0.02a	164.21 ± 4.47bc	3.81 ± 0.10b	47.70 ± 3.90a
T4	30.65 ± 0.01c	0.40 ± 0.04a	226.65 ± 7.08a	5.04 ± 0.51a	42.20 ± 1.47c

注: 数据后不同小写字母表示 0.05 水平下差异显著 ($n=5$), 下同。

2.3 不同奶牛粪肥施用量对玉米根系状况的影响

如表2所示, 不同奶牛粪肥用量处理对玉米根系有显著影响, 随奶牛粪肥用量增加, 玉米鲜根重、总根长、根表面积、根系直径、根体积均呈现先增加后降低的趋势。各施粪肥处理玉米鲜根重、总根长、根表面积、根系直径、根体积均高于

CK处理, 其中T3处理表现最为突出, 玉米鲜根重、总根长、根表面积、根系直径、根体积较CK分别显著增长115.80%、103.78%、104.06%、4.63%、101.83%, T1处理表现较差, 表明适宜的粪肥施用量能够促进玉米根系健康发育。

表2 不同奶牛粪肥施用量对玉米根系状况的影响

处理	鲜根重 (g)	总根长 (cm)	根表面积 (cm^2)	根系直径 (mm)	根体积 (cm^3)
CK	105.11 ± 2.10d	2025.39 ± 125.27d	708.38 ± 28.11c	1.08 ± 0.01bc	20.75 ± 0.36d
T1	128.92 ± 2.19c	2589.17 ± 54.66c	752.57 ± 21.24c	1.10 ± 0.01b	25.08 ± 0.37c
T2	185.71 ± 2.12b	3462.44 ± 39.48b	1168.42 ± 21.07b	1.09 ± 0.03bc	35.41 ± 0.38b
T3	226.83 ± 9.41a	4127.28 ± 44.26a	1445.51 ± 21.09a	1.13 ± 0.03a	41.88 ± 1.70a
T4	185.00 ± 4.95b	3635.18 ± 6.89b	1229.28 ± 16.17b	1.10 ± 0.02b	35.27 ± 0.89b

2.4 不同奶牛粪肥施用量对玉米农艺性状的影响

如表3所示, 不同奶牛粪肥用量处理对玉米农艺性状有显著影响, 较CK处理相比, 各施奶牛粪肥处理穗行数、行粒数、穗长、穗粗均高于CK处理, CK处理秃尖长最长, 性状劣于各施奶牛粪肥处理。其中T3处理表现最为突出, 行粒数、穗长、穗粗均高于其他处理, 穗行数与最大值T4处

理差异不显著, 秃尖长最小, 其中穗行数比CK增长27.53%, 行粒数比CK增长31.49%, 穗长比CK增长50.44%, 穗粗比CK增长72.28%, 秃尖长比CK降低53.99%。表明适宜的奶牛粪肥施用量能够促进穗行数、行粒数、穗长、穗粗等农艺指标。

表3 不同奶牛粪肥施用量对玉米农艺性状的影响

处理	穗行数 (行)	行粒数 (个)	穗长 (cm)	穗粗 (mm)	秃尖长 (cm)
CK	13.33 ± 0.67c	29.66 ± 0.33c	13.60 ± 0.20d	31.21 ± 1.62b	3.26 ± 0.18a
T1	16.33 ± 0.33bc	34.00 ± 1.52b	17.43 ± 0.43c	50.74 ± 0.84a	1.96 ± 0.51ab
T2	16.00 ± 1.15bc	38.66 ± 1.45a	20.50 ± 0.28a	52.51 ± 0.55a	1.86 ± 0.73ab
T3	17.00 ± 1.73ab	39.00 ± 0.57a	20.46 ± 0.53a	53.77 ± 0.94a	1.50 ± 0.28b
T4	17.33 ± 0.67a	38.33 ± 1.20a	19.16 ± 0.16b	51.58 ± 0.28a	1.53 ± 0.27b

2.5 不同奶牛粪肥施用量对玉米产量的影响

如表 4 所示, 不同奶牛粪肥施用量显著影响玉米穗粒数、百粒重及产量, 与 CK 处理差异显著, 较 CK 处理, 随奶牛粪施用量增加, 玉米穗粒数、百粒重、产量、增产率均有不同程度增加,

其中 T4 处理表现较为突出, 与 CK 处理差异显著, 较 CK 处理穗粒数、百粒重、产量增幅分别为 67.96%、55.20%、160.67%, 百粒重、产量排序为 T4>T3>T2>T1>CK, 增产率排序为 T4>T3>T2>T1。

表 4 不同奶牛粪肥施用量对玉米产量的影响

处理	穗粒数(粒)	百粒重(g)	产量(kg·hm ⁻²)	增产率(%)
CK	395.33 ± 18.12b	21.45 ± 0.6d	7249.80 ± 202.8d	—
T1	556.33 ± 36.62a	24.97 ± 0.58c	11878.95 ± 276.15c	63.85
T2	615.33 ± 21.79a	28.97 ± 0.20b	15239.85 ± 304.25b	110.21
T3	665.00 ± 77.37a	29.23 ± 0.71b	16619.40 ± 309.50b	129.24
T4	664.00 ± 28.84a	33.29 ± 0.86a	18897.90 ± 312.98a	160.67

2.6 不同奶牛粪肥施用量对玉米经济效益的影响

如表 5 所示, 各处理经济效益从高到低依次为 T4>T3>T2>T1>CK, 较 CK 处理, 施奶牛粪肥 T1 ~ T4 处理提升了 6493.80 ~ 15672.15 元·hm⁻²,

产投比增加了 56.88% ~ 121.10%, T4 处理产投比最大, 达到 2.41, CK 处理的产投比最低, 为 1.09, 各处理总成本均高于 CK 处理, 随奶牛粪肥施用量的增加, 经济效益随之增加。

表 5 不同奶牛粪肥施用量对玉米经济效益的影响

处理	奶牛粪肥成本 (元·hm ⁻²)	其他成本 (元·hm ⁻²)	总成本 (元·hm ⁻²)	产值 (元·hm ⁻²)	经济效益 (元·hm ⁻²)	产投比
CK	0.00	9975.00	9975.00	10874.55	899.55	1.09
T1	450.00	9975.00	10425.00	17818.35	7393.35	1.71
T2	900.00	9975.00	10875.00	22859.78	11984.70	2.10
T3	1350.00	9975.00	11325.00	24929.10	13603.95	2.20
T4	1800.00	9975.00	11775.00	28346.85	16571.70	2.41

注: 其他成本包含机耕 675 元·hm⁻²、种子 750 元·hm⁻²、播种 375 元·hm⁻²、除草剂 225 元·hm⁻²、电费 750 元·hm⁻²、水费 1800 元·hm⁻²、追肥 3000 元·hm⁻²、农药 300 元·hm⁻²、机收 900 元·hm⁻²、滴灌材料 1200 元·hm⁻²、奶牛粪肥 120 元·t⁻¹、玉米籽粒 1.5 元·kg⁻¹。产值(元·hm⁻²) = 产量(kg·hm⁻²) × 玉米籽粒价格(元·kg⁻¹), 经济效益(元·hm⁻²) = 产值(元·hm⁻²) - 总成本(元·hm⁻²)。

2.7 不同奶牛粪肥施用量对玉米贡献率综合评价

在玉米产量与株高、茎粗、叶绿素及根系状况评价中, 通过较为单一的参数无法确定适宜的施肥量, 从而运用主成分分析方法进行综合评价, 可以更加科学地确定相对适宜的施肥量。以玉米产量、穗长、穗粗、秃尖长、株高、茎粗、SPAD 值、鲜根重、总根长、根表面积、根系直径、根体积为评价参数, 首先进行相关性分析, 其次进行主成分分析得出综合评价得分及排名^[13]。如表 6 所示, 玉

米产量与株高呈极显著正相关, 与穗长、茎粗及总根长呈显著正相关, 与秃尖长呈显著负相关。如表 7 所示, T1 ~ T4 施奶牛粪肥处理的综合得分均高于不施奶牛粪肥 CK 处理, 经计算分析得出 T3 处理综合得分排名第一, 说明奶牛粪肥施用量为 T3 时, 玉米生长发育及产量综合评价为最优, 综合得分排名为 T3>T4>T2>T1>CK, 故奶牛粪肥施用量为 T3 时为最佳消纳粪肥用量。

表 6 玉米产量与株高、茎粗、叶绿素及根系状况相关性分析

	产量	穗长	穗粗	秃尖长	株高	茎粗	叶绿素	鲜根重	总根长	根表面积	根系直径	根体积
产量	1.000	0.884*	0.851	-0.932*	0.960**	0.908*	0.827	0.865	0.918*	0.863	0.592	0.878
穗长	0.884*	1.000	0.940*	-0.926*	0.936*	0.899*	0.960**	0.908*	0.924*	0.855	0.636	0.917*
穗粗	0.851	0.940*	1.000	-0.973**	0.956*	0.979**	0.823	0.776	0.818	0.696	0.657	0.785
秃尖长	-0.932*	-0.926*	-0.973**	1.000	-0.996**	-0.989**	-0.829	-0.834	-0.884*	-0.781	-0.719	-0.843
株高	0.960**	0.936*	0.956*	-0.996**	1.000	0.978**	0.855	0.867	0.915*	0.825	0.707	0.876
茎粗	0.908*	0.899*	0.979**	-0.989**	0.978**	1.000	0.766	0.752	0.813	0.691	0.632	0.764
叶绿素	0.827	0.960**	0.823	-0.829	0.855	0.766	1.000	0.970**	0.958*	0.937*	0.686	0.973**
鲜根重	0.865	0.908*	0.776	-0.834	0.867	0.752	0.970**	1.000	0.993**	0.989**	0.779	0.999**
总根长	0.918*	0.924*	0.818	-0.884*	0.915*	0.813	0.958*	0.993**	1.000	0.982**	0.769	0.995**
根表面积	0.863	0.855	0.696	-0.781	0.825	0.691	0.937*	0.989**	0.982**	1.000	0.734	0.989**
根系直径	0.592	0.636	0.657	-0.719	0.707	0.632	0.686	0.779	0.769	0.734	1.000	0.760
根体积	0.878	0.917*	0.785	-0.843	0.876	0.764	0.973**	0.999**	0.995**	0.989**	0.760	1.000

注: * 表示显著相关 ($P < 0.05$); ** 表示极显著相关 ($P < 0.01$)。

表 7 不同奶牛粪肥施用量对玉米贡献率

处理	主成分 (F1)	累积贡献率 (%)	综合得分	排名
CK	-1.55636		-1.35403	5
T1	-0.36666		-0.31899	4
T2	0.37809	87.33	0.328938	3
T3	1.00374		0.873254	1
T4	0.54119		0.470835	2

3 讨论

3.1 不同奶牛粪肥施用量对玉米生长发育的影响

宁夏奶牛粪肥资源丰富, 奶牛粪肥又是养分全面的天然复合肥^[14-15], 合理施用奶牛粪肥即可在有限的绿洲农业区培肥地力, 改善土壤结构, 促进植物根系发育及植株生长发育, 又能消纳当地养殖粪污。奶牛粪肥的合理施用可为微生物提供营养场所, 促进营养的矿化和养分的吸收, 奶牛粪肥用量的多少直接影响玉米所需营养物质和有益微生物数量^[16], 从而影响玉米生长发育。有研究表明, 施用牛粪有机肥可改善玉米株高、促进茎粗增加^[17], 周静等^[18]发现合理施用粪肥可有效满足作物的营养需求, 活化土壤养分, 促使玉米株高及茎粗增加, 较常规施肥增加 6.71% ~ 7.00%。本试验研究表明施用奶牛粪肥, 玉米株高及茎粗较 CK 增加 27.50% ~ 41.08% 及 50.00% ~ 61.36%, 增幅高于以上研究, 其原因: 一是该区域土壤贫瘠, 对

照完全不施肥, 其对照的株高及茎粗与施肥处理差异明显; 二是增施奶牛粪肥后, 供应玉米生长的养分随之增多, 不同施肥量处理玉米株高及茎粗也就有所差异。

植物的光合作用不仅受气候影响, 还受土肥水供应状况的影响^[19], 适宜的施肥量能够促进光合效率的增加。有研究表明, 施用奶牛粪肥的处理小麦苗期至孕穗期光合速率均高于 CK 处理, 对蒸腾速率影响较小, 施用奶牛粪肥在越冬前显著提升油菜的蒸腾速率^[20], 生牛粪 4835 kg · hm⁻² 和秸秆 3000 kg · hm⁻² 混合施用降低了玉米胞间 CO₂ 浓度, 提高了气孔导度和蒸腾速率, 进而提高了净光合速率, 促进了叶片花后的光合性能^[9]。本试验研究表明, 增施奶牛粪肥处理, 在抽雄期叶片净光合速率、气孔导度、胞间 CO₂ 浓度、蒸腾速率、叶绿素, 较 CK 分别增加 1.42% ~ 15.49%、40% ~ 60%、29.02% ~ 65.70%、21.73% ~ 55.59%、12.79% ~ 44.23%。其原因: 一是本试验采用田间试验, 除奶牛粪肥施用量不同以外, 其他环境基本一致, 引起玉米抽雄期光合参数变化的因素是供应养分及玉米生长发育本身的差异; 二是奶牛粪肥还田经过一段时间腐解, 随施肥量增加供应养分也随之增加, 玉米生长发育状况好, 光合效率也就明显提升; 三是粪肥未经处理会携带病菌及寄生虫之类的有害物质, 适宜的施肥量有助于玉米生长发育, 过量的粪肥施用量, 携带有害物质较多, 对玉米造成的抑制作用就需要一段时间的消化与缓解, 从而影

响玉米叶片光合效率,当奶牛粪肥用量达到 15000 kg·hm⁻²时玉米叶片光合效率低于 11250 kg·hm⁻²的处理。

奶牛粪肥养分全面,可改善根系环境,如土壤含水量、紧实度及容重等,从而刺激植物根系生长^[21-23]。有研究表明,在灰漠土上增施有机肥植株根长、根尖数及根直径增加显著^[24]。本研究发现增施奶牛粪肥显著增加玉米鲜根重、总根长、根表面积、根系直径、根体积,较不施肥处理分别增加 115.80%、103.78%、104.06%、4.63%、101.83,这与梁尧等^[25]的研究结果基本相似。其原因:一是奶牛粪肥养分含量高且营养成分全面,含有大量的生物活性物质,可有效活化土壤微生物,创造玉米根系健康生长的环境;二是增施奶牛粪肥后土壤相关物理特性改善,沙地蓄水能力弱,增施奶牛粪肥可使水气状况更加合理,从而促进玉米根系生长。

3.2 不同奶牛粪肥施用量对玉米产量的影响

玉米产量的有效提高与施肥量、施肥类型、施肥方式密切相关^[26]。Arancon 等^[27]研究发现蚯蚓粪肥施用量对草莓产量提升具有显著作用;李永平等^[28]也发现与纯施化肥相比,施用牛粪玉米产量增加了 6.5%~27.6%;王丽英等^[29]发现,牛粪与化肥配能获得 90000~125000 kg·hm⁻²的番茄产量;周静等^[18]发现施粪肥处理较对照玉米产量增加 25.59%~39.15%,合理施用粪肥可以有效促使玉米壮根、促苗、保果、促进玉米健康生长,从而促进穗行数、行粒数、穗长、穗粗的增加,秃尖长度减小。本试验研究表明增施奶牛粪肥能显著促进玉米增产,与 CK 处理相比,增施粪肥后,玉米产量提升了 63.85%~160.67%,当奶牛粪肥施用量为 11250 kg·hm⁻²时,行粒数、穗长、穗粗、秃尖长度表现均优于其他处理。其原因:一是奶牛粪肥养分较为均衡,施入土壤后,经一段时间的腐解,养分源源不断地供应玉米根系吸收,同时释放二氧化碳,改善玉米氮素营养,促进玉米产量增加;二是在适宜施肥范围内,随奶牛粪肥用量增加,玉米根系对养分吸收增加,可有效提高光合速率,促进干物质积累,田间农艺性状指标表现较好,从而提高产量;三是奶牛粪肥中含有各种有机养分,有些可以直接吸收利用,对作物生长代谢具有十分重要的作用,只要施肥量得当,就能促进作物健康生长,从而达到增产效果。试验只是对生长、抽雄期光合参数、产量数据做了分析,土壤相关指标等有

待进一步深入探究,进而为沙地合理消纳养殖粪污及改土培肥提供科学依据。在本试验研究基础上,砂质土壤奶牛粪肥施用注意事项:(1)施用奶牛粪肥抛撒均匀后应进行深翻,大量的奶牛粪肥集中在地表,虽然与土壤进行了混合,但仍较集中,即使已经腐熟的粪肥,在用量大的情况下,翻耕深度较浅也会影响玉米根系生长;(2)砂质土保水保肥效果差,补水量不宜太大,少量多次,防止养分随水下渗。

4 结论

本试验研究表明,宁夏沙地增施奶牛粪肥对玉米生长发育和产量有显著影响,随奶牛粪肥用量增加,各项指标均显著向好。从综合施肥成本和效益来看,在宁夏沙地上增施 11250 kg·hm⁻²奶牛粪肥可有效消纳养殖粪污,促进农田生产力的提高,实现沙地玉米生产的最佳效益。

参考文献:

- [1] 黄红卫.宁夏畜禽养殖废弃物资源化利用现状调研报告[J].畜牧业环境,2019(2):35-39.
- [2] 李永平,田艳,史向远,等.施用畜禽粪肥对土壤呼吸和玉米产量的影响及其增效分析[J].华北农学报,2017,32(1):193-200.
- [3] 张鸣,高天鹏,李昂,等.畜禽粪肥与化肥配施对春小麦产量和养分吸收利用的影响[J].麦类作物学报,2014,34(2):216-221.
- [4] 邱吟霜,王西娜,李培富,等.不同种类有机肥及用量对当季旱地土壤肥力和玉米产量的影响[J].中国土壤与肥料,2019(6):182-189.
- [5] 左文刚,黄顾林,朱晓雯,等.施用牛粪对沿海泥质滩涂土壤原始肥力驱动及黑麦草幼苗生长的影响[J].植物营养与肥料学报,2016,22(2):372-379.
- [6] 李燕青,温延臣,林治安,等.不同有机肥与化肥配施对作物产量及农田氮肥气态损失的影响[J].植物营养与肥料学报,2019,25(11):1835-1846.
- [7] 李燕青,温延臣,林治安,等.不同有机肥与化肥配施对氮素利用率和土壤肥力的影响[J].植物营养与肥料学报,2019,25(10):1669-1678.
- [8] 孟艳,孙晓涵,郑宾,等.有机物沟埋还田模式与花后灌水量对玉米光合特性和产量的影响[J].应用生态学报,2018,29(8):2541-2550.
- [9] 徐大兵,邓建强,彭五星,等.施用牛粪和绿肥对土地整治区玉米产量和土壤理化性质的影响[J].应用生态学报,2017,28(3):856-862.
- [10] Aggelides S M, Londra P A. Effects of compost produced from town wastes and sewage sludge on the physical properties of a

- loamy and clay soil [J]. *Bioresource Technology*, 2000, 71 (3): 253–259.
- [11] Bittman S, Forge T A, Kowalenko C G. Responses of the bacterial and fungal biomass in a grassland soil to multi-year applications of dairy manure slurry and fertilizer [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2005, 37 (4): 613–623.
- [12] 鲍士旦. 土壤农化分析 (第3版) [M]. 北京: 中国农业出版社, 2010.
- [13] 杨竞, 童祯恭, 刘玉哲. SPSS 软件对饮用水水质进行主成分分析评价的运用 [J]. *环境科学与技术*, 2011, 34 (7): 171–174.
- [14] 孙超, 潘瑜春, 刘玉. 畜禽粪便资源现状及替代化肥潜力研究: 以安徽省固镇县为例 [J]. *生态与农村环境学报*, 2017, 33 (4): 324–331.
- [15] 王晓娟, 贾志宽, 梁连友, 等. 不同有机肥量对旱地玉米光合特性和产量的影响 [J]. *应用生态学报*, 2012, 23 (2): 419–425.
- [16] Hanson P J, Edwards N T, Garten C T. Separating root and soil microbial contributions to soil respiration: A review of methods and observations [J]. *Biogeochemistry*, 2000, 48 (1): 115–146.
- [17] 邱吟霜. 不同有机肥对土壤理化性质及玉米生长的影响 [D]. 银川: 宁夏大学, 2019.
- [18] 周静, 籍增顺, 李永平, 等. 施用畜禽粪肥对旱地玉米生产力的影响 [J]. *山西农业科学*, 2012, 40 (10): 1049–1054.
- [19] 邵云, 王敬娣, 冯荣成, 等. 耕作方式和有机物料还田对小麦叶片光合特性及产量的影响 [J]. *江苏农业科学*, 2018, 46 (11): 69–73.
- [20] 王林权, 周春菊, 郑险峰, 等. 鸡粪和奶牛粪对小麦和油菜光合特性的影响 [J]. *西北农林科技大学学报 (自然科学版)*, 1997 (6): 44–49.
- [21] Marinari S, Masciandaro G, Ceccanti B, et al. Influence of organic and mineral fertilisers on soil biological and physical properties [J]. *Bioresource Technology*, 2000, 72 (1): 9–17.
- [22] Mu X, Zhao Y, Liu K, et al. Responses of soil properties, root growth and crop yield to tillage and crop residue management in a wheat–maize cropping system on the North China Plain [J]. *European Journal of Agronomy*, 2016, 78: 32–43.
- [23] 槐圣昌, 刘玲玲, 汝甲荣, 等. 增施有机肥改善黑土物理特性与促进玉米根系生长的效果 [J]. *中国土壤与肥料*, 2020 (2): 40–46.
- [24] 张国娟, 濮晓珍, 张鹏鹏, 等. 干旱区棉花秸秆还田和施肥对土壤氮素有效性及根系生物量的影响 [J]. *中国农业科学*, 2017, 50 (13): 2624–2634.
- [25] 梁尧, 蔡红光, 袁静, 等. 深松结合不同施肥方式对春玉米根系时空分布特征的影响 [J]. *西北农林科技大学学报 (自然科学版)*, 2019, 47 (6): 31–40.
- [26] 王曙光, 许轲, 戴其根, 等. 氮肥运筹对太湖麦区弱筋小麦宁麦9号产量与品质的影响 [J]. *麦类作物学报*, 2005 (5): 65–68.
- [27] Arancon N Q, Edwards C A, Bierenman P. Influences of vermicomposts on field strawberries: Part 2. Effects on soil microbiological and chemical properties [J]. *Bioresource Technology*, 2006, 97: 831–840.
- [28] 李永平, 史向远, 周静, 等. 不同畜禽粪肥对土壤培肥及玉米增产效应的影响 [J]. *山西农业科学*, 2013, 41 (6): 590–593.
- [29] 王丽英, 张彦才, 陈丽莉, 等. 不同种类畜禽粪肥与化肥肥施对设施番茄产量、品质和土壤养分的影响 [J]. *华北农学报*, 2011, 26 (S2): 152–156.

Effect of applying dairy manure on corn growth and yield in Ningxia sandy soil

LIU Shao-quan, WANG Jing, TIAN Chao, LIU Zhi, LI Dong-li, WAN Jia-miao, SUN Quan* (College of Agriculture, Ningxia University, Yinchuan Ningxia 750021)

Abstract: The barren sandy land in northwestern Ningxia has restricted corn growth due to insufficient nutrients. The application of cow manure from surrounding farms can effectively improve soil quality, thereby promoting healthy growth and yield formation of corn. Understanding reasonable farmland manure disposal capacity can not only improve farmland production capacity, but also realize the maximum benefit of corn production. Taking fodder corn “Lvbo 6” as the research object, under the premise of drip irrigation and topdressing with integrated water and fertilizer application, 3750 (T1), 7500 (T2), and 11250 (T3), 15000 kg · hm⁻² (T4) of semi-rotten mature cow dung treatments were set up, with no manure applied as the control (CK). The results showed that the plant height and stem diameter of corn increased by 27.50% ~ 41.08% and 50.00% ~ 61.36% after adding cow manure compared with CK. When applying 15000 kg · hm⁻² cow manure, the plant height and stem diameter of corn increased the most. The application of cow manure had a significant effect on the photosynthetic characteristics of corn during the tasseling period, compared with CK, the net photosynthesis rate, stomatal conductance, intercellular CO₂ concentration, transpiration rate, and chlorophyll increased by 1.42% ~ 15.49%, 40% ~ 60%, 29.02% ~ 65.70%, 21.73% ~ 55.59%, 12.79% ~ 44.23% after the application of cow manure, respecting. When applying 15000 kg · hm⁻² cow manure, the photosynthetic parameters of corn during tasseling period were more prominent. Corn roots developed best when 11250 kg · hm⁻² cow manure was applied, and the corn

fresh root weight, total root length, root surface area, root diameter, and root volume increased by 115.80%, 103.78%, 104.06%, 4.63%, and 101.83%, respectively, compared to CK. Application of manure had a significant effect on corn agronomic trait, compared with CK, ear rows, row grains, ear length, and ear thickness increased by 20.03% ~ 30.00%, 14.63% ~ 31.49%, 28.16% ~ 50.74%, 62.57% ~ 72.28%, respectively, and the length of bald tip decreased by 39.88% ~ 53.99%. When applying 11250 kg · hm⁻² cow manure, the number of rows, ear length, ear thickness and bald tip length performed the best. The application of cow manure significantly increased the number of corn ears and the weight of 100 kernels, there was no significant difference on the number of spikes per manure treatment, and the yield was 11878.95 ~ 18897.90 kg · hm⁻². Compared with CK, the output increased by 63.85% ~ 160.67%, and economic benefits increased by 166.53% ~ 401.90%. Therefore, it is necessary to improve the soil conditions and promote the increase of corn yield by supplementing suitable organic matter in the corn field of sandy land. From the perspective of fertilization cost and benefit, adding 11250 kg · hm⁻² semi-rotted cow manure to sandy soil with corn in Ningxia dairy farming area can not only effectively consume farm manure, but also promote high-quality and efficient production of local corn.

Key words: cow manure; corn; root system; growth and development; yield; drip irrigation