

施钾方式对高产春玉米根系分布及其活力的影响

张玉芹¹, 杨恒山¹, 高聚林², 范秀艳¹, 梁怀宇¹

(1. 内蒙古民族大学 农学院, 内蒙古 通辽 028042; 2. 内蒙古农业大学 农学院, 内蒙古 呼和浩特 010019)

摘要: [目的] 探讨施钾方式(一次性施入和钾肥后移)对高产春玉米根系特性的影响, 为高产春玉米钾素养分调控提供理论依据。[方法] 以金山 27 玉米为供试品种, 2 个施钾水平(K_2O 150 和 300 kg/hm^2)及施钾后移处理下, 测定不同生育时期各土层根系干物质重、根系活力及其酶活性, 成熟期测定根条数、根幅。[结果] 300 kg/hm^2 施钾水平与 150 kg/hm^2 施钾水平相比, 各土层根系干重增加, 尤以吐丝前 0—20 cm 土层为根干重增加幅度最大, 20—60 cm 土层根干重占总干重比例减小, 尤以乳熟期为甚; 各土层根条数、最大根幅增加, 最大根幅下移; 各生育时期各土层根系活力、超氧化物歧化酶(SOD)活性和过氧化物酶(POD)活性随施钾量增加而增加, 丙二醛(MDA)含量下降。相同施钾水平下, 施钾后移各生育时期 0—60 cm 各土层根系干重减小; 0—20 cm 土层根干重占总干重比例增加; 最大根幅、根条数及最大根幅深度均减少, 且随土层深度增加差异增大; 各土层根系活力、SOD 酶活性和 POD 酶活性降低, MDA 含量增加。[结论] 300 kg/hm^2 施钾量较 150 kg/hm^2 施钾量促进玉米根系生长, 且延缓根系衰老, 尤其可促进深层根系的生长; 同一施钾水平下, 施钾后移则促进作用不明显, 甚至降低了根系的干重。

关键词: 高产玉米; 施钾方式; 根系分布; 生理特性

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2015)06-0064-06

中图分类号: S513

Effects of Potassium Fertilization Methods on Root Distribution and Root Vitality of a High-Yield Spring Maize

ZHANG Yuqin¹, YANG Hengshan¹, GAO Julin², FAN Xiuyan¹, LIANG Huaiyu¹

(1. College of Agronomy, Inner Mongolia University for Nationalities, Tongliao, Inner Mongolia 028042, China; 2. College of Agronomy, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot, Inner Mongolia 010019, China)

Abstract: [Objective] To provide some bases for nutrient regulation of high yield maize, the effects of potassium fertilization on root vitality of a high yield spring maize were investigated. Potassium fertilization had application level treatment with two levels of 150 and 300 kg/hm^2 and application method treatment with levels of once-and-base fertilizer and postponed application. [Methods] A maize cultivar, Jinshan 27, was used as the test material. Its dry root weight, root vigor, activities of superoxide dismutase(SOD) and peroxidase(POD), and malondialdehyde(MDA) content were measured at each stage; root number and root width were measured at mature stage. [Results] Root dry weight at 300 kg/hm^2 application level was greater than that at 150 kg/hm^2 , especially it was obvious in 0—20 cm layer before silking stage. The percentage of root weight at 20—60 cm was contrary, especially in milking stage. Root number increased at high application level, and also the biggest root width increased and proliferated deeper. At high application level, vigor, SOD and POD activities of root in all growth period increased, while MDA content decreased. Root weight of postponed fertilization at 0—40 cm soil layer was less than that of once-and-base fertilization method; while, the percentage of root weight at 0—20 cm soil layer was relatively great. Root number, the biggest root width and the layer with the biggest root width of postponed application was lower than that of the once-and base application method, and the differences of these indices between the two methods increased with the increase of soil depth. Root vigor and activities of SOD and POD of postponed application decreased; MDA content increased. [Conclusion] Once-and-base K application could improve the root growth of maize and es-

收稿日期: 2014-08-20

修回日期: 2014-09-19

资助项目: 国家科技支撑计划“内蒙古春玉米大面积均衡增产技术集成与示范”(2012BAD04B00; 2013BAD07B04); 内蒙古自然科学基金项目(2012MS0314); 内蒙古民族大学博士启动项目(S265)

第一作者: 张玉芹(1977—), 女(蒙古族), 内蒙古自治区赤峰市人, 博士, 副教授, 主要从事作物高产栽培方面的研究。E-mail: zhyq369@126.com。

pecially the proliferation at deep layer was promoted; It also delayed the senescence of root. These effects were not observed, and moreover the contrary effects it were for postponed application.

Keywords: spring maize; potassium application methods; root distribution; physiological characteristics

合理施肥是实现作物高产的重要措施之一,也是调控生物产量及组分动态转化的重要手段^[1-2]。随着氮、磷肥料的施用,单产的提高,钾已成为许多土壤继氮、磷之后的又一高产限制因子^[3]。中国钾矿资源和钾肥缺乏^[4],提高作物对钾肥的吸收利用效率是缓解资源短缺、节约资源的重要途径^[5]。根系是作物物质生产的基础,直接决定养分的吸收能力和抗倒能力^[6],尤其是在高产栽培中,根系的分布和生长状态对作物产量的形成至关重要。已有的研究^[7]指出,在施氮、磷肥的基础上施钾,能明显影响根的形态与生长,缺钾处理显著抑制了根系伸长。也有研究^[8]认为,缺钾不抑制根系的伸长生长,但降低了侧根数和侧根分布密度。近些年来,随着品种的改变,栽培技术的改进,产量不断提高,玉米根系也发生变化,研究

高产栽培下不同施钾方式对春玉米根系特性的影响对产量提高有重要意义。但目前有关根系生长与钾营养的关系其他作物上研究较多^[9-10],在玉米方面的研究很少。钾肥后移对根系影响未见报道。因此,本研究对 2 个施钾水平下钾肥后移处理对高产春玉米根系特性的影响进行试验分析,以期对高产春玉米的钾肥管理提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于 2011 年在地处西辽河平原的内蒙古民族大学试验农场进行。试验点地理坐标为 43°36'N, 122°22'E,海拔 178 m;土壤为灰色草甸土,播前试验地耕层(0—20 cm)土壤养分状况详见表 1。

表 1 试验地耕层基础地力

土层/cm	有机质/(g·kg ⁻¹)	全氮/(g·kg ⁻¹)	碱解氮/(mg·kg ⁻¹)	速效磷/(mg·kg ⁻¹)	速效钾/(mg·kg ⁻¹)
0—20	24.6	0.96	58.78	10.81	79.92

1.2 试验设计

以金山 27 玉米为试材,磷肥为过磷酸钙、含 P₂O₅ 16%,一次性底施,170 kg/hm²;氮肥为尿素,含 N 46%,在拔节期、大喇叭口期和抽雄期按 3:6:1 的比例追施,共 375 kg/hm²。钾肥为德国钾盐公司生产红牛硫酸钾,含 K₂O 50%,钾肥试验方案详见表 2。各处理均等行距种植,行距 50 cm,株距 22.2 cm,小区面积为 60 m²,随机排列,3 次重复。2011 年 5 月 2 日播种,9 月 26 日收获。

表 2 钾素养分调控田间试验方案

处理	钾施入量/ (kg·hm ⁻²)	施肥时期			
		基施		小口期追施	
		比例	施入量	比例	施入量
CK	0	0	0	0	0
T _{150-I}	150	1	150	0	0
T _{150-II}	150	2/3	100	1/3	50
T _{150-III}	150	1/2	75	1/2	75
T _{300-I}	300	1	300	0	0
T _{300-II}	300	2/3	200	1/3	100
T _{300-III}	300	1/2	150	1/2	150

1.3 测定项目与方法

1.3.1 根系干重 在大喇叭口期(V₁₂)、吐丝期(VT)、乳熟期(R₃)和完熟期(R₆),同行内连续 3 株,

以第 1 株 1/2 株距处到第 3 株 1/2 株距处为长,以 1/2 行距为宽,挖长方形样方分层取根,每 20 cm 为 1 层,取根深度为 60 cm,取样 3 株,3 次重复。取出后装网袋,用水冲洗干净,剔除杂质并检出死根后烘干称重。

1.3.2 根条数及根幅 完熟期将根挖出后,置于贴有坐标纸的平板上,查 10,20 和 30 cm 处单株根条数,同时测定最大根幅(植株根系水平分布最大直径)及最大根幅所处深度,每处理取样 5 株,3 次重复。

1.3.3 根系酶活性及根活力 取样方法同 1.3.1,用水冲洗根系,剔除杂质并检出死根后用鲜根测定酶活性及根系活力。SOD 活性用 NBT 光化还原法^[11]测定,POD 活性用愈创木酚法^[11]测定,MDA 含量采用硫代巴比妥酸法^[11]测定。根系活力采用 TTC 还原法^[11]测定。

1.3.4 选 3 个生长均匀的样方测产,样方面积均为 30 m²,测定子粒产量,同时取样测定籽粒含水率,并折算成 14% 含水率下的产量。

2 结果与分析

2.1 不同土层根系干重

由表 3 可知,施钾处理各生育时期各土层根系干重均高于对照。与 T_{150-I} 相比,T_{300-I} 各生育时期各土

层根干重均升高,尤以吐丝期后 0—20 cm 为甚,成熟期 T_{300-I} 较 T_{150-I} 高 13.35%。同一施钾水平下,各生育时期 0—40 cm 土层均表现为施钾后移根系干重减小,40—60 cm 土层差异不显著。

表 3 不同施钾方式对不同土层根重的影响

土层/cm	生长期	根干重(g/株)						
		T_{150-I}	T_{150-II}	$T_{150-III}$	T_{300-I}	T_{300-II}	$T_{300-III}$	CK
0—20	V_{12}	15.56 ^a	15.08 ^a	14.02 ^a	15.76 ^a	16.29 ^a	13.78 ^{ab}	12.13 ^b
	VT	21.58 ^{ab}	20.35 ^b	18.10 ^{bc}	23.90 ^a	20.71 ^b	17.58 ^{bc}	16.72 ^c
	R_3	18.34 ^b	16.91 ^c	15.37 ^{cd}	20.31 ^a	16.99 ^c	14.58 ^d	13.48 ^e
	R_6	15.05 ^b	12.98 ^d	12.51 ^d	17.06 ^a	14.93 ^{bc}	13.68 ^c	11.20 ^d
20—40	V_{12}	1.04 ^a	0.81 ^b	0.67 ^c	1.15 ^a	0.97 ^b	0.74 ^{bc}	0.58 ^d
	VT	2.40 ^a	1.71 ^b	1.33 ^c	2.64 ^a	2.05 ^{ab}	1.27 ^c	0.96 ^d
	R_3	2.85 ^a	2.01 ^b	1.63 ^c	3.11 ^a	2.30 ^b	1.45 ^d	0.97 ^e
	R_6	1.04 ^{ab}	0.72 ^b	0.57 ^c	1.21 ^a	0.83 ^b	0.71 ^b	0.52 ^c
40—60	V_{12}	0.67 ^a	0.54 ^b	0.41 ^b	0.73 ^a	0.61 ^{ab}	0.46 ^b	0.30 ^c
	VT	0.77 ^{ab}	0.60 ^b	0.47 ^c	0.88 ^a	0.66 ^b	0.49 ^c	0.31 ^d
	R_3	0.88 ^{ab}	0.64 ^{bc}	0.51 ^c	0.98 ^a	0.76 ^b	0.58 ^c	0.41 ^d
	R_6	0.61 ^a	0.47 ^b	0.34 ^c	0.63 ^a	0.49 ^b	0.36 ^c	0.23 ^d

注:注: V_{12} 为大喇叭口期,VT为吐丝期, R_3 为乳熟期, R_6 为完熟期。下同。

2.2 根重垂直分布

由表 4 可知,0—20 cm 土层中,施钾处理根干重占总干重比例各生育时期均小于对照;与 T_{150-I} 相比, T_{300-I} 根干重占总干重比例各生育时期均下降,尤以乳熟期为甚;同一施钾水平下,施钾后移根干重占总干重比例增加,且施钾量越少越显著,其中, $T_{150-III}$

较 T_{150-I} 高出 3.1%,说明前期施钾促进下层根系生长。

20—60 cm 土层,根干重占总干重比例各生育时期均大于对照;与 T_{150-I} 相比, T_{300-I} 根干重占总干重比例各生育时期均升高,乳熟期差异最大;同一施钾水平下,随施钾后移量增加而减小。

表 4 不同施钾方式对各生育时期根系干重在土壤中的垂直分布的影响

土层/cm	时期	分布比例/%						
		T_{150-I}	T_{150-II}	$T_{150-III}$	T_{300-I}	T_{300-II}	$T_{300-III}$	CK
0—20	V_{12}	90.10	91.78	92.85	89.34	91.16	91.99	93.24
	VT	87.19	89.81	90.95	87.16	88.43	90.90	92.94
	R_3	83.10	86.45	87.78	83.24	84.74	87.78	90.71
	R_6	90.12	91.60	93.22	90.26	91.88	92.75	93.72
20—40	V_{12}	6.02	4.93	4.44	6.52	5.43	4.94	4.46
	VT	9.70	7.55	6.68	9.63	8.75	6.57	5.34
	R_3	12.91	10.28	9.31	12.75	11.47	8.73	6.53
	R_6	6.23	5.08	4.25	6.40	5.11	4.81	4.35
40—60	V_{12}	3.88	3.29	2.72	4.14	3.41	3.07	2.31
	VT	3.11	2.65	2.36	3.21	2.82	2.53	1.72
	R_3	3.99	3.27	2.91	4.02	3.79	3.49	2.76
	R_6	3.65	3.32	2.53	3.33	3.02	2.44	1.92

2.3 完熟期根条数

由图 1 可知,完熟期玉米单株根条数均随土层深度的增加而减少,施钾处理各土层根条数均高于对照。与 T_{150-I} 相比, T_{300-I} 根条数增加,在 10 cm 处, T_{300-I} 根条数较 T_{150-I} 高出 7.9%,比对照高出 11.5%;20 cm 处, T_{300-I} 根条数较 T_{150-I} 高出 8.2%,比对照高出 19.5%,30 cm 处, T_{300-I} 根条数较 T_{150-I} 高出

12.8%,比对照高出 60.3%。同一施钾水平下,施钾后移根条数减少,且随土层深度增加差异增大,0—20 cm, T_{300-II} , $T_{300-III}$ 分别较 T_{300-I} 减少了 6.5%和 9.0%, T_{150-II} , $T_{150-III}$ 分别较 T_{150-I} 减少了 8.8%和 15.6%。20—40 cm, T_{300-II} , $T_{300-III}$ 分别较 T_{300-I} 减少了 11.6%和 19.4.0%, T_{150-II} , $T_{150-III}$ 分别较 T_{150-I} 减少了 12.8%和 21.6%。40—60 cm, T_{300-II} , $T_{300-III}$ 分别较

T_{300-I} 减少了 14.9% 和 24.4.0%, T_{150-II} , $T_{150-III}$ 分别减少了 T_{150-I} 降低了 15.7% 和 28.6%。

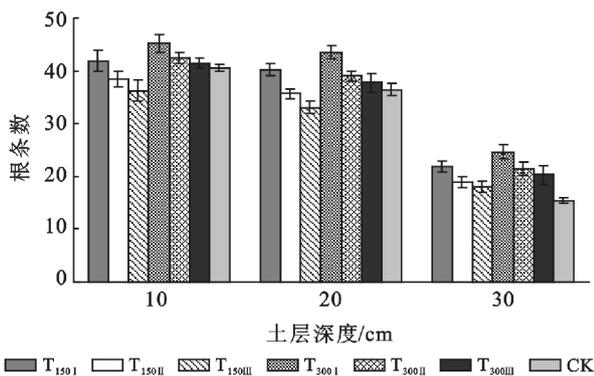


图 1 不同施钾方式对春玉米成熟期根条数的影响

2.4 完熟期根幅

由图 2 可知,施钾处理完熟期最大根幅深度均大于对照。与 T_{150-I} 相比, T_{300-I} 最大根幅下移,最大根幅深度较 T_{150-I} 下移了 6.2%。同一施钾水平下,施钾后移最大根幅深度减少, T_{300-II} , $T_{300-III}$ 分别较 T_{300-I} 减少了 7.9% 和 12.4.0%, T_{150-II} , $T_{150-III}$ 分别较 T_{150-I} 减少了 9.7% 和 18.1%。施钾处理最大根幅大于对照。与 T_{150-I} 相比, T_{300-I} 最大根幅增加, T_{300-I} 较 T_{150-I} 高出 14.2%; 同一施钾水平下,施钾后移最大

根幅减小, T_{300-II} , $T_{300-III}$ 分别较 T_{300-I} 减少 6.8% 和 9.4.0%, T_{150-II} , $T_{150-III}$ 分别较 T_{150-I} 减少 9.4% 和 14.3%。

2.5 根系活力

由表 5 可知,施钾处理各生育时期各土层根系活力均显著高于对照。与 T_{150-I} 相比, T_{300-I} 各土层根系活力增加,尤以吐丝期 20—40 cm 土层为甚, T_{300-I} 较 T_{150-I} 高 12.2%。同一施钾水平下,施钾后移各土层根系活力均降低,尤以 0—20 cm 土层为甚,其中,乳熟期差异最大, T_{300-II} , $T_{300-III}$ 分别较 T_{300-I} 降低了 17.5% 和 38.2%, T_{150-II} , $T_{150-III}$ 分别较 T_{150-I} 降低了 20.9% 和 33.3%。

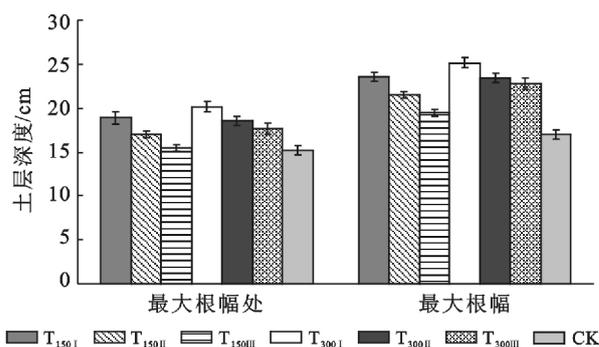


图 2 不同施钾方式对成熟期最大根幅的影响

表 5 不同施钾方式对根系活力的影响

土层深度/cm	时期	根系活力/ $(\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1})$						
		T_{150-I}	T_{150-II}	$T_{150-III}$	T_{300-I}	T_{300-II}	$T_{300-III}$	CK
0—20	V_{12}	29.1±3.7 ^b	24.3±2.6 ^b	19.7±2.4 ^b	31.5±4.7 ^b	26.1±3.2 ^b	23.8±1.6 ^a	15.3±1.3 ^b
	VT	38.4±2.7 ^b	31.8±4.0 ^b	26.3±2.3 ^c	42.1±3.1 ^a	34.7±2.6 ^b	28.1±1.9 ^c	19.4±1.4 ^d
	R_3	32.1±2.8 ^b	25.4±2.0 ^c	21.4±1.6 ^d	36.1±2.5 ^a	29.8±2.4 ^b	22.3±1.9 ^{cd}	10.4±1.4 ^e
20—40	V_{12}	26.4±1.3 ^b	22.5±1.1 ^c	15.3±1.0 ^d	30.2±1.6 ^a	27.1±1.6 ^b	18.3±2.3 ^d	10.1±0.9 ^e
	VT	34.1±2.1 ^b	30.0±1.5 ^{bc}	25.1±1.4 ^c	38.2±1.9 ^a	30.2±1.5 ^{bc}	26.1±1.8 ^c	15.4±1.0 ^d
	R_3	31.3±1.7 ^{ab}	25.1±0.9 ^b	22.1±1.0 ^c	33.1±1.2 ^a	30.2±1.1 ^b	24.1±1.3 ^c	14.2±1.4 ^d
40—60	V_{12}	24.3±1.2 ^b	21.3±1.0 ^c	19.1±1.1 ^{cd}	26.4±1.1 ^a	24.2±1.4 ^b	20.2±12.2 ^c	12.3±1.0 ^d
	VT	32.4±1.7 ^b	30.1±1.2 ^b	26.1±1.2 ^d	35.2±1.6 ^a	30.6±2.1 ^c	29.2±1.6 ^b	14.2±0.6 ^d
	R_3	27.1±1.0 ^b	23.1±1.2 ^c	20.1±0.9 ^d	29.3±1.1 ^a	26.8±1.2 ^b	22.1±1.0 ^c	13.8±0.8 ^e

2.6 根系抗氧化酶活性

由表 6 可知,根系 SOD 酶(超氧化物歧化酶)活性和 POD 酶(过氧化物酶)活性变化趋势基本一致。施钾处理吐丝期和乳熟期各土层 SOD 和 POD 活性均显著高于对照。与 T_{150-I} 相比, T_{300-I} 各土层酶活性增加,尤以乳熟期 20—40 cm 土层为甚,其中, T_{300-I} SOD 酶活性较 T_{150-I} 高出 25.2%, T_{300-I} POD 酶活性较 T_{150-I} 高出 12.1%。同一施钾水平下,施钾后移根系 SOD 和 POD 酶活性降低,尤以乳熟期 0—20 cm 土层为甚。其中, SOD 酶活性 T_{300-II} , $T_{300-III}$ 分别较 T_{300-I} 降低了 11.9% 和 23.8%, T_{150-II} , $T_{150-III}$ 分别较

T_{150-I} 降低了 14.4% 和 26.8%; POD 酶活性 T_{300-II} , $T_{300-III}$ 分别较 T_{300-I} 降低了 12.0% 和 28.9%, T_{150-II} , $T_{150-III}$ 分别较 T_{150-I} 降低了 14.4% 和 23.0%。

施钾各处理 MDA(丙二醛)含量均显著低于对照。与 T_{150-I} 相比, T_{300-I} 各土层 MDA 含量下降,以乳熟期 0—20 cm 土层最为明显,其中, T_{300-I} MDA 含量较 T_{150-I} 低 21.2%。同一施钾水平下,施钾后移根系 MDA 含量增加,尤以乳熟期 0—20 cm 土层为甚,其中, T_{300-II} , $T_{300-III}$ MDA 含量分别较 T_{300-I} 降低了 11.9% 和 23.8%, T_{150-II} , $T_{150-III}$ 分别较 T_{150-I} 降低了 14.4% 和 26.8%。

2.7 产量变化

施钾各处理春玉米产量均显著高于对照。T_{150-I}处理和 T_{300-I} 处理产量分别较对照高出 13.9% 和 18.5%；不同施钾水平下，T_{300-I} 处理与 T_{150-I} 处理产量

差异显著，T_{300-I} 处理产量较 T_{150-I} 处理产量高出 8.9%。同一施钾水平下，钾肥后移产量下降，T_{300-II}，T_{300-III} 产量分别较 T_{300-I} 降低了 14.3% 和 19.9%，T_{150-II}，T_{150-III} 产量分别较 T_{150-I} 降低了 4.2% 和 8.9%。

表 6 不同施钾方式对根系 SOD, POD 酶活性及 MDA 含量的影响

酶	土层深度/cm	时期	T _{150-I}	T _{150-II}	T _{150-III}	T _{300-I}	T _{300-II}	T _{300-III}	CK
SOD/ (U · g ⁻¹)	0—20	VT	115.5 ± 20.1 ^b	101.1 ± 23.7 ^c	94.1 ± 13.7 ^d	129.1 ± 12.6 ^a	119.1 ± 21.1 ^b	93.8 ± 11.6 ^d	89.3 ± 15.3 ^e
		R ₃	192.3 ± 5.6 ^b	170.3 ± 5.1 ^c	140.7 ± 2.6 ^e	200.8 ± 6.7 ^a	176.9 ± 5.3 ^c	152.9 ± 4.9 ^d	126.8 ± 5.7 ^f
	20—40	VT	112.7 ± 4.8 ^b	110.4 ± 4.7 ^{bc}	91.7 ± 3.1 ^d	132.4 ± 2.8 ^a	117.1 ± 6.6 ^b	108.3 ± 3.3 ^c	90.1 ± 7.90 ^d
		R ₃	151.3 ± 3.9 ^c	139.2 ± 5.6	131.4 ± 5.1 ^d	172.2 ± 1.9 ^a	165.4 ± 6.2 ^b	147.4 ± 4.7 ^c	126.1 ± 6.9 ^e
	40—60	VT	110.4 ± 4.5 ^b	101.68.2 ^c	91.5 ± 4.2 ^e	123.4 ± 4.1 ^a	114.2 ± 9.4 ^b	98.2 ± 12.2 ^d	81.3 ± 10.0 ^f
		R ₃	109.4 ± 7.1 ^b	94.1 ± 9.1 ^c	90.4 ± 3.9 ^c	119.6 ± 3.7 ^a	104.6 ± 7.1 ^b	92.2 ± 13.6 ^a	84.2 ± 7.6 ^d
POD/ (U · g ⁻¹)	0—20	VT	72.4 ± 6.4	68.6 ± 3.1	61.0 ± 2.8	74.6 ± 5.2 ^a	69.1 ± 3.7 ^b	63.8 ± 1.6 ^a	52.3 ± 5.3 ^b
		R ₃	84.2 ± 3.8 ^c	72.1 ± 4.6 ^d	64.8 ± 3.2 ^e	99.3 ± 4.72.9 ^a	87.4 ± 3.7 ^{bc}	70.6 ± 4.8 ^d	53.9 ± 3.9 ^f
	20—40	VT	70.6 ± 4.6 ^a	67.9 ± 6.2 ^b	60.5 ± 4.1 ^{bc}	70.1 ± 1.9 ^a	67.1 ± 6.6 ^b	62.3 ± 23.3 ^{bc}	60.1 ± 7.90 ^b
		R ₃	76.2 ± 3.7 ^c	71.5 ± 5.1 ^d	64.3 ± 5.1 ^e	95.4 ± 4.3 ^a	89.4 ± 4.4 ^b	74.6 ± 4.9 ^c	56.7 ± 5.1 ^f
	40—60	VT	67.1 ± 5.9 ^b	63.5 ± 4.6 ^c	60.8 ± 4.6 ^d	71.6 ± 5.1 ^a	68.2 ± 9.4 ^b	61.2 ± 1.2 ^d	54.3 ± 1.0 ^e
		R ₃	75.1 ± 4.1 ^c	70.4 ± 3.9 ^{cd}	63.8 ± 3.8 ^d	86.4 ± 4.6 ^a	80.6 ± 7.1 ^b	72.2 ± 13.6 ^c	60.2 ± 7.6 ^d
MDA/ (μmol · g ⁻¹)	0—20	VT	17.2 ± 1.1 ^d	21.6 ± 1.3 ^{bc}	24.1 ± 1.2 ^b	15.3 ± 1.1 ^e	19.1 ± 1.7 ^{bc}	20.8 ± 1.6 ^c	29.3 ± 15.3 ^a
		R ₃	19.4 ± 1.3 ^d	23.9 ± 1.1 ^c	30.2 ± 1.2 ^b	16.1 ± 0.9 ^e	20.3 ± 1.1 ^d	24.3 ± 1.5 ^c	35.2 ± 1.6 ^a
	20—40	VT	15.1 ± 1.6 ^d	18.4 ± 1.4 ^c	21.9 ± 0.9 ^b	14.2 ± 1.6 ^d	15.6 ± 1.6 ^d	18.3 ± 2.3 ^c	26.1 ± 0.90 ^a
		R ₃	18.7 ± 1.1 ^c	23.6 ± 1.4 ^{bc}	25.7 ± 1.6 ^b	15.7 ± 1.2 ^e	17.9 ± 1.1 ^d	19.5 ± 1.1 ^c	32.1 ± 1.5 ^a
	40—60	VT	14.2 ± 1.3 ^d	15.1 ± 0.9 ^c	17.4 ± 1.4 ^b	13.9 ± 0.2 ^d	14.1 ± 1.4 ^d	15.7 ± 1.2 ^c	21.3 ± 1.0 ^a
		R ₃	17.6 ± 0.9 ^c	21.1 ± 1.4 ^{bc}	24.1 ± 1.1 ^b	15.8 ± 1.6 ^d	18.6 ± 1.1 ^a	22.2 ± 1.6 ^{bc}	34.2 ± 1.6 ^a

3 讨论

根量的大小直接影响植株地上部分的生育，建立起强大的根系，并维持后期较高的生物量，可获得高量^[12]。已有研究^[13]表明，钾的富集可促进作物根系的生长。也有研究认为施钾或缺钾均可对根系产生抑制作用。试验研究表明，施钾使棉花根系的总长和总体积显著降低^[9]，缺钾对水稻根系生长有一定的抑制作用^[13]。缺钾能够抑制主根伸长生长^[7]，但能促进根毛生长^[14]。Shin 等^[8]认为缺钾不抑制根系的伸长生长，却显著降低了侧根数和侧根分布密度。土壤缺钾对根冠比、根数、根平均直径、总根长、侧根数、根表面积、根体积、根总吸收面积以及活跃吸收面积等性状均有影响。韩立军等^[15]研究表明拔节期前玉米根系对钾肥不敏感，大喇叭口期后根系干重、根体积、地上干重均与施钾水平呈正相关。本研究中与 T_{150-I} 相比，T_{300-I} 各土层根干重和根条数均增加，尤以吐丝期明显，但施钾后移根系干重及根条数减小。所以，增加施钾量促进玉米根系生长，施钾后移抑制根系生长。

玉米根系的空间分布对玉米产量有重要作用，深

层根量较多，籽粒增重期根系吸收活力高，活跃吸收层深，有利于玉米吸收深层土壤水分^[16]，且深层根系所处的土壤环境稳定，根系活力受密度影响小，根系活力强向地上部分运输物质的能力强，有利于植株地上部分各种生理活动的正常进行，促进光合物质生产，为籽粒充实提供充足的光合产物，对产量贡献大^[16]。Edward 研究发现，施钾使玉米根向下深扎达 60 cm，能吸收到深层土壤中的水分。本研究中与 T_{150-I} 相比，T_{300-I} 0—20 cm 根干重所占比例下降，20—60 cm 根干重所占比例增加，表明增加钾肥施用量可增加深层根系增加。施钾后移 0—20 cm 根干重比例增加，20—60 cm 根干重所占比例下降，所以施钾后移不利于深层根系的发生。这可能与钾肥追肥方式有关，本试验小口期追施钾肥是在表面追施覆土，加之钾肥在土壤中移动性小，所以钾肥在小口期表面追施不利于深层根系发生。

研究^[17]表明，叶片功能的强弱和持续期长短，主要决定于根系功能和衰老的延迟。低钾胁迫易造成玉米根系 CAT, POD 等活性下降，MDA 含量上升^[18]。钾肥的施用能提高玉米对环境胁迫的抵抗能力，增施钾肥能够提高植株根系活力。本研究中，

T_{300-I} 玉米各土层根系活力、根系 SOD 和 POD 酶活性均高于 T_{150-I} , 这与前人研究基本一致。但施钾后移根系抗氧化酶活性降低, 这与本研究试验条件有关, 本研究为 7 a 生苜蓿翻耕后种植玉米, 苜蓿喜磷、钾, 所以播前耕层土壤含有效钾较低(表 1), 施钾后移造成玉米生育前期钾肥不足, 根系发育受到限制, 后期易早衰, SOD 和 POD 酶活性下降, 而 MDA 含量增加。玉米施用钾肥后产量大幅度提高, 有研究^[19] 得出, 钾肥基施增产效果优于大喇叭口期追施和拔节期追施, 也有提出钾肥做底肥时分期施用明显优于钾肥一次性施用^[20]。本研究结果表明, 增施钾肥促进产量增加, T_{150-I} 处理和 T_{300-I} 处理产量分别较对照高 13.9% 和 18.5%, T_{300-I} 处理产量较 T_{150-I} 处理产量高 8.9%。同一施钾水平下, 施钾后移产量下降, T_{300-II} , $T_{300-III}$ 产量分别较 T_{300-I} 低 14.3% 和 19.9%, T_{150-II} , $T_{150-III}$ 产量分别较 T_{150-I} 低 4.2% 和 8.9%。这可能是金山 27 钾肥需求规律与钾肥施入方式不吻合造成的, 有待在其他品种进一步试验。

4 结论

与 150 kg/hm² 施钾水平相比, 300 kg/hm² 施钾水平可增加各土层根系干重, 增加下层根系(20—60 cm)根干重占总干重比例, 增加各土层根条数和最大根幅, 且最大根幅下移; 延缓生育后期根系衰老, 各生育时期各土层根系活力、SOD 酶活性和 POD 酶活性较高, MDA 含量较低。施钾后移则促进作用不明显, 甚至导致根系干重降低; 0—20 cm 土层根干重占总干重比例增加; 最大根幅、根条数及最大根幅深度均减少, 各土层根系活力、SOD 酶活性和 POD 酶活性降低, MDA 含量增加。

[参 考 文 献]

- [1] Zhao Rongfang, Chen Xinpeng, Zhang Fusuo, et al. Fertilization and nitrogen balance in a wheat-maize rotation system in North China [J]. *Agronomy Journal*, 2006, 98(4): 938-945.
- [2] Valentinuz O R, Tollenaar M. Effect of genotype, nitrogen, plant density, and row spacing on the area per-leaf profile in maize[J]. *Agronomy Journal*, 2006, 98(1): 94-99.
- [3] 张铭. 钾肥不同施用量对玉米主要生理、生化指标的影响研究[M]. 吉林 长春: 吉林大学, 2009.
- [4] 毛培培, 赵云云. 植物对钾营养的吸收、运转和胁迫反应的研究进展[J]. *生物学通报*, 2008, 43(8): 11-13.
- [5] 王强胜, 甄若宏, 丁艳峰. 钾肥用量对优质粳稻钾素积累利用及稻米品质的影响[J]. *中国农业科学*, 2004, 37(10): 1444-1450.
- [6] Jackson R B, Sperry J S, Dawson T E. Root water uptake and transport: Using physiological processes in global predictions [J]. *Trends Plant Science*, 2000, 5(11): 482-488.
- [7] Jung J Y, Shin R, Schachtman D P. Ethylene mediates response and tolerance to potassium deprivation in *Arabidopsis*[J]. *Plant Cell*, 2009, 21(2): 607-621.
- [8] Shin R, Schachtman D P. Hydrogen peroxide mediates plant root cell response to nutrient deprivation[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2004, 101(23): 8827-8832.
- [9] 张志勇, 王清连, 李召虎, 等. 缺钾对棉花幼苗根系生长的影响及其生理机制[J]. *作物学报*, 2009, 35(4): 718-723.
- [10] 潘艳花, 马忠明, 吕晓东, 等. 不同供钾水平对西瓜幼苗生长和根系形态的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2012, 20(5): 536-541.
- [11] 邹琦. 植物生理生化试验指导[M]. 北京: 中国农业出版社, 1997.
- [12] Sánchez-Calderón L, López-Bucio J, Chacón-López A, et al. Phosphate starvation induces a determinate developmental program in the roots of *Arabidopsis thaliana* [J]. *Plant Cell Physiol*, 2005, 46(1): 174-184.
- [13] 陈际型. 钾素营养对水稻根系生长和养分吸收的影响[J]. *土壤学报*, 1997, 34(2): 182-188.
- [14] Kim M J, Silvano C, Schachtman D P. A peroxidase contributes to ROS production during *Arabidopsis* root response to potassium deficiency[J]. *Molecular Plant*, 2010, 3(2): 420-427.
- [15] 韩立军, 李羽, 王守富, 等. 钾肥对玉米根系生长状况及地上干物质积累的影响[J]. *吉林农业大学学报*, 2004, 26(1): 10-12, 22.
- [16] Jackson R B, Sperry J S, Dawson T E. Root water uptake and transport: Using physiological processes in global predictions [J]. *Trends Plant Science*, 2000, 5(11): 482-488.
- [17] 王旭军. 不同类型水稻根系生理特性及其与地上部关系的研究[M]. 河南 郑州: 河南农业大学, 2005.
- [18] 薛艳茹, 曹敏建, 王晓光, 等. 低钾胁迫下玉米逆境反应机制初探[J]. *玉米科学*, 2008, 16(2): 101-103.
- [19] 倪大鹏, 刘强, 阴卫军, 等. 施钾时期和施钾量对玉米产量形成的影响[J]. *山东农业科学*, 2007(6): 82-83, 97.
- [20] 王晓玲. 氮钾肥不同调控模式对玉米性状及产量的影响[J]. *农业技术与装备*, 2009(6): 15-17.