

水磷耦合烤烟养分吸收分配规律研究

汤宏¹, 曾掌权², 李向阳¹, 王建伟¹, 邓洁¹, 刘伦沛¹, 严红光¹

(1. 凯里学院大健康学院, 贵州 凯里 556011; 2. 湖南衡山森林生态系统定位观测研究站湖南省林业科学院, 长沙 410004)

摘要: 为探究烤烟适宜的水磷耦合模式及其对氮、磷、钾养分吸收积累的影响。采用田间小区试验, 试验设置3种灌水水平和施磷水平, 分别为低水(W_1 : 0.50 L/株)、中水(W_2 : 1.00 L/株)、高水(W_3 : 2.00 L/株)和低磷(P_1 : 32 kg/hm²)、中磷(P_2 : 64 kg/hm²)、高磷(P_3 : 96 kg/hm²), 研究了不同施磷量和灌水量条件下烤烟对氮磷钾养分吸收积累的影响。结果表明: 施磷量相同时, 灌水处理能够明显增加烟株对氮、磷、钾养分的吸收积累量, 表现为: $W_3P_i > W_2P_i > W_1P_i > CK_i$ (其中 $i=1$ 或 2 或 3); 当灌水量相同时, 增加施磷量也有利于烟株对氮磷钾养分的吸收积累, 且在施磷水平为 96 kg/hm² 时表现较好, 表现为: $W_iP_3 > W_iP_2 > W_iP_1$; 高磷水平下, 灌水量为 1.00、2.00 L/株时, W_3P_3 和 W_2P_3 处理烟株对氮磷钾养分的吸收积累量差异不显著; 烟株和根、茎、叶各器官对钾的吸收量高于氮和磷, 氮、磷、钾在根、茎、叶器官中的分配顺序呈现叶>茎>根的变化规律; 在烟株的不同生育期, 对养分的吸收积累量和积累强度存在差异。烟株对养分的吸收积累主要在旺长期, 烟叶是养分的主要吸收积累器官; 施磷量为 96 kg/hm², 灌水量为 1.00~2.00 L/株的水磷耦合处理在促进烟株对氮磷钾养分的吸收积累方面效果较好。烤烟施肥中要注意调整氮磷钾的施用比例和水磷耦合配比。

关键词: 水磷耦合; 烤烟; 养分; 吸收; 分配

中图分类号: S572

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2019)02-0294-09

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2019.02.045

Studies on Nutrients Uptake and Distribution of Flue-Cured Tobacco with Water-Phosphorus Coupling

TANG Hong¹, ZENG Zhangquan², LI Xiangyang¹, WANG Jianwei¹,

DENG Jie¹, LIU Lunpei¹, YAN Hongguang¹

(1. School of Life and Health Science, Kaili University, Kaili, Guizhou 556011;

2. Hengshan Research Station of Forest Ecosystem, Hunan Academy of Forestry, Changsha 410004)

Abstract: In this study, the optimal pattern for water-phosphorus coupling and its influences on Nitrogen (N), Phosphorus (P) and Potassium (K) uptake and accumulation of flue-cured tobacco were studied, which provided scientific basis for the rational use of water-fertilizer resources in Qiandongnan prefecture tobacco land, Guizhou province. Three irrigation rates: 0.50 L/plant (W_1), 1.00 L/plant (W_2) and 2.00 L/plant (W_3), and three P fertilizer application rates: 32 kg/hm² (P_1), 64 kg/hm² (P_2) and 96 kg/hm² (P_3) were set in this field plot experiment. The results showed that, at the same P application rate, N, P and K uptake and accumulation of tobacco plant were significantly increased by irrigation. The order of N, P and K uptake and accumulation of each treatment was as follows: $W_3P_i > W_2P_i > W_1P_i > CK_i$ ($i = 1$ or 2 or 3). At the same water irrigation level, N, P and K uptake and accumulation of tobacco plant increased as P application rates increased. The P application rate of 96 kg/hm² was beneficial for N, P and K uptake and accumulation. The order of N, P and K uptake and accumulation was as follows: $W_iP_3 > W_iP_2 > W_iP_1$. Under high P application treatment, irrigation rate of 1.00~2.00 L/plant, N, P and K uptake and accumulation were not significantly different between W_3P_3 and W_2P_3 treatment. The K uptake and accumulation of tobacco plant, leaf, stem and root were higher than N and P. The order of N, P and K distributed in root, stem and leaf was as follows: leaf>stem>root. The N, P and K uptake, accumulation and accumulation intensities of tobacco

收稿日期: 2018-11-08

资助项目: 贵州省科学技术基金项目(黔科合 LH 字[2014]7220); 贵州省教育厅特色重点实验室项目(黔教合 KY 字[2017]011)

第一作者: 汤宏(1974—), 男, 湖南益阳人, 副教授, 博士, 主要从事土壤化学与生态环境、土壤肥力研究。E-mail: 13077315255@126.com

通信作者: 曾掌权(1976—), 男, 湖南益阳人, 副研究员, 博士, 主要从事土壤生态研究。E-mail: zzq7601@126.com

李向阳(1984—), 男, 湖北荆州人, 副教授, 博士, 主要从事土壤微生物研究。E-mail: 397310815@qq.com

plant were different at different growth stages. Nutrients uptake and accumulation of tobacco plant occurred mainly at tobacco leaf and vigorous growth stages. The P application rate of 96 kg/hm² and irrigation rate of 1.00~2.00 L/plant were suitable for N, P and K uptake and accumulation of tobacco plant. The optimal application rates of N, P and K fertilizers and water and phosphorus coupling should be paid attention to adjust in fertilizer application of tobacco.

Keywords: water-phosphorus coupling; flue-cured tobacco; nutrients; uptake; distribution

水和肥是作物生长的两大重要限制因子。有研究^[1]表明,水分通过影响烟株体内诸多生理生化反应影响烟株根系的生长、植株形态的建成和生理特性的变化^[2],影响烟株干物质的积累和生化反应代谢酶的活性^[3],最终影响烟株的生长、产量和品质。磷肥能提高作物根系活力、活跃吸收面积和总吸收面积^[4],影响烟株根系构型和农艺性状,提高叶片中叶绿素的含量,增加光合作用强度,加速光合产物的积累^[5],增强作物的抗逆能力,促进作物穗粒增多、籽粒饱满,提高作物产量^[6]。两者之间的适宜用量对提高水肥利用效率和促进作物生长发挥着重要作用。有关水磷耦合效应的研究^[7]表明,在水分相同的条件下,拔节期适量施用磷肥可以提高小麦的水分利用效率,植株能有效地从形态与生理代谢等方面表现出积极响应,提高生长的适应性,从而增强抗旱能力。水分亏缺与过量均不利于作物对磷素的吸收利用,适量的水分条件下可提高作物对磷肥的吸收和利用率^[8]。可见,水分和磷肥二者既相互关联又相互制约,水磷耦合实质是以水促肥,以肥调水,提高水分和肥料的利用率,使水分和肥料发挥其最大的生产效益。

黔东南州是贵州省重要的烤烟种植区之一,2016年烤烟种植面积约2.35万hm²。但黔东南州属于典型的山地烟区,烟田以坡耕地为主,水肥短缺且时空分布不均,水土流失较为严重,这在一定程度上制约烟叶产量和品质的提升。近年来,出于节水减肥的角度,我国烟草行业在烤烟种植上大力提倡和推行水肥一体化技术。水肥一体化技术可以有效改善烤烟生产过程中水肥供应不协调和耦合效应差的弊端,提高肥料的利用率^[9-10]。但目前有关黔东南州烤烟种植方面水肥一体化的报道甚少,水磷耦合适当对比对烤烟养分吸收分配规律影响的报道更是空白。为此,本研究在黔东南州选择典型烟区,开展水磷耦合对烤烟养分吸收分配规律的大田试验,旨在为提高烟草生产中水肥利用率、节约水肥资源、探讨适合烤烟种植的最佳水磷配比、为促进烤烟节水和减肥降本及增产提质增效提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验地位于黔东南州麻江县东南部的龙山镇大

塘村,地处云贵高原向湘桂丘陵过渡的斜坡地带(26°27'N,107°43'E),海拔885 m,属亚热带季风湿润气候区,年均气温14~16℃,降水量1200~1500 mm,相对湿度80%左右,无霜期270~301天。大塘村是龙山镇烤烟主要种植区和烤烟种植示范村,有多个优质烟示范点。

1.2 试验材料

供试烤烟品种为“云烟87”,烟苗由黔东南州麻江县烟草专卖局(公司)统一提供。

供试化肥:尿素(含N 46%)、过磷酸钙(含P₂O₅ 12%)和硫酸钾(含K₂O 50%),均购自当地农资公司。

试验田土壤:中壤质黄壤,试验开始前耕层土壤有机质含量23.36 g/kg,全氮含量1.41 g/kg,碱解氮含量126.31 mg/kg,全磷含量0.79 g/kg,有效磷含量20.26 mg/kg,全钾含量11.27 g/kg,速效钾含量96.25 mg/kg,pH 6.49,阳离子交换量13.52 cmol/kg。总体上看,对烤烟种植而言,试验田土壤有效磷和速效钾略低,其他指标适宜。

1.3 试验设计

大田试验于2017年夏秋季进行,试验前茬作物为夏玉米,冬季休闲。试验田土壤肥力空间上较为均匀,排灌条件良好且配有滴灌设施。试验采取田间小区形式,设置灌水和磷肥2因素3水平,随机区组设计,并设置3个对照处理,共计12个处理,试验中各处理的灌水量和施肥量在参考以往研究的基础上适当减少^[11-12]。灌水量设低、中、高3个水平,即0.50,1.00,2.00 L/株,分别用W₁、W₂和W₃表示,磷肥设低、中、高3个水平,即32,64,96 kg/hm²,分别用P₁、P₂和P₃表示,对照CK₁、CK₂和CK₃小区烟株生长所需水分均来自自然降水,试验田2017年各月降水量见图1。各处理设置4次重复,共48个小区,随机区组排列,每个小区尺度为4 m×9 m,并设置保护行,植烟行距为120 cm,株距为50 cm,各处理单排单灌,以防止串水串肥。

各处理氮肥和钾肥的施用量均为120,240 kg/hm²,W₁P₁、W₂P₁、W₃P₁和CK₁处理的施磷量依次为32,64,96 kg/hm²,灌水量依次为0.50,1.00,2.00,0 L/株。磷肥在翻耕整地时作基肥一次性施用,钾肥

和氮肥分基肥和追肥施用,钾肥和氮肥的基追比分别为 4:6 和 6:4。作基肥的钾肥和氮肥在翻地时一次性施用,追肥分别在烟草移栽后的还苗期(5 月 5 日即移栽后 15 天)和旺长期(6 月 4 日即移栽后 45 天)分 2 次利用滴灌设施均匀浇施,第 1 次浇施量均为追肥的 15%,于烟草的还苗期内浇施,剩余的追肥在烟草的旺长期内一次性浇施。试验地内沿烟株行铺设滴灌管,每根滴灌管前安装控制开关,每株烟株下安装 1 个 4 L/h 流量的管上式滴头,灌水量由带流量的管上式滴头控制。各处理(除 CK₁、CK₂ 和 CK₃)灌水量的 10%,20%,30% 和 40% 分别于烟草的还苗期(5 月 5 日)、伸根期(5 月 25 日)、旺长期前期(6 月 4 日)和旺长期后期(6 月 24 日)利用滴灌设施均匀滴灌。烟苗于 4 月 20 日移栽,其栽培管理措施均与当地烟草生产中所采用的管理措施完全一致。

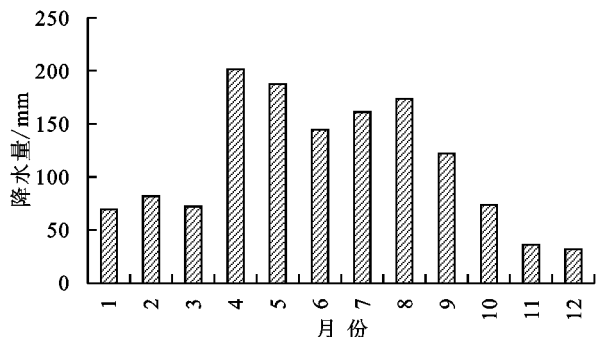


图 1 2017 年试验区各月降水量

1.4 测定项目与方法

分别在烟株还苗期、伸根期、旺长期和成熟期(移栽后第 18,40,80,110 天)采集烟株,其中还苗期和伸根期分别随机采集烟株 5 株,之后每次采集 3 株。采集烟株时用土铲挖取长势中等的烟株,包括烟株整个根系,根据烟株根系实际再延伸挖坑的大小,尽量不伤根,并在土壤中捡尽肉眼可见的根系。将烟株样品带回实验室后,用自来水冲洗干净后再用吸水纸吸干水分,然后用剪刀将烟株根系、茎、烟叶分开,用电子天平分别称量三者的鲜重。称重后的烟叶、根和茎分别放入已烘干并已称重和编号的牛皮纸文件袋内,放入 105 ℃ 烘箱中杀青 30 min,然后在 70 ℃ 下烘干至恒重,再用电子天平称取三者的干重。用植物粉碎机分别将三者磨碎后过 0.5 mm 塑料筛制成分析样品,装入自封袋内用于测定全氮、全磷和全钾的含量,全氮含量采用 H₂SO₄-H₂O₂ 消煮-蒸馏法测定;全磷含量采用钒钼黄比色法测定;全钾含量采用火焰光度计法^[13]测定。

各小区单独采收、编竿、烘烤和计产,记录每次各小区产量,采收结束后将不同小区每次的产量合计,得到每小区的产量并计算单位面积产量。

1.5 数据处理与统计分析

试验数据经 Microsoft Excel 2010 软件整理后,

应用 IBM Statistics SPSS 23.0 软件进行统计分析。方差分析多重比较采用最小显著差异法。

2 结果与分析

2.1 不同处理烤烟氮素吸收积累规律及在各器官中的分配

2.1.1 不同处理烟株氮素吸收积累差异 由表 1 可知,不同水磷耦合处理全生育期内烟株的氮吸收积累规律相似,即烟株的还苗期和伸根期吸收氮素较少,到旺长期烟株吸氮量急剧增加,成熟期吸氮量又急剧减少,氮积累量随着烟株生长发育期的后移而逐渐增大。各处理烟株旺长期氮素积累量占总吸氮量的 91.47%~94.99%,净吸氮量占总吸氮量的 62.27%~68.19%,成熟期烟株吸氮量仅占总吸氮量的 5.01%~8.53%,说明烟株的氮吸收积累主要集中在生长的前中期,成熟期吸氮很少。

不同磷水平下, W₁P₃ 烟株氮素吸收积累量较高, W₁P₁ 烟株氮素吸收积累量较低。 W₁P₁、W₂P₁、W₃P₁ 处理均高于 CK₁ 处理。 W₁P₃ 和 CK₃ 处理中, W₃P₃ 处理吸氮量最高,为 110.38 kg/hm², CK₃ 处理吸氮量最低,为 86.91 kg/hm², W₁P₃ 处理吸氮量分别为 CK₃ 处理的 1.04, 1.17, 1.27 倍,达显著性差异 ($p < 0.05$)。

不同处理同一生育期氮素积累强度大小顺序为: W₁P₃ > W₁P₂ > W₁P₁。各处理烟株氮素积累强度都在旺长期达到高峰, W₃P₃ 处理处理烟株氮素积累强度最高,为 1.82 kg/(hm² · d), CK₁ 最低,为 0.91 kg/(hm² · d)。各处理中, W₃P₂ 处理烟株氮素净积累强度最高,为 0.80 kg/(hm² · d), CK₁ 处理最低,为 0.28 kg/(hm² · d)。 W₁P₃ 和 CK₃ 处理中, W₁P₃ 处理氮素净积累强度分别为 CK₃ 处理的 0.98, 1.09, 1.12 倍。

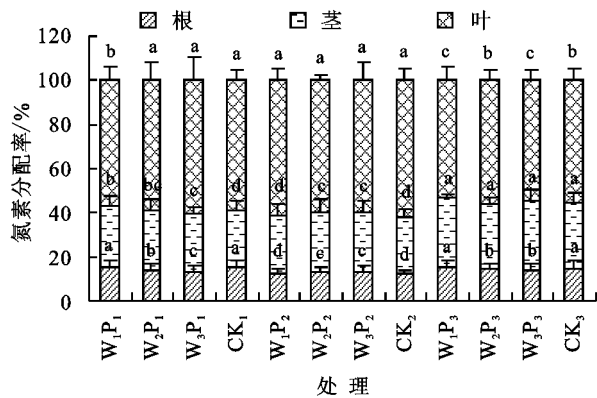
2.1.2 不同处理烟株各器官氮素分配差异 从表 1 和图 2 可以看出,不同处理各器官在还苗期、伸根期和成熟期氮素积累量低,积累强度小。不同处理烟株同一生育期相比,根、茎、叶各器官中氮积累量均表现为: W₁P₃ > W₁P₂ > W₁P₁, W₁P₁ 处理烟株总吸氮量一般要高于 CK₁ 处理。相同处理同一生育期相比,烟株根、茎、叶氮积累量均以叶最高,其次是茎,根最低,叶中氮积累量大于茎、根之和;旺长期根、茎和叶中氮素净积累量最高均为 W₃P₃ 处理,其值依次为 10.82, 23.94, 38.15 kg/hm², 最低的均为 CK₁ 处理,其值依次为 5.37, 10.19, 20.85 kg/hm²。

不同处理同一生育期相同器官相比,旺长期氮积累强度均达生育期内最高值,根、茎、叶中氮素积累强度最高均为 W₃P₃ 处理,其值依次为 0.27, 0.60, 0.95 kg/(hm² · d), 最低均为 CK₁ 处理,其值依次为 0.13, 0.25, 0.52 kg/(hm² · d)。

表 1 不同处理烤烟氮素吸收积累量与积累强度

处理	生育期	移栽后 天数/d	根		茎		叶		全株		
			积累量/	积累强度/	积累量/	积累强度/	积累量/	积累强度/	积累量/	积累强度/	积累率/
			(kg·hm ⁻²)	(kg·hm ⁻² ·d ⁻¹)	(kg·hm ⁻²)	(kg·hm ⁻² ·d ⁻¹)	(kg·hm ⁻²)	(kg·hm ⁻² ·d ⁻¹)	(kg·hm ⁻²)	(kg·hm ⁻² ·d ⁻¹)	%
W ₁ P ₁	1	18	0.31c	0.02	0.34e	0.02	2.96e	0.16	3.61e	0.20	5.61
	2	40	1.82c	0.07	3.57e	0.15	12.38d	0.43	17.77d	0.64	27.60
	3	80	8.67c	0.17	16.05e	0.31	34.17c	0.54	58.89e	1.03	91.47
	4	110	9.83d	0.04	18.02d	0.07	36.53d	0.08	64.38e	0.18	100.00
W ₂ P ₁	1	18	0.46b	0.03	0.47d	0.03	4.70c	0.26	5.63d	0.31	6.96
	2	40	2.18b	0.08	4.24d	0.17	14.67c	0.45	21.09c	0.70	26.06
	3	80	10.51c	0.21	20.72c	0.41	44.85b	0.75	76.08c	1.37	94.01
	4	110	11.19c	0.02	22.11c	0.05	47.63c	0.09	80.93c	0.16	100.00
W ₃ P ₁	1	18	0.53a	0.03	0.55c	0.03	5.46b	0.30	6.54d	0.36	7.47
	2	40	2.26b	0.08	4.46d	0.18	16.21b	0.49	22.93c	0.75	26.20
	3	80	10.95b	0.22	21.61c	0.43	49.71b	0.84	82.27b	1.48	93.99
	4	110	11.81c	0.03	23.08c	0.05	52.64b	0.10	87.53c	0.18	100.00
CK ₁	1	18	0.26d	0.01	0.31e	0.02	3.35d	0.19	3.92e	0.22	6.70
	2	40	1.71c	0.07	3.32e	0.14	12.66d	0.42	17.69d	0.63	30.25
	3	80	7.08d	0.13	13.51e	0.25	33.51c	0.52	54.10e	0.91	92.53
	4	110	8.79d	0.06	15.06e	0.05	34.62d	0.04	58.47e	0.15	100.00
W ₁ P ₂	1	18	0.38c	0.02	0.51c	0.03	4.63c	0.26	5.52d	0.31	6.91
	2	40	1.86c	0.07	3.92e	0.16	14.92bc	0.47	20.70c	0.69	25.93
	3	80	9.17c	0.18	19.23d	0.38	46.17b	0.78	74.57c	1.35	93.40
	4	110	10.21d	0.03	20.57d	0.04	49.06c	0.10	79.84d	0.18	100.00
W ₂ P ₂	1	18	0.49a	0.03	0.57c	0.03	5.45b	0.30	6.51c	0.36	7.22
	2	40	2.35b	0.08	4.65d	0.19	16.63b	0.51	23.63b	0.78	26.22
	3	80	11.81b	0.24	22.89c	0.46	50.36a	0.84	85.06b	1.54	94.37
	4	110	12.19c	0.01	24.23c	0.04	53.71b	0.11	90.13b	0.17	100.00
W ₃ P ₂	1	18	0.56a	0.03	0.58c	0.03	5.62b	0.31	6.76c	0.38	7.07
	2	40	2.39b	0.08	4.84d	0.19	17.50a	0.54	24.73b	0.82	25.87
	3	80	11.89b	0.24	23.71c	0.47	53.87a	0.91	89.47b	1.62	93.61
	4	110	12.84c	0.03	25.69c	0.07	57.05a	0.11	95.58b	0.20	100.00
CK ₂	1	18	0.31c	0.02	0.45d	0.03	4.37c	0.24	5.13d	0.29	7.21
	2	40	1.82c	0.07	4.08d	0.17	13.61c	0.42	19.51c	0.65	27.43
	3	80	7.72d	0.15	15.81e	0.29	42.13	0.71	65.66d	1.15	92.32
	4	110	9.01d	0.04	17.83d	0.07	44.28c	0.07	71.12d	0.18	100.00
W ₁ P ₃	1	18	0.42b	0.02	0.56c	0.03	5.31b	0.30	6.29c	0.35	6.96
	2	40	2.53b	0.10	5.73c	0.24	15.92b	0.48	24.18b	0.81	26.74
	3	80	12.65a	0.25	26.15b	0.51	45.38b	0.74	84.18b	1.50	93.10
	4	110	13.91b	0.04	28.37b	0.07	48.14c	0.09	90.42b	0.21	100.00
W ₂ P ₃	1	18	0.53a	0.03	0.64b	0.04	5.96a	0.33	7.13b	0.40	6.99
	2	40	3.21a	0.12	7.13b	0.30	17.35a	0.52	27.69a	0.93	27.15
	3	80	13.48a	0.26	27.86b	0.52	54.31a	0.92	95.65a	1.70	93.79
	4	110	14.71a	0.04	29.74b	0.06	57.53a	0.11	101.98a	0.21	100.00
W ₃ P ₃	1	18	0.61a	0.03	0.81a	0.05	6.81a	0.38	8.23a	0.46	7.46
	2	40	3.53a	0.13	8.62a	0.36	18.91a	0.55	31.06a	1.04	28.14
	3	80	14.35a	0.27	32.56a	0.60	57.06a	0.95	103.97a	1.82	94.19
	4	110	15.70a	0.05	34.41a	0.06	60.27a	0.11	110.38a	0.21	100.00
CK ₃	1	18	0.40b	0.02	0.50c	0.03	5.29b	0.29	6.19c	0.34	7.12
	2	40	2.61b	0.10	5.68c	0.24	15.01bc	0.44	23.30b	0.78	26.81
	3	80	11.72b	0.23	24.71c	0.48	46.13b	0.78	82.56b	1.48	94.99
	4	110	12.98c	0.04	25.52c	0.03	48.41c	0.08	86.91c	0.15	100.00

注:1 表示还苗期;2 表示伸根期;3 表示旺长期;4 表示成熟期;同列数字后不同小写字母表示处理间在 0.05 水平上差异显著。下同。



注:图中不同小写字母表示处理间在 0.05 水平差异显著。下同。

图 2 各处理烟株不同器官中氮素分配率

2.2 不同处理烤烟磷素吸收积累规律及在各器官中的分配

2.2.1 不同处理烟株磷素吸收积累差异 由表 2 可知,不同水磷耦合处理全生育期内烟株的磷吸收积累规律相似,即烟株的还苗期和伸根期吸收磷素较少,到旺长期烟株吸磷量急剧增加,成熟期吸磷量又急剧减少,磷积累量随着烟株生长发育期的后移而逐渐增大。各处理烟株旺长期磷素累积量占总吸磷量的 92.14%~95.98%,净吸磷量占总吸磷量的 64.78%~81.85%,成熟期烟株吸磷量仅占总吸磷量的 4.02%~7.86%,说明烟株的磷吸收积累主要集中在生长的前中期,成熟期吸磷很少。

不同磷水平下, W₁P₃ 处理烟株磷素吸收积累量较高, W₁P₁ 处理烟株磷素吸收积累量较低。 W₁P₁、W₂P₁ 和 W₃P₁ 处理均高于 CK₁ 处理。 W₁P₃ 和 CK₃ 处理中, W₃P₃ 处理吸磷量最高, 为 24.40 kg/hm², CK₃ 处理吸磷量最低, 为 20.02 kg/hm², W₁P₃ 处理吸磷量分别为 CK₃ 处理的 1.10, 1.12, 1.22 倍, 达显著性差异 ($p < 0.05$)。

不同处理同一生育期磷素积累强度大小顺序为: W₁P₃ > W₁P₂ > W₁P₁。各处理烟株磷素积累强度都在旺长期达到峰值, W₃P₃ 处理烟株磷素累积强度最高, 为 0.42 kg/(hm² · d), W₁P₁ 处理最低, 为 0.24 kg/(hm² · d)。各处理磷素积累强度差异较大, W₁P₁ 处理磷素积累强度增幅明显小于 W₁P₃ 和 W₁P₂ 处理。

2.2.2 不同处理烟株各器官磷素分配差异 从表 2 和图 3 可以看出,不同处理烟株各器官在还苗期、伸根期和成熟期磷素积累量低, 积累强度小。不同处理烟株同一生育期相比, 根、茎、叶各器官中磷积累量均表现为: W₁P₃ > W₁P₂ > W₁P₁, W₁P₁ 处理均高于 CK₁ 处理。相同处理同一生育期相比, 烟株根、茎、叶磷积累量都以叶最高, 其次是茎, 根最低, 除 W₁P₁ 和 W₂P₃ 处理外, 叶中磷积累量均大于或等于茎、根中磷积累量之和; 旺长期根、茎和叶中磷素净积累量最高为 W₁P₃、W₃P₃ 和 W₃P₂ 处理, 其值依次为 3.24, 5.59, 8.65 kg/hm², 最低的为

CK₁、W₁P₁ 和 W₁P₁ 处理, 其值依次为 1.69, 3.47, 4.52 kg/hm²。不同处理同一生育期相同器官相比, 旺长期磷积累强度均达生育期内最高值, 根、茎、叶中磷积累强度最高为 W₃P₃ (W₁P₃ 和 CK₃)、W₃P₃ (W₃P₂) 和 W₃P₂ 处理, 其值依次为 0.08, 0.14, 0.22 kg/(hm² · d)。

2.3 不同处理烤烟钾素吸收积累规律及在各器官中的分配

2.3.1 不同处理烟株钾素吸收积累差异 由表 3 可知,不同水磷耦合处理,全生育期内烟株的钾吸收积累规律相似,即烟株的还苗期和伸根期吸收钾素较少,到旺长期烟株吸钾量急剧增加,成熟期吸钾量又大幅度减少,钾积累量随着烟株生长发育期的后移而逐渐增大。各处理烟株旺长期钾素累积量占总吸钾量的 84.91%~92.03%,净吸钾量占总吸钾量的 66.22%~74.01%,成熟期烟株吸钾量占总吸钾量的 7.97%~15.09%,说明烟株的钾吸收积累主要集中在生长的前中期,成熟期吸钾较少。

高、中、低量磷肥和不同灌水量耦合的各处理中,烟株总吸钾量以 W₁P₃ 处理较高, W₁P₁ 处理较低。 W₁P₁ 处理烟株总吸钾量一般高于 CK₁ 处理。 W₁P₃ 和 CK₃ 处理中, W₃P₃ 处理吸钾量最高, 为 185.97 kg/hm², CK₃ 处理吸钾量最低, 为 161.52 kg/hm², W₁P₃ 各处理吸钾量分别为 CK₃ 处理的 1.02, 1.09, 1.15 倍, 达显著性差异 ($p < 0.05$)。

不同处理同一生育期钾素积累强度大小顺序为: W₁P₃ > W₁P₂ > W₁P₁。各处理烟株钾素积累强度均在旺长期达到高峰, W₃P₃ 处理烟株钾素积累强度最高达 3.08 kg/(hm² · d), CK₁ 处理烟株钾素积累强度最低为 1.89 kg/(hm² · d)。各处理钾素积累强度差异较大, W₁P₁ 处理钾素积累强度增幅明显小于 W₁P₃ 和 W₁P₂ 处理。

2.3.2 不同处理烟株各器官钾素分配差异 从表 3 和图 4 可以看出,不同处理烟株各器官在还苗期、伸根期和成熟期钾素积累量低, 积累强度小。不同处理烟株同一生育期相比, 根、茎、叶各器官中钾积累量均表现为: W₁P₃ > W₁P₂ > W₁P₁, W₁P₁ 处理烟株总吸钾量均高于 CK₁ 处理。相同处理同一生育期相比, 烟株根、茎、叶钾积累量均以叶最高, 其次是茎, 根最低, 叶中钾积累量大于茎、根之和; 旺长期根、茎和叶中钾素净积累量最高的为 W₃P₂、W₃P₃ 和 W₃P₃ 处理, 其值依次为 21.72, 29.28, 73.12 kg/hm², 最低的均为 CK₁ 处理, 其值依次为 12.62, 17.77, 45.16 kg/hm²。

不同处理同一生育期相同器官相比, 旺长期根、茎和叶中钾素积累强度最高的依次为 W₃P₂、W₃P₂ 和 W₃P₃ 处理, 其值依次为 0.54, 0.73, 1.83 kg/(hm² · d), 最低的均为 CK₁ 处理, 其值依次为 0.32, 0.44, 1.13 kg/(hm² · d)。

表 2 不同处理烤烟磷素吸收积累量与积累强度

处理	生育期	移栽后 天数/d	根		茎		叶		全株		
			积累量/ (kg·hm ⁻²)	积累强度/ (kg·hm ⁻² ·d ⁻¹)	积累量/ (kg·hm ⁻²)	积累强度/ (kg·hm ⁻² ·d ⁻¹)	积累量/ (kg·hm ⁻²)	积累强度/ (kg·hm ⁻² ·d ⁻¹)	积累量/ (kg·hm ⁻²)	积累强度/ (kg·hm ⁻² ·d ⁻¹)	积累率/ %
			(kg·hm ⁻²)	(kg·hm ⁻² ·d ⁻¹)	(kg·hm ⁻²)	(kg·hm ⁻² ·d ⁻¹)	(kg·hm ⁻²)	(kg·hm ⁻² ·d ⁻¹)	(kg·hm ⁻²)	(kg·hm ⁻² ·d ⁻¹)	%
W ₁ P ₁	1	18	0.07d	0	0.07e	0	0.36f	0.02	0.50f	0.03	3.99
	2	40	0.41d	0.02	0.38e	0.01	1.15e	0.04	1.94e	0.07	15.48
	3	80	2.13e	0.04	3.85e	0.09	5.67g	0.11	11.65f	0.24	92.98
	4	110	2.16d	0	4.21d	0.01	6.16e	0.02	12.53f	0.03	100.00
W ₂ P ₁	1	18	0.08d	0	0.07e	0	0.45e	0.03	0.60e	0.03	4.21
	2	40	0.45c	0.02	0.42e	0.02	1.31e	0.04	2.18d	0.07	15.30
	3	80	2.26d	0.05	4.36d	0.10	6.51f	0.13	13.13e	0.27	92.14
	4	110	2.31d	0	4.71c	0.01	7.23d	0.02	14.25e	0.04	100.00
W ₃ P ₁	1	18	0.08d	0	0.08e	0	0.47e	0.03	0.63e	0.04	4.00
	2	40	0.47c	0.02	0.41e	0.02	1.35e	0.04	2.23d	0.07	14.17
	3	80	2.38d	0.05	4.65d	0.11	7.65e	0.16	14.68d	0.31	93.27
	4	110	2.41c	0	4.92c	0.01	8.41c	0.03	15.74d	0.04	100.00
CK ₁	1	18	0.07d	0	0.06e	0	0.38f	0.02	0.51f	0.03	3.55
	2	40	0.40d	0.02	0.35e	0.01	1.10e	0.03	1.85e	0.06	12.87
	3	80	2.09e	0.04	3.92e	0.09	7.61e	0.16	13.62e	0.29	94.71
	4	110	2.12d	0	4.31d	0.01	7.95d	0.01	14.38e	0.03	100.00
W ₁ P ₂	1	18	0.10c	0.01	0.12d	0.01	0.75c	0.04	0.97d	0.05	5.59
	2	40	0.51c	0.02	0.60d	0.02	1.91d	0.05	3.02d	0.09	17.40
	3	80	2.46d	0.05	4.73c	0.10	9.16c	0.18	16.35c	0.33	94.18
	4	110	2.53c	0	5.01c	0.01	9.82b	0.02	17.36c	0.03	100.00
W ₂ P ₂	1	18	0.11c	0.01	0.13c	0.01	0.81c	0.05	1.05c	0.06	5.79
	2	40	0.60b	0.02	0.71c	0.03	2.30c	0.07	3.61c	0.12	19.90
	3	80	2.78d	0.05	5.23c	0.11	9.25c	0.17	17.26b	0.34	95.15
	4	110	2.82c	0	5.54c	0.01	9.78b	0.02	18.14b	0.03	100.00
W ₃ P ₂	1	18	0.13b	0.01	0.15c	0.01	0.87c	0.05	1.15c	0.06	5.26
	2	40	0.67b	0.02	0.74c	0.03	2.37c	0.07	3.78c	0.12	17.28
	3	80	3.10c	0.06	6.31a	0.14	11.02a	0.22	20.43a	0.42	93.37
	4	110	3.27b	0.01	6.75a	0.01	11.86a	0.03	21.88a	0.05	100.00
CK ₂	1	18	0.09c	0.01	0.10d	0.01	0.65d	0.04	0.84d	0.05	5.03
	2	40	0.48c	0.02	0.51d	0.02	1.61d	0.04	2.60d	0.08	15.58
	3	80	2.48d	0.05	4.73c	0.11	8.36d	0.17	15.57c	0.32	93.29
	4	110	2.60c	0.00	5.14c	0.01	8.95c	0.02	16.69c	0.04	100.00
W ₁ P ₃	1	18	0.15b	0.01	0.17b	0.01	1.01b	0.06	1.33b	0.07	6.03
	2	40	0.71b	0.03	1.21b	0.05	3.21b	0.10	5.13b	0.17	23.27
	3	80	3.95a	0.08	5.76b	0.11	11.36a	0.20	21.07a	0.40	95.56
	4	110	4.12a	0.01	6.01b	0.01	11.92a	0.02	22.05a	0.03	100.00
W ₂ P ₃	1	18	0.21a	0.01	0.23a	0.01	1.31a	0.07	1.75a	0.10	7.80
	2	40	1.04a	0.04	1.41a	0.05	4.12a	0.13	6.57a	0.22	29.29
	3	80	4.03a	0.07	6.74a	0.13	10.33b	0.16	21.10a	0.36	94.07
	4	110	4.20a	0.01	7.21a	0.02	11.02a	0.02	22.43a	0.04	100.00
W ₃ P ₃	1	18	0.21a	0.01	0.25a	0.01	1.41a	0.08	1.87a	0.10	7.66
	2	40	1.03a	0.04	1.51a	0.06	4.13a	0.12	6.67a	0.22	27.34
	3	80	4.22a	0.08	7.10a	0.14	12.10a	0.20	23.42a	0.42	95.98
	4	110	4.41a	0.01	7.64a	0.02	12.35a	0.01	24.40a	0.03	100.00
CK ₃	1	18	0.15b	0.01	0.17b	0.01	1.21a	0.07	1.53b	0.09	7.64
	2	40	0.68b	0.02	1.10b	0.04	3.25b	0.09	5.03b	0.16	25.12
	3	80	3.70b	0.08	6.05b	0.12	9.15c	0.15	18.90b	0.35	94.41
	4	110	3.72b	0.00	6.29b	0.01	10.01b	0.03	20.02b	0.04	100.00

表 3 不同处理烤烟钾素吸收积累量与积累强度

处理	生育期	移栽后 天数/d	根		茎		叶		全株		
			积累量/	积累强度/	积累量/	积累强度/	积累量/	积累强度/	积累量/	积累强度/	积累率/
			(kg·hm ⁻²)	(kg·hm ⁻² ·d ⁻¹)	(kg·hm ⁻²)	(kg·hm ⁻² ·d ⁻¹)	(kg·hm ⁻²)	(kg·hm ⁻² ·d ⁻¹)	(kg·hm ⁻²)	(kg·hm ⁻² ·d ⁻¹)	%
W ₁ P ₁	1	18	0.56e	0.03	0.87d	0.05	4.23d	0.24	5.66e	0.31	4.78
	2	40	2.63d	0.09	5.65d	0.22	13.51d	0.42	21.79d	0.73	18.39
	3	80	16.71c	0.35	24.13e	0.46	59.75e	1.16	100.59g	1.97	84.91
	4	110	20.12c	0.11	28.21d	0.14	70.14g	0.35	118.47e	0.60	100.00
W ₂ P ₁	1	18	0.61d	0.03	0.97c	0.05	4.85c	0.27	6.43d	0.36	5.11
	2	40	2.84d	0.10	6.12c	0.23	15.70c	0.46	24.03c	0.80	19.10
	3	80	18.21b	0.38	26.16d	0.50	65.13d	1.25	109.50f	2.14	87.06
	4	110	20.52c	0.08	30.51c	0.15	74.75f	0.32	125.78e	0.54	100.00
W ₃ P ₁	1	18	0.64d	0.04	1.10c	0.06	5.03c	0.28	6.77d	0.38	5.18
	2	40	2.87d	0.10	6.23c	0.23	15.70c	0.49	24.80c	0.82	18.96
	3	80	19.70b	0.42	27.54d	0.53	67.46d	1.29	114.70e	2.25	87.70
	4	110	21.15c	0.05	31.31c	0.13	78.32f	0.36	130.78e	0.54	100.00
CK ₁	1	18	0.51e	0.03	0.74d	0.04	3.24e	0.18	4.49f	0.25	4.10
	2	40	2.24e	0.08	4.91e	0.19	13.76d	0.48	20.91d	0.75	19.09
	3	80	14.86d	0.32	22.68f	0.44	58.92e	1.13	96.46g	1.89	88.06
	4	110	16.25d	0.05	25.87e	0.11	67.42g	0.28	109.54f	0.44	100.00
W ₁ P ₂	1	18	0.72c	0.04	1.21b	0.07	5.71c	0.32	7.64c	0.42	5.34
	2	40	2.87d	0.10	6.34c	0.23	15.91c	0.46	25.12c	0.79	17.56
	3	80	21.16a	0.46	30.08c	0.59	74.38c	1.46	125.62d	2.51	87.81
	4	110	23.39b	0.07	34.13c	0.14	85.54e	0.37	143.06d	0.58	100.00
W ₂ P ₂	1	18	0.78c	0.04	1.27b	0.07	6.04b	0.34	8.09b	0.45	5.36
	2	40	3.23c	0.11	6.82c	0.25	16.36c	0.47	26.41c	0.83	17.49
	3	80	22.19a	0.47	32.15b	0.63	79.41c	1.58	133.75c	2.68	88.59
	4	110	24.68a	0.08	36.16c	0.13	90.13d	0.36	150.97c	0.57	100.00
W ₃ P ₂	1	18	0.86b	0.05	1.45b	0.08	5.56c	0.31	7.87c	0.44	4.77
	2	40	3.61b	0.13	7.61b	0.28	18.17b	0.57	29.39b	0.98	17.80
	3	80	25.33a	0.54	36.82a	0.73	89.42b	1.78	151.57a	3.05	91.82
	4	110	27.41a	0.07	40.16a	0.11	97.51c	0.27	165.08b	0.45	100.00
CK ₂	1	18	0.73c	0.04	1.20b	0.07	5.73c	0.32	7.66c	0.43	5.37
	2	40	3.14c	0.11	6.71c	0.25	16.39c	0.48	26.24c	0.84	18.40
	3	80	21.50a	0.46	31.01c	0.61	78.71c	1.56	131.22c	2.62	92.03
	4	110	23.11b	0.05	34.31c	0.11	85.17e	0.22	142.59d	0.38	100.00
W ₁ P ₃	1	18	0.86b	0.05	1.31b	0.07	6.34b	0.35	8.51b	0.47	5.15
	2	40	3.84b	0.14	8.12b	0.31	19.72b	0.61	31.68b	1.05	19.19
	3	80	24.71a	0.52	35.92a	0.70	88.59b	1.72	149.22a	2.94	90.37
	4	110	26.14a	0.05	40.31a	0.15	98.67c	0.34	165.12b	0.53	100.00
W ₂ P ₃	1	18	0.95a	0.05	1.65a	0.09	7.52a	0.42	10.12a	0.56	5.76
	2	40	4.12a	0.14	9.93a	0.38	24.17a	0.76	38.22a	1.28	21.77
	3	80	25.15a	0.53	38.71a	0.72	95.65a	1.79	159.51a	3.03	90.85
	4	110	27.31a	0.07	43.23a	0.15	105.04a	0.31	175.58a	0.54	100.00
W ₃ P ₃	1	18	1.04a	0.06	1.70a	0.09	7.18a	0.40	9.92a	0.55	5.33
	2	40	4.61a	0.16	10.13a	0.38	24.5a	0.79	39.30a	1.34	21.13
	3	80	25.36a	0.52	39.41a	0.73	97.68a	1.83	162.45a	3.08	87.35
	4	110	27.72a	0.08	45.52a	0.20	112.73a	0.50	185.97a	0.78	100.00
CK ₃	1	18	0.85b	0.05	1.34b	0.07	6.28b	0.35	8.47b	0.47	5.24
	2	40	3.68b	0.13	8.61b	0.33	18.35b	0.55	30.64b	1.01	18.97
	3	80	23.61a	0.50	34.81b	0.66	87.37b	1.73	145.79b	2.88	90.26
	4	110	25.09a	0.05	39.37b	0.15	97.06c	0.32	161.52b	0.52	100.00

2.4 不同处理烤烟氮磷钾吸收比例

由表 1~表 3 中的数据可计算出每生产 100 kg 干烟叶 CK₁ 处理需要的氮最少,为 2.69 kg,W₂P₃ 处理需要的氮最多,为 3.81 kg;W₁P₃ 处理需要的磷最

多,为 0.24 kg,W₂P₁ 和 W₃P₁ 处理需要的磷最少,为 0.18 kg;CK₂ 处理需要的钾最多,为 2.00 kg,W₃P₁ 处理需要的钾最少为 1.49 kg;其他处理所需氮磷钾的量介于上述最大量和最小量之间。由表 4 可以看

出,各处理烤烟吸磷量相差不大,但吸钾量差别较大。

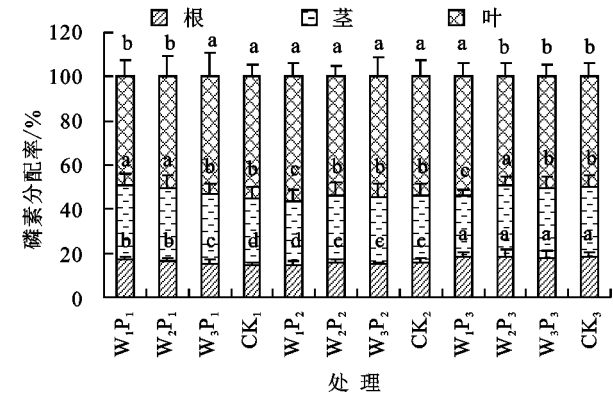


图 3 各处理烟株不同器官中磷素分配率

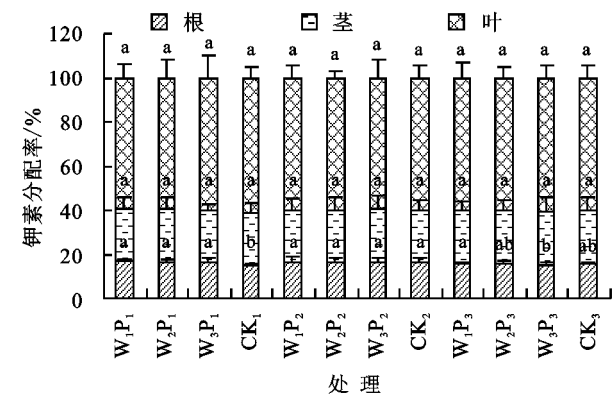


图 4 各处理烟株不同器官中钾素分配率

3 讨论

作物对水分和养分的吸收虽然是两个独立的过程,但水分和养分对于作物生长的作用却是相互制约和相互影响的^[14]。有研究^[15]表明,磷的作物有效性与土壤的水分条件密切相关,水与磷的投入水平共同影响作物对磷的吸收。一方面,水分使作物根系发生生理适应性改变,影响作物根系的大小,使之形成理想的根系构型,即表层土壤有大量根系分布和具有发达的深层根系^[15],增加根系和土壤的接触面积^[16],理

想的根系构型可显著提高养分的有效性^[17];水分显著影响根系的生长发育和根分泌物的释放,根分泌物增加,提高作物对土壤养分的获取效率,进而影响植物对根际养分的吸收^[16];另一方面,水分也是养分的良好溶剂,作为养分的载体对养分的运输转运和吸收有着至关重要的意义,其丰缺与否直接影响到土壤中有效养分的数量,还影响到通过扩散和质流方式向根系迁移养分的速率,对磷的影响尤为重要,磷在土壤中易被胶体吸附和固定,移动性差,通过截获和质流被根系吸收的磷很少,不到植物总需磷量的 5%,扩散是植物获取土壤中磷的主要途径^[18],而土壤含水量高低不仅影响磷的扩散速率,同时还决定根系吸收土壤磷的范围。通常土壤中的可溶性磷吸附在土壤颗粒表面,存在于土壤微细孔隙中的水膜是磷扩散的介质,一旦水膜中断,土壤中可溶性磷便无法在土粒间进行扩散。当土壤体积水分含量从 0.3 cm³/cm³ 降至 0.2 cm³/cm³,下降 0.1 个单位,磷的扩散速率下降 98%,在增加土壤水分含量后,土壤磷的扩散速率增加,根系吸收磷的速率显著上升^[19]。但水分过多时作物根系生长受到抑制,根系生物量减少,根系分布浅,不利于根系对深层土壤养分的吸收利用^[20];水分过多可稀释土壤中的养分,降低其浓度,加速养分的流失,降低肥料的利用率^[21],从而减少作物对养分的吸收量。本试验的结果表明,同一供磷水平下,各灌水处理烟株的根、茎、叶各器官和全株吸收氮、磷、钾养分的量均高于或显著高于各自对照,说明灌水处理可提高氮、磷、钾养分的有效性,促进作物对氮、磷、钾的吸收,水分促进烟株对养分的吸收和利用,水磷间存在耦合效应;本研究中,不同灌水量下,不同处理烟株对养分的吸收量表现为 W₃P_i > W₂P_i > W₁P_i,说明本研究设置的高量灌水处理促进烤烟对氮、磷、钾吸收的效果优于中量和低量灌水处理。

表 4 各处理烤烟氮磷钾吸收比例

处理	吸氮量/ (kg · hm ⁻²)	吸磷量/ (kg · hm ⁻²)	吸钾量/ (kg · hm ⁻²)	产量/ (kg · hm ⁻²)	氮磷钾吸收 比例
W ₁ P ₁	64.38e	12.53f	118.47e	2146.65f	1 : 0.19 : 1.84
W ₂ P ₁	80.93c	14.25e	125.78e	2329.51e	1 : 0.18 : 1.55
W ₃ P ₁	87.53c	15.74d	130.78e	2424.74d	1 : 0.18 : 1.49
CK ₁	58.47e	14.38e	109.54f	2176.32f	1 : 0.25 : 1.87
W ₁ P ₂	79.84d	17.36c	143.06d	2491.80c	1 : 0.22 : 1.79
W ₂ P ₂	90.13b	18.14b	150.97c	2522.56c	1 : 0.20 : 1.68
W ₃ P ₂	95.58b	21.88a	165.08b	2846.25a	1 : 0.23 : 1.73
CK ₂	71.12d	16.69c	142.59d	2289.60e	1 : 0.23 : 2.00
W ₁ P ₃	90.42b	22.05a	165.12b	2516.71c	1 : 0.24 : 1.83
W ₂ P ₃	101.98a	22.43a	175.58a	2675.83b	1 : 0.22 : 1.72
W ₃ P ₃	110.38a	24.40a	185.97a	2931.37a	1 : 0.22 : 1.68
CK ₃	86.91c	20.02b	161.52b	2487.18c	1 : 0.23 : 1.86

有研究^[22]表明,适量增施磷肥能促进作物对氮的吸收,提高氮素利用率。在一定范围内,适量增施

磷肥可提高作物对水分和磷素的吸收利用效率^[6]。王艳丽等^[23]的研究表明,适量施磷可促进烟株对氮、磷、钾养分的吸收和积累,对促进钾的吸收作用尤其显著,同时也发现,当施磷超过一定量后,促进作用反而减弱;张海伟等^[12]的研究也表明,适宜的磷肥施用量可促进烟株对氮、磷、钾的吸收,提高肥料的利用率,过高或过低的磷肥施用量都会减少烟株对氮、磷和钾的吸收量,降低肥料的利用率。其可能的原因是适量而充足的磷素供应能促进作物根系延伸生长,增加根系总长度、最大根长、根系直径和根体积,提高根系比表面积,提高根系活力,提高根水势等生理作用^[24-25],扩大根系接触的土壤体积,提高土壤养分和水分的有效性^[26]。磷素养分供应能促进烟株根系发育,叶片扩展,构建良好的根、冠结构,促进烟株形成良好的生理功能^[4]。磷素营养能促进作物对水分、养分的吸收和利用,尤其能扩大对土壤深层水分和养分的吸收利用^[27-28]。而根系作为烤烟吸收养分和水分的主要器官,其生理功能的强弱直接影响烟株对养分的吸收利用,对地上部的生长发育产生重要的促进作用,同时地上部较好的生长也会促使根系生长较为旺盛,且形成良好的根系构型,根系与地上部分的生长存在相互促进、相互依存的关系。植株具有发达的根系和良好的根系构型,具有强的吸收氮^[29]、磷^[30]、钾^[31]等养分和水分^[32]的能力。在烤烟生产中,促进烟株对钾的吸收,符合优质烟叶生产要求。本研究中,在烟株的同一生育期,同一灌水量条件下,供磷量不同时,烟株的根、茎、叶和全株对氮磷钾养分的吸收量存在较大差异,基本呈现 $P_3W_i > P_2W_i > P_1W_i$ 的变化规律,说明适量施用磷肥可促进烟株对氮、磷、钾养分的吸收,高量磷肥处理促进烟株对氮、磷、钾养分吸收的效果优于中量和低量磷肥处理。

4 结论

(1)中、高量灌水处理和磷肥处理均有利于提升烤烟对氮、磷、钾的吸收和积累。

(2)综合比较,施磷量为 96 kg/hm^2 、灌水量为 $1.00 \sim 2.00 \text{ L/株}$ 的水磷耦合处理对于促进烟叶氮磷钾养分吸收和积累,以及提升烟叶质量的效果较好。

参考文献:

- [1] 龚婷,刘善丽,尹国瞩,等.烟草生长、光合特性及品质对水分胁迫的响应研究[J].西南师范大学学报(自然科学版),2017,42(8):64-69.
- [2] 杨苹,程智敏,陈叙生,等.土壤水分调控对烤烟根系、植株形态及生理特性的影响[J].贵州农业科学,2017,45(9):21-23.
- [3] 韦建玉,金亚波,郭晓惠,等.不同生育期水分亏缺对烤

烟干物质积累与代谢酶活性的影响[J].西南农业学报,2016,29(5):1081-1085.

- [4] 王艳丽,王京,刘国顺,等.磷施用量对烤烟根系生理及叶片光合特性的影响[J].植物营养与肥料学报,2016,22(2):410-417.
- [5] 门思润,朱列书,彭妙.磷肥类型及施用量对烤烟光合特性的影响[J].江苏农业科学,2018,46(9):76-79.
- [6] 王瑜,宁堂原,迟淑筠,等.不同施磷水平下灌水量对小麦水分利用特征及产量的影响[J].水土保持学报,2012,26(3):232-237.
- [7] Singh D K, Sale P W G, Pallaghy C K, et al. Role of proline and leaf expansion rate in the recovery of stressed white clover leaves with increased phosphorus concentration[J]. New Phytologist,2000,146(2):261-269.
- [8] 唐宏亮,马领然,张春潮,等.水分和磷对苗期玉米根系形态和磷吸收的耦合效应[J].中国生态农业学报,2016,24(5):582-589.
- [9] 韩天华,贺彪,张晓海,等.云南丽江山地烤烟滴灌水肥一体化技术[J].农业工程技术,2018,38(17):22-23.
- [10] 霍昭光,孙志浩,邢雪霞,等.北方烟区水肥一体化对烤烟生长、根系形态、生理及光合特性的影响[J].中国生态农业学报,2017,25(9):1317-1325.
- [11] 王政,刘久羽,王加荣,等.红壤条件下水氮耦合对烤烟促生及烟叶品质的影响[J].江西农业学报,2018,30(1):91-94.
- [12] 张海伟,翟晶,程小强,等.施磷量对紫色土旱地烤烟养分吸收和利用的影响[J].湖北农业科学,2014,53(12):2767-2770.
- [13] 鲍士旦.土壤农化分析[M].3版.北京:中国农业出版社,2007.
- [14] 张赛,王龙昌,石超,等.水肥耦合对玉米化学计量学特征及其生长性状的影响[J].水土保持学报,2018,32(5):252-261.
- [15] 王昕,李海港,程凌云,等.磷与水分互作的根土界面效应及其高效利用机制研究进展[J].植物营养与肥料学报,2017,23(4):1054-1064.
- [16] 庞春花,张紫薇,张永清.水磷耦合对藜麦根系生长、生物量积累及产量的影响[J].中国农业科学,2017,50(21):4107-4117.
- [17] Jiao X, Lyu Y, Wu X, et al. Grain production versus resource and environmental costs: Towards increasing sustainability of nutrient use in China[J]. Journal of Experimental Botany,2016,67(17):4935-4949.
- [18] Lamers H, Chapin Iii F S, Pons T L. Plant physiological ecology[J]. Photosynthetica,2008,37(3):446.
- [19] Bhadoria P B S, Kaselowsky J, Claassen N, et al. Phosphate diffusion coefficients in soil as affected by bulk density and water content[J]. Journal of Plant Nutrition and Soil Science,1991,154(1):53-57.

- [17] Yang X, Liu J, Mcgrouter K, et al. Effect of biochar on the extractability of heavy metals (Cd, Cu, Pb, and Zn) and enzyme activity in soil[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2016, 23(2): 974-984.
- [18] 潘萌娇. 燕山山脉木材热裂解规律及生物质油特性实验研究[D]. 天津: 河北工业大学, 2014.
- [19] 杨兴, 黄化刚, 王玲, 等. 烟秆生物质炭热解温度优化及理化性质分析[J]. *浙江大学学报(农业与生命科学版)*, 2016, 42(2): 245-255.
- [20] 罗煜, 赵立欣, 孟海波, 等. 不同温度下热裂解芒草生物质炭的理化特征分析[J]. *农业工程学报*, 2013, 29(13): 208-217.
- [21] 罗凯, 陈汉平, 王贤华, 等. 生物质焦及其特性[J]. *可再生能源*, 2007, 25(1): 17-19.
- [22] 刘志龙. 麻栎炭用林种源选择与关键培育技术研究[D]. 南京: 南京林业大学, 2010.
- [23] 李桥, 高屿涛. 生物质炭对水中重金属吸附研究进展[J]. *低碳世界*, 2016(22): 13-15.
- [24] 吴瑾光. 近代傅里叶变换红外光谱技术及应用[M]. 北京: 科学技术文献出版社, 1994.
- [25] 张越, 林珈羽, 刘沅, 等. 改性生物炭对镉离子吸附性能研究[J]. *武汉科技大学学报*, 2016, 39(1): 48-52.
- [26] 王月瑛, 吕貽忠. 酸洗处理对生物质炭表面吸附特性及光谱特性的影响[J]. *光谱学与光谱分析*, 2016, 36(10): 3292-3296.
- [27] 温婧, 朱元骏, 张兴昌, 等. 砒砂岩修复晋陕蒙能源区铅污染土壤的研究[J]. *环境科学学报*, 2015, 35(3): 873-879.
- [28] 孙红文. 生物炭与环境[M]. 北京: 化学工业出版社, 2013.
- [29] 周以力, 吴建一. 壳聚糖对铅离子吸附的研究[J]. *嘉兴学院学报*, 2003, 15(6): 20-21.
- [30] 梁东旭, 罗春燕, 周鑫, 等. 改性小麦壳对水溶液中 Cd^{2+} 的吸附研究[J]. *农业环境科学学报*, 2015, 34(12): 2364-2371.
- [31] 周尊隆, 卢媛, 孙红文. 菲在不同性质黑炭上的吸附动力学和等温线研究[J]. *农业环境科学学报*, 2010, 29(3): 476-480.
- [32] Vimonses V, Lei S, Bo J, et al. Kinetic study and equilibrium isotherm analysis of Congo Red adsorption by clay materials[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2010, 148(2): 354-364.
- [33] 张伟, 王维清, 王德志, 等. 磁性斜发沸石对溶液中 Pb^{2+} 的吸附性能[J]. *安徽农业科学*, 2015, 43(27): 206-208.
- [34] 秦婷婷, 王兆伟, 朱俊民, 等. 花椰菜基生物炭对水中 $\text{Pb}(\text{II})$ 的吸附性能[J]. *环境科学学报*, 2017, 37(8): 2977-2988.
- [35] 景明. 生物炭对土壤中六价铬和莠去津的吸附锁定作用研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2015.
- [36] 郭林中, 韦瑞杰, 王海潮, 等. 改性活性炭的制备及其对金吸附性能的研究[J]. *岩矿测试*, 2014, 33(4): 528-534.

(上接第 302 页)

- [20] 张均, 贺德先, 段增强. 水磷耦合对小麦次生根特殊根毛形态与结构的影响[J]. *生态学报*, 2011, 31(11): 3110-3119.
- [21] 潘晓莹, 武继承. 水肥耦合效应研究的现状与前景[J]. *河南农业科学*, 2011, 40(10): 20-23.
- [22] 陈远学, 周涛, 王科, 等. 施磷对麦/玉/豆套作体系氮素利用效率及土壤硝态氮含量的影响[J]. *水土保持学报*, 2014, 28(3): 191-196.
- [23] 王艳丽, 刘国顺, 丁松爽, 等. 磷用量对烤烟根系及其与地上部关系的影响[J]. *应用生态学报*, 2015, 26(5): 1440-1446.
- [24] 江厚龙, 徐宸, 汪代斌, 等. 不同磷素水平对烟苗根系生长和光合生理特性的影响[J]. *福建农业学报*, 2015, 30(7): 656-661.
- [25] 宋欣, 孙敏, 高志强, 等. 旱地小麦休闲期覆盖增磷对籽粒蛋白质积累的影响[J]. *激光生物学报*, 2015, 24(4): 390-398.
- [26] 蔡赛男. 不同根构型烤烟对氮素、钾素吸收与利用的研究[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2015.
- [27] 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.
- [28] 高艳梅, 孙敏, 高志强, 等. 旱地小麦休闲期覆盖施磷对土壤水库的调控作用[J]. *中国生态农业学报*, 2014, 22(10): 1139-1145.
- [29] Sattelmacher B, Horst W J, Becker H C. Factors that contribute to genetic variation for nutrient efficiency of crop plants[J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2010, 157(3): 215-224.
- [30] Ao J H, Fu J B, Tian J A, et al. Genetic variability for root morph-architecture traits and root growth dynamics as related to phosphorus efficiency in soybean[J]. *Functional Plant Biology*, 2010, 37(4): 304-312.
- [31] 何冰, 韩助君, 薛刚, 等. 不同基因型烤烟钾吸收特性差异及吸收机理[J]. *应用生态学报*, 2015, 26(11): 3367-3372.
- [32] 占爱. 提高养分、水分吸收的根系形态和生理调控[D]. 陕西 杨凌: 西北农林科技大学, 2015.