

氮磷钾施肥总量对工业大麻生长及光合作用的影响^{*}

罗 燕¹, 夏 鑫¹, 李聪平², 董明华¹, 程 霞^{1**}

(1. 昆明学院 农学与生命科学学院, 云南 昆明 650214; 2. 曲靖市农业环境保护监测站, 云南 曲靖 655000)

【摘 要】工业大麻是喜肥作物, 施肥量影响其生长发育. 为筛选最适于药用工业大麻‘云麻 8 号’生长的氮磷钾施肥总量, 设置 7 个肥料总量水平 (240, 360, 480, 600, 720, 840, 960 kg/hm²), 以氮磷钾比例为 3:1:2 进行施肥, 测定其生长及光合指标. 结果显示, 随着施肥总量增加, 各指标均呈先升高后下降趋势. 当施肥量为 720 kg/hm² 时, 大麻的叶绿素相对含量 (SPAD 值)、净光合速率 (P_n)、茎粗、根长、根粗、叶数目、叶鲜质量、根茎叶干质量、壮苗指数均达到最高值, 与最低处理组相比, 分别提高了 66.64%、3.43 倍、1.75 倍、74.12%、1.62 倍、79.53%、1.17 倍、3.77 倍、4.89 倍、3.55 倍、7.56 倍. 当施肥量达到 960 kg/hm² 时, 各指标均显著低于最高值. 因此, 为提升‘云麻 8 号’产量, 氮磷钾最适宜施肥总量应为 720 kg/hm². 研究结果可为工业大麻栽培的精准施肥提供数据支撑和理论依据.

【关键词】工业大麻; 氮磷钾; 施肥总量; 生长; 光合作用

【中图分类号】S563.3 **【文献标志码】**A **【文章编号】**1674-5639(2025)06-0069-08

DOI: 10.14091/j.cnki.kmxyxb.2025.06.009

氮磷钾作为植物生长发育的三大营养元素, 通过多种机制调控植物的生理代谢过程影响植株生长发育. 其中, 氮素是构成叶绿素、氨基酸和核酸的核心元素, 直接关系植物的光合作用和生长速度^[1,2]. 磷作为 ATP、磷脂和遗传物质的组成成分, 在能量代谢和信息传递中发挥核心作用^[3,4]. 钾离子通过调节气孔开闭、酶活性和渗透平衡, 影响光合产物的运输和水分的利用效率^[5]. 研究显示, 合理施用氮磷钾肥料可有效提升作物产量及品质. 例如, 适宜的施氮量能使棉花 (*Gossypium hirsutum* L.) 幼苗的株高、茎粗、生物量等显著提高^[6]; 施加 22.5 kg/hm² 的钾肥, 能显著提高甜荞麦 (*Fagopyrum esculentum* Moench.) 的产量和品质^[7]; 适量的氮磷钾配施肥能显著提高小麦 (*Triticum aestivum* L.) 和玉米 (*Zea mays* L.) 的产量和品质^[8,9]. 然而过量施肥会导致产量降低、养分流失及环境风险等问题^[10]. 例如, 过量施肥会抑制水稻 (*Oryza sativa* L.) 根系生长, 同时导致肥料在土壤中积累, 增加淋溶风险, 进而污染地下水, 对生态环境造成潜在威胁^[11,12].

工业大麻 (*Cannabis sativa* L.) 是指四氢大麻酚 (THC) 含量低于 0.3% 的大麻, 广泛应用于工业、纺织业、医药领域^[13,14]. 近年来工业大麻花叶内的主要次生代谢物大麻二酚 (cannabidiol, CBD) 在神经疾病领域有显著作用, 已成为工业大麻产业发展的重要价值点^[15,16]. 云南省是我国工业大麻合法化种植最早, 制度最健全, 也是全国唯一能合法种植药用工业大麻的省份^[17]. 近年来, 随着全球工业大麻市场需求激增, 如何通过精准栽培技术促进工业大麻生长, 提高其产量已成为研究热点. 工业大麻是喜肥作物, 施肥量影响其产量和质量. 例如, 适量的磷肥可促进工业大麻品种‘Mountain Mango’的叶绿素的合成, 有效提高净光合速率^[18]. 施氮量在 200 kg/hm² 时, 最有利于大麻品种‘CRS-1’和‘Anka’生物量及光合作用的提高^[19]. 140~190 kg/hm² 的施氮量可提高大麻品种‘Spectrum’和‘therapy’的花序生物量, 从而提高单株 CBD 产量^[20]. 刘浩等^[21]研究也表明适宜的氮磷钾施肥量及比例可显著促进‘云麻 1

^{*} [收稿日期] 2025-05-12

[作者简介] 罗燕, 女, 云南南华人, 昆明学院在读硕士研究生, 研究方向为作物高产栽培.

^{**} [通信作者] 程霞, 女, 河南许昌人, 昆明学院副教授, 博士, 研究方向为作物高产栽培和抗逆性, E-mail: 592331476@qq.com.

[基金项目] 云南省大学生创新创业训练项目 (S202311393076, S202311393089, 202411393009).

号’生长,并提高其生物量.

‘云麻 8 号’是云南省主推的药用工业大麻品种,其 CBD 含量达 1.33%,在推动云南高原特色农业发展中具有重要意义.实验室前期已确定,最适宜‘云麻 8 号’生长的氮磷钾元素质量比例为 3:1:2,但在此配比下最优施肥总量尚未明确,这在一定程度上限制了精准施肥技术的推广应用.因此,本研究以工业大麻‘云麻 8 号’为试验材料,设置 7 个肥料总量水平(240, 360, 480, 600, 720, 840, 960 kg/hm²),按照氮磷钾比例 3:1:2 进行施肥,通过测定其生长指标和光合作用,筛选出最适宜‘云麻 8 号’生长的氮磷钾施肥总量.本研究结果将有助于优化工业大麻的施肥管理,为工业大麻栽培的精准施肥提供科学的数据支撑和理论依据.

1 材料与方法

1.1 试验材料

本试验使用的工业大麻品种为‘云麻 8 号’,由云南省农业科学院提供.

土壤准备:红土取自云南省昆明市昆明学院白沙河实验基地,将土壤进行遮阴风干,压碎后过 5 mm 网筛后,与腐质土以 3:1 体积比充分混匀,备用.

肥料:氮肥为尿素(含 N 质量分数 46%),磷肥为过磷酸钙(含 P₂O₅ 质量分数 16%),钾肥为硫酸钾(含 K₂O 质量分数 50%).

1.2 试验方法

试验于 2024 年 3 月至 9 月于昆明学院农学与生命科学学院试验大棚进行.采用盆栽法(花盆高 24 cm,直径 18 cm).设 7 个施肥量水平,即 240, 360, 480, 600, 720, 840, 960 kg/hm² 处理,以氮磷钾比例为 3:1:2 作为底肥施入.施肥按照大田用肥的 3 倍进行计算,换算方法为,每 m² 大田耕地有 225 kg 有效耕地土壤,每盆装土 10 kg,所有肥料根据不同水平用量计算得出每盆 3 种肥料用量,将肥料和土壤充分混匀,每个处理重复 4 次(盆),共 28 盆.

1.2.1 工业大麻生长指标的测定

在收获期,用皮尺测定株高(基部到顶部生长点,单位:cm)、根长(主根,单位:cm),用游标卡尺测定茎粗(茎秆中部,单位:mm)、根粗(主根中部,单位:mm),叶数目(整个植株上所有有效叶片数,单位:对,两个叶片为一对),用分析天平称量植株鲜质量.然后将根、茎、叶放入恒温烘箱 105 ℃ 杀青 20 min 后,于 75 ℃ 烘干至恒质量,用电子天平测定植株干质量.按如下公式计算壮苗指数:

$$\text{壮苗指数} = (\text{茎粗}/\text{株高}) \times \text{全株干质量} \times 100\% \quad (1)$$

1.2.2 工业大麻光合指标测定

待苗长至约 40 cm 时,即进入快速生长期,此时不同处理下大麻生长状态差异明显.选取不同处理下一部位完全展开叶片,用叶绿素含量检测仪(北京中科维和仪器公司 TYS-B)(手持)测定叶绿素相对含量(SPAD 值),使用便携式光合作用测定系统(北京力高泰科技有限公司 Li-cor 6400XT)测定净光合速率(P_n)、蒸腾速率(T_r)、胞间二氧化碳浓度(C_i)和气孔导度(G_s)的测定.每个处理 4 个生物学重复.

1.3 数据的统计分析方法

以上数据采用 Excel、SPSS 24 软件进行数据统计分析,采用单因素方差分析和 DUNCAN 进行多重比较,使用 GraphPad Prism 8 软件进行绘图.

2 结果与分析

2.1 不同氮磷钾施肥总量对工业大麻生长的影响

由图 1 可见,不同氮磷钾施肥量下工业大麻株高、茎粗、根长、根粗和叶片数均随施肥量增加呈现先增加后减少的趋势.其中,株高在氮磷钾施肥量 840 kg/hm² 时达到最高值,是最低组(240 kg/hm²)的 2.45 倍;茎粗、根长、根粗、叶片数在 720 kg/hm² 处理下达到最高,分别比最低组提高了 1.75 倍、74.12%、1.62 倍、79.53%.此外,株高和茎粗在施肥量 240, 360, 480, 600 kg/hm² 的处理组之间有显著差异,株高、茎粗、根长、根粗在施肥量 720 kg/hm² 和 840 kg/hm² 之间无显著差异.当施肥量达到 960 kg/hm² 时,各生长指标都显著低于最高值.这说明不同施肥量对大麻各生长指标影响程度不同,适宜的氮磷钾施肥量

(720 ~840 kg/hm²) 可显著促进工业大麻营养器官的形态建成,而过量施肥 (960 kg/hm²) 则有抑制作用.

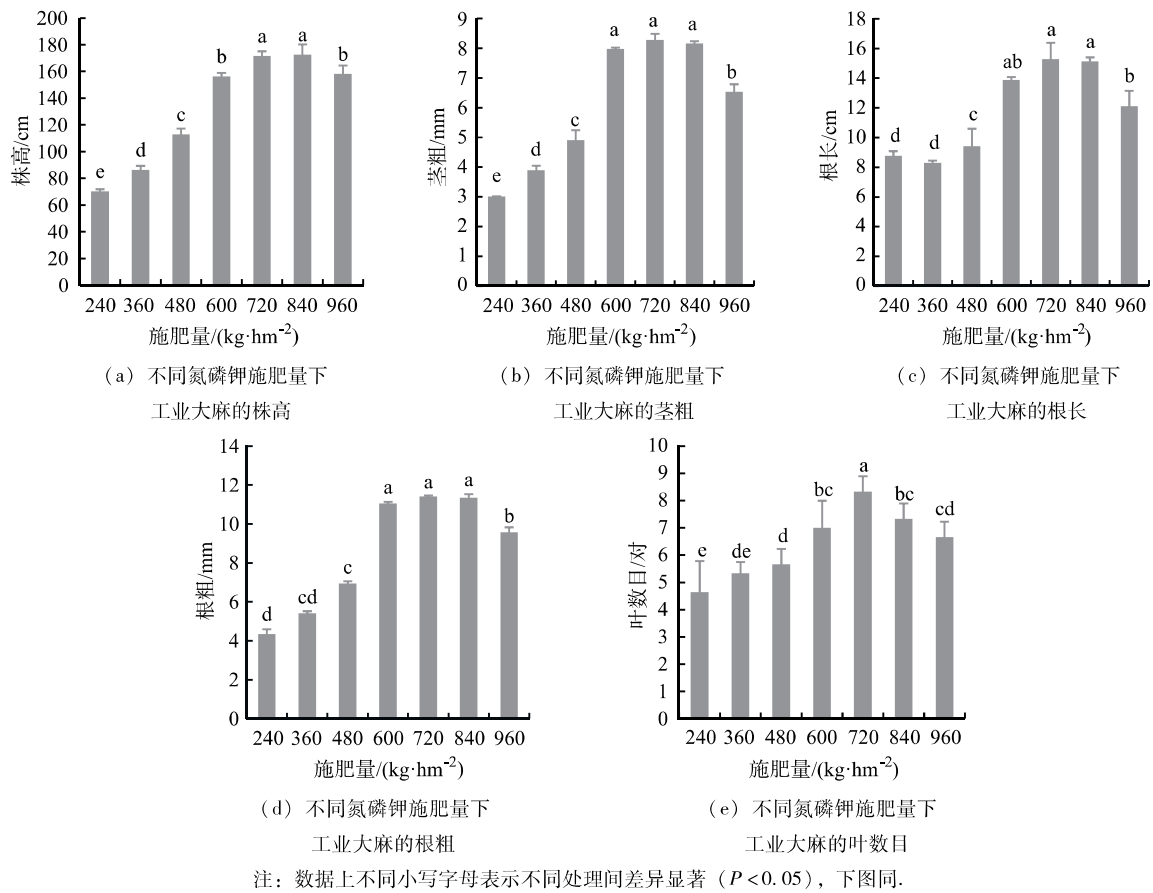


图1 不同氮磷钾施肥量下工业大麻生长指标的影响

2.2 不同氮磷钾施肥总量对工业大麻生物量的影响

由表1可知,不同施肥量对工业大麻植株生物量影响显著.其中,根、茎鲜质量在施肥量为840 kg/hm²时达到最高,分别较最低组(240 kg/hm²)提高了3.74倍、3.70倍;叶鲜质量和根、茎、叶干质量在720 kg/hm²处理下达到最高,分别比最低组(240 kg/hm²)提高了1.17倍、3.77倍、4.89倍、3.55倍.当施肥量达到960 kg/hm²时,茎和叶的鲜质量和干质量与最高值有显著差异,而根的鲜、干质量与最高值无显著差异.此外,根、茎、叶的干、鲜质量在施肥量为240 kg/hm²和360 kg/hm²时无显著差异,但根、茎、叶的鲜质量和根、茎的干质量在施肥量为360,480,600 kg/hm²时有显著差异.

表1 不同氮磷钾施肥总量对工业大麻生物量的影响

施肥量/ (kg·hm ⁻²)	鲜质量/g			干质量/g		
	根	茎	叶	根	茎	叶
240	1.51 ± 0.39 ^e	5.45 ± 0.02 ^{ef}	4.53 ± 0.41 ^e	0.31 ± 0.02 ^d	0.99 ± 0.53 ^e	1.01 ± 0.07 ^d
360	3.04 ± 0.06 ^d	7.16 ± 0.27 ^e	5.48 ± 0.32 ^{de}	0.45 ± 0.21 ^d	1.26 ± 0.10 ^{de}	1.40 ± 0.14 ^{cd}
480	4.03 ± 0.06 ^c	10.07 ± 0.22 ^d	6.33 ± 0.14 ^c	0.65 ± 0.03 ^c	2.72 ± 0.15 ^c	1.77 ± 0.08 ^{bc}
600	5.22 ± 0.41 ^b	19.67 ± 3.14 ^b	7.88 ± 0.35 ^b	0.95 ± 0.12 ^b	3.99 ± 0.60 ^b	2.20 ± 0.19 ^b
720	6.99 ± 0.14 ^a	24.53 ± 0.74 ^a	9.81 ± 0.67 ^a	1.48 ± 0.17 ^a	5.83 ± 0.51 ^a	4.60 ± 0.16 ^a
840	7.15 ± 0.03 ^a	25.63 ± 0.74 ^a	9.37 ± 0.34 ^a	1.46 ± 0.22 ^a	5.33 ± 1.92 ^a	4.35 ± 0.72 ^a
960	6.95 ± 0.08 ^a	20.92 ± 2.16 ^b	7.43 ± 1.37 ^b	1.45 ± 0.07 ^a	3.24 ± 0.62 ^b	2.15 ± 0.49 ^b

注: 同列数据后不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$), 下表同.

壮苗指数的变化趋势与生物量一致,随着施肥量的增加,壮苗指数呈现先增加后减少趋势(图2)。当施肥量为 720 kg/hm^2 时壮苗指数最大,比最低组(240 kg/hm^2)提高了 7.56 倍。壮苗指数在施肥量为 360, 480, 600, 720 kg/hm^2 时有显著差异,而 720 kg/hm^2 和 840 kg/hm^2 处理间无显著差异。而当施肥量为 960 kg/hm^2 时壮苗指数显著低于 720 kg/hm^2 处理。可见,适宜的氮磷钾施肥量有利于工业大麻生物量的积累。

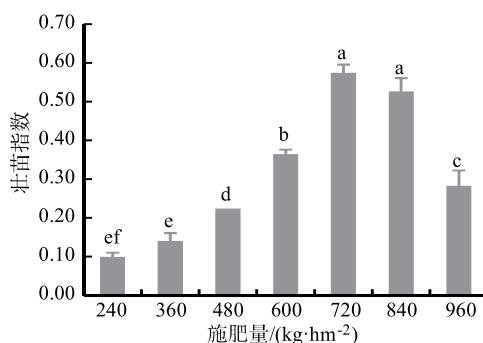


图2 不同氮磷钾施肥总量对工业大麻的壮苗指数的影响

2.3 不同氮磷钾施肥总量对工业大麻光合作用的影响

不同氮磷钾施肥总量对工业大麻光合指标的影响如图3所示。

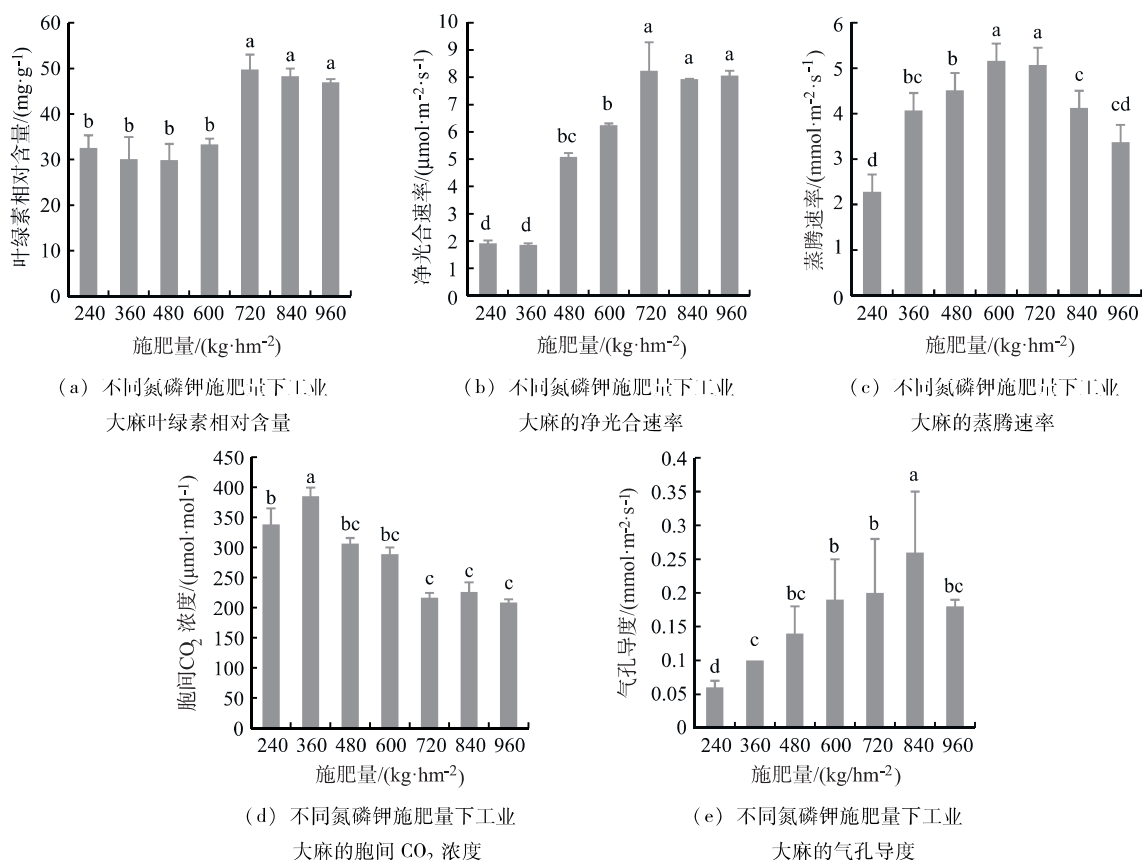


图3 不同氮磷钾施肥量对工业大麻光合作用的影响

施肥量为 720, 840, 960 kg/hm^2 处理下大麻叶绿素相对含量和净光合速率显著高于其他处理组,其中 720 kg/hm^2 处理下均达到最高,比最低组(360 kg/hm^2)分别提高了 66.64% 和 3.43 倍。叶绿素相对含量在 240, 360, 480, 600 kg/hm^2 处理间无显著差异,而在 720, 840, 960 kg/hm^2 处理间也无显著差

异. 蒸腾速率随着施肥量增加呈现先增加后降低趋势, 施肥量为 600 kg/hm² 和 720 kg/hm² 时显著高于其他处理组. 360 kg/hm² 处理组的胞间二氧化碳浓度显著高于其他处理组, 而在 480, 600, 720, 840, 960 kg/hm² 处理间无显著差异. 气孔导度在施肥量为 840 kg/hm² 时最大, 显著高于其他处理, 较最低组 (240 kg/hm²) 提高了 3.33 倍, 且当施肥量上升至 960 kg/hm² 时, 发生明显降低. 可见, 相对于低施肥量, 高施肥量下的光合能力更强, 但当施肥量超过 720 kg/hm² 时, 叶绿素相对含量、净光合速率和蒸腾速率都出现降低趋势.

2.4 相关性分析

由表 2 可知, 不同施肥量处理下工业大麻各项指标之间存在不同的相关性. 其中, 植株干质量、鲜质量与株高、茎粗、根长、根粗、叶片数呈极显著正相关, 壮苗指数与植株干、鲜质量呈极显著正相关, 这与农艺学性状结果一致. P_n 与 SPAD 值、 G_s 呈极显著正相关, 与 C_i 呈极显著负相关. 此外, 工业大麻植株生长指标、生物量与 SPAD 值、 P_n 、 G_s 存在不同程度的正相关, 与 C_i 存在不同程度的负相关.

表 2 不同氮磷钾施肥总量下工业大麻各项指标相关性

指标	相关性系数												
	株高	茎粗	叶数目	根长	根粗	壮苗指数	SPAD 值	P_n	G_s	C_i	T_r	植株鲜质量	植株干质量
株高	1												
茎粗	0.977 **	1											
叶数目	0.946 **	0.959 **	1										
根长	0.944 **	0.972 **	0.948 **	1									
根粗	0.987 **	0.998 **	0.954 **	0.968 **	1								
壮苗指数	0.914 **	0.886 **	0.934 **	0.921 **	0.887 **	1							
SPAD 值	0.799 *	0.718	0.796 *	0.795 *	0.736	0.929 **	1						
P_n	0.970 **	0.906 **	0.895 **	0.882 **	0.927 **	0.897 **	0.835 *	1					
G_s	0.952 **	0.940 **	0.873 *	0.908 **	0.943 **	0.898 **	0.739	0.902 **	1				
C_i	-0.893 **	-0.803 *	-0.815 *	-0.830 *	-0.831 *	-0.879 **	-0.908 **	-0.962 **	-0.805 *	1			
T_r	0.594	0.686	0.683	0.551	0.656	0.450	0.128	0.481	0.578	-0.245	1		
植株鲜质量	0.989 **	0.965 **	0.955 **	0.959 **	0.972 **	0.960 **	0.866 *	0.957 **	0.953 **	-0.903 **	0.535	1	
植株干质量	0.924 **	0.927 **	0.961 **	0.949 **	0.920 **	0.979 **	0.844 *	0.893 **	0.913 **	-0.840 *	0.583	0.955 **	1

注: * 表示显著相关 ($P<0.05$), ** 表示在极显著相关 ($P<0.01$); SPAD 值表示叶绿素相对含量; P_n 表示净光合速率; G_s 表示气孔导度; C_i 表示胞间 CO₂ 浓度; T_r 表示蒸腾速率.

3 讨论与结论

在生长发育方面, 工业大麻的株高、茎粗、根长等指标均随施肥量增加呈先增加后减少趋势, 在 720 ~ 840 kg/hm² 施肥量时达到最高, 当施肥量增至 960 kg/hm² 时, 发生显著降低. 这表明适量氮磷钾养分显著促进了植株的生长发育, 主要归因于其对细胞分裂和伸长的促进作用^[5,22,23]. 而过量施肥可能通过破坏根际微环境 (如 pH 失衡或离子毒害) 抑制根系发育, 进而影响地上部生长^[24-28]. 值得注意的是, 不同工业大麻品种的最适施肥量存在显著差异. 例如, ‘火麻一号’的最适施肥量为 543.1 kg/hm²^[29], 而本研究中 ‘云麻 8 号’的最适施肥量更高 (720 ~ 840 kg/hm²). 这种差异可能源于品种特性 (如 ‘云麻 8 号’作为高产花叶品种具有更强的养分吸收能力和生物量潜力) 和环境条件 (如云南与黑龙江的地理位置、气候、土壤差异) 的综合影响.

生物量积累的差异反映了施肥量的双重效应. 尽管高施肥量 (960 kg/hm²) 下根生物量仍较高, 但

茎、叶生物量显著下降,表明过量施肥可能优先分配资源至根系以应对高盐胁迫,而牺牲了地上部生长,这与 BALASUBRAMANIAM 等的研究结果一致^[30]。这种资源分配的权衡策略可能是植物适应逆境的一种机制,而在农业生产中需避免因过量施肥导致的产量缩减和经济损失。

光合作用是植物生长发育的核心生理过程,直接影响工业大麻的生长和产量。本研究中,叶绿素相对含量、净光合速率、蒸腾速率和气孔导度在 720 ~ 840 kg/hm² 处理下最高,但过量施肥 (960 kg/hm²) 导致光合参数下降,可能与高盐浓度引起的渗透胁迫或气孔关闭有关^[31-33],说明适宜的施肥量能高效提高植物光合能力,过量施肥则会抑制光合作用,这与 Zhang 等^[34]在咖啡 (*Coffea arabica* Linn.) 中的研究结果一致。胞间二氧化碳浓度在低施肥量 (240 kg/hm² 和 360 kg/hm²) 下显著升高,可能反映了此时光合碳同化能力不足,导致胞间 CO₂ 积累。

通过相关性分析可见,工业大麻的生长指标 (株高、茎粗、根长、叶片数)、生物量、叶绿素含量、净光合速率和气孔导度存在不同程度的正相关关系,这表明植株生长与光合作用高度协同。首先大麻发达的根系 (根长增加拓展吸收空间,根粗提升增强输导能力) 显著提高了水分与矿质营养 (尤其是氮磷钾) 的吸收效率,充足的养分供给为大麻地上部分 (株高、茎粗、叶片等) 的生长发育提供物质基础^[35]。另外,大麻茎粗的增加增强了木质部的输导能力,这具有双重效应:一方面,保障了大麻在高蒸腾速率条件下持续的水分供应,有助于维持较高的气孔导度,避免因水分胁迫导致气孔限制,从而保证光合作用的正常进行;另一方面,提高了水分及溶解其中的矿质养分向地上部分 (尤其是叶片) 纵向运输的效率,促进了大麻叶片的着生,叶片数量的增多扩大了光合面积,促进了大麻地上部分生物量的积累^[36-38]。同时,充足的养分供应 (特别是氮素) 有助于提高大麻叶片叶绿素含量 (常以叶绿素相对含量 (SPAD 值表征)),从而增强叶片的光合能力^[39]。大麻叶片光合性能的提升表现为净光合速率的提高,同时伴随着较高的叶绿素相对含量和气孔导度,以及较低的胞间二氧化碳浓度。这表明大麻叶片光合效率的提升依赖于叶绿体功能 (碳同化能力) 与气孔开放程度 (CO₂ 供应) 的协同优化。另外本研究结果显示净光合速率与胞间二氧化碳浓度之间存在显著的负相关关系,这也进一步印证了大麻碳同化能力对胞间 CO₂ 浓度的调控作用。而大麻光合作用产生的同化物 (光合产物) 既支持地上部分的生长,也通过韧皮部向根系转运,为根系的进一步生长提供能量和碳骨架^[40]。根系生物量的增加又强化了其固着土壤和吸收水分养分的能力。

综上,氮磷钾施肥量为 720 ~ 840 kg/hm² 时,工业大麻“云麻 8 号”的光合效率、生长及生物量积累均达到最高。因此,综合参考产量和经济效益,720 kg/hm² 的氮磷钾施肥总量是提升“云麻 8 号”产量的最适量。

尽管本研究探讨了施肥量对“云麻 8 号”生长的影响,但其生理与分子机制尚不清楚。因此未来研究可通过测定抗氧化酶活性等,揭示施肥量对植株生理代谢的调控;此外,还可挖掘与生长发育、次生代谢等相关基因的表达,从分子层面解析施肥量影响“云麻 8 号”生长的内在机制,从而实现“云麻 8 号”精准施肥的调控,为推动药用工业大麻产业的可持续发展提供科学支持。

[参考文献]

- [1] 张林海,曾从盛,胡伟芳. 氮输入对植物光合固碳的影响研究进展 [J]. 生态学报, 2017, 37 (1): 147-155.
- [2] LIU J, WANG D, YAN X, et al. Effect of nitrogen, phosphorus and potassium fertilization management on soil properties and leaf traits and yield of *Sapindus mukorossi* [J]. *Frontiers in Plant Science*, 2024, 15: 1300683.
- [3] KHAN F, SIDDIQUE A B, SHABALA S, et al. Phosphorus plays key roles in regulating plants' physiological responses to abiotic stresses [J]. *Plants*, 2023, 12 (15): 2861.
- [4] 朱隆静. 磷与钙对低温胁迫下番茄光合作用的影响及其机理研究 [D]. 杭州: 浙江大学硕士学位论文, 2004.
- [5] 薛欣欣, 吴小平, 王文斌, 等. 植物-土壤系统中钾镁营养及其交互作用研究进展 [J]. 土壤, 2019, 51 (1): 1-10.
- [6] 李文晓, 李永竞, 冯士珍. 不同施氮量和分施比例对棉花幼苗生长和水分利用效率的影响及其根源 ABA 调控效应 [J]. 生态学报, 2017, 37 (20): 6712-6723.
- [7] 侯迷红, 范富, 宋桂云, 等. 钾肥用量对甜荞麦产量和钾素利用效率的影响 [J]. 植物营养与肥料学报, 2013, 19 (2):

- 340-346.
- [8] 刘振冰,刘腾腾. 基于控释尿素的小麦肥料利用率优化试验分析 [J]. 新农民, 2025 (13): 80-82.
- [9] 郑浩飞,杨楠,杜健,等. 西北灌漠土区长期有机无机配施协同提升玉米产量和品质 [J]. 作物学报, 2025, 51 (6): 1618-1628.
- [10] LI Z, ZHANG R, XIA S, et al. Interactions between N, P and K fertilizers affect the environment and the yield and quality of satsumas [J]. Global Ecology and Conservation, 2019, 19: 00663.
- [11] 谭鹏飞,代亮. 不同氮肥施用对水稻生长及产量的影响 [J]. 农业工程技术, 2024, 44 (34): 21-22.
- [12] 田琳琳,庄舜尧,杨浩. 不同施肥模式对芋艿产量及菜地土壤中氮素迁移累积的影响 [J]. 生态环境学报, 2011, 20 (12): 1853-1859.
- [13] SARMA N D, WAYE A, ELSOHL Y M A, et al. Cannabis inflorescence for medical purposes: USP considerations for quality attributes [J]. Journal of Natural Products, 2020, 83 (4): 1334-1351.
- [14] VIGNESHWARAN S, SUNDARAKANNAN R, JOHN K M, et al. Recent advancement in the natural fiber polymer composites: a comprehensive review [J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 277: 124109.
- [15] 翟莹,高双,王志刚,等. 工业大麻 ZF-HD 转录因子的鉴定及表达分析 [J]. 西南农业学报, 2024, 37 (6): 1188-1195.
- [16] 杨辉,田小凡,郗茜. 推进黑龙江省工业大麻产业发展的实现路径研究 [J]. 中国麻业科学, 2019, 41 (2): 84-88.
- [17] 刘飞虎,杜光辉,杨阳,等. 花叶用工业大麻绿色高效栽培技术 [M]. 昆明: 云南大学出版社, 2020: 1-10.
- [18] 董晓慧,景玉良,刘立超,等. 不同供磷水平和品种对工业大麻形态生理特征的影响 [J/OL]. 作物杂志, 2024: 1-10 (2024-08-15). <https://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?filename=ZWZZ20240814001&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ>.
- [19] AUBIN M P, SEGUIN P, VANASSE A, et al. Industrial hemp response to nitrogen, phosphorus, and potassium fertilization [J]. Crops & Soils, 2016, 49 (3): 26-29.
- [20] ATOLOYE I A, ADESINA I, SHAHBAZI A, et al. Response of cannabidiol hemp (*Cannabis sativa* L.) varieties grown in the southeastern United States to nitrogen fertilization [J]. Open Agriculture, 2022, 7 (1): 373-381.
- [21] 刘浩,张云云,胡华冉,等. 氮磷钾配施对工业大麻干物质和养分积累与分配的影响 [J]. 中国麻业科学, 2015, 37 (2): 100-105.
- [22] 储成才,王毅,王二涛,等. 植物氮磷钾养分高效利用研究现状与展望 [J]. 中国科学 (生命科学), 2021, 51 (10): 1415-1423.
- [23] BECHTAOUI N, RABIU M K, RAKLAMI A, et al. Phosphate-dependent regulation of growth and stresses management in plants [J]. Frontiers in Plant Science, 2021, 12: 679916.
- [24] 王夏雯,王绍华,李刚华,等. 氮素穗肥对水稻幼穗细胞分裂素和生长素浓度的影响及其与颖花发育的关系 [J]. 作物学报, 2008, 34 (12): 2184-2189.
- [25] 刘潮,褚洪龙,吴丽芳,等. 植物磷稳态的调控机制 [J]. 生物技术通报, 2022, 38 (2): 184-194.
- [26] 陈光,高振宇,徐国华. 植物响应缺钾胁迫的机制及提高钾利用效率的策略 [J]. 植物学报, 2017, 52 (1): 89-101.
- [27] 谢军,王子芳,王莹燕,等. 化肥和有机肥配施生物炭对根际土壤反硝化势和反硝化细菌群落的影响 [J]. 环境科学, 2023, 44 (8): 4565-4574.
- [28] 徐影,于镇华,李彦生,等. 土壤酸化成因及其对农田土壤-微生物-作物系统影响的研究进展 [J]. 土壤通报, 2024, 55 (2): 562-572.
- [29] 张晓艳,边境,孙开学,等. 不同肥密对工业大麻新品种火麻一号农艺性状及产量的影响 [J]. 中国麻业科学, 2022, 44 (4): 225-231.
- [30] BALASUBRAMANIAM T, SHEN G, ESMAEILI N, et al. Plants' response mechanisms to salinity stress [J]. Plants, 2023, 12 (12): 2253.
- [31] ZHOU H, SHI H, YANG Y, et al. Insights into plant salt stress signaling and tolerance [J]. Journal of Genetics and Genomics, 2024, 51 (1): 16-34.
- [32] 王丹,万春阳,侯俊玲,等. 盐胁迫对甘草叶片光合色素含量和光合生理特性的影响 [J]. 热带作物学报, 2014, 35 (5): 957-961.
- [33] 尚晓阳,赵鹏,武兰芳,等. 控盐施肥对滨海中度盐渍土壤盐分、养分及冬小麦产量的影响 [J]. 农业科学, 2017, 7

- (4): 301-309.
- [34] ZHANG Z X, CAI Z Q, LIU G Z, et al. Effects of fertilization on the growth, photosynthesis, and biomass accumulation in juvenile plants of three coffee (*Coffea arabica* L.) cultivars [J]. *Photosynthetica*, 2017, 55 (1): 134-143.
- [35] 杨阳, 韩浩宇, 韩慧英. 四种植物组合对城市雨水径流污染的净化效能 [J/OL]. *环境工程*, 2025: 1-8 (2025-05-18). [https://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx? filename = HJGC20250515004&dbname = CJFD&dbcode = CJFQ](https://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?filename=HJGC20250515004&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ).
- [36] 宋雯, 刘永强, 姚雪宁, 等. 枣疯病对枣树茎叶水力性状和碳代谢的影响 [J]. *林业科学*, 2025, 61 (5): 120-130.
- [37] 迟天淇. 刺槐幼苗叶、茎和根功能性状对水分和土壤类型的响应 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学硕士学位论文, 2024.
- [38] 焦雪辉, 刘杰, 周小娟, 等. 氮磷钾配施对青冈属植物容器苗生长和生理特性的影响 [J]. *生态与农村环境学报*, 2025, 41 (7): 893-903.
- [39] 胡文诗. 钾营养调控冬油菜叶片光合面积和光合速率的机制 [D]. 武汉: 华中农业大学博士学位论文, 2021.
- [40] 平晓燕, 周广胜, 孙敬松, 等. 植物光合产物分配及其影响因子研究进展 [J]. *植物生态学报*, 2010, 34 (1): 100-111.

Effects of Total Nitrogen, Phosphorus and Potassium Fertilization on the Growth and Photosynthesis of Industrial Hemp

LUO Yan¹, XIA Xin¹, LI Congping², DONG Minghua¹, CHENG Xia¹

(1. School of Agronomy and Life Sciences, Kunming University, Kunming, Yunnan, China 650214;

2. Qujing Agricultural Environmental Protection Monitoring Station, Qujing, Yunnan, China 655000)

Abstract: Industrial hemp is a fertilizer-loving crop, and the amount of fertilizer affects its growth and development. In order to screen the total amount of nitrogen, phosphorus and potassium fertilization that was most suitable for the growth of medicinal industrial hemp "Yunma 8", seven total fertilizer levels (240, 360, 480, 600, 720, 840 and 960 kg/hm²) were set up, and the ratio of nitrogen, phosphorus and potassium was 3:1:2 to fertilize and the growth and photosynthetic indexes were determined. The results showed that with the increase of the total amount of fertilization, all indexes first increased and then decreased. When the fertilization rate was 720 kg/hm², the relative chlorophyll content (SPAD value), net photosynthetic rate (P_n), stem diameter, root length, root diameter, leaf number, weight of fresh leaf, weight of dry root, stem and leaf, and strength seedling index of cannabis reached the highest value, which increased by 66.64%, 3.43 times, 1.75 times, 74.12%, 1.62 times, 79.53%, 1.17 times, 3.77 times, 4.89 times, 3.55 times, and 7.56 times, respectively, compared with those of the lowest treatment group. When the fertilization rate reached 960 kg/hm², all indexes were significantly lower than the highest value. Therefore, the total amount of nitrogen, phosphorus and potassium fertilization of 720 kg/hm² was the most appropriate amount to increase the yield of "Yunma 8". The results of this study can provide data support and theoretical basis for the precise fertilization of industrial hemp cultivation.

Key words: industrial hemp; nitrogen, phosphorus and potassium; total amount of fertilization; growth; photosynthesis

(责任编辑: 陈伟超)