

DOI: 10.11913/PSJ.2095-0837.2022.60839

马道承, 余注光, 王凌晖, 林泳志, 潘媛媛. 氮磷钾配比施肥对赤苍藤生理及生物量积累的影响[J]. 植物科学学报, 2022, 40(6): 839~852
 Ma DC, Yu ZG, Wang LH, Lin YZ, Pan YY. Effects of nitrogen-phosphorus-potassium ratio fertilization on physiology and biomass accumulation of *Erythropalum scandens* Bl. [J]. *Plant Science Journal*, 2022, 40(6): 839~852

氮磷钾配比施肥对赤苍藤生理及生物量积累的影响

马道承¹, 余注光², 王凌晖^{1*}, 林泳志¹, 潘媛媛¹

(1. 广西大学林学院, 南宁 530004; 2. 广西南宁树木园, 南宁 530031)

摘要: 赤苍藤 (*Erythropalum scandens* Bl.) 是华南、西南地区一种常见的木本蔬菜, 其嫩茎叶口感好、营养价值高。本研究采用“3414”施肥法, 对 1.5 年生大新种源赤苍藤扦插苗进行追肥试验, 探究不同氮磷钾施肥处理对其生理特性及生物量积累的影响。结果显示: 大多数施肥处理下赤苍藤植株生理及干物质积累情况较对照 (NOPOKO) 有所提升, 渗透调节物质、叶绿素等随施肥进程均有规律性升高或降低; 多因素方差分析结果表明, 氮素主效应对各指标的影响效果高于磷、钾; 施肥后期, 缺素及过量施肥处理均出现轻度养分胁迫现象; 此外, 施肥后期叶片大量元素含量较施肥中期降低, 可能存在一定的“养分稀释”效应; 综合分析发现, 尿素 2.14 g/株 + 过磷酸钙 4.44 g/株 + 氯化钾 0.67~1.33 g/株处理下赤苍藤植株状况最佳; 氮素对赤苍藤生长发育的促进及胁迫作用较为突出。

关键词: 赤苍藤; 氮磷钾施肥; 光合指标; 生理生化指标; 营养元素含量; 生物量积累

中图分类号: Q945.12

文献标识码: A

文章编号: 2095-0837(2022)06-0839-14

Effects of nitrogen-phosphorus-potassium ratio fertilization on physiology and biomass accumulation of *Erythropalum scandens* Bl.

Ma Dao-Cheng¹, Yu Zhu-Guang², Wang Ling-Hui^{1*}, Lin Yong-Zhi¹, Pan Yuan-Yuan¹

(1. Forestry College, Guangxi University, Nanning 530004, China; 2. Nanning Arboretum in Guangxi, Nanning 530031, China)

Abstract: *Erythropalum scandens* Bl. is a common woody vegetable in South and Southwest China. Its tender stems and leaves are valued for their taste and high nutritional value. In this study, the “3414” fertilization method was used to carry out a top-dressing experiment on 1.5-year-old Daxin Provenance cutting seedlings of *E. scandens* to explore the effects of different nitrogen (N), phosphorus (P), and potassium (K) fertilization treatments on physiological characteristics and biomass accumulation. Compared to the control (CK), plant physiology and dry matter accumulation were improved under most fertilization treatments, and osmotic regulators and chlorophyll changed with fertilization. The main effect of N was stronger than that of P and K. In the late fertilization stage, both nutrient deficiency and over-fertilization showed mild nutrient stress. In addition, bulk element content in leaves in the late fertilization period was lower than that in the mid-fertilization period, which had a “nutrient dilution” effect. The optimal physiological and material accumulation conditions for the plant were urea

收稿日期: 2022-05-08, 修回日期: 2022-07-05。

基金项目: 广西林业科技项目(桂林科研[2021]16号); 南宁树木园林下木本蔬菜种植技术研究与示范项目(南宁树木园科字2018-1号); 广西壮族自治区大学生创新创业训练计划项目(202110593234)。

This work was supported by grants from the Foundation Woody (Guangxi Forestry Scientific Research [2021] No.16), Foundation of Research and Demonstration on Planting Technology of Woody Vegetable under Arboretum in Nanning (Arboretum in Nanning Kezi [2018] No. 01), and Guangxi Zhuang Autonomous Region Level College Students Innovation and Entrepreneurship Training program (202110593234).

作者简介: 马道承(1998-), 男, 硕士研究生, 研究方向为园林植物栽培与育种(E-mail: 2418063235@qq.com)。

* 通讯作者(Author for correspondence. E-mail: wanglinghui97@163.com)。

2.14 g/plant, calcium superphosphate 4.44 g/plant, and potassium chloride 0.67–1.33 g/plant. Overall, N played a prominent role in promoting and stressing *E. scandens* growth and development.

Key words: *Erythropalum scandens*; N, P and K fertilization; Photosynthetic index; Physiological and biochemical indices; Nutrient element content; Biomass accumulation

赤苍藤 (*Erythropalum scandens* Bl.) 隶属于铁青树科、赤苍藤属, 是一种嫩茎叶部分可食用的常绿木质藤本植物。因其营养价值高, 富含优质氨基酸、维生素、矿物质等成分, 在广西、云南、海南等地常被作为野生蔬菜。目前关于其扦插、播种等丰产栽培技术研究较多^[1, 2]。其叶挥发油、多糖等化学成分研究^[3, 4]、群体遗传分析^[5]等方面亦有初步探索。在赤苍藤施肥及营养生理层面, 郭品湘^[6]使用腐熟鸡粪和牛粪两种有机肥对 2 年生赤苍藤植株进行配比施用, 发现适当施用有机肥可有效提升嫩茎叶部分产量及品质, 具体表现在糖、蛋白、氨基酸、总黄酮等成分, 该研究使用 2 年生植株进行大田试验, 侧重点主要在施肥后可食用部分营养品质的探索。

国内学者将辣木 (*Moringa oleifera* Lam.)、枸杞 (*Lycium chinense* Miller)、香椿 (*Toona sinensis* (A. Juss.) Roem.) 等一类嫩茎、叶、花等部分器官可供食用的植物认定为“木本蔬菜”。此类植物在非洲地区资源尤为丰富, 被视为重要的食物来源。部分国家(如印度、意大利、波斯尼亚和黑塞哥维那等)出现了针对具有食用及药用价值的野生植物的资源调查、栽培基础及开发利用等方面的研究^[7, 8]。此类植物在栽培推广过程中, 施肥是重要环节。以南瓜 (*Cucurbita maxima* L.) 叶、香椿、辣木等蔬菜为例, 已出现各类肥料单施或混合施用的研究^[9–11]。但有研究表明, 长期施用有机肥后土壤重金属、抗生素等多种有害物质含量显著上升, 蔬菜安全性受到影响^[12, 13]。相对而言, 氮(N)磷(P)钾(K)无机配比施肥后蔬菜有害物质富集较少。在常见的氮磷钾配比施肥方案中, “3414”氮磷钾配方施肥试验设计(即“氮、磷、钾”3 因素, 每因素各 4 水平, 共计 14 组处理的试验方法)已被广泛用于林木、园林植物、药用植物等栽培。许冰等^[14]对辣木的研究结果表明, N3P2K3 处理(N 150 g/株 + P₂O₅ 60 g/株 + K₂O 60 g/株)最有利于植株生长发育。栗春青^[15]发现,

N1P2K2(N 0.9 g/株、P₂O₅ 2 g/株、K₂O 1.8 g/株)处理最有利于 0.75 年生假苹婆 (*Sterculia lanceolata* Cav.) 的生长发育。温旭丁等^[16]的研究表明, N 0.547 g/kg、P₂O₅ 0.131 g/kg、K₂O 0.342 g/kg 为 1 年生海南海桑 (*Sonneratia hainanensis* W. C. Ko, E. Y. Chen & W. Y. Chen) 实生苗理论施肥量; 而中氮中磷低钾(N2P2K1, N 5.28 g/株、P 0.99 g/株、K 2.97 g/株)最适宜云南蓝果树 (*Nyssa yunnanensis* W. C. Yin) 1 年生幼苗的生长发育^[17]。此外, “3414”配方施肥法亦应用于盆栽绣球菊‘花手鞠’(*Hydrangea macrophylla* ‘Hanatemari’)^[18]、雷公藤 (*Tripterygium wilfordii* Hook. f.)^[19]等园林植物、药用植物中。

鉴于前期对赤苍藤苗期肥料运用及生理状况探究不清, 对大量元素需求及相应效应不甚了解, 本研究对 1.5 年生扦插苗进行“3414”氮磷钾配比追肥试验, 探究适宜赤苍藤扦插苗的施肥组合, 并分析其生理状况、营养元素及干物质积累情况。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于 2021 年 4–11 月间在广西大学林学院苗圃教学基地内进行。该试验地位于广西壮族自治区南宁市(22° 48' N, 108° 22' E), 年均温为 21.6°C, 年均降水量 1304 mm, 气候类型为亚热带季风气候, 温和湿润, 适宜赤苍藤的生长。植株培育及处理在苗圃大棚内采用盆栽试验法进行, 盆下置托盘, 置于平整且铺垫无纺布的苗床内, 以防因下雨等天气造成肥、土流失。大棚上方覆盖一层塑料薄膜与一层黑色遮阴网。

1.2 供试材料

供试材料为赤苍藤大新种源 1.5 年生扦插苗, 由广西壮族自治区南宁树木园珍稀树种花卉苗木繁育中心提供。2020 年采用 1 年生嫩枝进行扦插, 待成活后适当修剪, 2021 年 4 月上旬裸根移植, 使用的圆形塑料盆直径 15.3 cm, 高 14.9 cm, 每

盆1株。使用的栽培基质为V_{黄壤土}:V_{细砂}:V_{珍珠岩、泥炭土}=6:2:1, 移栽时根际加入少量珍珠岩、泥炭土混合物促其生长。每盆均匀混入40 g生物有机肥(华沃特公司生产)作为基肥。移植后缓苗1.5月, 待其恢复正常生长势后进行试验。供试赤苍藤扦插苗初始生长指标为: 地径(7.21 ± 1.38) mm, 一级分枝粗度(5.21 ± 1.10) mm, 插穗长度(6.77 ± 3.16) cm, 一级分枝长度(25.99 ± 9.01) cm。供试栽培基质基本理化性质为: pH 6.71, 全氮1.274 g/kg, 全磷0.805 g/kg, 全钾8.954 g/kg, 铵态氮11.85 mg/kg, 硝态氮45.86 mg/kg, 速效磷25.23 mg/kg, 速效钾184.17 mg/kg。试验用肥料为尿素(含N 46%, 天津市大茂化学试剂厂生产, AR分析纯)、过磷酸钙(含P₂O₅ 18%, 天津市大茂化学试剂厂生产, LR实验试剂)及氯化钾(含K₂O 60%, 成都科龙化学试剂有限公司生产, AR分析纯)。

1.3 试验设计

使用“3414”试验设计, 设置14组处理, 分别为空白对照组(T1, CK)以及施肥处理组(T2~T14), 各组处理施肥总量见表1(施肥总量中“2”水平参照试验开始前赤苍藤叶片、土壤氮磷钾本底值及前人文献^[20, 21]确定)。每组12个生物学重复(每重复1株), 共168株苗木。于2021年6月底

开始施肥, 每隔35 d进行1次, 共4次。4次施肥量分别为施肥总量的30%、30%、20%、20%。将肥料溶于200 mL去离子水制成氮磷钾配方液, 采用浇灌法配施。所有植株除施肥处理存在差异外, 其他管理措施均保持一致。随时清除盆内杂草, 并根据气象条件浇水, 以保持土壤湿润。于试验中期(2021年8月)及后期(2021年10月)对各处理组的生理生化指标及元素含量进行测定, 试验结束后进行光合指标测定, 每处理3个生物学重复。

1.4 指标测定

1.4.1 生理生化指标

生理生化指标采用上部枝条自顶芽向下数第2~5片成熟功能叶测定。叶绿素、可溶性糖、可溶性蛋白、游离脯氨酸及丙二醛(MDA)含量分别采用乙醇-丙酮混合提取法、蒽酮比色法、考马斯亮蓝G-250染色法、酸性茚三酮法及硫代巴比妥酸法测定^[22~24]。将成熟功能叶烘干后, 每重复取0.1 g干粉末, 使用H₂SO₄-H₂O₂消煮后, 全氮采用AA3型连续流动分析仪测定, 全磷采用钼锑抗比色法测定, 全钾采用火焰光度计测定^[25]。

1.4.2 光合指标

每处理选择3株长势基本一致、无病虫害的植株, 取上部枝条自顶芽向下数的第2~5片成熟功

表1 肥料施用安排表
Table 1 Fertilizer application schedule

序号 No.	处理组 Treatment group	氮(尿素) Nitrogen (CO(NH ₂) ₂)		磷(过磷酸钙) Phosphorus (Ca ₃ (PO ₄) ₂)		钾(氯化钾) Potassium (KCl)		重复数 Repeat
		水平 Level	总施用量 Dosage / g/株	水平 Level	总施用量 Dosage / g/株	水平 Level	总施用量 Dosage / g/株	
T ₁	N ₀ P ₀ K ₀	0	0.00	0	0.00	0	0.00	12
T ₂	N ₀ P ₂ K ₂	0	0.00	2	8.88	2	1.33	12
T ₃	N ₁ P ₂ K ₂	1	1.07	2	8.88	2	1.33	12
T ₄	N ₂ P ₀ K ₂	2	2.14	0	0.00	2	1.33	12
T ₅	N ₂ P ₁ K ₂	2	2.14	1	4.44	2	1.33	12
T ₆	N ₂ P ₂ K ₂	2	2.14	2	8.88	2	1.33	12
T ₇	N ₂ P ₃ K ₂	2	2.14	3	13.33	2	1.33	12
T ₈	N ₂ P ₂ K ₀	2	2.14	2	8.88	0	0.00	12
T ₉	N ₂ P ₂ K ₁	2	2.14	2	8.88	1	0.67	12
T ₁₀	N ₂ P ₂ K ₃	2	2.14	2	8.88	3	2.00	12
T ₁₁	N ₃ P ₂ K ₂	3	3.21	2	8.88	2	1.33	12
T ₁₂	N ₁ P ₁ K ₂	1	1.07	1	4.44	2	1.33	12
T ₁₃	N ₁ P ₂ K ₁	1	1.07	2	8.88	1	0.67	12
T ₁₄	N ₂ P ₁ K ₁	2	2.14	1	4.44	1	0.67	12
共计								168

能叶中的 3 片进行。使用 Li-6400XT 便携式光合仪 (LI-COR, 美国) 记录瞬时净光合速率 (P_n)、气孔导度 (G_s)、胞间 CO_2 浓度 (C_i) 及蒸腾速率 (T_r)。每组 3 个生物学重复。

1.4.3 生物量

每处理各取 3 个植株, 将植株挖出后先后用自来水、去离子水仔细洗净泥土、附着物等, 擦拭干净。用洁净剪刀分解为根、茎、叶 3 部分, 分别采用电子天平记录鲜重(精确到 0.01 g)。记录完毕将样品置于烘箱中, 105°C 杀青 30 min 后, 75°C 烘干至恒重, 而后使用电子天平称干重(精确到 0.01 g)。

1.5 数据处理

采用 Excel 2016 软件对数据进行整理, 使用 SPSS 18.0 软件进行方差分析, 采用 Duncan 新复极差法进行多重比较, 并进行相关性分析及模糊隶属函数分析, 利用 Excel 2016 软件作图。

2 结果与分析

2.1 不同氮磷钾配比施肥对赤苍藤渗透调节物质含量的影响

由表 2 可知, 施肥中期, 可溶性糖及丙二醛组间差异不显著, 而可溶性蛋白及游离脯氨酸的组间差异达极显著水平 ($P < 0.01$); 施肥后期, 4 者组间差异均达显著或极显著水平。可溶性糖含量在施肥中期、后期的最大值分别为 11.58% 和 13.87%。氮量级组 (N0P2K2、N1P2K2、N2P2K2、N3P2K2, 下同) 中, 施肥初期可溶性糖含量随氮肥施用量上升逐渐增加, 但后期则表现为先升后降。磷 (N2P0K2、N2P1K2、N2P2K2、N2P3K2, 下同)、钾 (N2P2K0、N2P2K1、N2P2K2、N2P2K3, 下同) 量级组可溶性糖含量在施肥中、后期均随施肥量上升而先升后降。对可溶性蛋白而言, 施肥中期及后期分别在 T5、T11 组含量达最高, 为 18.31 和 27.65 mg/g。氮、磷、钾 3 量级组中施肥中、后期均表现为随施肥量上升而先升后降。对游离脯氨酸而言, 施肥中期氮磷钾均极显著影响其含量; 而在施肥后期, 氮、磷胁迫对脯氨酸含量的影响明显高于钾胁迫。施肥中、后期脯氨酸含量最高的组合分别为 T10 组 (8.89 mg/g) 和 T11 组 (28.48 mg/g)。施肥中、后期, 在氮、磷、钾 3

量级组中, 游离脯氨酸含量均随施肥量上升不断升高。而对 MDA 而言, T8 处理在施肥中、后期均最高, 分别为 28.43 nmol/g 和 45.83 nmol/g。氮、磷、钾 3 量级组中, MDA 含量随施肥量上升整体呈增加趋势。

2.2 不同氮磷钾配比施肥对叶片养分的影响

由表 3 可知, 施肥中期, 叶片全氮、全钾含量差异极显著 ($P < 0.01$), 全磷含量差异不显著; 而施肥后期, 叶片全氮磷钾含量组间均呈极显著差异 ($P < 0.01$), 多因素方差分析结果亦如此。施肥中、后期叶片全氮含量最高的组合分别为 T8 和 T9, 达 21.65 和 19.58 g/kg。氮、磷量级组在施肥中、后期全氮含量均随施用量的上升而增加, 而钾量级组中, 中、后期分别呈增-减-增趋势及先升后降趋势。对叶片全磷含量而言, 中期、后期含量最高的组合均为 T2, 分别达 5.67 和 3.82 g/kg。氮、钾量级组中, 叶片全磷含量均随肥料施用量呈先增后减趋势, 而磷量级组则表现为随磷施用量的增加而增加。对叶片全钾而言, 施肥中期、后期含量最高的组合分别为 T7 和 T11 处理, 分别为 16.77 和 17.93 g/kg。磷、钾量级组中, 施肥中期叶片全钾含量随施肥量的上升逐渐增加, 而施肥后期则随施肥量上升呈先增后减趋势。施肥后期叶片全氮、磷、钾素含量在大多数处理中呈降低趋势。

2.3 不同氮磷钾配比施肥对光合特性的影响

由表 4 可知, 在施肥中、后期, 不同处理组之间叶绿素 a 、 b 及总叶绿素含量均达到极显著差异 ($P < 0.01$)。而相较施肥中期, 除 CK、T2 (N0P2K2) 处理外, 施肥后期叶片的叶绿素含量均上升。在氮磷钾主效应中, 氮主效应对施肥中、后期叶绿素含量均起到极显著影响 ($P < 0.01$), 钾主效应对施肥后期叶绿素 a 、后期叶绿素 b 及中、后期总叶绿素含量存在极显著或显著影响。施肥中期, 叶绿素 a 、 b 及总叶绿素含量均在 T6 组达最大值, 分别为 1.09、0.9 和 2.02 mg/g; 而施肥后期除叶绿素 a 在 T5 组达最大值 1.37 mg/g 外, 叶绿素 b 及总叶绿素含量仍在 T6 组最大, 分别为 1.14 和 2.49 mg/g。施肥中、后期, 叶绿素含量在氮、磷、钾 3 量级组中均随施肥量的上升呈现先增后减趋势。

表2 不同氮磷钾配比对赤苍藤叶片渗透调节物质含量的影响
Table 2 Effects of different N, P, and K ratios on content of osmotic regulators in *Erythropalum scandens* leaves

组别 Group	可溶性糖含量 / % Soluble sugar content		可溶性蛋白含量 / mg/g Soluble protein content		游离脯氨酸含量 / mg/g Free proline content		丙二醛含量 / nmol/g MDA content	
	中期 Metaphase	后期 Anaphase	中期 Metaphase	后期 Anaphase	中期 Metaphase	后期 Anaphase	中期 Metaphase	后期 Anaphase
T1	10.07 ± 0.69AA	10.30 ± 1.06Ab	2.02 ± 1.13De	14.29 ± 1.28Acd	0.44 ± 0.08Gf	4.97 ± 2.17Dd	23.66 ± 2.71Aa	29.30 ± 5.33Cd
T2	10.24 ± 0.28Aa	11.57 ± 1.02Aab	2.35 ± 0.93De	12.08 ± 2.26Ad	6.06 ± 0.15Bcb	5.43 ± 1.14Dd	15.33 ± 2.16Aa	29.16 ± 2.56Cd
T3	11.58 ± 1.30Aa	11.46 ± 0.04Aab	10.95 ± 1.73Bcccd	17.47 ± 4.21Abcd	3.33 ± 0.65Fe	6.07 ± 0.59Cdd	18.20 ± 2.88Aa	37.72 ± 2.58ABCbcd
T4	10.25 ± 0.84Aa	13.88 ± 2.20Aa	12.48 ± 1.94ABCbcd	22.91 ± 2.92Aab	4.06 ± 0.66FFde	13.58 ± 0.16ABCDbcd	23.77 ± 5.32Aa	36.56 ± 2.66ABCbcd
T5	11.31 ± 0.92Aa	13.37 ± 0.23Aa	18.31 ± 2.48Aa	24.14 ± 7.92Aab	4.46 ± 0.05DEFcd	15.76 ± 3.78ABCDabcd	19.62 ± 2.29Aa	35.67 ± 1.63ABCbcd
T6	10.69 ± 1.5Aa	13.51 ± 1.13Aa	13.64 ± 4.38ABCbc	23.88 ± 1.56Aab	4.47 ± 1.23DEFcd	20.43 ± 1.83BCDab	24.90 ± 8.12Aa	38.24 ± 0.01ABCabc
T7	10.92 ± 1.83Aa	13.24 ± 1.77Aa	12.47 ± 1.32ABCbcd	23.23 ± 5.29Aab	7.58 ± 0.48Aa	23.28 ± 13.68ABab	23.96 ± 10.79Aa	43.19 ± 3.26ABA
T8	11.19 ± 0.36Aa	13.73 ± 1.94Aa	14.50 ± 4.15ABCabc	23.78 ± 1.12Aab	5.43 ± 0.47CDEbc	17.33 ± 8.09ABCDabc	27.35 ± 1.60Aa	45.83 ± 8.46Aa
T9	11.57 ± 1.19Aa	13.24 ± 1.12Aa	14.46 ± 4.27ABCabc	22.95 ± 3.40Aab	7.08 ± 0.51ABA	21.69 ± 8.42ABCab	20.69 ± 2.85Aa	45.44 ± 3.01Aa
T10	11.24 ± 0.90Aa	12.75 ± 1.06Aab	8.80 ± 0.82Ccd	21.39 ± 2.56Abc	7.73 ± 0.92Aa	19.93 ± 6.07ABCDab	19.62 ± 2.27Aa	36.54 ± 1.47ABCbcd
T11	11.78 ± 1.62Aa	13.41 ± 0.73Aa	11.35 ± 1.26BCcd	27.65 ± 7.60Aa	5.80 ± 0.51BCD	28.48 ± 10.72Aa	21.56 ± 3.01Aa	39.51 ± 3.85ABCabc
T12	11.43 ± 1.55Aa	11.09 ± 1.77Aab	16.40 ± 0.99ABAab	20.52 ± 3.69Aabc	4.34 ± 0.40EFde	6.88 ± 2.21CDcd	19.30 ± 0.23Aa	34.86 ± 4.58ABCbcd
T13	10.97 ± 0.56Aa	12.03 ± 1.56Aab	10.28 ± 0.75BCcd	17.42 ± 0.58Abcd	4.66 ± 0.23DEFcd	8.74 ± 1.70BCDcd	16.17 ± 2.89Aa	31.80 ± 7.95BCcd
T14	11.83 ± 0.95Aa	11.45 ± 1.88Aab	12.73 ± 2.50ABCbcd	21.04 ± 7.05Aabc	3.92 ± 0.05Fde	6.45 ± 1.46CDcd	21.62 ± 1.51Aa	31.99 ± 6.82BCcd
主效应 Main effect	N P K	ns ns ns	*	**	**	**	ns ns ns	** ** ns
交互作用 Interaction	N × P N × K P × K	ns ns ns	ns ns *	ns ns ns	ns ns ns	ns ns ns	ns ns ns	ns ns *

注: 数据为平均值 ± 标准差; 不同大写字母表示同一指标、同一时期、不同处理间在 0.01 水平上差异极显著 ($P < 0.01$); 不同小写字母表示同一指标、同一时期、不同处理间在 0.05 水平上差异显著 ($P < 0.05$)。多因素方差分析中, “***”代表差异极显著水平 ($P < 0.01$), “*”代表差异达极显著水平 ($P < 0.05$), “ns”代表无显著差异 ($P > 0.05$)。下同。

Notes: Data in table are mean ± standard deviation (SD); Different capital letters indicate significant differences at 0.01 level between the same index, same period, and different treatments ($P < 0.01$), and different lowercase letters indicate significant differences at 0.05 level between the same index, same period, and different treatments ($P < 0.05$). In multivariate analysis of variance, “***” represents extremely significant difference ($P < 0.01$), “*” represents significant difference ($P < 0.05$), and “ns” represents no significant difference ($P > 0.05$). Same below.

Table 3 Effects of different N, P, and K ratios on nutrient content in *Erythropalum scandens* leaves

组别 Group	叶片全氮含量 / g/kg Total nitrogen content in leaves			叶片全磷含量 / g/kg Total phosphorus content in leaves			叶片全钾含量 / g/kg Total potassium content in leaves		
	中期 Metaphase		后期 Anaphase	中期 Metaphase		后期 Anaphase	中期 Metaphase		后期 Anaphase
	中期 Metaphase	后期 Anaphase	中期 Metaphase	后期 Anaphase	中期 Metaphase	后期 Anaphase	中期 Metaphase	后期 Anaphase	中期 Metaphase
T1	15.54 ± 0.50Ef	12.14 ± 1.48Bb	3.92 ± 0.59Aa	2.20 ± 0.28Bb	9.85 ± 0.46Ce	13.42 ± 2.44BCDbcd			
T2	15.60 ± 0.09Ef	12.09 ± 2.66Bb	5.67 ± 1.04Aa	3.82 ± 0.74Aa	11.66 ± 3.19ABCde	11.76 ± 0.90BCDcce			
T3	18.51 ± 1.83BCDcbcd	14.90 ± 2.02ABab	3.82 ± 0.64Aa	1.77 ± 0.49Bbc	12.09 ± 3.18ABCcde	13.77 ± 1.46ABCDbcd			
T4	19.14 ± 2.33ABCDbcd	18.78 ± 4.35ABA	2.87 ± 0.94Aa	0.88 ± 0.40Bc	14.77 ± 2.18ABCabcd	14.97 ± 0.50ABCabc			
T5	20.29 ± 1.30ABab	18.62 ± 1.32ABA	3.01 ± 0.35Aa	1.28 ± 0.45Bbc	16.72 ± 2.53Aa	13.27 ± 1.60BCDbcd			
T6	19.14 ± 0.33BCDEcde	18.73 ± 1.54ABA	3.81 ± 1.49Aa	1.80 ± 0.10Bbc	13.01 ± 1.42ABCabcde	13.08 ± 0.78BCDbcd			
T7	17.99 ± 0.56ABab	19.05 ± 2.09Aa	4.27 ± 0.04Aa	2.01 ± 0.43Bb	16.77 ± 0.55Aa	11.53 ± 0.95BCDcce			
T8	21.65 ± 0.34Aa	15.88 ± 3.49ABab	5.14 ± 1.92Aa	1.35 ± 0.47Bbc	12.91 ± 3.53ABCabcde	9.06 ± 1.98De			
T9	19.23 ± 1.58ABCDbcd	19.58 ± 2.38AA	3.99 ± 1.64Aa	1.97 ± 0.65Bb	15.01 ± 1.11ABCabcd	10.86 ± 2.86CDde			
T10	19.78 ± 0.57ABCabcd	17.45 ± 2.11ABA	3.46 ± 0.50Aa	1.61 ± 0.33Bbc	15.57 ± 0.14ABabc	12.16 ± 2.97BCDcce			
T11	20.01 ± 0.26ABabc	18.75 ± 4.25ABA	3.54 ± 0.66Aa	1.90 ± 0.95Bb	16.34 ± 1.72ABab	17.93 ± 1.63Aa			
T12	16.82 ± 1.51DEef	16.80 ± 3.04ABab	3.39 ± 1.16Aa	1.73 ± 0.23Bbc	11.14 ± 1.34BCdce	15.68 ± 2.47ABab			
T13	16.86 ± 1.07CDEef	12.07 ± 1.06Bb	3.39 ± 0.51Aa	1.85 ± 0.69Bbc	11.33 ± 1.81BCde	11.14 ± 0.37BCDde			
T14	17.78 ± 0.88BCDede	17.83 ± 1.42ABA	3.30 ± 0.26Aa	1.45 ± 0.26Bbc	12.67 ± 1.44ABCbcde	11.66 ± 1.93BCDcce			
主效应 Main effect		N	**	ns	**	**	**		
P		P	ns	ns	*	ns	ns		
K		K	**	ns	ns	ns	*		
N × P			**	ns	ns	ns	ns		
N × K			*	ns	ns	ns	ns		
P × K			**	ns	ns	ns	ns		

Table 4 Effects of different N, P, and K ratios on photosynthetic pigment content in *Erythropalum scandens* leaves

组别 Group	叶绿素 a 含量 / mg/g Chlorophyll a content						叶绿素 b 含量 / mg/g Chlorophyll b content						叶绿素 a + b 含量 / mg/g Chlorophyll a + b content					
	中期 Metaphase			后期 Anaphase			中期 Metaphase			后期 Anaphase			中期 Metaphase			后期 Anaphase		
T1	0.99 ± 0.03ABab	0.98 ± 0.10Bb	0.55 ± 0.13BCbc	0.39 ± 0.07BCcd	1.53 ± 0.16BCb	1.37 ± 0.17BCc	1.19 ± 0.39Cc											
T2	0.84 ± 0.12Cc	0.84 ± 0.27Bb	0.40 ± 0.09Cc	0.34 ± 0.12Cd	1.25 ± 0.21Cc	1.28 ± 0.28Ab												
T3	1.08 ± 0.01Aa	1.33 ± 0.02Aa	0.76 ± 0.06ABab	0.94 ± 0.26Aab	1.84 ± 0.05Ab	1.91 ± 0.15Aa	2.11 ± 0.47Ab											
T4	1.05 ± 0.01ABA	1.27 ± 0.13Aa	0.86 ± 0.14ABA	0.84 ± 0.34ABCab	1.10 ± 0.18Aa	1.92 ± 0.18Aa	2.47 ± 0.21Aa											
T5	1.06 ± 0.03Aa	1.37 ± 0.03Aa	0.86 ± 0.15ABA	1.14 ± 0.26Aa	2.02 ± 0.13Aa	2.49 ± 0.24Aa												
T6	1.09 ± 0.05Aa	1.26 ± 0.05Aa	0.83 ± 0.16ABA	0.60 ± 0.09ABCbcd	1.84 ± 0.19Ab	1.85 ± 0.14Ab												
T7	1.01 ± 0.06ABab	1.08 ± 0.06Aa	0.68 ± 0.12ABCab	0.95 ± 0.18Ab	1.76 ± 0.12Ab	2.28 ± 0.20Ab												
T8	1.10 ± 0.04Aa	1.33 ± 0.03Aa	0.88 ± 0.08ABA	0.85 ± 0.16ABCab	1.98 ± 0.08Aa	2.18 ± 0.16Ab												
T9	0.92 ± 0.12BCbc	1.34 ± 0.07Aa	0.82 ± 0.24ABA	0.91 ± 0.33ABA	1.74 ± 0.13Ab	2.25 ± 0.40Ab												
T10	1.08 ± 0.01Aa	1.33 ± 0.03Aa	0.93 ± 0.08Aa	0.74 ± 0.10ABCabc	2.01 ± 0.07Aa	2.08 ± 0.12Ab												
T11	1.07 ± 0.01Aa	1.32 ± 0.07Aa	0.75 ± 0.12ABA	0.80 ± 0.28ABCab	1.82 ± 0.11ABA	2.12 ± 0.33Ab												
T12	1.04 ± 0.06ABA	1.33 ± 0.06Aa	0.82 ± 0.21ABA	0.79 ± 0.21ABCab	1.86 ± 0.24ABA	2.12 ± 0.25Ab												
T13	1.07 ± 0.06Aa	1.36 ± 0.04Aa	0.91 ± 0.08ABA	0.80 ± 0.13ABCab	1.98 ± 0.02Aa	2.16 ± 0.16Ab												
T14	N	**	**	**	**	**	**	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
主效应 Main effect		P	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
K		**	ns	ns	ns	ns	*	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	*	ns	ns	ns
N × P		ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
N × K		ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
P × K		ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns

由表 5 可知, 各处理组间瞬时光合指标呈现极显著差异 ($P < 0.01$)。在氮磷钾 3 量级组中, 净光合速率 (P_n) 均随施肥量上升而先升后降, 在 T5 组最高, 达 $4.30 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。对气孔导度 (G_s) 而言, 氮、钾量级组中随施肥量上升而先降后升, 而在磷量级组中则随施肥量上升而先升后降。CK 组 G_s 最大, 为 $0.10 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。胞间 CO_2 浓度 (C_i) 在氮、磷、钾 3 量级组中均随施肥量上升而先降后升, 在 CK 组达最大值。蒸腾速率 (T_r) 在氮、钾量级组中随施肥量上升而先降后升, 在磷量级组中则表现为先升后降, 在 CK 组达最大值。

2.4 不同氮磷钾配比施肥对赤苍藤生物量积累的影响

就鲜重而言, 地下部仅须根部分在组间差异极显著 ($P < 0.01$), 而地上部分(茎、叶)及全株鲜重的差异均达显著或极显著水平(表 6)。由表 7 可知, 就干重而言, 总根干重差异极显著 ($P < 0.01$), 主根部分差异显著 ($P < 0.05$), 而须根干重差异不显著。茎干重差异显著 ($P < 0.05$), 叶干重及总干重差异极显著 ($P < 0.01$)。总根、主根鲜重在 T14 组最大, 分别为 33.39 和 23.12 g/株,

须根最大鲜重出现在 T5 组, 为 16.35 g/株。而总根、主根及须根干重最大值出现在 T14 组, 分别为 8.63、5.78 和 2.86 g/株。对地上部分而言, 茎、叶及全株总鲜重及干重均以 T14 组最高, 鲜重分别为 29.91、26.98 和 90.29 g/株; 茎、叶及总干重分别为 10.97、10.49 和 30.10 g/株。对鲜重而言, 氮磷钾 3 量级组中, 地上及地下部分均随养分施用量的升高而呈先增后减趋势, 干重亦如此。在适度施肥时, 其生物量呈现增加趋势, 氮素对地上部分鲜、干重影响大于磷、钾, 而地下部分物质积累则以磷主效应影响最为显著。

2.5 不同氮磷钾配比施肥对赤苍藤生理及生物量影响的综合分析

隶属函数公式为: $F(X_i) = (X_i - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min})$, 其中 $F(X_i)$ 为指标隶属函数值, X_i 为该处理指标均值, X_{\max} 、 X_{\min} 分别代表该指标均值的最大值和最小值。根据生理指标及生物量的测定结果, 经模糊隶属函数分析得出的结果见表 8。14 组处理平均隶属函数值排序为: T14 > T5 > T6 > T10 > T9 > T3 > T13 > T4 > T12 > T8 > T11 > T2 > T7 > T1。由此可见, T14 和 T5 处理下赤苍藤生理状况及生物量积累状况最佳, 二者差别不大。氮

表 5 不同氮磷钾配比对赤苍藤瞬时光合作用的影响

Table 5 Effects of different N, P, and K ratios on transient photosynthesis of *Erythropalum scandens*

组别 Group	净光合速率 P_n $/ \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$	气孔导度 G_s $/ \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$	胞间 CO_2 浓度 C_i $/ \mu\text{mol}/\text{m}$	蒸腾速率 T_r $/ \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$
T1	1.24 ± 0.26Fgh	0.10 ± 0.03Aa	452.50 ± 11.63Aa	0.90 ± 0.19Aa
T2	0.96 ± 0.08Fh	0.06 ± 0.01Bb	439.50 ± 2.18ABa	0.63 ± 0.11BCbc
T3	1.10 ± 0.42Fgh	0.03 ± 0.01Cc	383.00 ± 9.12ABCab	0.31 ± 0.07DEFg
T4	3.14 ± 0.64Cb	0.03 ± 0.00BCcc	296.11 ± 40.24CDEcd	0.41 ± 0.04BCDEdefg
T5	4.30 ± 0.27Aa	0.04 ± 0.01BCcbc	275.78 ± 24.40CDEFcd	0.54 ± 0.13BCDEbcde
T6	4.22 ± 0.09ABA	0.02 ± 0.00Cc	168.33 ± 22.03Fe	0.35 ± 0.01CDEefg
T7	2.32 ± 0.65CDEcde	0.03 ± 0.03BCcc	208.29 ± 94.93EFde	0.26 ± 0.12Eg
T8	2.83 ± 0.52CDbc	0.03 ± 0.01Cc	270.00 ± 67.03CDEFcd	0.37 ± 0.09CDEefg
T9	3.27 ± 0.20BCb	0.03 ± 0.01Cc	213.83 ± 92.86DEFde	0.38 ± 0.16CDEdefg
T10	3.18 ± 0.79Cb	0.03 ± 0.01BCcc	284.11 ± 7.78CDEFcd	0.51 ± 0.10BCDEbcdef
T11	2.56 ± 0.33CDEbcd	0.04 ± 0.01BCcbc	344.33 ± 26.19ABCbc	0.67 ± 0.10ABb
T12	1.81 ± 0.14Efefg	0.02 ± 0.01Cc	311.33 ± 54.28CDEbc	0.41 ± 0.12BCDEdefg
T13	1.92 ± 0.26DEFdef	0.03 ± 0.01Cc	329.22 ± 9.73BCDbc	0.45 ± 0.09BCDEcdefg
T14	3.32 ± 0.14BCb	0.03 ± 0.00BCcc	278.78 ± 36.03CDEFcd	0.59 ± 0.08BCDbcde
主效应 Main effect	N	**	**	**
	P	**	ns	ns
	K	*	ns	*
交互作用 Interaction	N × P	ns	ns	**
	N × K	ns	ns	ns
	P × K	ns	ns	ns

表 6 不同氮磷钾配比对赤苍藤植株各部分鲜重的影响
Table 6 Effects of different ratios of N, P, and K on fresh weight of each part of *Erythropalum scandens*

组别 Group	总根鲜重/g Total root fresh weight		主根鲜重 / g Main root fresh weight		须根鲜重 / g Fibrous root fresh weight		茎鲜重 / g Stem fresh weight		叶鲜重 / g Leaf fresh weight		总鲜重 / g Total fresh weight																																																																																					
	T1	9.19 ± 0.54Aa	6.47 ± 2.05Aa	2.73 ± 1.51Abc	13.97 ± 2.44Ad	6.54 ± 0.81De	29.69 ± 2.17Cd	T2	16.91 ± 6.13Aa	12.22 ± 3.97Aa	4.69 ± 2.18Abc	18.28 ± 6.89Abcd	8.21 ± 1.96CDde	43.41 ± 10.05Ccd																																																																																		
T3	20.29 ± 7.15Aa	13.73 ± 5.43Aa	6.56 ± 2.91Abc	21.16 ± 6.39Abcd	20.73 ± 9.26ABCabc	62.19 ± 19.40ABCbc	T4	17.00 ± 8.56Aa	9.97 ± 6.17Aa	7.03 ± 5.15Abc	14.83 ± 6.39Acd	13.31 ± 6.93BCDcde	45.14 ± 21.73Ccd	T5	32.24 ± 15.13Aa	15.89 ± 10.62Aa	16.35 ± 7.39Aa	27.01 ± 4.69Abab	24.64 ± 9.20ABab	83.89 ± 27.20ABab	T6	23.89 ± 10.98Aa	15.31 ± 7.62Aa	8.58 ± 3.84Abc	24.31 ± 6.32Aabc	18.01 ± 2.07ABCDabcd	66.21 ± 19.37ABCabcd	T7	15.55 ± 2.25Aa	11.39 ± 0.86Aa	4.16 ± 2.74Abc	17.03 ± 1.61Abcd	9.30 ± 3.27CDde	41.88 ± 5.56Ccd	T8	18.40 ± 6.78Aa	12.06 ± 5.94Aa	6.33 ± 2.23Abc	17.96 ± 5.70Abcd	13.81 ± 5.61BCDcde	50.17 ± 16.86BCcd	T9	23.72 ± 4.43Aa	15.74 ± 4.12Aa	7.98 ± 3.60Abc	23.91 ± 3.78Abcd	17.07 ± 6.86ABCDabcd	64.71 ± 6.33ABCabcd	T10	20.69 ± 6.18Aa	13.94 ± 2.65Aa	6.75 ± 4.03Abc	25.38 ± 4.41Aab	20.12 ± 0.54ABCabc	66.20 ± 5.81ABCabc	T11	13.35 ± 8.03Aa	11.26 ± 8.66Aa	2.09 ± 0.68Ac	15.03 ± 2.33Acd	9.80 ± 1.64CDde	38.17 ± 8.22Ccd	T12	17.01 ± 7.25Aa	8.33 ± 1.52Aa	8.68 ± 5.73Abc	18.13 ± 2.65Abcd	11.29 ± 1.02CDcde	46.43 ± 8.88Ccd	T13	19.36 ± 5.60Aa	12.07 ± 4.61Aa	7.29 ± 0.99Abc	19.25 ± 2.70Abcd	12.09 ± 4.47BCDcde	50.70 ± 12.77BCcd	T14	33.39 ± 10.76Aa	23.12 ± 14.95Aa	10.27 ± 5.46Aab	20.44 ± 6.42Aa	26.98 ± 5.83Aa	90.29 ± 13.03Aa		ns	ns	*	**	ns							
主效应 Main effect	N	ns	ns	ns	*	**	P	ns	ns	**	*	**	ns	K	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns																																																																								
交互作用 Interaction	N × P	ns	ns	ns	ns	ns	N × K	ns	ns	ns	ns	ns	ns	N × P N × K P × K	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns																																																																								

表 7 不同氮磷钾配比对赤苍藤植株各部分干重的影响
Table 7 Effects of different ratios of N, P, and K on dry weight of each part of *Erythropalum scandens*

组别 Group	总根干重 / g Total root dry weight		主根干重 / g Main root dry weight		须根干重 / g Fibrous root dry weight		茎干重 / g Stem dry weight		叶干重 / g Leaf dry weight		总干重 / g Total dry weight		
	T1	2.75 ± 0.19BCC	1.93 ± 0.64Ab	0.82 ± 0.45Aa	5.42 ± 0.73Ab	2.56 ± 0.40Ce	10.72 ± 0.52Cd	T2	3.38 ± 0.47BCbc	2.41 ± 0.21Ab	0.97 ± 0.40Aa	5.90 ± 2.77Ab	2.98 ± 0.93Cde
T3	4.39 ± 1.37BCbc	3.00 ± 0.51Ab	1.39 ± 0.86Aa	7.71 ± 1.93Ab	8.13 ± 3.65ABCabc	20.23 ± 5.62ABCbcd							
T4	3.64 ± 1.92BCbc	2.08 ± 1.42Ab	1.56 ± 1.24Aa	5.04 ± 2.35Ab	4.96 ± 2.76ABCde	13.63 ± 6.97BCcd							
T5	5.65 ± 1.62ABb	2.92 ± 1.02Ab	2.73 ± 0.62Aa	10.75 ± 3.57Aa	9.84 ± 4.67ABab	26.24 ± 9.80ABab							
T6	4.34 ± 1.53BCbc	2.80 ± 1.06Ab	1.53 ± 0.59Aa	8.57 ± 2.30Aab	6.50 ± 0.92ABCabcde	19.40 ± 4.71ABCbcd							
T7	3.03 ± 1.01BCC	2.23 ± 0.53Ab	0.80 ± 0.54Aa	5.59 ± 0.20Ab	3.85 ± 1.87BCcde	12.47 ± 2.38Ccd							
T8	4.17 ± 1.62BCbc	2.76 ± 1.51Ab	1.41 ± 0.47Aa	6.77 ± 2.13Aab	5.83 ± 3.14ABCbcde	16.77 ± 6.68BCcd							
T9	4.45 ± 0.51BCbc	3.21 ± 0.54Ab	1.24 ± 0.56Aa	8.87 ± 1.54Ab	7.06 ± 3.22ABCabcd	20.39 ± 4.32ABCbcd							
T10	4.27 ± 1.48BCbc	3.00 ± 0.80Ab	1.26 ± 0.79Aa	8.93 ± 1.10Ab	8.03 ± 0.62ABCabc	21.23 ± 0.48ABCbc							
T11	2.00 ± 0.55Cc	1.58 ± 0.77Ab	0.42 ± 0.24Aa	5.33 ± 1.01Ab	3.94 ± 0.80BCcde	11.26 ± 0.52Cd							
T12	3.84 ± 1.90BCbc	1.73 ± 0.40Ab	2.11 ± 1.50Aa	7.32 ± 2.32Ab	4.39 ± 0.10BCcde	15.54 ± 4.12BCcd							
T13	4.54 ± 1.67BCbc	2.94 ± 1.24Ab	1.60 ± 0.43Aa	6.94 ± 1.61Ab	7.19 ± 0.50ABCabcd	18.66 ± 2.77ABCbcd							
T14	8.63 ± 1.02Aa	5.78 ± 2.60Aa	2.86 ± 2.14Aa	10.97 ± 4.87Aa	10.49 ± 2.34Aa	30.10 ± 6.62Aa							
主效应 Main effect		N	ns	ns	ns	ns	*	P	*	ns	*	*	*
K		ns	ns	ns	*	ns	*	N × P	ns	ns	ns	ns	ns
N × K		ns	ns	ns	ns	ns	ns	N × K	ns	ns	ns	ns	ns
交互作用 Interaction		ns	ns	ns	ns	ns	ns	P × K	ns	ns	ns	ns	ns

表 8 氮磷钾配比施肥后赤苍藤生理及生物量积累效应隶属度分析
Table 8 Membership degree analysis of physiological and biomass accumulation effects
of *Erythropalum scandens* after N, P, and K ratio fertilization

指标 Index	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10	T11	T12	T13	T14
可溶性糖含量	0.000	0.355	0.324	1.000	0.858	0.897	0.821	0.958	0.821	0.684	0.869	0.221	0.483	0.321
可溶性蛋白含量	0.142	0.000	0.346	0.696	0.775	0.758	0.716	0.751	0.698	0.598	1.000	0.542	0.343	0.576
游离脯氨酸含量	1.000	0.980	0.953	0.634	0.541	0.342	0.221	0.474	0.289	0.364	0.000	0.919	0.840	0.937
丙二醛含量	0.992	1.000	0.487	0.556	0.610	0.455	0.158	0.000	0.023	0.557	0.379	0.658	0.842	0.830
叶片全氮含量	0.009	0.003	0.377	0.894	0.872	0.887	0.929	0.507	1.000	0.716	0.890	0.630	0.000	0.767
叶片全磷含量	0.449	1.000	0.303	0.000	0.136	0.313	0.384	0.160	0.371	0.248	0.347	0.289	0.330	0.194
叶片全钾含量	0.492	0.304	0.531	0.666	0.475	0.453	0.279	0.000	0.203	0.350	1.000	0.746	0.235	0.293
叶绿素 a 含量	0.264	0.000	0.925	0.811	1.000	0.962	0.793	0.925	0.925	0.943	0.925	0.906	0.925	0.981
叶绿素 b 含量	0.063	0.000	0.750	0.625	0.950	1.000	0.325	0.763	0.638	0.713	0.500	0.575	0.563	0.575
叶绿素 a+b 含量	0.139	0.000	0.839	0.708	0.985	1.000	0.508	0.839	0.762	0.815	0.685	0.715	0.715	0.746
净光合速率	0.084	0.000	0.042	0.653	1.000	0.976	0.407	0.560	0.692	0.665	0.479	0.255	0.287	0.707
气孔导度	1.000	0.500	0.125	0.125	0.250	0.000	0.125	0.125	0.125	0.125	0.250	0.000	0.125	0.125
胞间 CO ₂ 浓度	1.000	0.954	0.755	0.450	0.378	0.000	0.141	0.358	0.160	0.407	0.619	0.503	0.566	0.389
蒸腾速率	1.000	0.578	0.078	0.234	0.438	0.141	0.000	0.172	0.188	0.391	0.641	0.234	0.297	0.516
总根鲜重	0.000	0.319	0.459	0.323	0.952	0.607	0.263	0.381	0.600	0.475	0.172	0.323	0.420	1.000
主根鲜重	0.000	0.345	0.436	0.210	0.566	0.531	0.295	0.336	0.557	0.449	0.288	0.112	0.336	1.000
须根鲜重	0.045	0.182	0.313	0.346	1.000	0.455	0.145	0.297	0.413	0.327	0.000	0.462	0.365	0.574
茎鲜重	0.000	0.270	0.451	0.054	0.818	0.649	0.192	0.250	0.624	0.716	0.066	0.261	0.331	1.000
叶鲜重	0.000	0.082	0.694	0.331	0.886	0.561	0.135	0.356	0.515	0.664	0.159	0.232	0.272	1.000
总鲜重	0.000	0.226	0.536	0.255	0.894	0.603	0.201	0.338	0.578	0.602	0.140	0.276	0.347	1.000
总根干重	0.113	0.208	0.360	0.247	0.551	0.353	0.155	0.327	0.370	0.342	0.000	0.278	0.383	1.000
主根干重	0.083	0.198	0.338	0.119	0.319	0.290	0.155	0.281	0.388	0.338	0.000	0.036	0.324	1.000
须根干重	0.164	0.225	0.398	0.467	0.947	0.455	0.156	0.406	0.336	0.344	0.000	0.693	0.484	1.000
茎干重	0.064	0.145	0.450	0.000	0.963	0.595	0.093	0.292	0.646	0.656	0.049	0.384	0.320	1.000
叶干重	0.126	0.147	0.400	0.244	0.485	0.320	0.190	0.287	0.348	0.396	0.194	0.216	0.354	0.517
总干重	0.000	0.079	0.491	0.150	0.801	0.448	0.090	0.312	0.499	0.542	0.028	0.249	0.410	1.000
隶属度均值	0.278	0.312	0.468	0.415	0.710	0.540	0.303	0.402	0.491	0.516	0.372	0.412	0.419	0.733
隶属度排序	14	12	6	8	2	3	13	10	5	4	11	9	7	1

过量(N3P2K2)、缺氮(N0P2K2)、磷过量(N2P3K2)及不施肥(N0P0K0)处理下植株生理状况较差。排名靠前的处理中, 氮素多为2水平(即N 1 g/株), 而氮、磷肥过量处理(N3P2K2、N2P3K2)对赤苍藤的毒害作用大于钾肥过量处理(N2P2K3)。缺素状态下(N0P2K2、N2P0K2、N2P2K0)植株整体生理状况均不佳。

3 讨论

叶绿素含量可反映植株叶片光合能力及植株的生理状况。本试验中, 施肥处理间叶绿素含量差异极显著, 大多数处理叶绿素含量随施肥过程逐渐升

高, 而T2(N0P2K2)处理叶绿素含量小于对照(N0P0K0), 这与杨永恒等^[26]在甜菊(*Stevia rebaudiana* Bertoni)中的研究结果相似。而除N0P0K0、N0P2K2处理叶绿素含量较施肥中期有所下降外, 其他处理组的变化趋势与海南风吹楠(*Horsfieldia hainanensis* Merr.)^[27]、假苹婆(*Sterculia lanceolata* Cav.)^[15]等植物中的研究结果相似。这可能与植物对不同元素的偏好性有关。海南风吹楠、假苹婆等植物在进行N0P2K2处理时, 磷钾肥的施用可能造成其对氮素的需求降低, 因而其叶绿素含量仍高于对照(N0P0K0)。而赤苍藤本身可能偏好氮素,

抑或是磷钾肥的施用对氮素吸收具有协同作用，故长期氮素缺乏导致其叶绿素含量下降。当施肥过量时，会对赤苍藤根系造成毒害，进而影响其对氮素的吸收利用，导致叶绿素含量有所下降。对比来看，赤苍藤植株净光合速率在一定范围内随施肥量上升呈先升后降趋势，而气孔导度、胞间 CO₂ 浓度及蒸腾速率则呈先降后升或先升后降趋势，其净光合速率变化规律与扁桃 (*Mangifera persiciform* C. Y. Wu et T. L. Ming)^[28]、小叶楠 (*Phoebe microphylla* H. W. Li)^[29] 等植物接近。适度施肥可促进植株氮素吸收、叶绿素合成，进而使净光合速率增加，呼吸作用稍减弱，但过度施肥条件下赤苍藤根系受影响，导致氮素吸收及叶绿素合成受阻，净光合速率下降，光合作用减弱，呼吸作用加强，从而造成胞间 CO₂ 浓度及蒸腾速率的升高。施肥对赤苍藤植株生物量积累具有显著的促进作用。总根鲜重及主根鲜重差异不显著，可能是由于植株扦插时选择了一致的一年生枝条。施肥后，氮素主效应多影响植株地上部分物质积累，磷素主效应对地下部分鲜、干重影响更为显著，而钾影响不显著。生物量与光合作用变化趋势相似。

可溶性糖、可溶性蛋白、游离脯氨酸为常见的渗透调节物质，而 MDA 是植物细胞膜脂过氧化程度最直观的反映，这些指标可从渗透调节层面反映植物的生理状况^[30]。本研究中，4 种渗透调节物质均受到施肥效应的极显著影响，施肥后期大多数处理均使其产生积累，表明施肥可促进渗透调节物质的产生与富集，但过度施肥及长期的养分缺乏易造成植物养分胁迫，从而导致游离脯氨酸及 MDA 大量积累，细胞受损。可溶性糖与可溶性蛋白含量的变化趋势与扁桃^[28]、海南风吹楠^[27] 等植物中的结果一致，而游离脯氨酸及 MDA 变化趋势与观光木 (*Michelia odora* (Chun) Nooteboom & B. L. Chen)^[31]、扁桃^[28]、桑树 (*Morus alba* L.)^[32] 等植物中的结果相反。研究表明，施肥后期游离脯氨酸及 MDA 比施肥中期低，预示着施肥可增强植株抗逆性，这可能与植物对养分的适应性有关。本研究所用的 1.5 年生赤苍藤扦插苗，其地下部分以须根为主。长期缺素处理或在其生长后期追肥过多可能对其根系生长产生显著影响，进而形成养分胁迫，导致游离脯氨酸及 MDA 积累。

研究发现，在大田试验中，生态区、采摘部位

等均为植物叶片养分含量的制约因素^[33]，而盆栽试验中植株叶片养分含量则主要取决于植物体对养分的吸收、转运及利用情况。本试验中，赤苍藤叶片全氮、磷、钾含量随施肥量的上升而呈先增后减的变化趋势，这与菊花 (*Chrysanthemum morifolium* Ramat. var. ‘Nannong Huangfengwo’)^[34]、核桃 (*Juglans regia* L. var. ‘Xiangling’)^[35] 等植物中的结果相一致。施肥后期赤苍藤叶片全氮、磷及多数处理中全钾含量呈下降趋势，且植株生长减缓，11—12 月期间叶片甚至出现轻微变黄现象，与粟春青^[15]、李俊飞^[36]、黄巧义等^[37] 的研究结果类似。这可能是由于植株在施肥后期养分吸收量不足，比生物量增速变慢，表现为养分的稀释效应，而形成“养分稀释”状态，抑或是养分后期分配至其他器官，从而引起叶中元素含量降低所致。此效应还需与养分矢量诊断结果进行对应分析。

4 结论

研究结果表明，氮主效应对渗透调节物质含量、叶绿素含量、光合作用及干物质积累相关指标具有显著影响。渗透调节物质、叶绿素含量等随施肥进程均有规律性升高或降低，在施肥后期缺素及过量施肥处理中均出现轻度养分胁迫现象。总体而言，赤苍藤在 T14(N2P1K1) 处理下生理及物质积累状况最佳，T5(N2P1K2) 处理次之。最佳施肥处理为尿素 2.14 g/株 + 过磷酸钙 4.44 g/株 + 氯化钾 0.67 ~ 1.33 g/株。

参考文献：

- [1] 隆卫革, 黎素平, 安家成, 朱昌叁. 森林蔬菜赤苍藤营养分析与评价 [J]. 食品研究与开发, 2017, 38(24): 124–127. Long WG, Li SP, An JC, Zhu CS. Analysis and evaluation of nutritional components in *Erythropalum scandens* Blume [J]. *Food Research and Development*, 2017, 38(24): 124–127.
- [2] 符策, 韦雪英, 刘连军, 谢君峰. 不同外源激素、基质处理对赤苍藤扦插生根的影响 [J]. 南方农业, 2019, 13(5): 139–140.
- [3] 冯旭, 李耀华, 梁臣艳, 唐慧勤, 牛晋英. 赤苍藤叶挥发油化学成分分析 [J]. 时珍国医国药, 2014, 25(6): 1338–1339. Feng X, Li YH, Liang CY, Tang HQ, Niu JY. Analysis of the chemical constituents of essential oil from leaf *Erythropalum* [J]. *Lishizhen Medicine and Materia Medica Research*, 2014, 25(6): 1338–1339.

- [4] 潘乔丹, 黄元河, 唐海燕, 农静羽, 韦贤, 等. 赤苍藤和密蒙花多糖的含量测定及抗氧化研究 [J]. 食品研究与开发, 2016, 37(22): 6–9.
- Pan QD, Huang YH, Tang HY, Nong JY, Wei X, et al. Content determination and antioxidant activity of polysaccharides of *Erythropalum scandens* Bl. and *Buddleja officinalis* Maxim [J]. *Food Research and Development*, 2016, 37(22): 6–9.
- [5] Zhu ZX, Wang JH, Cai YC, Zhao KK, Moore MJ, Wang HF. Complete plastome sequence of *Erythropalum scandens* (Erythropalaceae), an edible and medicinally important liana in China [J]. *Mitochondrial DNA B Resour*, 2018, 3(1): 139–140.
- [6] 郭品湘. 鸡粪和牛粪配施对赤苍藤产量和品质的影响 [D]. 南宁: 广西大学, 2020: 1–67.
- [7] Urso V, Signorini MA, Tonini M, Bruschi P. Wild medicinal and food plants used by communities living in *Mopane* woodlands of southern Angola: results of an ethnobotanical field investigation [J]. *J Ethnopharmacol*, 2016, 177: 126–139.
- [8] Łuczaj Ł, Dolina K. A hundred years of change in wild vegetable use in southern Herzegovina [J]. *J Ethnopharmacol*, 2015, 166: 297–304.
- [9] Azeez JO, van Averbeke W, Okorogbona AOM. Differential responses in yield of pumpkin (*Cucurbita maxima* L.) and nightshade (*Solanum retroflexum* Dun.) to the application of three animal manures [J]. *Bioresource Technol*, 2010, 101(7): 2499–2505.
- [10] 校彦赟, 杨东生, 石卓功. 不同施肥处理对设施栽培香椿产量的影响 [J]. 林业科技开发, 2015, 29(3): 136–138.
- Xiao YY, Yang DS, Shi ZG. Influences of different fertilization on the production of *Toona sinensis* cultivated in greenhouse [J]. *China Forestry Science and Technology*, 2015, 29(3): 136–138.
- [11] Sarwar M, Patra JK, Ali A, Maqbool M, Arshad MI. Effect of compost and NPK fertilizer on improving biochemical and antioxidant properties of *Moringa oleifera* [J]. *South Afr J Bot*, 2020, 129: 62–66.
- [12] Ning CC, Gao PD, Wang BQ, Lin WP, Jiang NH, Cai KZ. Impacts of chemical fertilizer reduction and organic amendments supplementation on soil nutrient, enzyme activity and heavy metal content [J]. *J Integr Agric*, 2017, 16(8): 1819–1831.
- [13] Margenat A, You R, Cañameras N, Carazo N, Díez S, et al. Occurrence and human health risk assessment of antibiotics and trace elements in *Lactuca sativa* amended with different organic fertilizers [J]. *Environ Res*, 2020, 190: 109946.
- [14] 许冰, 任开磊, 吴疆翀, 郑益兴, 张燕平. 辣木幼林对氮、磷、钾肥效响应及叶片的生理反应 [J]. 林业科学研究,
- 2016, 29(3): 418–423.
- Xu B, Ren KL, Wu JC, Zheng YX, Zhang YP. Effect of formulated fertilization of nitrogenous, phosphate and potash on growth and leaf physiological reactions of *Moringa oleifera* [J]. *Forest Research*, 2016, 29(3): 418–423.
- [15] 粟春青. 氮磷钾配比对假草婆生长生理及土壤肥力特征的影响 [D]. 南宁: 广西大学, 2020: 1–94.
- [16] 温旭丁, 陈花. 海南海桑幼苗氮磷钾施肥量分析 [J]. 森林与环境学报, 2021, 41(4): 351–357.
- Wen XD, Chen H. Study on application rates of nitrogen, phosphorus, and potassium fertilizers in *Sonneratia hainanensis* seedling cultivation [J]. *Journal of Forest and Environment*, 2021, 41(4): 351–357.
- [17] 罗婷, 杨文忠, 张珊珊. 施肥对云南蓝果树幼苗抗旱生理指标的影响 [J]. 中南林业科技大学学报, 2021, 41(2): 54–62.
- Luo T, Yang WZ, Zhang SS. Effects of fertilization on physiological indicators of drought resistance of *Nyssa yunnanensis* [J]. *Journal of Central South University of Forestry & Technology*, 2021, 41(2): 54–62.
- [18] 汪雪影, 胡永红, 张宪权, 秦俊, 刘群录. 氮、磷、钾肥对绣球‘花手鞠’容器苗生长及养分状况的影响 [J/OL]. 广西植物. [2021-09-29]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/45.1134.Q.20210928.1310.012.html>.
- Wang XY, Hu YH, Zhang XQ, Qin J, Liu QL. Effects of nitrogen, phosphorus and potassium on the growth and nutrient status of potted *Hydrangea macrophylla* ‘Hanatemari’ [J/OL]. *Guizhou*. [2021-09-29]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/45.1134.Q.20210928.1310.012.html>.
- [19] 龚泽丹, 刘三波, 龚达林, 薛襟祺, 朱登岩, 等. 氮磷钾配施对不同年限雷公藤根鲜重和甲素含量的影响 [J]. 中药材, 2021, 44(8): 1803–1809.
- Gong ZD, Liu SB, Gong DL, Xue JQ, Zhu DY, et al. Effects of combined application of nitrogen, phosphorus and potassium on fresh weight and triptolide content in roots of *Tripterygium wilfordii* with different growth years [J]. *Journal of Chinese Medicinal Materials*, 2021, 44(8): 1803–1809.
- [20] 王慷慨, 李莲芳, 苏柠, 张恩向, 何明阐释, 刘广路. 小省藤苗木生长对遮阴和施肥的响应 [J]. 西南林业大学学报, 2019, 39(1): 20–26.
- Wang KL, Li LF, Su N, Zhang EX, He MC, Liu GL. Growth response of *Calamus gracilis* seedlings to shading and fertilization [J]. *Journal of Southwest Forestry University*, 2019, 39(1): 20–26.
- [21] 徐永强. 辣木苗期施肥效应和营养诊断研究 [D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2010: 14–15.
- [22] 高俊山, 蔡永萍. 植物生理学实验指导 [M]. 2 版. 北京: 中

- 国农业大学出版社, 2018: 32–114.
- [23] 蔡永萍. 植物生理学实验指导 [M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2014: 170–172.
- [24] 陈建勋, 王晓峰. 植物生理学实验指导 [M]. 广州: 华南理工大学出版社, 2015: 24–25.
- [25] 鲍士旦. 土壤农化分析 [M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000: 263–271.
- [26] 杨永恒, 张永侠, 徐晓洋, 孙玉明, 包亚英, 等. 氮、磷、钾肥配施对甜菊生长、产量及糖苷相关指标的影响 [J]. 植物资源与环境学报, 2018, 27(1): 17–26.
Yang YH, Zhang YX, Xu XY, Sun YM, Bao YY, et al. Effects of combined application of nitrogen, phosphorus, and potassium fertilizers on related indexes of growth, yield, and glycoside in *Stevia rebaudiana* [J]. *Journal of Plant Resources and Environment*, 2018, 27(1): 17–26.
- [27] 王莉娜. 不同施肥处理对海南风吹楠幼苗生长和生理特性的影响 [D]. 南宁: 广西大学, 2017: 1–57.
- [28] 付晓凤. 不同施肥处理对一年生扁桃生长及生理特性的影响 [D]. 南宁: 广西大学, 2018: 1–76.
- [29] 董妍君. 不同肥料配比对小叶楠幼苗生长及生理特性的影响 [D]. 南宁: 广西大学, 2016: 1–53.
- [30] 赵子豪, 宋琦, 李利, 楼锦锋, 罗建勋, 俞飞. 南方四季杨雌雄幼苗对镉胁迫光合生理响应的差异 [J]. 森林与环境学报, 2019, 39(2): 201–207.
Zhao ZH, Song Q, Li L, Lou JF, Luo JX, Yu F. Difference in photosynthesis and physiological response of male and female *Populus deltoides* × *nigra* to Cd stress [J]. *Journal of Forest and Environment*, 2019, 39(2): 201–207.
- [31] 亢亚超. 氮磷钾配比施肥对观光木幼苗生长生理及光合特性的影响 [D]. 南宁: 广西大学, 2020: 1–89.
- [32] 刘刚. 平衡施肥对桑树产量与品质的影响及其施肥模型的建立 [D]. 重庆: 西南大学, 2012: 1–113.
- [33] Melesse A, Steingass H, Boguhn J, Schollenberger M, Rodehutscord M. Effects of elevation and season on nutrient composition of leaves and green pods of *Moringa stenopetala* and *Moringa oleifera* [J]. *Agroforest Syst*, 2012, 86(3): 505–518.
- [34] 周杨, 方馨妍, 汪燕, 管志勇, 陈素梅, 等. 测土配方施肥对菊花苗期生长发育、土壤性质及养分吸收的影响 [J]. 土壤, 2021, 53(1): 118–124.
Zhou Y, Fang XY, Wang Y, Guan ZY, Chen SM, et al. Effects of soil testing and formula fertilization on growth, soil properties and nutrient absorption of chrysanthemum in seedling stage [J]. *Soils*, 2021, 53(1): 118–124.
- [35] 成艳霞, 戴建昊, 刘杜玲, 彭少兵. 配方施肥对核桃果实性状和营养成分的影响 [J]. 北方园艺, 2018(15): 123–128.
Cheng YX, Dai JH, Liu DL, Peng SB. Influence of formula fertilization on fruit traits and nutritional components of walnut [J]. *Northern Horticulture*, 2018(15): 123–128.
- [36] 李俊飞. 矿质元素对西洋参生长及质量的作用研究 [D]. 北京: 北京协和医学院, 2020: 1–97.
- [37] 黄巧义, 唐拴虎, 陈建生, 张发宝, 解开治, 等. 氮磷钾配比对木薯养分吸收动态及产量影响 [J]. 植物营养与肥料学报, 2014, 20(4): 947–956.
Huang QY, Tang SH, Chen JS, Zhang FB, Jie KZ, et al. Effects of different N, P and K treatments on absorption and accumulation of nutrients and yield of cassava [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2014, 20(4): 947–956.

(责任编辑: 李惠英)