

荔枝在不同温度和氮素营养条件下的钾、钙和镁吸收动力学特征

朱陆伟, 周昌敏, 白翠华, 姚丽贤*

(华南农业大学资源环境学院, 广州 510642)

摘要:【目的】明确不同温度和氮形态营养条件下荔枝根系吸收 K^+ 、 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 能力的差异。【方法】以黑叶荔枝实生苗为材料, 进行水培实验。设置6个温度处理(10、15、20、25、30和35℃)和3种氮营养形态处理(硝态氮、1/2硝态氮+1/2铵态氮和铵态氮)。研究荔枝吸收 K^+ 、 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 养分离子的动力学参数(最大吸收速率 I_{max} 、亲和力 A_m 和离子补偿点 C_{min})变化, 比较根系吸收营养能力的差异。【结果】除温度与氮营养的交互作用对荔枝吸收 Ca^{2+} 的 A_m 无显著影响外, 温度、氮营养及两者的交互作用对荔枝吸收 K^+ 、 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 均有显著影响($p < 0.05$)。硝态氮和1/2硝+1/2铵处理下荔枝吸收 K^+ 的3个动力学参数随温度升高而波动变化, 而铵态氮处理下动力学参数随温度升高变化不大。硝态氮处理下荔枝吸收 Ca^{2+} 的 I_{max} 随温度升高而提高, 其他营养下随温度升高而波动变化; 荔枝吸收 Ca^{2+} 的 A_m 均随温度升高而先降低后提高, 而 C_{min} 随温度及氮营养变化的趋势与 A_m 的相反。不同氮营养下荔枝对 Mg^{2+} 的动力学参数随温度的升高而波动变化。【结论】在秋梢生长和果实膨大期, 硝铵混合氮源比单一形态氮源更有利于荔枝对钾、钙和镁营养的吸收。在秋梢老熟期至开花前可以叶面喷施钙肥和镁肥为荔枝补充钙和镁营养。

关键词: 荔枝; 温度; 硝态氮; 铵态氮; 动力学参数

中图分类号: S667.1

文献标志码: A

文章编号: 1009-9980(2021)04-0538-11

Dynamic characteristics of K, Ca and Mg uptake by litchi as affected by temperature and nitrogen form

ZHU Luwei, ZHOU Changmin, BAI Cuihua, YAO Lixian*

(College of Natural Resources and Environment, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, Guangdong, China)

Abstract: 【Objective】 K, Ca and Mg uptake by litchi under varied temperatures and N forms was investigated, aiming to provide references by selecting suitable N source and K, Ca and Mg nutrient combinations for litchi in different seasons or phenological stages. 【Methods】 A hydroponic experiment was conducted using litchi seedlings of cultivar Heiye. The designed growth temperatures were 10, 15, 20, 25, 30 and 35℃, and the supplied N forms included nitrate, 1/2 nitrate + 1/2 ammonium, and ammonium. K, Ca and Mg contents in the nutrient solution were measured, and the uptake kinetic parameters of K, Ca and Mg nutrients were determined. 【Results】 Except that the interaction between temperature and nitrogen nutrition had no significant effect on affinity (A_m) of Ca^{2+} absorbed by litchi, temperature, nitrogen form and their interaction had significant effects on the absorption of K^+ , Ca^{2+} and Mg^{2+} ($p < 0.05$). Under the conditions of nitrate and 1/2 nitrate + 1/2 ammonium, the kinetic parameters of litchi on K^+ fluctuated with temperature increased, while under ammonium nitrogen treatment, the kinetic parameters did not change significantly as temperature increased. The maximum absorption rate (I_{max}) of K^+ by litchi at 10, 15 and 30℃ was found in the treatment of 1/2 nitrate + 1/2 ammonium, which had a significantly higher I_{max} of K^+ than the other two treatments. Under the ammonium treatment at 10 and 15℃,

收稿日期: 2020-07-10

接受日期: 2020-12-26

基金项目: 国家现代农业产业技术体系建设专项(CARS-32)

作者简介: 朱陆伟, 男, 硕士, 研究方向: 荔枝养分管理。Tel: 18814116391, E-mail: luweiz_0311@163.com

*通信作者 Author for correspondence. Tel: 13660637007, E-mail: lyaolx@scau.edu.cn

I_{\max} was significantly higher than under nitrate treatment, but the opposite was found at 30 °C. There was no significant difference in I_{\max} among the three nitrogen treatments at the other temperatures. Under ammonium treatment, the A_m of K^+ absorbed by litchi always had the maximum value at different temperatures. At 15 and 30 °C, the A_m in the treatment of 1/2 nitrate + 1/2 ammonium was greater than that in the nitrate treatment. However, that in the nitrate treatment was larger at 25 °C. Under different temperatures, ion compensation concentrations (C_{\min}) of K^+ uptake by litchi was always the highest under the nitrate treatment, with the exception of the lowest value in the 1/2 nitrate + 1/2 ammonium treatment at 15 °C. At 10, 15 and 25 °C, the I_{\max} of Ca^{2+} was in the order of nitrate < 1/2 nitrate + 1/2 ammonium < ammonium. When the temperature was 20 and 35 °C, the nitrate treatment was significantly higher than the other two treatments, and at 35 °C, the I_{\max} in the 1/2 nitrate + 1/2 ammonium treatment was significantly higher than that in the ammonium treatment. The A_m of Ca^{2+} absorbed by litchi decreased first and then increased with the increase of temperature, and that in the nitrate treatment at 15-35 °C was significantly lower than that in the 1/2 nitrate + 1/2 ammonium treatment, and significantly or slightly lower than that in the ammonium treatment. With the increase in temperature, the change pattern of C_{\min} for Ca^{2+} under different treatments were opposite to that of A_m . Under different nutrient treatments, the kinetic parameters of Mg^{2+} fluctuated and changed with temperature increase. At 10 °C, I_{\max} and A_m of Mg^{2+} were the highest and C_{\min} was the lowest, and at 35 °C A_m was the highest and C_{\min} was the lowest. At 25 °C, the ammonium treatment had the largest I_{\max} .【Conclusion】 Both temperature and nitrogen form can significantly affect the K, Ca and Mg uptake by litchi. The combination of ammonium and nitrate was more beneficial to the absorption of K, Ca and Mg by litchi than the use of single form of nitrogen during the period of autumn shoot growth and fruit expansion period. Calcium and magnesium fertilizers can be sprayed to supplement Ca and Mg nutrients for litchi after autumn shoot maturation and before anthesis.

Key words: Litchi; Temperature; Nitrate; Ammonium; Kinetic parameters

荔枝(*Litchi chinensis* Sonn.)为多年生的热带亚热带果树,就世界范围而言,我国虽有着最大的种植面积和产量,但单位面积产量却低于世界平均水平^[1]。同时荔枝的生长对温度要求严格,不仅需要低温促其成花,又对低温敏感易受冻害^[2]。土壤温度影响养分的可利用性^[3]和植物根系活性^[4]。根系是植物吸收、运输水分和养分的主要器官,其作用受土壤温度的影响^[5-7]。在一定温度范围内,升温有利于植物对矿质养分的吸收^[8-9],但根际高温也会降低根系的吸收能力^[10-12]。荔枝1 a(年)开花坐果1次,不同物候期的土壤温度差别很大,因此研究不同温度对荔枝生长的影响,对提高荔枝单产具有重要意义。

氮素是影响植物生长发育最重要的营养元素,其中硝态氮与铵态氮是植物从土壤中吸收的主要氮素形态,植物对不同氮素形态的吸收存在差异^[13],改变氮素供应形态同样可以调控植物的养分吸收^[14-15]。如单独供给铵态氮营养会降低植物对K、

Ca和Mg等养分的吸收速率^[16-18];同时供给铵态氮和硝态氮有利于植物的生长^[19]和氮营养的吸收^[20],而且当硝态氮和铵态氮的供应质量比为1:1时能促进毛竹对K、Ca和Mg等元素的吸收^[21],植物对大量元素的吸收能力会随硝铵比例的提升而升高^[22];供给单一的硝态氮能够促进植物对K、Ca和Mg等养分的吸收^[23-24]。故关注氮素形态及其配比有助于促进荔枝对养分的平衡吸收以及提高养分的利用效率。

目前虽有气候会影响荔枝的产量^[25-26]、氮形态^[27]以及氮钾配比^[28-29]会影响荔枝对养分的吸收和再分配的研究报道,但是关于温度对荔枝养分吸收的影响以及不同形态氮与其他营养间的相互作用还鲜有报道。笔者通过设置不同的温度和氮营养处理进行水培实验,探讨荔枝在不同温度及氮素营养条件下吸收K、Ca和Mg等养分的动力学参数变化,考察温度和氮形态对荔枝吸收K、Ca和Mg能力的影响,从而为荔枝生产中不同季节选择适用的氮肥形态及K、Ca和Mg养分组合提供依据。

1 材料和方法

1.1 供试荔枝

所用荔枝品种为黑叶,果实采自茂名水果研究所基地。剥取新鲜果实种子,清洗干净后播在干净河沙中。每天浇自来水1~2次,在整个育苗过程中不施用肥料。等到长至12片真叶时,选取长势一致的幼苗,将种子摘除,放在 $2\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 的多菌灵溶液中浸泡消毒30 min,然后用超纯水冲洗,在装有已经消毒和清洗的石英砂的定植杯中定植,最后移植于装有不同配方培养液的培养箱中。先用1/2剂量的营养液(pH 6.5)培养1周,然后更换1剂量的营养液(pH 6.5)培养,以后每2周更换1次营养液。培养期间用气泵为荔枝间歇供氧,15 min 1次,每次15 min。同时,用 $0.5\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 H_2SO_4 和 $1.0\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 NaOH 溶液调节营养液的pH值,使其维持在 6.5 ± 0.5 。荔枝幼苗培养至根系发达时进行吸收实验,此时荔枝幼苗具有16~20片真叶。

1.2 荔枝营养液配方

营养液的大中量元素根据荔枝幼苗植株矿质养分含量比例确定,其中将氮素供应形态分为硝态氮、1/2硝+1/2铵和铵态氮3种处理,获得3种氮素营养配方,如表1所示。3种微量元素的配方均使用Hoagland营养液的微量元素配方。营养液用超纯水配制,试验所用试剂均为分析纯。

表1 荔枝3种氮素形态处理的大中量元素营养液配方

Table 1 Formula of macronutrients and secondary nutrients in litchi tree under three N treatments

化合物名称 Compound name	硝态氮 Nitrate	1/2硝+1/2铵 1/2 Nitrate+1/2 Ammonium	铵态氮 Ammonium
$\text{Ca}(\text{NO}_3)_2\cdot 4\text{H}_2\text{O}$	4.01	-	-
CaCl_2	-	4.01	4.01
KNO_3	1.56	-	-
KCl	-	1.56	1.56
NH_4NO_3	-	4.79	-
NH_4Cl	-	-	9.58
K_2SO_4	0.31	0.31	0.31
KH_2PO_4	0.43	0.43	0.43
$\text{MgSO}_4\cdot 4\text{H}_2\text{O}$	1.11	1.11	1.11

注: - 未添加。Note: - no added.

1.3 试验设计与实施

根据2016年4月至2017年3月在华南农业大学园艺学院荔科技园气温和土壤地温监测数据,该园年气温范围为 $9.6\sim 39.2\text{ }^\circ\text{C}$,树盘滴水线下地温在 $16.7\sim 32.5\text{ }^\circ\text{C}$ 。故本研究设置荔枝吸收试验温度为10、

15、20、25、30和 $35\text{ }^\circ\text{C}$ 。同时,设置3种氮素营养条件,即表1的3种营养液配方处理,以下分别简写为硝态氮、1/2硝+1/2铵和铵态氮处理。每个处理3次重复。

进行吸收试验前,荔枝幼苗先进行饥饿处理。挑选根系发达且长势一致的荔枝幼苗,用超纯水冲洗根部后转入到装有超纯水的250 mL三角瓶中(每瓶2株),用锡箔纸包裹三角瓶瓶壁,分别置于不同温度条件下的人工智能气候培养箱(加拿大Conviron,PGV-36)中饥饿处理48 h。培养箱每天光照12 h,光照度为 $1000\text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$,相对湿度为75%。

荔枝吸收试验前12 h,将配制并分装好吸收液(pH=6.5)的250 mL吸收瓶放置在不同温度条件的培养箱中,保证吸收试验温度达到预定温度。从培养箱中取出吸收瓶,将饥饿处理后的荔枝幼苗移入瓶中,每瓶装2株,用锡箔纸包裹三角瓶瓶壁(对根部遮光处理),放回培养箱中开始吸收。每瓶加入3滴 $7\text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的硝化抑制剂(双氰胺)以抑制铵态氮的转化,并加入1 mL 3%的 H_2O_2 供氧气^[20]。在吸收的0、1、2、3、4、6、8、10和12 h采集吸收液样本,测定其中的各种养分含量。每次取样2 mL,取样后立即向吸收瓶中补充2 mL超纯水。吸收结束后,立即剪下荔枝幼苗根系,用吸水纸吸干其表面水分,称质量并记录。

1.4 样本测试

待测样品中的 K^+ 、 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 采用ICP-AES(AES, 710-ES, VARIAN, USA)测定。 K^+ 标样采用烘干的氯化钾(KCl, 优级纯), Ca^{2+} 标样采用单元素标准溶液GSB 04-1720-2004, Mg^{2+} 标样采用单元素标准溶液GSB 04-1735-2004。

1.5 动力学参数计算

利用吸收过程中不同时间吸收液的养分离子浓度,分别拟合离子消耗曲线方程,计算 K^+ 、 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 吸收动力学参数^[30]。

拟合的离子消耗曲线方程为: $Y = aX^2 + bX + c$

式中: Y 表示营养液中离子的浓度, X 表示植物根系吸收离子的时间。

对离子消耗方程求一阶导数得到浓度变化速率方程: $Y' = 2aX + b$

当 $Y' = b$,介质浓度有最大变化速率。利用公式 $I_{\max} = b \times V/U$,求得最大吸收速率 I_{\max} (V 为吸收试验液体的原体积, U 为根鲜质量)

吸收速率为 $1/2I_{max}$ 时溶液的离子浓度为米氏常数 K_m ,求得 $K_m = c - 3b^2/16a$,用 $1/K_m$ 来表示根系对养分离子的亲和力,即 $A_m = 1/K_m$ 。

当吸收速率为零时介质中离子的浓度为离子吸收补偿点 C_{min} ,代入原方程求得 $C_{min} = c - b^2/4a$ 。

I_{max} 表示根系吸收离子所能达到的最大速率,其值越大反映植物吸收某种离子的内在潜力越大^[31]。 A_m 值表示根系细胞膜对所吸收离子的亲和力,其值越高,表示更加易于吸收该种离子。 C_{min} 值表示植物开始吸收某一离子的离子最低浓度,其值越低,表明根系对该离子在介质中的浓度要求越低,根系对营养有限条件的适应能力越强。

1.6 数据处理分析

用Excel 2017进行数据整理与作图,用SPSS 22.0拟合吸收方程并检验显著性。用SAS 9.0进行

双因素(温度和氮形态)方差分析,进行Duncan's多重比较。分别用“*”和“**”表示 $p < 0.05$ 和 $p < 0.01$ 水平的差异显著性。

2 结果与分析

2.1 荔枝吸收 K^+ 的动力学参数

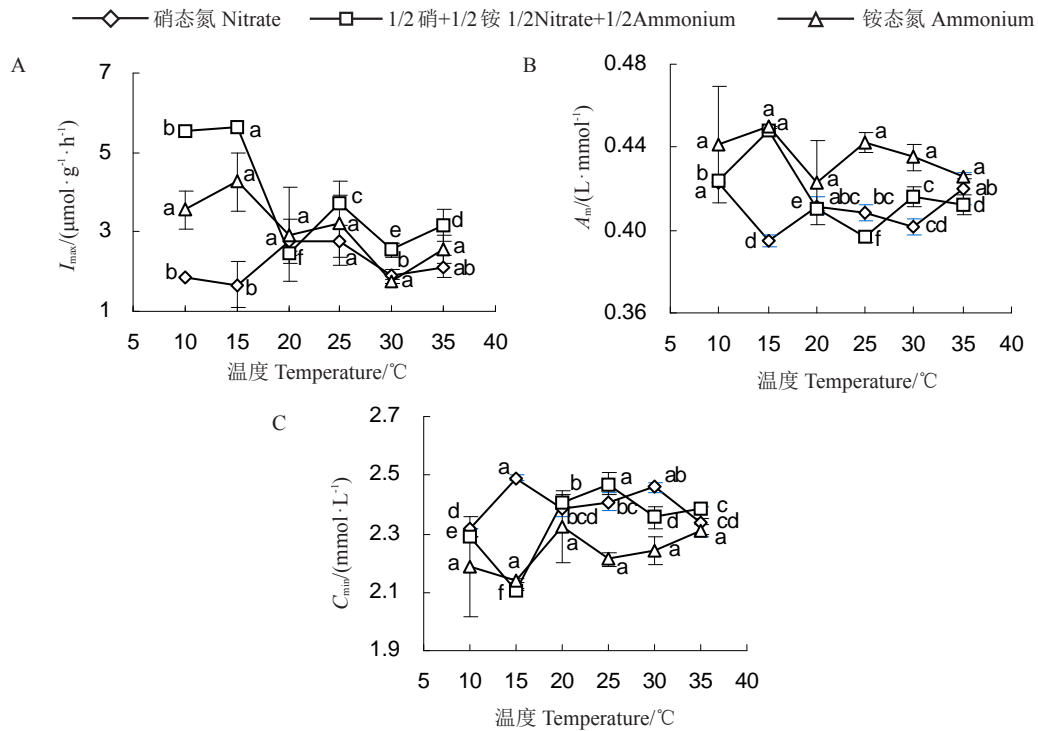
如表2所示,荔枝吸收 K^+ 的3种动力学参数均受到温度、氮营养及两者的交互作用的极显著影响($p < 0.001$)。

2.1.1 温度的影响 从图1-A来看,硝态氮营养条件下荔枝吸收 K^+ 的 I_{max} 随温度升高先升高后降低,在20~25℃有较大值;随温度升高,1/2硝+1/2铵营养下的 I_{max} 经历升高-下降的交替变化过程,以15℃的 I_{max} 显著高于其他所有温度处理,10℃的 I_{max} 次之。铵态氮营养下 I_{max} 虽然有随温度升高有先升高后下

表2 温度和氮营养对荔枝吸收 K^+ 动力学参数影响的方差分析($n=3$)

Table 2 Uptake dynamic parameters for K^+ in litchi as affected by temperature and N form ($n=3$)

项目 Item	温度 Temperature (T)			N形态 N form (N)			T×N		
	I_{max}	A_m	C_{min}	I_{max}	A_m	C_{min}	I_{max}	A_m	C_{min}
自由度 Freedom degree	5			2			10		
F值 F value	178.3	8.07	12.1	386.0	69.9	75.9	107.2	6.83	9.20
P值 P value	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001



不同的小写字母表示在某一氮素营养条件下不同温度间的差异显著($p < 0.05$)。 Different small letters attached with the lines denote significant difference at 0.05 level.

图1 不同氮营养条件下荔枝吸收 K^+ 的动力学参数随温度变化的动态

Fig. 1 Uptake dynamic parameters of K^+ in litchi under different temperatures and N forms

降的趋势,但不同温度间的差异不显著。

随着温度提高,硝态氮营养下荔枝吸收 K^+ 的 A_m 经历降低-升高的交替变化过程,且在10和35℃时有较大值(图1-B)。当供给1/2硝+1/2铵营养时, A_m 随温度升高出现先升高后降低的交替变化,在15℃时有最大值且显著高于其他温度处理。虽然铵态氮营养下以20℃处理的 A_m 最低,但所有温度处理的差异未达显著水平。

供给硝态氮营养时,荔枝对 K^+ 的 C_{min} 随温度升高经历升高-降低的交替变化过程,在15和30℃时有较大值(图1-C)。1/2硝+1/2铵营养条件下,当温度从10℃提高至15℃,荔枝吸 K^+ 的 C_{min} 显著下降,

随后随温度进一步提高至25℃, C_{min} 大幅显著提高,以后随温度继续提高, C_{min} 也有所波动,但仍以15℃时 C_{min} 显著低于其他温度处理。铵态氮营养中,荔枝对 K^+ 的 C_{min} 随温度升高变化不大。

2.1.2 氮营养的影响 如表3所示,荔枝吸收 K^+ 的 I_{max} 只有在10、15和30℃时3种氮营养处理间存在显著差异,且1/2硝+1/2铵处理的 I_{max} 显著大于其他两种单一氮营养处理,而铵态氮处理在10和15℃时又显著高于硝态氮处理,但在30℃时硝态氮处理显著高于铵态氮处理。在20、25和35℃时,虽然3种营养处理的 I_{max} 无显著差别,但1/2硝+1/2铵处理的 I_{max} 均为最高。

表3 相同温度下不同氮营养处理荔枝吸收 K^+ 动力学参数的比较($n=3$)

Table 3 Comparison of uptake kinetic parameters for K^+ in litchi as affected by N form under the same temperature ($n=3$)

动力学参数 Kinetic parameters	N形态 N form	培养温度 Culture temperature/℃					
		10	15	20	25	30	35
$I_{max}/$ ($\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$)	硝态氮 Nitrate	1.880±0.000 c	1.680±0.590 c	2.770±0.560 a	2.770±0.410 a	1.890±0.180 b	2.130±0.270 a
	1/2硝+1/2铵 1/2 Nitrate+1/2 Ammonia	5.560±0.000 a	5.640±0.000 a	2.470±0.050 a	3.740±0.170 a	2.550±0.180 a	3.180±0.390 a
	铵态氮 Ammonia	3.550±0.490 b	4.260±0.720 b	2.930±1.180 a	3.200±1.060 a	1.770±0.050 c	2.570±0.370 a
$A_m/$ ($\text{L}\cdot\text{mmol}^{-1}$)	硝态氮 Nitrate	0.423±0.000 a	0.395±0.003 c	0.412±0.004 a	0.408±0.004 b	0.401±0.004 c	0.420±0.008 a
	1/2硝+1/2铵 1/2 Nitrate+1/2 Ammonia	0.424±0.000 a	0.448±0.000 b	0.410±0.000 a	0.397±0.003 c	0.416±0.005 b	0.412±0.005 a
	铵态氮 Ammonia	0.442±0.028 a	0.450±0.001 a	0.423±0.020 a	0.442±0.005 a	0.435±0.006 a	0.426±0.001 a
$C_{min}/$ ($\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$)	硝态氮 Nitrate	2.320±0.000 a	2.490±0.010 a	2.390±0.030 a	2.410±0.030 a	2.460±0.020 a	2.320±0.000 a
	1/2硝+1/2铵 1/2 Nitrate+1/2 Ammonia	2.290±0.000 a	2.100±0.000 c	2.400±0.010 a	2.470±0.030 a	2.360±0.040 ab	2.290±0.000 a
	铵态氮 Ammonia	2.190±0.170 a	2.140±0.010b	2.320±0.120 a	2.210±0.020 b	2.240±0.050 b	2.190±0.170 a

注:表中同一列数据后面小写字母不相同者差异显著($p < 0.05$)。下同。

Note: Data with different lowercase letters in each column are significantly different ($p < 0.05$). The same below.

在10、20和35℃时,3种氮营养处理荔枝对 K^+ 的 A_m 没有差别(表3)。然而在15和30℃时为铵态氮营养下的 A_m 显著高于1/2硝+1/2铵和硝态氮处理,而后者又显著高于硝态氮处理。在25℃时则为铵态氮处理显著高于硝态氮处理,而后者又显著高于1/2硝+1/2铵处理。

在15℃时1/2硝+1/2铵处理的 C_{min} 显著低于铵态氮处理,而后者又显著低于硝态氮处理(表3)。在25℃时,铵态氮处理的显著低于其他2种氮营养处理,硝态氮处理和1/2硝+1/2铵处理的 C_{min} 无显

著差异。在30℃时硝态氮处理的 C_{min} 显著高于1/2硝+1/2铵处理,后者又显著高于铵态氮处理。但在10、20和35℃时,3种营养处理之间的 C_{min} 接近。

2.2 荔枝吸收 Ca^{2+} 的动力学参数

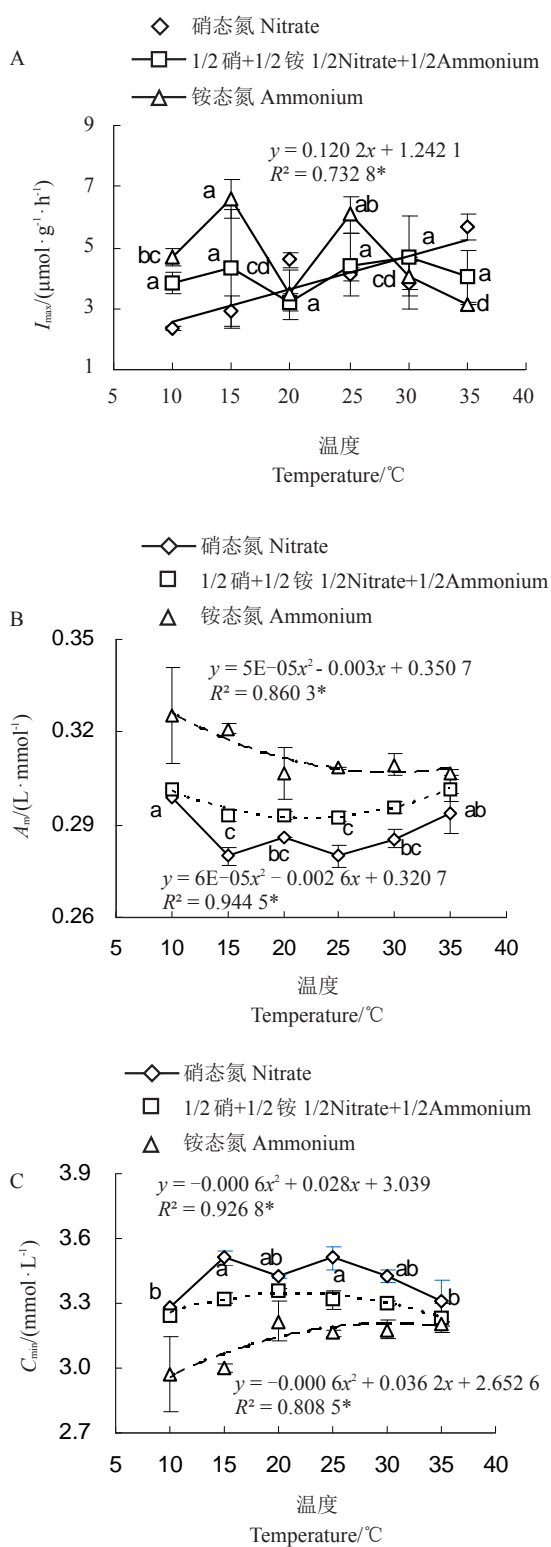
除温度与氮营养的交互作用对荔枝吸收 Ca^{2+} 的 A_m 影响未达显著水平外,温度、氮营养及两者的交互作用均对3种动力学参数有显著影响($p < 0.05$) (表4)。

2.2.1 温度的影响 图2-A显示,硝态氮营养下荔枝吸收 Ca^{2+} 的 I_{max} 随温度升高而升高($y = 0.120 2x +$

表4 温度和氮营养对荔枝吸收 Ca^{2+} 动力学参数影响的方差分析($n=3$)

Table 2 Uptake dynamic parameters for Ca^{2+} in litchi as affected by temperature and N form ($n=3$)

项目 Item	温度 Temperature (T)			N形态 N form (N)			T×N		
	I_{max}	A_m	C_{min}	I_{max}	A_m	C_{min}	I_{max}	A_m	C_{min}
自由度 Freedom degree	5			2			10		
F值 F value	3.91	12.20	12.07	6.20	127.00	105.40	6.96	1.00	2.65
P值 P value	0.013	<0.001	<0.001	0.008	<0.001	<0.001	<0.001	0.474	0.030



注:不同的小写字母表示差异显著($p < 0.05$)。下同。
 Note: Different small letters mean significant difference at 0.05 level. The same below.

图2 不同氮营养条件下荔枝吸收 Ca^{2+} 的动力学参数随温度变化的动态

Fig. 2 Uptake dynamic parameters of Ca^{2+} in litchi under different temperatures and various N forms

1.242 1, $R^2 = 0.732 8^*$)。1/2 硝 + 1/2 铵营养下 I_{max} 随温度变化不大。荔枝在铵态氮营养中,随温度升高 I_{max} 经历升高-降低的交替变化过程,在 15 和 25 °C 时有较大值。

随温度升高 3 种氮营养条件下荔枝对 Ca^{2+} 的 A_m 均先下降后上升,而且 1/2 硝 + 1/2 铵和铵态氮营养下的 A_m 与温度的关系符合一元二次模型($y = 6 \times 10^{-5}x^2 - 0.002 6x + 0.320 7, R^2 = 0.944 5^*$; $y = 5 \times 10^{-5}x^2 - 0.003x + 0.350 7, R^2 = 0.860 3^*$) (图 2-B)。在 10 °C 时 3 种氮营养处理下 Ca^{2+} 的 A_m 均有最大值,而在 35 °C 时硝态氮和 1/2 硝 + 1/2 铵营养下 A_m 也较高。

随温度升高,3 种氮营养条件下荔枝吸收 Ca^{2+} 的 C_{min} 均先升高后降低,且 1/2 硝 + 1/2 铵和铵态氮营养条件下的 C_{min} 与温度的关系符合一元二次模型($y = -0.000 6x^2 + 0.028x + 3.039, R^2 = 0.926 8^*$; $y = -0.000 6x^2 - 0.036 2x + 2.652 6, R^2 = 0.808 5^*$) (图 2-C)。其中,硝态氮和 1/2 硝 + 1/2 铵营养条件下,在 10 和 35 °C 时 C_{min} 为最低且显著低于其他温度处理,在铵态氮营养条件下及 10 °C 时 C_{min} 则最低。

2.2.2 氮营养的影响 除在 30 °C 时 3 种氮素营养处理间的 I_{max} 无显著差异外,其他温度下氮营养处理间的差异显著(表 5)。在 10、15 和 25 °C 时,随着营养中铵态氮含量的增加,荔枝对 Ca^{2+} 的 I_{max} 显著提高,即硝态氮处理 < 1/2 硝 + 1/2 铵处理 < 铵态氮处理。然而在 20 和 35 °C 时,则为硝态氮处理显著高于其他两种营养处理,且在 35 °C 时 1/2 硝 + 1/2 铵处理的 I_{max} 又显著高于铵态氮处理。

除 10 °C 时 3 种营养条件下荔枝吸收 Ca^{2+} 的 A_m 差异不大外,其他温度条件下均有显著差异。硝态氮处理显著低于 1/2 硝 + 1/2 铵处理,而后者又显著或稍低于铵态氮处理(表 5)。

与荔枝吸收 Ca^{2+} 的 A_m 变化规律不同,10 和 35 °C 时 3 种营养处理之间 C_{min} 的差异不大;15~30 °C 时,硝态氮处理 C_{min} 均显著高于 1/2 硝 + 1/2 铵处理,而后者又显著高于铵态氮处理(表 5)。

2.3 荔枝吸收 Mg^{2+} 的动力学参数

从表 6 看出,温度、氮营养及两者的交互作用均显著影响荔枝吸收 Mg^{2+} 的 3 种动力学参数($p < 0.01$)。

2.3.1 温度的影响 在硝态氮营养条件下,10 °C 时荔枝吸收 Mg^{2+} 的 I_{max} 最高,随温度提高至 15 °C,则急剧显著下降,至 20 °C 时又显著提高,随后随温度继续提高而持续显著下降(图 3-A)。1/2 硝 + 1/2 铵营

表 5 相同温度下不同氮营养处理荔枝吸收 Ca²⁺动力学参数的比较(n=3)

Table 5 Comparison on uptake kinetic parameters for Ca²⁺ in litchi as affected by N form under the same temperature (n=3)

动力学参数 Kinetic parameters	N 形态 N form	培养温度 Culture temperature/°C					
		10	15	20	25	30	35
$I_{max}/(\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{h}^{-1})$	硝态氮 Nitrate	2.320±0.070 c	2.880±0.530 c	4.590±0.250 a	4.100±0.230 c	3.840±0.820 a	5.690±0.430 a
	1/2 硝 + 1/2 铵 1/2 Nitrate+1/2 Ammonia	3.850±0.350 b	4.320±1.940 b	3.200±0.260 b	4.420±1.030 b	4.720±1.330 a	4.060±0.830 b
	铵态氮 Ammonia	4.680±0.280 a	6.570±0.620 a	3.450±0.800 b	6.070±0.610 a	4.060±0.420 a	3.120±0.00 c
$A_m/(\text{L}\cdot\text{mmol}^{-1})$	硝态氮 Nitrate	0.299±0.000 a	0.280±0.003 c	0.286±0.000 c	0.280±0.004 c	0.285±0.003 c	0.294±0.007 b
	1/2 硝 + 1/2 铵 1/2 Nitrate+1/2 Ammonia	0.301±0.000 a	0.293±0.002 b	0.293±0.001 a	0.293±0.002 b	0.296±0.002 b	0.301±0.004 ab
	铵态氮 Ammonia	0.325±0.016 a	0.321±0.002 a	0.307±0.008 a	0.308±0.000 a	0.309±0.004 a	0.307±0.001 a
$C_{min}/(\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1})$	硝态氮 Nitrate	3.280±0.000 a	3.510±0.040 a	3.430±0.010 a	3.510±0.060 a	3.430±0.030 a	3.310±0.090 a
	1/2 硝 + 1/2 铵 1/2 Nitrate+1/2 Ammonia	3.250±0.000 a	3.320±0.030 b	3.350±0.020 b	3.320±0.040 b	3.300±0.010 b	3.230±0.070 a
	铵态氮 Ammonia	2.970±0.170 a	3.000±0.020 c	3.220±0.090 c	3.160±0.010 c	3.180±0.050 c	3.200±0.010 a

表 6 温度和氮营养对荔枝吸收 Mg²⁺动力学参数影响的方差分析(n=3)

Table 6 Uptake dynamic parameters for Mg²⁺ in litchi as affected by temperature and N form (n=3)

项目 Item	温度 Temperature (T)			N 形态 N form (N)			T×N		
	I_{max}	A_m	C_{min}	I_{max}	A_m	C_{min}	I_{max}	A_m	C_{min}
自由度 Freedom degree	5			2			10		
F 值 F value	14.70	6.84	9.84	29.80	20.60	24.00	19.00	4.29	6.25
P 值 P value	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	0.002	<0.001

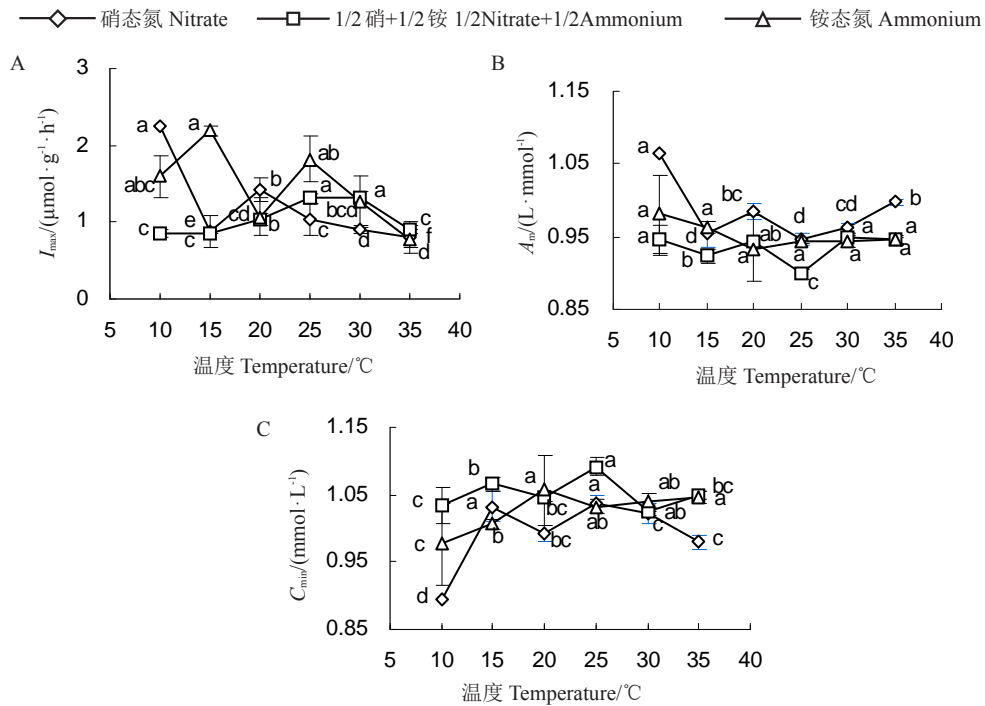


图 3 不同氮营养下荔枝吸收 Mg²⁺的动力学参数随温度变化的动态

Fig. 3 Uptake dynamic parameters of Mg²⁺ in litchi under different temperatures and N forms

养下 I_{max} 随温度升高先逐渐缓慢提高, 在 25~30 °C 范围内维持在最高水平, 随后随温度继续提高至 35 °C 则显著下降。铵态氮营养下的 I_{max} 在 10~25 °C 时呈

现出与硝态氮处理大致相反的变化趋势, 其中以 15 °C 时的 I_{max} 最大, 在 25~35 °C 时 I_{max} 随着温度升高而显著降低。

在供给硝态氮和1/2硝+1/2铵营养时,随温度升高荔枝吸收 Mg^{2+} 的 A_m 大致经历了下降-升高的剧烈交替变化过程,且在极端温度(10和35℃)时有最大值。供给铵态氮营养时虽然 A_m 随温度变化而无显著差异,但在10和15℃时有较大值(图3-B)。

荔枝吸收 Mg^{2+} 的 C_{min} 随温度的变化趋势与 A_m 大致相反(图3-C)。3种氮营养条件下,在10℃时均

有最小值,随温度升高先出现显著提高,然后呈现不同程度降低再提高的波动变化趋势。

2.3.2 氮营养的影响 如表7所示,在10℃时硝态氮处理的 I_{max} 显著高于铵态氮处理,而后者又显著高于1/2硝+1/2铵处理。15和25℃时均为铵态氮处理的 I_{max} 显著高于其他两种氮营养,其中15℃时硝态氮处理的 I_{max} 显著高于1/2硝+1/2铵处理,而

表7 相同温度下不同氮营养处理荔枝吸收 Mg^{2+} 动力学参数的比较($n=3$)

Table 7 Comparison of uptake kinetic parameters for Mg^{2+} in litchi as affected by N form under the same temperatures ($n=3$)

动力学参数 Kinetic parameters	N形态 N form	培养温度 Culture temperature/℃					
		10	15	20	25	30	35
$I_{max}/(\mu mol \cdot g^{-1} \cdot h^{-1})$	硝态氮 Nitrate	2.25±0.00 a	0.88±0.21 b	1.42±0.16 a	1.04±0.20 c	0.90±0.06 a	0.81±0.21 a
	1/2硝+1/2铵 1/2 Nitrate+1/2 Ammonia	0.85±0.00 c	0.85±0.00 c	1.03±0.08 a	1.31±0.06 b	1.32±0.07 a	0.90±0.00 a
	铵态氮 Ammonia	1.59±0.27 b	2.19±0.06 a	1.06±0.25 a	1.82±0.30 a	1.27±0.35 a	0.79±0.13 a
$A_m/(L \cdot mmol^{-1})$	硝态氮 Nitrate	1.06±0.00 a	0.95±0.02 a	0.99±0.01 a	0.95±0.01 a	0.96±0.01 a	1.00±0.00 a
	1/2硝+1/2铵 1/2 Nitrate+1/2 Ammonia	0.95±0.00 c	0.92±0.00 a	0.94±0.01 a	0.90±0.01 b	0.95±0.00 a	0.95±0.00 b
	铵态氮 Ammonia	0.98±0.05 b	0.96±0.01 a	0.93±0.05 a	0.94±0.00 a	0.94±0.01 a	0.94±0.01 c
$C_{min}/(mmol \cdot L^{-1})$	硝态氮 Nitrate	0.90±0.00 c	1.03±0.02 a	0.99±0.01 a	1.04±0.01 b	1.02±0.01 a	0.98±0.01 c
	1/2硝+1/2铵 1/2 Nitrate+1/2 Ammonia	1.03±0.00 a	1.07±0.00 a	1.05±0.01 a	1.09±0.01 a	1.03±0.01 a	1.04±0.00 b
	铵态氮 Ammonia	0.98±0.06 b	1.01±0.01 a	1.06±0.05 a	1.03±0.01 b	1.04±0.01 a	1.05±0.01 a

25℃时则为硝态氮处理的显著低于1/2硝+1/2铵处理。其他温度条件下,3种氮营养处理之间变化不大。

在10和25℃时,2个单一氮营养处理的 A_m 均显著高于1/2硝+1/2铵处理,其中10℃时硝态氮处理显著高于铵态氮处理,在25℃时两者相当。35℃时硝态氮处理的 A_m 显著高于1/2硝+1/2铵处理,而后者又显著高于铵态氮处理。在其他温度条件下,虽然硝态氮处理下的 A_m 均有较大值,但不同营养处理间较为接近(表7)。

在15、20和30℃时分别供应3种氮营养,荔枝吸收 Mg^{2+} 的 C_{min} 变化不大(表7)。10和35℃时硝态氮处理的 C_{min} 均小于其他两种氮营养处理,其中10℃时铵态氮处理的 C_{min} 小于1/2硝+1/2铵处理,而在35℃时铵态氮处理的 C_{min} 则又最大。在25℃时,2种单一氮营养处理的 C_{min} 相当,且又小于1/2硝+1/2铵处理。

3 讨论

华南荔枝通常在每年5月下旬至7月上旬收获,收获后往往进行不同程度的修剪,随后萌发1~3次秋梢。末次秋梢通常在10月中下旬至11月上旬老熟,作为翌年结果母枝。老熟的末次梢随气温降低

而进入休眠,休眠一段时间后开始花芽分化,然后大约在每年3月中下旬开始开花,4月上旬至收获前为果实膨大期。荔枝园传统的施肥方式多是采用沟施和穴施,而近些年随着设施农业的推广,越来越多的果园采用水肥一体化施肥模式。同时,荔枝的根系主要分布在0~40cm的土层中,而在滴灌施肥的果园,荔枝的根系分布更深^[32],所以本研究的温度是参考荔枝果园50cm土层深度温度的年变化来设置的。根据笔者在华南农业大学园艺学院荔枝园为期一年的温度监测数据^[33],可大致查出荔枝不同生育期的气温和地温情况。

3.1 不同生育期氮形态与钾素配施的适宜性

本研究结果表明,在10和15℃时1/2硝+1/2铵处理下,荔枝吸收 K^+ 的能力均达到最大,有最大的 I_{max} 、较高的 A_m 以及较低的 C_{min} ,而且在35℃时有较高的 I_{max} ,这与高温会导致苹果对 K^+ 的吸收和运输下降的研究结果不同^[10]。在20~30℃时,铵态氮处理的 A_m 最高、 C_{min} 最低,这与 NH_4^+ 在一定的条件下能够提高植物对 K^+ 的亲合力,进而促进 K^+ 吸收有关^[22],而且在果实膨大期和转色期荔枝对钾的需求量也会增加^[34]。因此在秋梢生长期和果实膨大期,如同时将硝态氮和铵态氮2种氮源与钾肥配施,则最有利于荔枝对钾的吸收。

3.2 不同生育期氮形态与钙素配施的适宜性

本研究表明,温度或氮营养形态对荔枝吸收 Ca^{2+} 的 I_{\max} 没有影响,但两者的交互作用有显著影响;这两个因素对荔枝吸收 Ca^{2+} 的 A_m 和 C_{\min} 的影响刚好相反。说明荔枝吸收 Ca^{2+} 的 I_{\max} 受温度和氮营养条件共同作用的影响,而温度和氮营养条件分别对 A_m 和 C_{\min} 的影响相反。硝态氮处理下荔枝吸收 Ca^{2+} 的 I_{\max} 随温度的升高而升高,而1/2硝+1/2铵和铵态氮处理在15、25和30℃时有较高的 I_{\max} ,在10~15℃时有较高的 A_m 和较低的 C_{\min} 。这表明荔枝在10~15℃的低温环境下对 Ca^{2+} 的亲合力会提高,可能与 Ca^{2+} 同抗逆性基因的表达有关^[35],即逆境环境下荔枝根系会提高对 Ca^{2+} 的亲合力。在本研究结果中,铵态氮处理下荔枝对 Ca^{2+} 的 A_m 最高,可能是与荔枝的生长需要大量的钙及多种元素间的相互作用有关^[36],需要进一步研究探讨。在荔枝秋梢生长期,施用硝酸铵钙更有利于荔枝对钙营养的吸收补充。荔枝在末次梢老熟后至开花前,除继续吸收钙和硼营养外,基本不吸收其他养分^[37],故该时期可将钙肥与少量铵态氮肥配合喷施,以促进叶片对钙的吸收。在果实膨大期,荔枝对钙的需求增加^[34]。结合本研究的结果,此时若同时供给两种形态氮,将有利于荔枝对钙肥的吸收。

3.3 不同生育期氮形态与镁素配施的适宜性

荔枝在春季,即当地温为10~20℃时对 Mg^{2+} 的吸收有较高的 I_{\max} 、较大的 A_m 和较低的 C_{\min} ,这是因为高温会使植物体内转运 Mg^{2+} 的酶钝化,影响植物对其的吸收^[38-39]。但是,在25~35℃时,1/2硝+1/2铵处理下荔枝根系吸收 Mg^{2+} 有较高的 I_{\max} ,同时荔枝生长对镁的需求量也上升^[34]。故在秋梢生长期和果实膨大期,镁肥若与两种氮素同时施用,能够有效地提高荔枝对镁肥的吸收。但是,若在秋梢老熟期至花芽分化期,单独施用镁肥即可,不需配合施用氮素。

4 结 论

温度和氮形态均能显著影响荔枝对 K^+ 、 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 的吸收。在荔枝年生长周期中,钾、钙和镁等养分的补充可以根据根际土壤温度选择合适的氮肥形态。其中在秋梢生长期和果实膨大期,硝态氮和铵态氮混合施用比单一铵态氮或硝态氮施用更有利于荔枝对钾、钙和镁养分的吸收。在秋梢老熟期至开

花前,可以将钙肥和镁肥与少量铵态氮肥配合喷施,为荔枝补充钙和镁营养。

参考文献 References:

- [1] 齐文娥,陈厚彬,李伟文,张浩军. 中国荔枝产业发展现状、趋势与建议[J]. 广东农业科学, 2016, 46(6): 173-179.
QI Wen'e, CHEN Houbin, LI Weiweng, ZHANG Haojun. Development situation, trend and suggestions of Chinese litchi industry[J]. Guangdong Agricultural Sciences, 2016, 46(6): 173-179.
- [2] 陈厚彬,庄丽娟,黄旭明,苏钻贤. 荔枝龙眼产业发展现状与前景[J]. 中国热带农业, 2013(2): 12-18.
CHEN Houbin, ZHUANG Lijuan, HUANG Xuming, SU Zuanxian. Current status and prospects of litchi longan industry development[J]. China Tropical Agriculture, 2013(2): 12-18.
- [3] PREGITER K S, KING J S. Effects of soil temperature on nutrient uptake[M]/Bassiri R H. Ecological Studies: Analysis And Synthesis. Springer Berlin Heidelberg, 2005: 277-310.
- [4] YAN Q Y, DUAN Z Q, MAO J D, LI X, DONG F. Low root zone temperature limits nutrient effects on cucumber seedling growth and induces adversity physiological response[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2013, 12(8): 1450-1460.
- [5] SAKAMOTO M, UENISHI M, MIYAMOTO K, SUZUKI, T. Effect of root-zone temperature on the growth and fruit quality of hydroponically grown strawberry plants[J]. Journal of Agricultural Science, 2016, 8(5): 123-131.
- [6] LOMAS M W, GLIBERT P M. Interactions between NH_4^+ and NO_3^- uptake and assimilation: Comparison of diatoms and dinoflagellates at several growth temperatures[J]. Marine Biology (Berlin), 1999, 133(3): 541-551.
- [7] YU C, LI C, WANG T, ZHANG M, XU J. Combined effects of experimental warming and eutrophication on phytoplankton dynamics and nitrogen uptake[J]. Water, 2018, 10(8): 1057.
- [8] SARDANS J, PENUELAS J. Introduction of the factor of partitioning in the lithogenic enrichment factors of trace element bioaccumulation in plant tissues[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2006, 115(1/3): 473-498.
- [9] CLARKE S J, LAMONT K J, PAN H Y, BARRY L A, HALL A, ROGIERS, S Y. Spring root-zone temperature regulates root growth, nutrient uptake and shoot growth dynamics in grapevines[J]. Australian Journal of Grape and Wine Research, 2015, 21(3): 479-489.
- [10] GUR A, BRAVDO B, MIZRAHI Y. Physiological responses of apple trees to supraoptimal root temperature[J]. Physiologia Plantarum, 1972, 27(2): 130-138.
- [11] TAN L P, HE J, LEE S K. Effects of root-zone temperature on the root development and nutrient uptake of *Lactuca sativa* L. "Panama" grown in an aeroponic system in the trop[J]. Journal of Plant Nutrition, 2002, 25(2): 297-314.

- [12] 宋敏丽,温祥珍,李亚灵.根际高温对植物生长和代谢的影响综述[J].生态学杂志,2010,29(11): 2258-2264.
SONG Minli, WEN Xiangzhen, LI Yaling. Effects of high rhizosphere temperature on plant growth and metabolism: A review [J]. Chinese Journal of Ecology, 2010, 29(11): 2258-2264.
- [13] BRIX H, DYHR-JENSEN K, LORENZEN B. Root-zone acidity and nitrogen source affects *Typha latifolia* L. growth and uptake kinetics of ammonium and nitrate[J]. Journal of Experimental Botany, 2002,53: 2441-2450.
- [14] 陈倩,谢旗.内质网胁迫在植物中的研究进展[J].生物技术通报,2018,34(1): 15-25.
CHEN Qian, XIE Qi. The research progress of the endoplasmic reticulum (ER) stress response in plant[J]. Biotechnology Bulletin, 2018, 34(1): 15-25.
- [15] 刘世亮,化党领,介晓磊,雷广海,张弘韬,刘芳,朱金峰.不同铵态氮/硝态氮配比营养液对烟草矿质营养吸收与积累的影响[J].土壤通报,2010,41(6): 1423-1427.
LIU Shiliang, HUA Dangling, JIE Xiaolei, LEI Guanghai, ZHANG Hongtao, LIU Fang, ZHU Jinfeng. Effect of nutrient solutions with different $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$ ratios on absorption and accumulation of mineral nutrients in tobacco[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2010, 41(6): 1423-1427.
- [16] 汤丹丹,刘美雅,张群峰,石元值,马立锋,阮建云.不同氮素形态、pH对茶树元素吸收及有机酸含量影响[J].茶叶科学,2019,39(2): 159-170.
TANG Dandan, LIU Meiya, ZHANG Qunfeng, SHI Yuanzhi, MA Lifeng, RUAN Jianyun. Effects of nitrogen form and root-zone pH on nutrient uptake and concentrations of organic anions in tea plants (*Camellia sinensis*) [J]. Journal of Tea Science, 2019, 39(2): 159-170.
- [17] 燕金香,李福明,褚光,徐春梅,陈松,章秀福,王丹英.水稻苗期根系铵钾离子吸收的交互作用研究[J].中国水稻科学,2017,31(4): 409-416.
YAN Jinxiang, LI Fuming, CHU Guang, XU Chunmei, CHEN Song, ZHANG Xiufu, WANG Danying. Study on the interaction between ammonium and potassium absorption in rice roots at the seedling stage[J]. Chinese Journal of Rice Science, 2017, 31(4): 409-416.
- [18] 封克,孙小茗,汪晓丽,盛海君.铵对不同作物根系钾高亲和转运系统的影响[J].植物营养与肥料学报,2007,13(5): 877-881.
FENG Ke, SUN Xiaoming, WANG Xiaoli, SHENG Haijun. Effect of ammonium on potassium uptake through high affinity transport system for K^+ (K^+ -HATS) of different crops[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2007, 13(5): 877-881.
- [19] 胡绵好.不同基因型水生植物对铵态氮和硝态氮吸收动力学特性研究[J].生物学杂志,2011,28(6): 10-13.
HU Mianhao. Study on the kinetic characteristics of ammonium and nitrate nitrogen uptaken by different genotypes aquatic plants[J]. Chinese Journal of Ecology, 2011, 28(6): 10-13.
- [20] 王梦柳,樊卫国.刺梨实生苗对硝态氮、铵态氮的吸收与利用差异分析[J].果树学报,2017,34(6): 682-691.
WANG Mengliu, FAN Weiguo. Differences in absorption and utilization of nitrate nitrogen and ammonium nitrogen in the seedling of *Rosa roxburghii*[J]. Journal of Fruit Science, 2017, 34(6): 682-691.
- [21] 李国栋,胡晓伟,牟梦晓,夏根清,盛卫星.不同氮素形态及配比对毛竹实生苗生长及养分吸收的影响[J].福建农林大学学报(自然科学版),2014,43(2): 151-155.
LI Guodong, HU Xiaowei, MOU Mengxiao, XIA Genqing, SHENG Weixing. Effects of different nitrogen forms and ratios on the growth and nutrients absorption of bamboo seedlings[J]. Journal of Fujian Agriculture and Forestry University (Natural Science Edition), 2014, 43(2): 151-155.
- [22] 章笑赞,祁百福,宋世威,刘厚诚,孙光闻,苏蔚,陈日远.不同铵硝比对芥蓝伤流液组分及植株氮磷钾积累的影响[J].中国蔬菜,2014(1): 31-36.
ZHANG Xiaoyun, QI Baifu, SONG Shiwei, LIU Houcheng, SUN Guangwen, SU Wei, CHEN Riyuan. Effects of different ammonium and nitrate ratios on Chinese kale bleeding sap component and its plant nitrogen, phosphorus and potassium accumulation[J]. China Vegetables, 2014 (1): 31-36.
- [23] 丁玉川,焦晓燕,聂督,李丽君,黄明镜.不同氮源与镁配施对甘蓝产量、品质和养分吸收的影响[J].中国生态农业学报,2012,20(8): 996-1002.
DING Yuchuan, JIAO Xiaoyan, NIE Du, LI Lijun, HUANG Mingjing. Effects of combined application of different nitrogen sources and magnesium fertilizers on cabbage yield, quality and nutrient uptake[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2012, 20(8): 996-1002.
- [24] ZOU C Q, WANG X F, WANG Z Y, ZHANG F S. Potassium and nitrogen distribution pattern and growth of flue-cured tobacco seedlings influenced by nitrogen form and calcium carbonate in hydroponic culture[J]. Journal of Plant Nutrition, 2005,28(12): 2145-2157.
- [25] 齐文娥,欧阳曦.气象条件对荔枝单产的影响[J].中国南方果树,2019,48(3): 47-49.
QI Wen'e, OU Yangxi. Effects of meteorological conditions on litchi yield[J]. South China Fruits, 2019, 48(3): 47-49.
- [26] 陈厚彬.当前我国荔枝龙眼芒果产业发展面临的重大问题和对策措施[J].中国果业信息,2017,34(1): 11-13.
CHEN Houbin. The major problems and countermeasures for the development of litchi industry in China[J]. China Fruit News, 2013, 34(1): 11-13.
- [27] 贾田,张新明,伏广农,龙启成.氮肥形态对荔枝植株氮素吸收分配特征的影响[J].耕作与栽培,2015(5): 7-10.
JIA Tian, ZHANG Xinming, FU Guangnong, LONG Qicheng. Effects of nitrogen form on absorption and distribution characteristics of litchi nitrogen[J]. Tillage and Cultivation, 2015(5): 7-10.

- [28] 杨苞梅, 李国良, 杨少海, 何兆桓, 周昌敏, 姚丽贤. 不同钾氮配比对荔枝果实矿质元素含量及其耐贮性的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(5): 1294-1303.
YANG Baomei, LI Guoliang, YANG Shaohai, HE Zhaohuan, ZHOU Changmin, YAO Lixian. Effect of application ratio of potassium and nitrogen on litchi fruit mineral element contents and their storage property[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2015, 21(5): 1294-1303.
- [29] 杨苞梅, 姚丽贤, 李国良, 周昌敏, 何兆桓. 荔枝叶片养分含量动态及不同比例钾、氮肥施用效应[J]. 植物营养与肥料学报, 2014, 20(5): 1212-1220.
YANG Baomei, YAO Lixian, LI Guoliang, ZHOU Changmin, HE Zhaohuan. Dynamic changes of nutrition in litchi leaves and effects of potassium and nitrogen fertilization[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2014, 20(5): 1212-1220.
- [30] 唐艺璇, 郑洁敏, 楼莉萍, 张奇春. 3种挺水植物吸收水体 NH_4^+ 、 NO_3^- 、 H_2PO_4^- 的动力学特征比较[J]. 中国生态农业学报, 2011, 19(3): 614-618.
TANG Yixuan, ZHENG Jiemin, LOU Liping, ZHANG Qichun. Comparisons of NH_4^+ , NO_3^- and H_2PO_4^- uptake kinetics in three different macrophytes in waterlogged condition[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2011, 19(3): 614-618.
- [31] 周再知, 梁坤南, 张玉臣, 黄桂华, 马华明. 柚木优良无性系根系养分吸收动力学研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2010, 16(5): 1258-1263.
ZHOU Zaizhi, LIANG Kunnan, ZHANG Yuchen, HUANG Guihua, MA Huaming. Kinetics of nutrient uptake by root system of teak superior clones[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2010, 16(5): 1258-1263.
- [32] 邓兰生, 涂攀峰, 张承林, 李中华, 曾亚妮, 谢永红. 长期滴灌施肥对荔枝根系生长及土壤 pH 的影响[J]. 安徽农业科学, 2011, 39(19): 11555-11557.
DENG Lansheng, TU Panfeng, ZHANG Chenglin, LI Zhonghua, ZENG Yani, XIE Yonghong. Effects of long-term drip fertigation on root growth of *L. chinensis* and soil pH[J]. Journal of Anhui Agriculture, 2011, 39(19): 11555-11557.
- [33] 朱陆伟, 周昌敏, 白翠华, 区宇程, 姚丽贤. 荔枝在不同温度和氮素形态下的氮、磷吸收动力学特征[J]. 植物营养与肥料学报, 2020, 26(5): 869-878.
ZHU Luwei, ZHOU Changmin, BAI Cuihua, OU Yucheng, YAO Lixian. Kinetics of nitrogen and phosphorus uptake by litchi under different temperature and N form supply[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2020, 26(5): 869-878.
- [34] 周晓超, 苏阳, 高丹, 周开兵. 叶面 K、Ca 和 Mg 营养对妃子笑荔枝果皮相应元素含量和着色的影响[J]. 福建农林大学学报(自然科学版), 2015, 44(6): 593-600.
ZHOU Xiaochao, SU Yang, GAO Dan, ZHOU Kaibing. The effects of foliar application of K, Ca and Mg on the contents of these elements in pericarp and its colouration of Feizixiao litchi[J]. Journal of Fujian Agriculture and Forestry University (Natural Science Edition), 2015, 44(6): 593-600.
- [35] 田景花, 王红霞, 张志华, 高仪. 低温逆境下两个抗寒性不同的核桃幼叶 Ca^{2+} 的亚细胞定位的变化[J]. 园艺学报, 2013, 40(3): 441-448.
TIAN Jinghua, WANG Hongxia, ZHANG Zhihua, GAO Yi. Alterations in subcellular localization of Ca^{2+} in young leaves of chilling sensitive and chilling-insensitive walnut cultivars under chilling stress[J]. Acta Horticulturae Sinica, 2013, 40(3): 441-448.
- [36] 宋喜梅, 陈菁, 杜丽清. 妃子笑荔枝树体钙素分布及累积特点[J]. 中国南方果树, 2012, 41(5): 63-65.
SONG Ximei, CHEN Jing, DU Liqing. Distribution and accumulation characteristics of calcium in Feizixiao litchi tree[J]. South China Fruits, 2012, 41(5): 63-65.
- [37] 姚丽贤, 周昌敏, 何兆桓, 李国良, 白翠华. 荔枝年度枝梢和花果发育养分需求特性[J]. 植物营养与肥料学报, 2017, 23(4): 1128-1134.
YAO Lixian, ZHOU Changmin, HE Zhaohuan, LI Guoliang, BAI Cuihua. Annual nutrient demand for the growth of autumn branch, spica and fruit in litchi[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2017, 23(4): 1128-1134.
- [38] 李惠霞, 周婷, 刘岩, 陈竹君, 周建斌. 不同番茄品种镁吸收特性比较[J]. 植物营养与肥料学报, 2018, 24(1): 187-194.
LI Huixia, ZHOU Ting, LIU Yan, CHEN Zhujun, ZHOU Jiabin. Comparison of magnesium uptake properties of three tomato cultivars[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2018, 24(1): 187-194.
- [39] 杨彬, 金小青, 陈修斌. 温度对龙葵幼苗质膜透性和抗氧化酶活性的影响[J]. 农业工程, 2018, 8(4): 123-127.
YANG Bin, JIN Xiaoqing, CHEN Xiubin. Effects of temperature on plasma membrane permeability and antioxidant enzyme activities in *Solanum nigrum* L. seedlings[J]. Agricultural Engineering, 2018, 8(4): 123-127.