



梁泳怡,王晶晶,吴炳孙,等.氮肥有机替代对橡胶树苗期养分吸收及土壤肥力的影响[J].江西农业大学学报,2023,45(4):915-930.

LIANG Y Y,WANG J J,WU B S,et al.Effects of organic fertilizer replacement of nitrogen fertilizer on nutrient uptake and soil fertility of rubber trees at seedling stage[J].Acta agriculturae universitatis Jiangxiensis,2023,45(4):915-930.

氮肥有机替代对橡胶树苗期养分吸收及土壤肥力的影响

梁泳怡^{1,2},王晶晶^{1*},吴炳孙^{2,3},林晓燕^{1,2},程琦雯^{1,2},
何雨可^{1,2},李佳乐⁴,徐文娴⁴

(1.海南大学 林学院,海南 海口 570228;2.中国热带农业科学院 橡胶研究所,海南 海口 571101;3.农业农村部 橡胶树生物学与遗传资源利用重点实验室/省部共建国家重点实验室培育基地——海南省热带作物栽培生理学重点实验室/农业农村部儋州热带作物科学观测实验站,海南 儋州 571737;4.海南大学 生态与环境学院,海南 海口 570228)

摘要:【目的】为明确有机肥替代化学氮肥对橡胶树苗期养分吸收及土壤肥力的影响。【方法】采用盆栽试验,以6月龄热研‘7-33-97’品系橡胶幼苗为材料,采用等氮替换方案设置5个施肥处理:100%化学氮肥(N)和有机肥分别替代25%、50%、75%和100%化学氮肥(25%M、50%M、75%M和100%M),研究不同处理橡胶树苗对养分的吸收、利用及分配特征和土壤肥力的影响。【结果】与N处理相比,有机肥替代化学氮肥处理均显著提高橡胶幼苗地上和地下部氮磷钾素养分积累量及养分利用效率,其中75%M处理的养分积累量和利用效率(表观利用率、偏生产力 and 农学利用效率等指标)最大;此外,有机肥替代化学氮肥处理还显著增加橡胶树苗总生物量,地上和地下部分生物量分别增加162%~352%和76%~210%,其中75%M处理的总生物量最大,根冠比显著下降35%~57%($P<0.05$)。与N处理相比,有机肥替代化学氮肥处理的土壤有机质含量显著升高46%~157%($P<0.05$);土壤铵态氮和硝态氮含量有所降低;土壤pH值均显著升高,维持在5.29~6.11($P<0.05$)。结构方程模型(SEM)分析表明,有机肥替代化学氮肥主要通过增加土壤有机质来保障土壤养分的供应,进而影响橡胶树在苗期的养分吸收量和生物量($P<0.05$)。【结论】有机肥替代化学氮肥能显著提高橡胶幼苗的养分利用效率和土壤有机质含量,促进橡胶树苗生长,以有机肥替代75%化学氮肥处理效果最优,这为橡胶树苗期科学施肥提供了参考。

关键词:橡胶树;有机肥替代化学氮肥;养分积累;养分利用效率;土壤肥力;结构方程模型

中图分类号:S158.3;S143;S141 文献标志码:A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):

文章编号:1000-2286(2023)04-0915-16



Effects of Organic Fertilizer Replacement of Nitrogen Fertilizer on Nutrient Uptake and Soil Fertility of Rubber Trees at Seedling Stage

LIANG Yongyi^{1,2}, WANG Jingjing^{1*}, WU Bingsun^{2,3}, LIN Xiaoyan^{1,2},
CHENG Qiwen^{1,2}, HE Yuke^{1,2}, LI Jiale⁴, XU Wenxian⁴

收稿日期:2023-02-15 修回日期:2023-04-19

基金项目:海南省自然科学基金高层次人才项目(320RC486)和国家重点研发计划项目(2018YFD0201105)

Project supported by the Natural Science Foundation High-level Talents Project of Hainan Province (320RC486) and the National Key R&D Program of China (2018YFD0201105)

作者简介:梁泳怡,硕士生,orcid.org/0009-0001-4044-3039,lyy5991017@163.com;*通信作者:王晶晶,讲师,博士,主要从事土壤物理过程与环境,水土资源利用与农业可持续发展等研究,orcid.org/0009-0007-9778-302X, pink_wangjing@163.com。

(1.School of Forestry, Hainan University, Haikou 570228, China; 2.Institute of Rubber, China Academy of Tropical Agriculture, Haikou 571101, China; 3. Key Laboratory of Rubber Biology and Genetic Resource Utilization, Ministry of Agriculture and Rural Affairs/State Key Laboratory Breeding Base of Cultivation and Physiology of Tropical Crops/Danzhou Investigation & Experiment Station of Tropical Crops, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Danzhou, Hainan 571737, China; 4. School of Ecological and Environmental Science, Hainan University, Haikou 570228, China)

Abstract: [Objective] The experiment is expected to clarify the effects of organic fertilizer replacing chemical nitrogen fertilizer on nutrient accumulation and utilization, and soil fertility of rubber seedlings, thus providing a theoretical and practical basis for scientifically and rationally fertilization for the growth of rubber trees at seedling stage. [Method] Pot experiments were conducted and rubber seedlings of line Reyan '7-33-97' were cultivated under five treatments: 100% application of chemical fertilizer (N), and organic fertilizer replacing 25%, 50%, 75% and 100% chemical fertilizer (25% M, 50% M, 75% M, 100% M) respectively. The effects of different treatments of rubber tree seedlings on nutrient absorption, utilization and distribution characteristics and soil fertility were studied. [Result] (1) compared with the N treatment, the organic fertilizer replacing nitrogen fertilizer treatments significantly increased the accumulation of nitrogen, phosphorus and potassium nutrients and use efficiency of rubber seedlings above and below the ground, with the 75% M treatment having the best effect ($P < 0.05$), and its nitrogen, phosphorus and potassium nutrient accumulation and nutrient use efficiency (recovery efficiency, partial productivity, agronomy efficiency and other indicators) were the highest. (2) The organic fertilizer replacing nitrogen fertilizer treatment significantly increased the total biomass of rubber seedlings, the above-ground and under-ground biomass increased by 162%–352% and 76%–210%, respectively, with 75%M had the highest total biomass and the best treatment effect, and the root top ratio significantly decreased ($P < 0.05$). (3) Compared with the N treatment, the soil organic matter content under the organic fertilizer replacing nitrogen fertilizer treatment significantly increased by 46%–157%; the soil ammonium and nitrate contents decreased with different degrees. Soil pH was significantly higher and maintained at 5.29–6.11 ($P < 0.05$). (4) Structural equation modeling (SEM) analysis showed that organic fertilizer replacing chemical nitrogen fertilizers mainly increased soil organic matter to secure soil nutrient supply, which in turn affected nutrient uptake and biomass ($P < 0.05$). [Conclusion] Organic fertilizer replacing chemical nitrogen fertilizer can significantly improve the nutrient use efficiency and soil organic matter content of rubber seedlings, effectively maintain the soil acid-base and promote the soil environment for the growth of rubber trees at seedling stage, and the replacement of organic fertilizer with 75% chemical nitrogen fertilizer was the best treatment.

Keywords: rubber tree; organic fertilizer replacing nitrogen fertilizer; nutrient accumulation; nutrient use efficiency; soil fertility; structural equation model

【研究意义】橡胶树((*Hevea brasiliensis*)(Willd. ex A. Juss.)Müll. Arg.))为大戟科橡胶树属多年生热带雨林乔木树种,其所产生的胶乳称为天然橡胶,被广泛应用于国防、交通、医药卫生领域和日常生活等方面^[1-3]。橡胶树的苗期管理关乎橡胶树的生长和割胶等,因此培育优质橡胶树苗木是天然橡胶产业稳定发展的重要途径之一^[4]。研究表明不施氮肥、氮肥施用量不足或供氮过多,都会影响橡胶幼苗的正常生长发育^[5]。杨丽萍等^[6]研究发现随供氮水平的提高,呈现橡胶树幼苗氮素和干物质积累量增加、对肥料氮素的吸收利用率下降等趋势,说明在肥料适宜施用范围内,施用氮肥可以促进橡胶幼苗生长、提高肥料对橡胶苗生长所需氮素的贡献率。施肥是保证橡胶树生长、增产稳产的一项重要措施^[7],但由于植胶区处于热带、亚热带地区,土壤富铝化作用强烈,盐基成分大量流失,土壤多为酸性,肥力较低^[8],加之橡

胶树是多年生的经济作物,在种植过程中长期大量施用化肥,有机肥施用量少,导致胶园土壤出现了明显酸化、有效养分降低等负面影响,胶树也常出现缺素和营养失调等问题^[9],这不利于橡胶树长期稳产高产和胶园土壤培肥,而且只有在施用有机肥的基础上施化肥才能充分发挥化肥的作用^[10-11]。为促进天然橡胶产业的可持续发展,在橡胶栽培过程中采用有机肥替代化肥的施肥方式至关重要^[9]。【前人研究进展】氮素是作物生长发育过程中必需的大量元素之一,大量研究表明合理施氮可以优化根系结构和养分吸收效率,进而促进干物质的积累;而过量施氮易引发地下水硝酸盐污染和江河湖泊富营养化等^[12-14]。作为化肥零增长目标的重要实现方式之一,有机肥替代化肥方式比传统的化肥单施方式可显著提高植物叶片的叶绿素含量和植株对氮、磷和钾的累积吸收^[15-17],进而提高植株氮素表观利用率、偏生产力、肥料氮贡献率和农学效率^[18-19],是实现作物稳定增产和提高资源利用效率的重要因素^[20];与此同时增加了土壤有机碳浓度和降低氮素淋溶风险^[21]。树木在苗期通常较为脆弱,对施肥等土壤养分变化较为敏感^[22-24]。研究橡胶树苗期的养分管理措施(如有机肥替代化学氮肥)及其对苗期生长、养分吸收利用的影响,对苗期科学施肥、降低树苗移栽大田后养分的淋失具有重要意义^[25]。前人开展了大量有机肥替代化肥研究,主要以粮食^[26]、蔬菜^[27]、茶叶^[28]等作物居多,结果表明有机肥替代化学氮肥方式的养分供应与作物营养需求相匹配,能够有效地提高肥料利用率,促进作物吸收利用各种营养元素,增加作物产量,减少养分损失^[29]。在橡胶生产上,开沟施用有机肥对提高投产胶园土壤物理性状和开割橡胶树的产胶均有良好的效果^[30]。【本研究切入点】前人研究表明,影响橡胶幼苗生长的首要限制营养因素是氮素养分,因此在生产实际施肥中,要适当增施氮肥,减施磷、钾肥,同时要加强对有机肥施用,以提高土壤有机氮含量^[31],而目前关于有机肥替代氮肥施用对橡胶树苗期的生长和养分利用等特征影响的研究成果较少。【拟解决的关键问题】本研究采用盆栽试验方法,分析有机肥替代不同比例化学氮肥后橡胶幼苗生长、养分吸收与分配利用及土壤理化性质的变化规律,探讨氮肥有机替代对橡胶幼苗生长、养分吸收利用和土壤肥力的影响,并利用结构方程模型明确橡胶树苗期生物量增加的主要途径,以为橡胶树有机肥替代化肥的减施化肥模式提供理论依据。

1 材料与方 法

1.1 供试材料

供试橡胶幼苗:试验选取中国热带农业科学院橡胶研究所提供的生长状况一致的6月龄热研7-33-97品系橡胶组培幼苗。

试验土壤采自海南省儋州市中国热带农业科学院橡胶研究所三队幼龄橡胶园近5年未施用任何肥料地块的土壤,实验室测定的土壤pH值为5.5、有机质含量为19.7 g/kg、全氮含量为1.1 g/kg、氨态氮和硝态氮含量分别为3.5 g/kg和19.8 g/kg。

供试有机肥:试验所用有机肥为橡胶所三队所收集的牛粪,实验室测定的有机肥理化指标为:pH值为7.72、全氮含量为5.76 g/kg、全磷含量为0.29 g/kg和全钾含量为0.27 g/kg。

1.2 试验设计

设置盆栽试验,于2020年4—12月于海南大学儋州校区农科基地物联网大棚1#棚南区(19°23'50"N, 109°29'16"E)进行。根据橡胶树生长物候期,橡胶树1—4月为大量集中落叶期^[32],因此该试验于2020年4月将试验橡胶幼苗栽植于圆形塑料桶(直径40 cm、高度52 cm)中,在2020年4—5月进行缓苗,待橡胶幼苗稳定存活后于2020年6月对橡胶幼苗进行施肥处理,进入落叶期不利于采集新鲜成熟叶片,因此至2020年12月试验结束。以等氮(全氮)替换的方案共设置施100%化学氮肥(N)、有机肥替代25%化学氮肥(25%M)、有机肥替代50%化学氮肥(50%M)、有机肥替代75%化学氮肥(75%M)和有机肥替代100%化学氮肥(100%M)共5个施肥处理,每处理共3个重复,每个重复共9株幼苗,每盆栽植1株橡胶幼苗,共计135株幼苗。根据常规橡胶园每年实际施肥状况,每公顷施尿素853.5 kg/hm²(含46%N)、过磷酸钙648.0 kg/hm²(含12%P₂O₅)和氯化钾86.4 kg/hm²(含60%K₂O),据此换算出盆栽实验面积所对应的肥料施加量,即N处理每盆单株橡胶幼苗每年对应施肥总量为:尿素10.72 g(含4.93 g全氮)、过磷酸钙8.14 g(含0.98 g全磷)和氯化钾1.08 g(含0.65 g全钾)。按等氮原则换算出25%M、50%M、75%M和100%M处

理的有机肥施用量分别为217.98, 427.95, 641.93, 855.90 g。其中有机肥替代化学氮肥的处理为在总氮量不变的情况下, 有机肥中氮的占比分别设为100%、75%、50%、25%, 其中磷和钾总量与100%施化学氮肥处理的磷钾施用量等量, 扣除有机肥的磷钾供应量后, 磷钾不足部分以化肥补充。试验期间温室大棚室温控制为28℃, 每株幼苗每日浇水约100 mL, 约光照10 h。试验期间各处理盆栽橡胶幼苗具体施肥方案见表1。

表1 各处理施肥方案
Tab.1 Fertilization treatment plan

处理 Treatment		每盆施肥总量/g Amount of fertilizer applied per potted plant			
		尿素 Urea	过磷酸钙 Calcium superphosphate	氯化钾 Muriate of potash	有机肥 Organic fertilizer
100%施化学氮肥 100% application of chemical fertilizer	N	10.72	8.14	1.08	0.00
有机肥替代化学氮肥 Organic fertilizer replacing chemical fertilizer	25%M	8.04	7.65	0.99	213.98
	50%M	5.36	7.13	0.89	427.95
	75%M	2.68	6.62	0.79	641.93
	100%M	0	6.10	0.69	855.90

N: 100% 施化学氮肥; 25%M: 有机肥替代25% 化学氮肥; 50%M: 有机肥替代50% 化学氮肥; 75%M: 有机肥替代75% 化学氮肥; 100%M: 有机肥替代100% 化学氮肥。

N: 100% application of chemical fertilizer; 25%M: Organic fertilizer replaces 25% of chemical fertilizer; 50%M: Organic fertilizer replaces 50% of chemical fertilizer; 75%M: Organic fertilizer replaces 75% of chemical fertilizer; 100%M: 100% organic fertilization.

1.3 样品采集

在试验期间, 每隔2个月对幼苗株高、基径进行测量。分别于2020年8、10和12月以破坏性实验的方式收获植株, 每个处理每次收获9株幼苗(每次共计收获45株), 具体为一个处理的每一个重复随机选取3株幼苗进行收获, 3个重复共计收获9株橡胶幼苗, 后用蒸馏水洗净和擦干, 按照根、茎和叶分别剪下作为植物样品。先将采集裁剪的植物样品于105℃杀青30 min, 70℃恒温烘干8 h至恒重后, 进行植物生物量的测量, 后将干燥的植物样品用磨样机进行粉碎, 过0.25 mm筛后密封保存, 用于氮磷钾含量等指标的测定。

1.4 样品分析测定

采用烘干法测定植物生物量; 采用 $H_2SO_4-H_2O_2$ 蒸馏, 全自动凯氏定氮仪(FOOKS K8200+梅特勒DL15型, 瑞典)测定植物样品N含量; 采用钼锑抗比色法, 紫外可见分光光度计(thermo scientific genesys 50型, 美国)测定植物样品P含量; 采用火焰分光光度计(Sherwood M410工业型, 英国)测定植物样品K含量; 采用水土比2.5:1浸提后酸度计测量土壤pH值, 采用重铬酸钾容量-外加加热法测定土壤有机碳含量; 采用KCl浸提, 全自动流动分析仪(Proxima1022/1/1, 爱利安斯科学仪器公司, 法国)测定土壤铵态氮和硝态氮含量^[33]。

1.5 计算方法

植株氮(磷, 钾)养分积累量 = 植株生物量 × 氮(磷, 钾)素养分含量, 氮(磷, 钾)素养分利用效率的计算方法^[18, 34-37]:

$$\text{表观利用率} = (N - N_0) / F \times 100\% \quad (1)$$

$$\text{偏生产力} (g \cdot g^{-1}) = Y / F \quad (2)$$

$$\text{肥料贡献率} = (Y - Y_0) / Y \times 100\% \quad (3)$$

$$\text{施肥效率} (g \cdot g^{-1}) = (Y - Y_0) / F \quad (4)$$

式中Y—不同施肥处理所获得的橡胶幼苗生物量; Y_0 —N处理所获得的橡胶幼苗生物量; N—不同施肥处

理的橡胶幼苗地上部氮(磷,钾)素养分总积累量; N_0 —N处理地上部的橡胶幼苗氮(磷,钾)素养分总积累量; F —为施氮(磷,钾)总量。

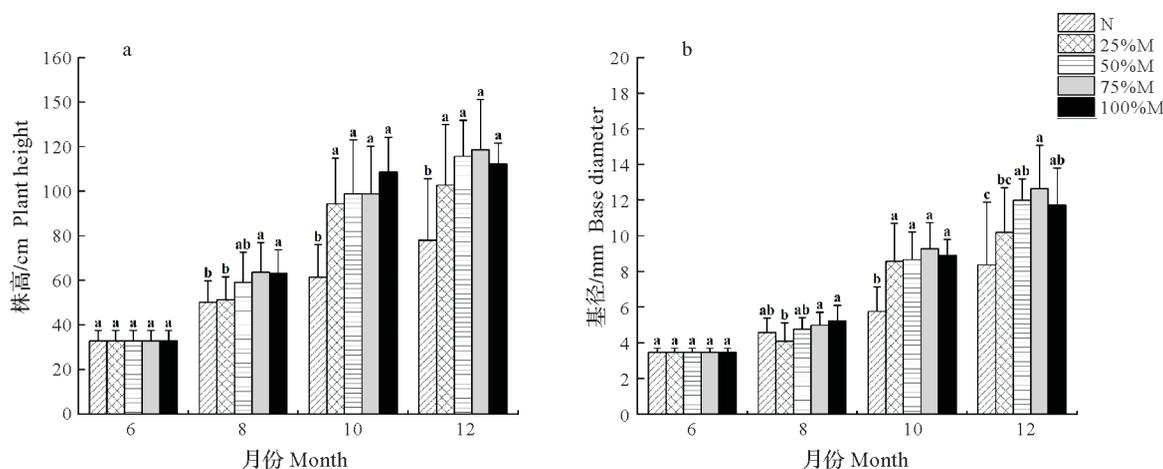
1.6 数据处理与分析

试验数据在Excel中进行整理和计算;利用SPSS 25.0软件对数据进行差异显著性检验(LSD法, $\alpha=0.05$)、Origin 2021软件进行绘图、采用Amos Graphics,根据SEM建模原理^[38-39]进行结构方程模型拟合与构建。

2 结果与分析

2.1 有机肥替代化学氮肥对橡胶幼苗生长的影响

2.1.1 有机肥替代化学氮肥对橡胶幼苗株高、基径的影响 由图1可知,随着橡胶幼苗生长,施肥处理对橡胶幼苗的株高、基径生长有明显的促进作用。与N处理比较,10和12月有机肥替代化学氮肥处理下橡胶幼苗株高增长效果显著($P<0.05$;图1a),分别显著升高54%、61%、61%、77%和32%、48%、52%、44% ($P<0.05$)。对于橡胶幼苗基径的生长,与N处理比较,10月有机肥替代化学氮肥处理下橡胶幼苗基径增长效果较12月更为显著,其中10月有机肥替代化学氮肥处理下橡胶幼苗基径分别为显著升高49%、51%、62%、55% ($P<0.05$),12月橡胶幼苗基径升高22%、43%、51%及40%(图1b)。



不同小写字母表示同一月份不同处理间差异显著($P<0.05$)。

Different small letters meant significant difference among treatments in the same month at 0.05 level.

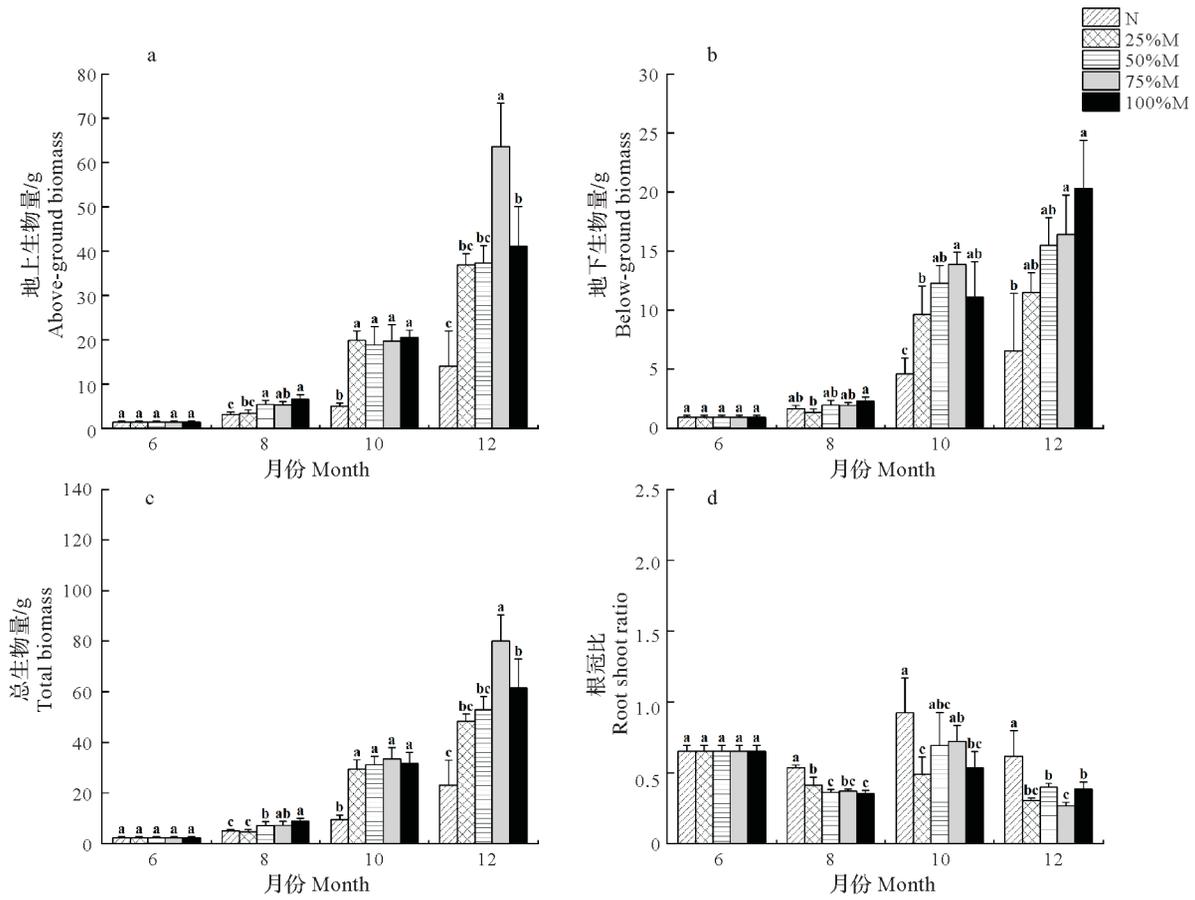
图1 不同施肥处理对橡胶幼苗株高和基径的影响

Fig.1 Effect of different fertilization treatments on plant height and basal diameter of rubber seedlings

2.1.2 有机肥替代化学氮肥对橡胶幼苗生物量、根冠比的影响 由图2可知,在N和有机肥替代化学氮肥处理下,橡胶幼苗的生物量积累逐渐呈现上升的趋势,说明施肥对橡胶幼苗生物量积累有显著的促进作用。12月,与N处理相比,12月有机肥替代25%、50%、75%和100%化学氮肥的施肥处理下总生物量分别显著升高110%、129%、247%和166%(图2c),其中地上和地下生物量分别显著升高162%、165%、352%、192%和76%、136%、150%、210%(图2a,b),根冠比显著下降50%、35%、57%和38% ($P<0.05$;图2d)。

2.2 有机肥替代化学氮肥对橡胶幼苗养分吸收与分配的影响

2.2.1 有机肥替代化学氮肥对橡胶幼苗氮、磷、钾素养分吸收的影响 由图3可知,与N处理相比,有机肥替代化学氮肥处理都分别显著增加了橡胶幼苗地上部分的氮磷钾素养分积累量($P<0.05$),说明有机肥替代化学氮肥能够显著促进橡胶幼苗各部分的氮磷钾素养分积累。比较各施肥处理的橡胶幼苗地上部分氮磷钾素养分积累量,发现随着有机肥替代化学氮肥比例的增加,氮磷钾的养分积累量都呈现出先升高后降低的趋势,其中75%M处理下的氮磷钾养分积累量最大,分别为2790.22,348.09,239.19 mg/plan,比N处理养分积累量分别提高357%、1388%和6% ($P<0.05$)。有机肥替代化学氮肥不同处理对橡胶幼苗地上部分氮磷素养分积累的影响顺序为75%M>100%M>50%M>25%M,钾素养分积累的影响顺序为75%M>100%M>25%M>50%M(图3a)。



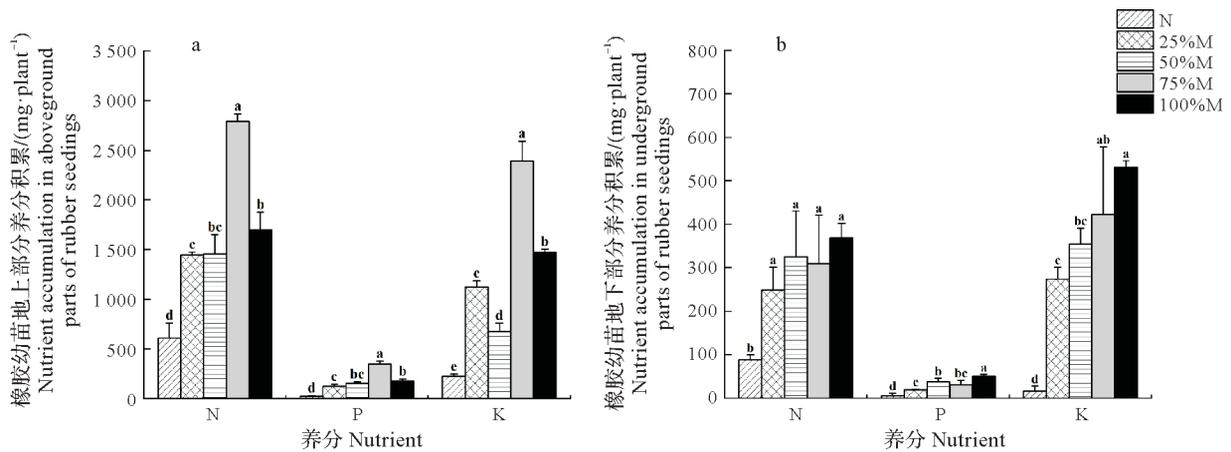
不同小写字母表示同一月份不同处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

Different small letters meant significant difference among treatments in the same month at 0.05 level.

图 2 不同施肥处理对橡胶幼苗生物量、根冠比的影响

Fig.2 Effects of different fertilization treatments on biomass and root-shoot ratio of rubber seedlings

比较各处理橡胶幼苗地下部分的氮磷钾素养分积累量,随着有机肥替代化肥比例的增加,氮素养分含量逐渐升高,100%M处理最大,分别为 368.85, 50.15, 531.19 mg/plant,比 N ($P < 0.05$)处理养分积累量分别提高 319%、941%和 3 241% ($P < 0.05$)。有机肥替代化学氮肥不同处理对橡胶幼苗地下部分氮磷素养分积累的影响顺序为 100%M > 50%M > 75%M > 25%M,钾素养分积累的影响顺序为 100%M > 75%M > 50%M > 25%M (图 3b)。



不同小写字母表示同一月份不同处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

Different small letters meant significant difference among treatments in the same month at 0.05 level.

图 3 不同施肥处理对橡胶幼苗氮磷钾养分积累的影响

Fig.3 Effects of different fertilization treatments on nitrogen, phosphorus and potassium nutrient accumulation in rubber seedlings

3.2.2 有机肥替代化学氮肥对橡胶幼苗养分分配的影响 有机肥替代化学氮肥对橡胶幼苗的养分积累与分配具有重要影响(图4)。由于橡胶幼苗地上和地下部分生物量分配的不同(图4d),养分积累在植株中的分配也有明显差异(图4a,b,c)。对比橡胶幼苗地上和地下部分的养分分配格局,可以发现,不同的施肥处理下,橡胶幼苗地上部分的养分分配比例皆明显大于地下部分的养分分配比例。其中,75%M处理下,橡胶幼苗地上部分的氮和磷素养分分配比例最大(图4a,b),分别占植株养分积累量的90%和92%,是地下部分养分分配比例的9.02和11.56倍;N处理下,橡胶幼苗地上部分的钾素养分的分配比例最大,占植株养分积累量的93%,是地下部分养分分配比例的14.13倍(图4c)。

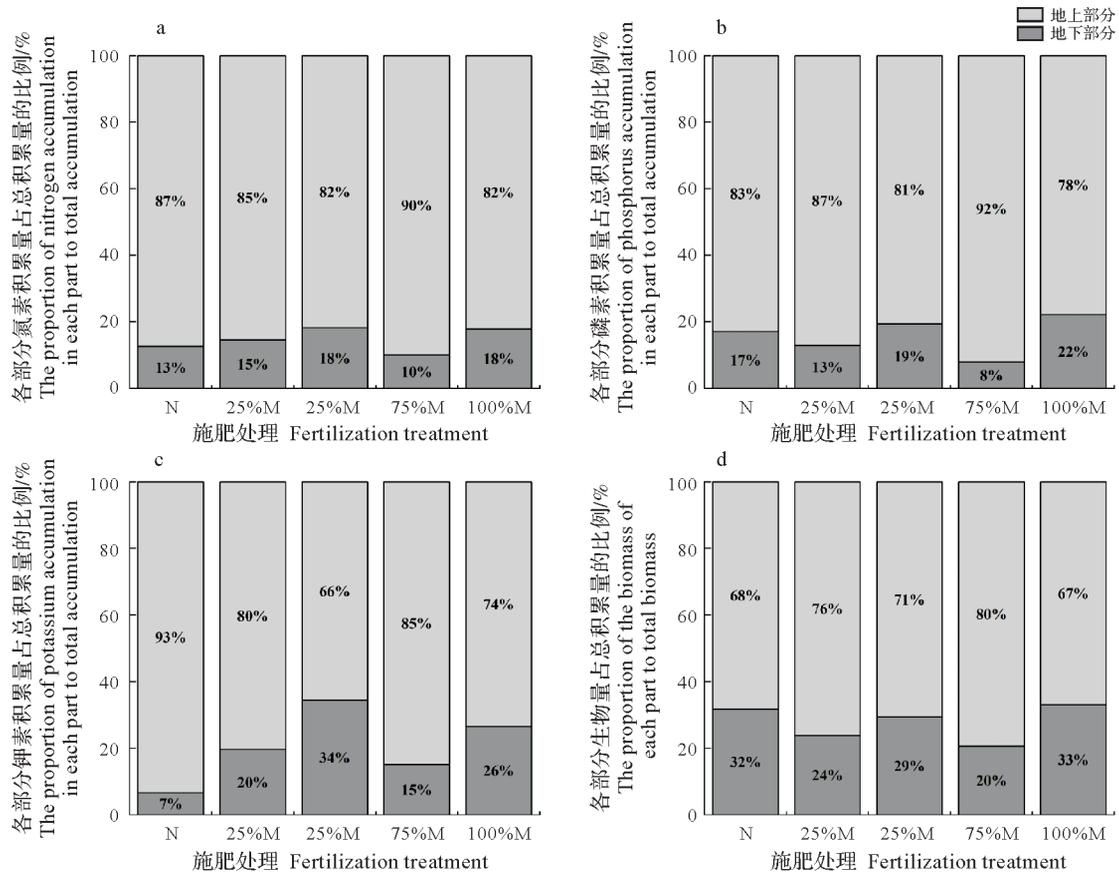


图4 不同施肥处理下橡胶幼苗养分、生物量分配格局

Fig.4 Distribution patterns of nutrients and biomass of rubber seedlings under different fertilization

2.3 有机肥替代化学氮肥对橡胶幼苗养分利用效率的影响

2.3.1 有机肥替代化学氮肥对橡胶幼苗氮素利用率的影响 养分利用效率反映了橡胶幼苗对养分环境的适应和利用状况。从表2可以看出,有机肥替代化学氮肥处理的偏生产力显著高于N处理,其中75%M处理的氮素偏生产力显著高出N处理2.5个百分点($P<0.05$)。各替代处理的氮素利用效率进行比较,发现75%M处理的氮素利用效率显著高于100%M、50%M和25%M处理,其中表观利用率分别显著高出1个、1.57个和1.6个百分点,氮素偏生产力分别显著高出0.24个、0.61个和0.74个百分点,肥料贡献率分别显著高出0.11个、0.32个和0.4个百分点,施肥效率分别显著高出处理0.37个、1.13个和1.46个百分点($P<0.05$)。其中,25%M与50%M处理间肥料氮表观利用率和偏生力没有显著差异,其余各处理间差异显著($P<0.05$)。随着替代比例的增加,各处理的氮素利用效率逐渐升高,可以得出,各替代比例间的氮素利用率影响顺序为75%M>100%M>50%M>25%M。

2.3.2 有机肥替代化学氮肥对橡胶幼苗磷素利用率的影响 从表3可以看出,有机肥替代化学氮肥处理的磷素利用效率均显著高于N处理,其中75%M处理的偏生产力显著高出N处理2.02个百分点($P<0.05$)。各替代处理间的磷素利用效率进行比较,发现75%M处理的磷素利用率均显著高于25%M、50%M和100%M处理,其磷素表观利用率分别显著高出2.19个、1.48个和1.13个百分点,偏生产力分别显著高出0.74个、0.61个和0.24个百分点,施肥效率分别显著高出1.46个、1.13个和0.37个百分点,其中

25%M 和 50%M 处理间养分利用效率没有显著差异,其余各处理间差异显著($P<0.05$)。随着替代比例的增加,各处理的磷素利用效率呈现先升高后降低的趋势,但总的来看,各替代比例间的磷素利用率影响顺序为 75%M>100%M>50%M>25%M。

表 2 不同施肥处理对橡胶幼苗氮素利用效率的影响

Tab.2 Effects of different fertilization treatments on nitrogen use efficiency of rubber seedlings

处理 Treatment	表观利用率/% Recovery efficiency	偏生产力/($g \cdot g^{-1}$) Partial productivity	肥料贡献率/% Fertilizer contribution	施肥效率/($g \cdot g^{-1}$) Fertilization efficiency
N	/	4.70±0.36 ^d	/	/
25%M	17.01±0.32 ^c	9.50±0.09 ^c	50.45±1.01 ^d	4.79±0.19 ^c
50%M	17.21±2.27 ^c	10.23±0.24 ^c	53.98±1.13 ^c	5.53±0.25 ^b
75%M	44.31±0.90 ^a	16.49±0.67 ^a	71.39±1.12 ^a	11.79±0.67 ^a
100%M	22.20±2.05 ^b	13.33±0.57 ^b	64.59±1.57 ^b	8.63±0.57 ^b

N:100%施化学氮肥;25%M:有机肥替代25%化学氮肥;50%M:有机肥替代50%化学氮肥;75%M:有机肥替代75%化学氮肥;100%M:有机肥替代100%化学氮肥。不同小写字母表示不同施肥处理间的氮素利用效率存在差异显著($P<0.05$)。

N:100% application of chemical fertilizer;25%M:Organic fertilizer replaces 25% of chemical fertilizer;50%M:Organic fertilizer replaces 50% of chemical fertilizer;75%M:Organic fertilizer replaces 75% of chemical fertilizer;100%M:100% organic fertilization.Different lowercase letters indicate that there is a significant difference in nitrogen utilization efficiency between different fertilization treatments, at the level of 0.05.

表 3 不同施肥处理下对橡胶树苗磷素利用效率的影响

Tab.3 Effects of different fertilization treatments on phosphorus utilization efficiency of rubber seedlings

处理 Treatment	表观利用率/% Recovery efficiency	偏生产力/($g \cdot g^{-1}$) Partial productivity	施肥效率/($g \cdot g^{-1}$) Fertilization efficiency
N	/	27.37±5.48 ^d	/
25%M	10.39±1.07 ^c	47.70±0.95 ^c	24.08±0.95 ^c
50%M	13.37±0.84 ^{bc}	51.37±1.23 ^c	27.76±1.23 ^c
75%M	33.13±1.76 ^a	82.80±3.36 ^a	59.19±3.36 ^a
100%M	15.54±1.28 ^b	66.94±2.85 ^b	43.33±2.85 ^b

N:100%施化学氮肥;25%M:有机肥替代25%化学氮肥;50%M:有机肥替代50%化学氮肥;75%M:有机肥替代75%化学氮肥;100%M:有机肥替代100%化学氮肥。不同小写字母表示不同施肥处理间的磷素利用效率存在差异显著($P<0.05$)。

N:100% application of chemical fertilizer;25%M:Organic fertilizer replaces 25% of chemical fertilizer;50%M:Organic fertilizer replaces 50% of chemical fertilizer;75%M:Organic fertilizer replaces 75% of chemical fertilizer;100%M:100% organic fertilization.Different lowercase letters indicate that there is a significant difference in phosphorus utilization efficiency between different fertilization treatments, at the level of 0.05.

2.3.3 有机肥替代化学氮肥对橡胶幼苗钾素利用率的影响 从表4可以看出,有机肥替代化学氮肥处理的偏生产力显著高于N处理,其中75%M处理的钾素偏生产力显著高出N处理2.03个百分点($P<0.05$)。各替代处理间的钾素利用效率进行比较,发现75%M处理的钾素利用率均显著高于25%M、50%M和100%M处理,其钾素表观利用率分别显著高出1.40个、3.81个和0.73个百分点,偏生产力分别显著高出0.74个、0.61个和0.24个百分点,施肥效率分别显著高出1.46个、1.13个和0.37个百分点($P<0.05$)。其中50%M与25%M处理间的钾素偏生产力和施肥效率差异不显著,其余各处理间差异显著($P<0.05$)。随着替代比例的增加,各处理的钾素利用效率呈现先升高后降低的趋势,但总的来看,各替代比例间的钾素利用率影响顺序为75%M>100%M>50%M>25%M。

2.4 有机肥替代化学氮肥对土壤理化性质的影响

2.4.1 有机肥替代化学氮肥对土壤有机质的影响 有机肥替代化学氮肥能有效地提升土壤肥力。土壤有机质是深刻影响土壤质地和结构的重要因素,并且是土壤养分的重要储藏库。如表5所示,与N处理比较,发现在不同月份中,有机肥替代化学氮肥处理下的土壤有机质均显著升高($P<0.05$),其中100%M处理与N处理的差异最大,8—12月分别高出46%~157%。各替代处理间比较,8月各处理间存在显著性差异,变化幅度大;随着橡胶幼苗种植时间的加长,12月100%M处理均与75%M和50%M处理的差异不显著,其余替代处理间差异显著,但变化幅度较小($P<0.05$)。

表4 不同施肥处理下对橡胶树苗钾素利用效率的影响

Tab.4 Effects of different fertilization treatments on potassium utilization efficiency of rubber seedlings

处理 Treatment	表观利用率/% Recovery efficiency	偏生产力/(g·g ⁻¹) Partial productivity	施肥效率/(g·g ⁻¹) Fertilization efficiency
N	/	41.26±8.27 ^d	/
25%M	138.62±5.34 ^c	71.91±1.43 ^c	36.31±1.43 ^c
50%M	69.34±7.42 ^d	77.45±1.86 ^c	41.85±1.86 ^c
75%M	333.31±17.92 ^a	124.84±5.06 ^a	89.24±5.06 ^a
100%M	192.21±2.54 ^b	100.92±4.30 ^b	65.32±4.30 ^b

N: 100%施化学氮肥; 25%M: 有机肥替代25%化学氮肥; 50%M: 有机肥替代50%化学氮肥; 75%M: 有机肥替代75%化学氮肥; 100%M: 有机肥替代100%化学氮肥。不同小写字母表示不同施肥处理间的钾素利用效率存在差异显著($P < 0.05$)。

N: 100% application of chemical fertilizer; 25%M: Organic fertilizer replaces 25% of chemical fertilizer; 50%M: Organic fertilizer replaces 50% of chemical fertilizer; 75%M: Organic fertilizer replaces 75% of chemical fertilizer; 100%M: 100% organic fertilization. Different lowercase letters indicate that there is a significant difference in potassium utilization efficiency between different fertilization treatments, at the level of 0.05.

表5 不同施肥处理对土壤有机质的影响

Tab.5 Effects of different fertilization treatments on soil organic matter

g·kg⁻¹

处理 Treatment	8月 August	10月 October	12月 December
N	26.95±1.82 ^d	39.91±1.21 ^d	25.56±1.03 ^d
25%M	38.08±1.85 ^c	49.48±0.65 ^c	32.60±1.12 ^c
50%M	45.13±1.36 ^b	52.44±0.91 ^{bc}	35.84±0.75 ^b
75%M	40.82±1.90 ^{bc}	55.06±1.15 ^{ab}	38.99±1.66 ^a
100%M	69.30±4.79 ^a	58.10±1.90 ^a	37.99±1.03 ^{ab}

N: 100%施化学氮肥; 25%M: 有机肥替代25%化学氮肥; 50%M: 有机肥替代50%化学氮肥; 75%M: 有机肥替代75%化学氮肥; 100%M: 有机肥替代100%化学氮肥。不同小写字母表示同一月份不同施肥处理间土壤有机质含量差异显著($P < 0.05$)。

N: 100% application of chemical fertilizer; 25%M: Organic fertilizer replaces 25% of chemical fertilizer; 50%M: Organic fertilizer replaces 50% of chemical fertilizer; 75%M: Organic fertilizer replaces 75% of chemical fertilizer; 100%M: 100% organic fertilization. Different lowercase letters indicate significant differences in soil organic matter content between different fertilization treatments in the same month at 0.05 level.

2.4.2 有机肥替代化学氮肥对土壤pH的影响 土壤pH是土壤的重要化学性质,对土壤肥力和植物生长等具有重要的影响。如表6所示,与N处理比较,发现在8—12月,有机肥替代化学氮肥处理下土壤pH均显著升高,其中100%M处理与N处理的差异最大,分别高出16%~20% ($P < 0.05$)。各替代处理间比较,发现各处理间均显著性差异,对土壤pH的影响顺序为100%M>75%M>50%M>25%M。

表6 不同施肥处理对土壤pH的影响

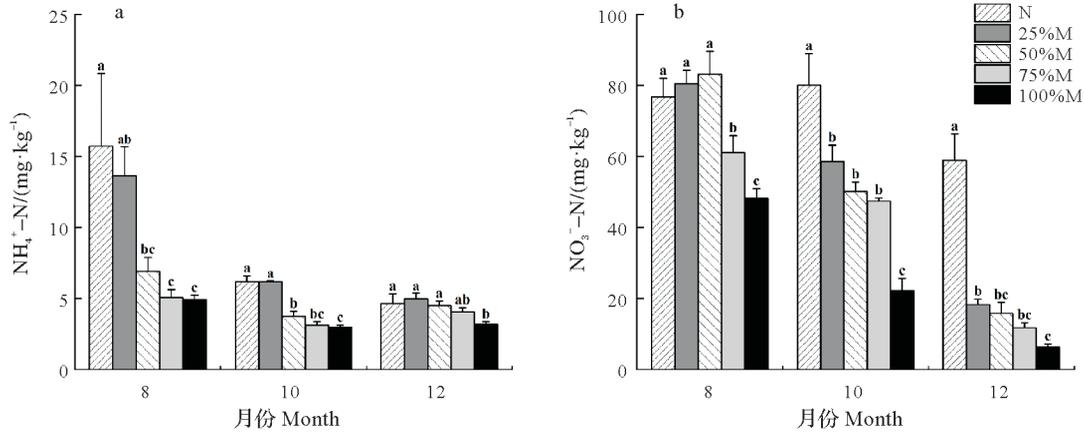
Tab.6 Effects of different fertilization treatments on soil pH

处理 Treatment	8月 August	10月 October	12月 December
N	5.17±0.10 ^d	5.08±0.10 ^c	5.25±0.07 ^c
25%M	5.29±0.08 ^d	5.35±0.14 ^d	5.48±0.11 ^d
50%M	5.50±0.15 ^c	5.65±0.17 ^c	5.69±0.10 ^c
75%M	5.72±0.13 ^b	5.88±0.12 ^b	5.78±0.08 ^b
100%M	6.06±0.24 ^a	6.10±0.21 ^a	6.11±0.09 ^a

N: 100%施化学氮肥; 25%M: 有机肥替代25%化学氮肥; 50%M: 有机肥替代50%化学氮肥; 75%M: 有机肥替代75%化学氮肥; 100%M: 有机肥替代100%化学氮肥。不同小写字母表示同一月份不同施肥处理间土壤pH差异显著($P < 0.05$)。

N: 100% application of chemical fertilizer; 25%M: Organic fertilizer replaces 25% of chemical fertilizer; 50%M: Organic fertilizer replaces 50% of chemical fertilizer; 75%M: Organic fertilizer replaces 75% of chemical fertilizer; 100%M: 100% organic fertilization. Different lowercase letters indicate significant differences in soil pH between different fertilization treatments in the same month at 0.05 level.

2.4.3 有机肥替代化学氮肥对土壤铵态氮和硝态氮的影响 有机肥替代化学氮肥对土壤铵态氮和硝态氮的影响如图 5 所示,8 月和 10 月除 25%M 处理,其余施肥处理土壤铵态氮含量均显著低于 N 处理,12 月 100%M 处理铵态氮含量显著低于 N 处理,其余处理与 N 处理无显著差异($P<0.05$;图 5a)。8 月 75%M 和 100%M 处理土壤硝态氮含量显著低于 N 处理,25%M 和 50%M 处理与 N 处理没有显著性差异,10 和 12 月有机肥替代化学氮肥处理均显著低于 N 处理($P<0.05$;图 5b)。



不同小写字母表示同一月份不同施肥处理间土壤铵态氮和硝态氮差异显著($P<0.05$)。

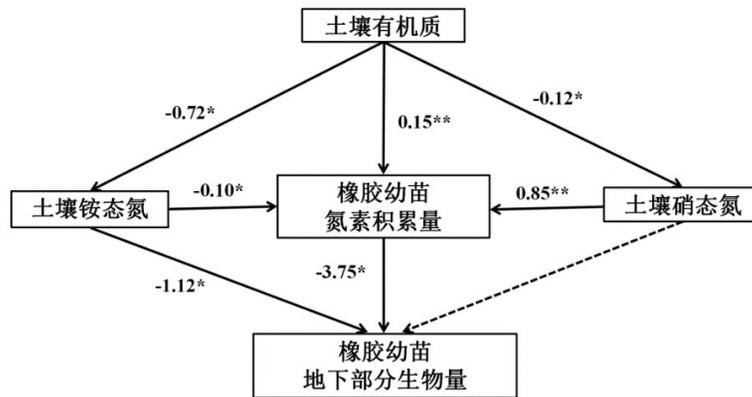
Different lowercase letters indicate significant differences in soil ammonium nitrogen and nitrate nitrogen content between different fertilization treatments in the same month at 0.05 level.

图 5 有机肥替代化学氮肥对土壤铵态氮和硝态氮的影响

Fig.5 Effects of partial replacement of chemical nitrogen fertilizer by organic fertilizer on ammonia and nitrate nitrogen

2.5 橡胶幼苗地下部分生物量影响结构方程模型

根系的生长与植物的生长发育密切相关,是植物生长之根本。通过构建结构方程模型(SEM)分析土壤有机质、铵态氮、硝态氮含量及橡胶幼苗氮素积累量对橡胶树苗地下部分生物量的综合响应,结果为 $\chi^2=1.257, P=0.262, GFI=0.959, CFI=0.995, TLI=0.948, NFI=0.979$ (图 6),综合来看模型整体拟合效果良好,可继续进行研究。结果表明:有机质可通过影响土壤铵态氮、硝态氮含量和橡胶幼苗氮素积累量,间



$\chi^2=1.257; P=0.262; GFI=0.959; CFI=0.995; TLI=0.948; NFI=0.979$; 实线箭头代表该路径显著,数字为路径系数,虚线表示不显著;“**” $P<0.01$, “*” $P<0.05$ 。

Solid arrows indicate that the path is significant, numbers are path coefficients, and dashed lines indicate insignificant.

图 6 橡胶幼苗地下部分生物量影响因素的结构方程模型(SEM)分析

Fig.6 Structural equation model(SEM)analysis of influencing factors of underground biomass of rubber seedlings

接影响橡胶幼苗地下部分生物量,其对土壤铵态氮、硝态氮含量和橡胶树苗氮素积累量的路径系数分别为-0.72、-0.12和0.15;土壤铵态氮和硝态氮含量两者通过影响植物体的氮素积累量间接影响橡胶幼苗地下部分生物量,影响因素的路径系数分别为-0.10和0.85;而土壤铵态氮含量也可直接影响橡胶幼苗地下部分生物量(路径系数为-1.12),橡胶幼苗氮素积累量影响地下部分生物量的路径系数为-3.75,土壤硝态氮含量对橡胶幼苗地下部分生物量的影响不显著($P>0.05$)。

3 讨论与结论

3.1 有机肥替代氮肥对土壤肥力的影响

本研究表明,相较于完全施用化学氮肥,有机肥部分替代化学氮肥可提高土壤pH,说明适当的有机肥替代比例可有效维持土壤酸碱环境,有机肥可促进土壤硝化和反硝化过程,增加土壤的氮积累速率,降低生态系统氮循环从而缓解农田土壤酸化进程^[40-41],因此有机肥替代化肥是有效阻控种植园土壤酸化的重要方法^[42];在本研究中,有机肥替代化学氮肥促进橡胶幼苗生长土壤有机质大幅提升,提升幅度随着有机肥施用比例的增加呈现上升趋势,这与前人的研究结果一致^[43-45],这主要是由于牛粪有机肥的主要成分为有机碳^[46],牛粪有机肥的施入必然导致有机质含量的大幅提升;同时牛粪有机肥偏碱性,可中和盆栽土壤中的酸性物质有效缓解土壤的酸度值^[47]。研究表明牛粪有机肥替代化学氮肥相比单施化肥更有助于提高土壤酶活性,进一步提高土壤有机质含量。一方面,土壤有机质能提供酶合成所需的底物;另一方面,土壤酶也可以和黏粒、有机质形成复合物,增强其稳定性^[44]。这说明配施牛粪有机肥是改善土壤理化性质,提升土壤肥力的有效措施。此外,本研究还发现100%化学氮肥处理土壤铵态氮和硝态氮含量较高,而有机肥替代化学氮肥处理铵态氮和硝态氮含量较低,这与付斌等^[48]研究结果一致,表明较单一施用化学氮肥,有机肥配施化学氮肥处理铵态氮和硝态氮的衰减速率更高。由于有机肥的施入改善了土壤酸度,同时向土壤提供大量的外源碳,改变土壤的C/N,可能促进微生物的代谢与繁育,提高了土壤中相关氮转化酶活性,改变固氮群体的竞争优势度,从而促进了土壤中有效氮利用率的提高^[31,41,49-52]。因此有机肥投入是提升土壤肥力水平的重要途径,且长期施用有机肥及有机肥替代化学氮肥能够较好地维持和提高土壤肥力^[53-54]。

3.2 有机肥替代氮肥对橡胶幼苗生长及养分吸收利用的影响

相比于化肥,有机肥具有培肥改土的作用,可有效增强土壤氮素转化能力和酶活性,提高作物产量^[55-56],将有机肥和化学氮肥两者科学搭配使用可取长补短,在降低有效成分挥发流失的同时,还可以很大程度地提高肥效,持续提供大量的养分,有助于植物对氮素吸收和干物质积累,促进养分在植物体内的转移和分配,有助于植物生长^[57-59],例如研究表明有机肥替代化学氮肥对棉花、水稻和小麦等作物生长与养分利用具有显著的促进作用^[18,60-61]。在本试验条件下,与100%施用化学氮肥相比,有机肥替代化学氮肥对橡胶幼苗的养分吸收与利用、生物量积累以及植株生长等的提升效果更为显著;其中橡胶幼苗生物量和根冠比的观测结果显示,氮、磷、钾养分和总生物量积累主要集中在地上部分,这与以往对橡胶幼苗及其他树种的研究结果一致^[62-63]。原因可能是与100%施用化学氮肥相比,有机肥替代化学氮肥可显著提高盆栽土壤有机质、全氮、全磷和全钾等养分含量,减轻单施化学氮肥对土壤pH造成的负面影响,还增加土壤有益微生物的相对丰度,对土壤有机质分解和养分循环具有重要作用,是促进橡胶幼苗的养分吸收与分配利用的重要影响因素^[64-65]。同时有机肥的缓释性能降低氮元素在土壤中的释放速率,使养分释放与作物吸收同步,满足橡胶幼苗对氮肥的需求。前人研究表明有机肥和化肥的组合比传统的仅施尿素增加了水稻地上部氮、磷和钾养分的积累量^[66],有利于氮素的持续供应,促进氮素吸收和不同器官中分配,减少了氮素养分进入环境的量。Deng等^[67]认为这可能是由于根的资源趋向性有关,当土壤中的某些元素缺乏时,植物会将更高比例的养分分配到可以获得这些元素的组织。因此在施肥条件下,由于土壤中养分含量充足,植物会将更多的养分和生物量等分配给地上组织,从而促进地上部生长,减缓地下部的生长^[56],进而使得施肥增加了地上养分及生物量比例。在本研究中,以75%M处理的养分利用效率最高,这可能是由于该替代比例,土壤氮素释放较为平稳,减少了氮素的损失,促进了橡胶幼苗对养分的吸收,从而提高氮肥利用率。

根系是植物体吸收土壤中的水分和养分的重要营养器官^[68]。地下部分生物量增加,会导致根系直径加粗,这对地上部分的生长起物理支撑和储藏碳水化合物的作用,并为苗木来年或短期胁迫环境下生长提供养分^[69]。有机与无机肥配施可显著促进根系生长,增强根系活力;保证林木整个生长期营养供应,在林木生长前期,无机肥营养供给根系伸长生长;在林木生长后期,有机肥营养供给根系生物量的积累^[56]。这对改善植物养分供应情况具有显著作用^[70-71]。橡胶幼苗根系较浅,其倒伏力不仅取决于土壤的物理力学性

质,还取决于橡胶幼苗根系生长状况,因此地下部分对于橡胶树抗风能力的影响显而易见^[72]。在本研究中有机肥替代化学氮肥提高了土壤有机质含量(表5),结构方程模型路径分析表明(图6),土壤有机质含量的提高,会直接对橡胶幼苗的氮素养分积累量产生正效应,进而对橡胶幼苗地下部分的生物量积累产生间接的影响;但有机质含量的提高对土壤中的氮素养分有显著负影响。土壤氮素养分是调控幼苗生长的重要因素,在橡胶幼苗的培育过程中,单施有机肥具有较高的土壤有机质和pH值,但有效氮含量较低,100%施用化学氮肥在提高土壤氮素养分含量的同时降低了土壤有机质和pH值。因此,合理的有机肥替代化学氮肥,从而平衡土壤有机质和土壤氮素养分含量,对橡胶幼苗生长具有重要意义。

3.3 结论

综上所述,有机肥替代化学氮肥显著提高了土壤有机质含量,有效改善土壤环境,促进橡胶树苗期的养分吸收与分配利用,利于橡胶幼苗生长。与完全施用化学氮肥相比,有机肥部分替代化学氮肥可有效提高养分利用效率,促使橡胶幼苗将更多的生物量分配给地上组织,促进橡胶幼苗株高和基径的生长,提高了幼苗地上生物量占比。总的看来,有机肥替代75%化学氮肥对生物量以及养分吸收的促进效果最佳。橡胶树苗期的生长与其养分吸收、利用密切相关,同等养分投入下有机肥替代化学氮肥可通过显著提高橡胶幼苗的N、P和K养分的吸收,提高干物质的积累量,并促进橡胶幼苗的生长。

致谢:中国热带农业科学院橡胶研究所省部级重点实验室及科学观测实验站开放课题(RRI-KLOF202204)同时对本研究给予了资助,谨致谢意!

参考文献 References:

- [1] SINGH A K, LIU W J, ZAKARI S, et al. A global review of rubber plantations: impacts on ecosystem functions, mitigations, future directions, and policies for sustainable cultivation[J]. *The science of the total environment*, 2021, 796: 148948.
- [2] 华元刚, 刘海林, 贝美容, 等. 施肥对天然橡胶胶乳及生胶性能的影响[J]. *热带作物学报*, 2018, 39(8): 1471-1475.
HUA Y, LIU H L, BEI M R, et al. Effects of fertilizing on properties of natural rubber latex and raw rubber[J]. *Chinese journal of tropical crops*, 2018, 39(8): 1471-1475.
- [3] 孙小龙, 梁国平, 和丽岗. 不同肥料对橡胶树 GT1 品种幼苗生长的影响[J]. *热带农业科学*, 2014, 34(2): 1-5.
SUN X L, LIANG G P, HE L G. Effect of different fertilizers on the GT1 rubber tree seedlings[J]. *Chinese journal of tropical agriculture*, 2014, 34(2): 1-5.
- [4] 桂明春, 邱彦芬, 唐敏, 等. 育苗措施对橡胶树小苗芽接苗生长的影响[J]. *热带作物学报*, 2021, 42(5): 1387-1393.
GUI M C, QIU Y F, TANG M, et al. Effects of various nursery measures on the growth performance of green budlings of *hevea brasiliensis*[J]. *Chinese journal of tropical crops*, 2021, 42(5): 1387-1393.
- [5] 赵春梅, 蒋菊生, 曹建华. 橡胶林氮素研究进展[J]. *热带农业科学*, 2009, 29(3): 44-50.
ZHAO C M, JIANG J S, CAO J H. Advances on nitrogen element under rubber plantations[J]. *Chinese journal of tropical agriculture*, 2009, 29(3): 44-50.
- [6] 杨丽萍, 陈永川, 许木果, 等. 不同供氮水平橡胶树幼苗氮素利用及来源特征[J]. *广东农业科学*, 2017, 44(11): 75-79.
YANG L P, CHEN Y C, XU M G, et al. Characteristics of nitrogen utilization and source of *hevea brasiliensis* under different nitrogen levels[J]. *Guangdong agricultural sciences*, 2017, 44(11): 75-79.
- [7] 杜海燕, 王大鹏, 王文斌, 等. 应用¹⁵N示踪技术研究橡胶树幼苗对不同氮肥的吸收和分配[J]. *热带作物学报*, 2015, 36(6): 1019-1024.
DU H Y, WANG D P, WANG W B, et al. Different nitrogen fertilizers absorption and distribution in rubber tree (*Hevea brasiliensis*) seedlings using ¹⁵N tracer technique[J]. *Chinese journal of tropical crops*, 2015, 36(6): 1019-1024.
- [8] 刘海林, 杨凯, 杨红竹, 等. 控释氮肥比例对橡胶苗生长和养分吸收的影响[J]. *热带农业科学*, 2021, 41(3): 1-6.
LIU H L, YANG K, YANG H Z, et al. Effects of the mixed ratio of controlled nitrogen in the control - released urea on the growth and nutrient absorption of rubber tree seedlings[J]. *Chinese journal of tropical agriculture*, 2021, 41(3): 1-6.
- [9] 刘俊良, 李晓波, 林清火, 等. 不同有机肥对橡胶树根系生长影响研究[J]. *热带农业科学*, 2021, 41(6): 56-61.
LIU J L, LI X B, LIN Q H, et al. Effects of different organic fertilizers on root growth of rubber tree [J]. *Chinese journal of tropical agriculture*, 2021, 41(6): 56-61.
- [10] 唐继伟, 林治安, 许建新, 等. 有机肥与无机肥在提高土壤肥力中的作用[J]. *中国土壤与肥料*, 2006(3): 44-47.

- TANG J W, LIN Z A, XU J X, et al. Effect of organic manure and chemical fertilizer on soil nutrient [J]. Soil and fertilizer sciences in China, 2006(3): 44-47.
- [11] 胡诚, 曹志平, 罗艳蕊, 等. 长期施用生物有机肥对土壤肥力及微生物生物量碳的影响[J]. 中国生态农业学报, 2007(3): 48-51.
- HU C, CAO Z P, LUO Y R, et al. Effect of long-term application of microorganismic compost or vermicompost on soil fertility and microbial biomass carbon [J]. Chinese journal of eco-agriculture, 2007(3): 48-51.
- [12] WEI W, CHEN Y, HUANG H C, et al. Appropriate nitrogen application enhances saponin synthesis and growth mediated by optimizing root nutrient uptake ability [J]. Journal of ginseng research, 2020, 44(4): 627-636.
- [13] 陆景陵, 胡霭堂. 植物营养学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- LU J L, HU A T. Plant nutriology [M]. Beijing: Higher Education Press, 2006.
- [14] 吴巍, 赵军. 植物对氮素吸收利用的研究进展[J]. 中国农学通报, 2010, 26(13): 75-78.
- WU W, ZHAO J. Advances on plants' nitrogen assimilation and utilization [J]. Chinese agricultural science bulletin, 2010, 26(13): 75-78.
- [15] AGEGNHU G, NELSON P N, BIRD M I. Crop yield, plant nutrient uptake and soil physicochemical properties under organic soil amendments and nitrogen fertilization on Nitisols [J]. Soil & tillage research, 2016, 160: 1-13.
- [16] YU Q G, YE J, YANG S N, et al. Effects of nitrogen application level on rice nutrient uptake and ammonia volatilization [J]. Rice science, 2013, 20(2): 139-147.
- [17] 张靖, 王平, 刘淑英, 等. 有机无机肥配施对甘肃省秦王川灌区蚕豆产量、养分吸收量及肥料利用率的影响[J]. 干旱区资源与环境, 2017, 31(1): 154-159.
- ZHANG J, WANG P, LIU S Y, et al. Effects of organic and chemical fertilization on dry biomass, grain yield, nutrient uptake and fertilizer utilization efficiency of faba bean in northwest hemi-dry-land [J]. Journal of arid land resources and environment, 2017, 31(1): 154-159.
- [18] 哈丽哈什·依巴提, 李青军, 张炎. 有机肥氮替代部分化肥氮对棉花养分吸收、氮素利用和产量的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2019(3): 137-142.
- Ibati H, LI Q J, ZHANG Y. Effects of organic manure nitrogen replacing chemical fertilizer nitrogen on cotton nutrient uptake, nitrogen utilization efficiency and yield [J]. Soil and fertilizer sciences in China, 2019(3): 137-142.
- [19] 桑文, 赵亚光, 张霁峰, 等. 化肥减量配施有机液体肥对加工番茄生长及土壤酶活性的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2021(2): 53-60.
- SANG W, ZHAO Y G, ZHANG J F, et al. Effects of chemical fertilizer reduction combined with organic liquid fertilizer on processed tomato growth and soil enzyme activity [J]. Soil and fertilizer sciences in China, 2021(2): 53-60.
- [20] WANG X L, REN Y Y, ZHANG S Q, et al. Applications of organic manure increased maize (*Zea mays* L.) yield and water productivity in a semi-arid region [J]. Agricultural water management, 2017, 187: 88-98.
- [21] LIU B, WANG X Z, MA L, et al. Combined applications of organic and synthetic nitrogen fertilizers for improving crop yield and reducing reactive nitrogen losses from China's vegetable systems: a meta-analysis [J]. Environmental pollution, 2021, 269: 116143.
- [22] 幸福梅, 柳文杰, 张兴强, 等. 不同施肥方式对巨柏苗木生长及光合作用的影响[J]. 厦门大学学报(自然科学版), 2022, 61(5): 880-887.
- XIN F M, LIU W J, ZHANG X Q, et al. Effects of different fertilization methods on growth and photosynthesis of *Cupressus gigantea* seedlings [J]. Journal of Xiamen university (natural science), 2022, 61(5): 880-887.
- [23] FENNER M, THOMPSON K. The ecology of seeds [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2005.
- [24] 孙国语, 马晓雨, 易嘉欣, 等. 养分供给对黑青杨等杨树生长动态及养分分配的影响[J]. 植物研究, 2021, 41(5): 690-699.
- SUN G Y, MA X Y, YI J X, et al. Effects of Nutrient supply on growth dynamics and nutrient allocation of poplars [J]. Bulletin of botanical research, 2021, 41(5): 690-699.
- [25] 张敏, 杨浩瑜, 包立, 等. 氮、磷、钾配比施肥对辣木生长及叶片养分吸收的影响[J]. 林业科学研究, 2019, 32(5): 114-120.
- ZHANG M, YANG H Y, BAO L, et al. Effects of nitrogen, phosphorus and potassium ratio fertilization on growth and leaf nutrient absorption of *Moringa oleifera* [J]. Forest research, 2019, 32(5): 114-120.
- [26] 左婷, 王新霞, 侯琼, 等. 稻-麦轮作体系不同施肥模式对氮肥利用效率和土壤有效养分平衡的影响[J]. 水土保持学

- 报, 2021, 35(1): 213-221.
- ZUO T, WANG X X, HOU Q, et al. Nitrogen use efficiency of crops and available nutrient balance in soil as affected by different fertilization modes with a rice-wheat rotation[J]. Journal of soil and water conservation, 2021, 35(1): 213-221.
- [27] 骆晓声, 吕宏伟, 寇长林. 有机肥替代氮肥及节水对设施番茄和辣椒菜田氮淋溶的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2021(2): 96-101.
- LUO X S, LYU H W, KOU C L. Effects of mineral nitrogen substitution by organic fertilizer nitrogen and water saving on nitrogen leaching in tomato and pepper greenhouse vegetable fields[J]. Soil and fertilizer sciences in China, 2021(2): 96-101.
- [28] 丁力, 张清旭, 陈晓婷, 等. 动物源有机肥对茶树生长及其根际土壤酶活性的影响[J]. 江苏农业科学, 2018, 46(20): 121-125.
- DING L, ZHANG Q X, CHEN X T, et al. Effects of animal manure on tea tree growth and enzyme activity in rhizosphere soil[J]. Jiangsu agricultural sciences, 2018, 46(20): 121-125.
- [29] 贝美容, 倪维茜, 林清火, 等. 缓释氮肥对橡胶幼苗生物量及养分积累的影响[J]. 西南农业学报, 2020, 33(12): 2867-2871.
- BEI M R, NI W Q, LIN Q H, et al. Effects of slow-released nitrogen fertilizer on growth and nutrient accumulation of rubber seedlings[J]. Southwest China journal of agricultural sciences, 2020, 33(12): 2867-2871.
- [30] 何康, 黄宗道. 热带北缘橡胶树栽培[M]. 广州: 广东科技出版社, 1987.
- HE K, HUANG Z D. Rubber tree cultivation of the northern edge of the tropics[M]. Guangzhou: Guangdong Science and Technology Press, 1987.
- [31] 冀春花, 黄艳艳, 杨红竹, 等. 不同施肥处理下橡胶苗对土壤养分吸收和分配的化学计量特征[J]. 热带生物学报, 2022, 13(5): 519-523.
- JI C H, HUANG Y Y, YANG H Z, et al. Stoichiometric characteristics of soil nutrient absorption and distribution in young rubber plants under fertilizer treatment[J]. Journal of tropical biology, 2022, 13(5): 519-523.
- [32] 薛欣欣, 任常琦, 徐正伟, 等. 海南橡胶林落叶特征研究[J]. 热带作物学报, 2022, 43(2): 377-384.
- XUE X X, REN C Q, XU Z W, et al. Characteristic of defoliation of rubber plantations (*Hevea brasiliensis*) in Hainan, China[J]. Chinese journal of tropical crops, 2022, 43(2): 377-384.
- [33] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- BAO S D. Soil agrochemical analysis[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2000.
- [34] CORRALES I, AMENOS M, POSCHENRIEDER C, et al. Phosphorus efficiency and root exudates in two contrasting tropical maize varieties[J]. Journal of plant nutrition, 2007, 30(6): 887-900.
- [35] 郭盛磊, 阎秀峰, 白冰, 等. 落叶松幼苗碳素和氮素的获取与分配对供氮水平的响应[J]. 植物生态学报, 2005(4): 550-558.
- GUO S L, YAN X F, BAI B, et al. Carbon and nitrogen acquisition and allocation in larch seedlings in response to different N supply rates[J]. Chinese journal of plant ecology, 2005(4): 550-558.
- [36] ROBERTS T L. Improving nutrient use efficiency[J]. Turkish journal of agriculture and forestry, 2006, 32(3): 177-182.
- [37] 白晶晶, 吴俊文, 何茜, 等. 不同配方施肥对楸树幼苗生物量分配及养分利用的影响[J]. 华南农业大学学报, 2015, 36(6): 7.
- BAI J J, WU J W, HE Q, et al. Effects of different fertilization formulas on catalpa bungei seedling biomass allocation and nutrient use efficiency[J]. Journal of south China agricultural university, 2015, 36(6): 7.
- [38] 程开明. 结构方程模型的特点及应用[J]. 统计与决策, 2006(10): 22-25.
- CHENG K M. Characteristics and application of structural equation model[J]. Statistics & decision, 2006(10): 22-25.
- [39] TABACHNICK B G, FIDELL L S. Using multivariate statistics (5th ed)[M]. Pearson/allyn & bacon, 2007.
- [40] 谢育利, 王吉平, 苏天明, 等. 有机肥部分替代化肥对生菜生长及土壤环境的影响[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2022, 44(5): 41-49.
- XIE Y L, WANG J P, SU T M, et al. Effects of partial substitution of chemical fertilizers by organic fertilizers on lettuce growth and soil environment[J]. Journal of southwest university (natural science edition), 2022, 44(5): 41-49.
- [41] 唐继伟, 李娟, 车升国, 等. 长期单施不同量化肥和有机肥后盐化潮土 pH 和 EC 的变化[J]. 植物营养与肥料学报, 2019, 25(8): 1300-1307.
- TANG J W, LI J, CHE S G, et al. Changes in pH and EC of salinized fluvo-aquic soil after long-term application of chemical or organic fertilizers[J]. Journal of plant nutrition and fertilizers, 2019, 25(8): 1300-1307.
- [42] 毛妍婷, 刘宏斌, 陈安强, 等. 长期施用有机肥对减缓菜田耕层土壤酸化的影响[J]. 生态环境学报, 2020, 29(9): 1784-1791.
- MAO Y T, LIU H B, CHEN A Q, et al. Effects of long-term application of organic fertilizers on reducing soil acidification of

- plough layer in vegetable fields[J]. *Ecology and environmental sciences*, 2020, 29(9): 1784-1791.
- [43] 郭龙, 李陈, 刘佩诗, 等. 牛粪有机肥替代化肥对茶叶产量、品质及茶园土壤肥力的影响[J]. *水土保持学报*, 2021, 35(6): 264-269.
- GUO L, LI C, LIU P S, et al. Effect of replacing chemical fertilizer with cow manure organic fertilizer on tea yield, quality, and soil fertility in tea garden[J]. *Journal of soil and water conservation*, 2021, 35(6): 264-269.
- [44] 李燕青, 温延臣, 林治安, 等. 不同有机肥与化肥配施对氮素利用率和土壤肥力的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2019, 25(10): 1669-1678.
- LI Y Q, WEN Y C, LIN Z A, et al. Effect of different organic manures combined with chemical fertilizer on nitrogen use efficiency and soil fertility[J]. *Journal of plant nutrition and fertilizers*, 2019, 25(10): 1669-1678.
- [45] 雷菲, 张冬明, 吴宇佳, 等. 化肥减量配施有机肥对樱桃番茄产量、品质和微生物群落结构的影响[J]. *江西农业大学学报*, 2021, 43(6): 1269-1277.
- LEI F, ZHANG D M, WU J Y, et al. Influences of chemical fertilizer reduction combined with organic fertilizer application on yield and quality of cherry tomato and structure of soil microbial community[J]. *Acta agriculturae universitatis Jiangxiensis*, 2021, 43(6): 1269-1277.
- [46] 杨龙元, 袁巧霞, 刘志刚, 等. 牛粪堆肥成型基质块蔬菜育苗灌溉方式[J]. *农业工程学报*, 2018, 34(5): 98-106.
- YANG L Y, YUANG Q X, LIU Z G, et al. Irrigation method for vegetable seedling using cow dung compressed substrates[J]. *Transactions of the Chinese society of agricultural engineering*, 2018, 34(5): 98-106.
- [47] 肖庆礼, 陈昆燕, 代先强, 等. 牛粪有机肥对植烟黄壤理化性质及持水能力的影响[J]. *中国烟草学报*, 2020, 26(2): 57-64.
- XIAO Q L, CHEN K Y, DAI X Q, et al. Effect of cattle manure organic fertilizer on physicochemical properties and water-holding capacity of tobacco-planting yellow soil[J]. *Acta tabacaria Sinica*, 2020, 26(2): 57-64.
- [48] 付斌, 刘宏斌, 胡万里, 等. 施用牛粪对土壤-油菜系统氮素组分的影响[J]. *土壤通报*, 2016, 47(5): 1177-1183.
- FU B, LIU H B, HU W L, et al. Effects of cow manure application on nitrogen cycling in soil-rape systems[J]. *Chinese journal of soil science*, 2016, 47(5): 1177-1183.
- [49] 林仕芳, 王小利, 段建军, 等. 有机肥替代化肥对旱地黄壤有机碳矿化及活性有机碳的影响[J]. *环境科学*, 2022, 43(4): 2219-2225.
- LIN S F, WANG X L, DUAN J J, et al. Effects of organic fertilizer replacing chemical fertilizer on organic carbon mineralization and active organic carbon in dryland yellow soil[J]. *Environmental science*, 2022, 43(4): 2219-2225.
- [50] 夏文建, 柳开楼, 张丽芳, 等. 长期施肥对红壤稻田土壤微生物生物量和酶活性的影响[J]. *土壤学报*, 2021, 58(3): 628-637.
- XIA W J, LIU K L, ZHANG L F, et al. Effect of long-term fertilization on soil microbial biomass and enzyme activities in reddish paddy soil[J]. *Acta pedologica Sinica*, 2021, 58(3): 628-637.
- [51] 唐海明, 李超, 肖小平, 等. 有机肥氮投入比例对双季稻田根际土壤微生物生物量碳、氮和微生物熵的影响[J]. *应用生态学报*, 2019, 30(4): 1335-1343.
- TANG H M, LI C, XIAO X P, et al. Effects of different manure nitrogen input ratio on rhizosphere soil microbial biomass carbon, nitrogen and microbial quotient in double-cropping rice field[J]. *Chinese journal of applied ecology*, 2019, 30(4): 1335-1343.
- [52] VTRDE T, BALLANTYNE A, MILLE-LINDBLOM C, et al. Effects of N:P loading ratios on phytoplankton community composition, primary production and N fixation in a eutrophic lake[J]. *Freshwater biology*, 2010, 54: 331-344.
- [53] 何翠翠, 王立刚, 王迎春, 等. 长期施肥下黑土活性有机质和碳库管理指数研究[J]. *土壤学报*, 2015, 52(1): 194-202.
- HE C C, WANG L G, WANG Y C, et al. Effect of long-term fertilization on labile organic matter in and carbon pool management index of black soil[J]. *Acta pedologica Sinica*, 2015, 52(1): 194-202.
- [54] 龚伟, 颜晓元, 王景燕. 长期施肥对土壤肥力的影响[J]. *土壤*, 2011, 43(3): 336-342.
- GONG W, YAN X Y, WANG J Y, et al. Effect of long-term fertilization on soil fertility[J]. *Soils*, 2011, 43(3): 336-342.
- [55] 苏兰茜, 白亭玉, 鱼欢, 等. 有机肥与化肥配施对菠萝蜜幼苗光合及养分吸收的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2020(5): 117-123.
- SU L Q, BAI T Y, YU H, et al. Effects of combined application of organic fertilizer and chemical fertilizer on photosynthesis and nutrient uptake of jackfruit seedlings[J]. *Soil and fertilizer sciences in China*, 2020(5): 117-123.
- [56] ADEKIYA A O, EJUE W S, OLAYANJU A, et al. Different organic manure sources and NPK fertilizer on soil chemical properties, growth, yield and quality of okra[J]. *Scientific reports*, 2020, 10(1): 16083-16083.
- [57] IQBAL A, He L, ALI I, et al. Co-incorporation of manure and inorganic fertilizer improves leaf physiological traits, rice pro-

- duction and soil functionality in a paddy field[J].Sci rep,2021,11(1):10048-10048.
- [58] KUMAR K A, SWAIN D K, BHADORIA P B S. Split application of organic nutrient improved productivity, nutritional quality and economics of rice-chickpea cropping system in lateritic soil[J].Field crops research,2018,223:125-136.
- [59] 王逗,杨杰,廖汝佳,等.化肥有机肥配施对油菜营养生长期根系分泌物的影响[J].中国土壤与肥料,2021(5):95-102.
WANG D, YANG J, LIAO R J, et al. Effects of chemical fertilizers combined with organic fertilizers on root exudates of rape during vegetative growth period[J].Soil and fertilizer sciences in China,2021(5):95-102.
- [60] 陈香碧,胡亚军,秦红灵,等.稻作系统有机肥替代部分化肥的土壤氮循环特征及增产机制[J].应用生态学报,2020,31(3):1033-1042.
CHEN X B, HU Y J, QIN H L, et al. Characteristics of soil nitrogen cycle and mechanisms underlying the increase in rice yield with partial substitution of mineral fertilizers with organic manure in a paddy ecosystem: a review[J].Chinese journal of applied ecology,2020,31(3):1033-1042.
- [61] 裴雪霞,党建友,张定一,等.化肥减施下有机替代对小麦产量和养分吸收利用的影响[J].植物营养与肥料学报,2020,26(10):1768-1781.
PEI X X, DANG J Y, ZHANG D Y, et al. Effects of organic substitution on the yield and nutrient absorption and utilization of wheat under chemical fertilizer reduction[J].Journal of plant nutrition and fertilizers,2020,26(10):1768-1781.
- [62] 李佳乐,梁泳怡,刘文杰,等.有机肥替代化学氮肥对橡胶幼苗生长和土壤环境的影响[J].应用生态学报,2022,33(2):431-438.
LI J L, LIANG Y Y, LIU W J, et al. Effects of manure substituting chemical nitrogen fertilizer on rubber seedling growth and soil environment[J].Chinese journal of applied ecology,2022,33(2):431-438.
- [63] LI J Y, GUO Q X, ZHANG J X, et al. Effects of nitrogen and phosphorus supply on growth and physiological traits of two *Larix* species[J].Environmental and experimental botany,2016,130:206-215.
- [64] MENG W, HU G Q, WANG H, et al. 35 years of manure and chemical fertilizer application alters soil microbial community composition in a fluvo-aquic soil in Northern China[J].European journal of soil biology,2017,82:27-34.
- [65] LIU J, SHU A P, SONG W F, et al. Long-term organic fertilizer substitution increases rice yield by improving soil properties and regulating soil bacteria[J].Geoderma,2021,404:115287.
- [66] 陈猛猛,张士荣,吴立鹏,等.有机-无机配施对盐渍土壤水稻生长及养分利用的影响[J].水土保持学报,2019,33(6):311-317.
CHEN M M, ZHANG S R, WU L P, et al. Effects of combined application of organic and inorganic fertilizers on rice[J].Journal of soil and water conservation,2019,33(6):311-317.
- [67] DENG S X, SHI K K, MA J, et al. Effects of fertilization ratios and frequencies on the growth and nutrient uptake of *Magnolia wufengensis* (Magnoliaceae)[J].Forests,2019,10(1):65.
- [68] BEKELE A, HUDNALL W H, TIARKS A E. Response of densely stocked loblolly pine (*Pinus taeda* L.) to applied nitrogen and phosphorus[J].Southern journal of applied forestry,2003,27(3):180-189.
- [69] 廖逸宁,郭素娟,王芳芳,等.有机-无机肥配施对板栗园土壤肥力及根系功能性状的影响[J].南京林业大学学报(自然科学版),2021,45(5):84-92.
LIAO Y N, GUO S J, WANG F F, et al. Effects of combined application of organic and inorganic fertilizers on soil fertility and root functional traits in chestnut orchards[J].Journal of Nanjing forestry university(natural sciences edition),2021,45(5):84-92.
- [70] 王冉,李吉跃,张方秋,等.不同施肥方法对马来沉香和土沉香苗期根系生长的影响[J].生态学报,2011,31(1):98-106.
WANG R, LI J Y, ZHANG F Q, et al. Growing dynamic root system of *Aquilaria malaccensis* and *Aquilaria sinensis* seedlings in response to different fertilizing methods[J].Acta ecologica Sinica,2011,31(1):98-106.
- [71] WU L N, JIANG Y, ZHAO F Y, et al. Increased organic fertilizer application and reduced chemical fertilizer application affect the soil properties and bacterial communities of grape rhizosphere soil[J].Scientific reports,2020,10(1):9568.
- [72] 连士华.橡胶树风害成因问题的探讨[J].热带作物学报,1984(1):59-72.
LIAN S H. Discussion on causes of wind damage in *hevea brasiliensis*[J].Chinese journal of tropical crops,1984(1):59-72.