2015-02-25 DOI: 10.3724/SP.J.1145.2014.07017 http://www.cibj.com/
应用与环境生物学报 Chin J Appl Environ Biol 2015, 21 (1): 129-138

施肥对1年生桢楠幼苗生长及主要土壤肥力指标的影响*

贺 维[1] 张 炜[2] 胡庭兴[1]** 陈 洪[1] 王 茜[1] 罗 杰[1]
[1]四川农业大学林学院 雅安 625014
[2]四川省林业科学研究院 成都 610000

摘 要 采用盆栽的方法，研究施用氮肥（NF）、复合肥（CF）、有机肥（OF）和混合肥（MF）对1年生桢楠（*Phoebe zhennan* S. Lee）幼苗期生长与土壤肥力的影响. 以年施氮量为标准，设置低（L，0.3 g/桶）、中（M，0.6 g/桶）、高（H，0.9 g/桶）3个施肥水平，于2013年5、7、9月份分3次将各肥料平均施入各栽植桶中，施肥1个月后测定土壤养分、微生物生物量碳、氮以及土壤酶活性指标，且最后一次同时测定桢楠苗高和地径生长量，初步探讨施肥影响桢楠生长的同时对土壤肥力的作用. 结果表明：（1）中氮水平的有机肥（M_{OF}）对桢楠生长的促进效应最大，其生长量可以达到CK的2倍；且土壤肥力得到了明显的提高，这种优势可以持续到施肥后期（9-10月）；（2）氮肥和复合肥对桢楠生长起到了微弱的促进作用，但不能有效提高甚至维持土壤肥力；（3）混合肥由于在氮肥的基础上配合施用有机肥，与氮肥相比不仅改善了土壤肥力状况，还显著促进了桢楠生长；（4）桢楠生长状况（苗高、地径生长量）均与土壤蔗糖酶活性、微生物生物量氮呈极显著正相关（$P < 0.01$），故这两个指标可以有效反映桢楠生长状况. 综合来看，中氮水平的有机肥是最佳施肥方案. 图7 表4 参47

关键词 施肥；桢楠；幼苗生长；土壤肥力；微生物生物量；土壤酶
CLC S718 : S147.5

Effects of fertilization on growth of 1-year-old *Phoebe zhennan* S. Lee and soil fertility*

HE Wei[1], ZHANG Wei[2], HU Tingxing[1]**, CHEN Hong[1], WANG Qian[1] & LUO Jie[1]
[1]*College of Forestry, Sichuan Agricultural University*, Ya'an 625014, China
[2]*Institute of Forestry Science Research in Sichuan Province,* Chengdu 610000, China

Abstract To explore the effects of fertilizer application on growth of *Phoebe zhennan* S. Lee as well as on soil fertility, a pot experiment was conducted to study the effects of application of nitrogen fertilizer (NF), compound fertilizer (CF), organic fertilizer (OF) and mixed fertilizer (MF) on growth of 1-year-old seedling of *P. zhennan* and soil fertility. Each fertilizer was applied at three levels based on the annual nitrogen application rate, namely, low (L, 0.3 g/pail), medium (M, 0.6 g/pail) and high (H, 0.9 g/pail), which was divided into three equal parts and applied into pail in the middle of May, July and September, respectively. The indicators of soil nutrients, microbial biomass carbon and nitrogen and enzyme activities were measured after a month of fertilization; the increment of height and ground diameter of the seedlings were measured in October, one month after the third application of fertilizer. The results showed that: 1) the promoting effect on the growth of *P. zhennan* was the most obvious under medium nitrogen level of organic fertilizer (M_{OF}), with the increment up to twice that of CK. Soil fertility was also significantly improved and sustained to the late stage of fertilization (September to October); 2) NF and CF slightly promoted the growth of *P. zhennan*, but it could not improve or even maintain soil fertility; 3) due to the combined application of organic fertilizer based on NF, MF not only improved soil fertility, but also promoted the growth of *P. zhennan* significantly in comparison to NF; 4) the growth condition of *P. zhennan* (height and ground diameter increment) showed an extremely significant and positive correlation with soil sucrase activity and microbial biomass N, therefore these two indices can reflect growth condition effectively. On the whole, organic fertilizer with medium nitrogen level is the best fertilization choice for *P. zhennan* seedlings.

Keywords fertilization; *Phoebe zhennan* S. Lee; seedling growth; soil fertility; microbial biomass; soil enzyme

收稿日期 Received: 2014-07-12 接受日期 Accepted: 2014-08-01
*国家"十二五"科技支撑计划项目（2011BAC09B05）和四川省"十二五"农作物育种攻关课题（2011NZ0098-10）资助 Supported by the Sci-tech Project of the Twelfth Five-year-plan of China (2011BAC09B05), and the Crop Breeding Research Project of the Twelfth Five-year-plan of Sichuan (2011NZ0098-10)
** 通讯作者 Corresponding author (E-mail: hutx001@aliyun.com)

从上世纪80年代初期起，中国化肥施用量以年均4%的速度增长，已成为世界上最大的化肥生产国和消费国，尽管耕地面积只占世界耕地面积的7%，但化肥施用量却接近世界总量的1/3 [1]. 随着氮肥在农业实践中应用的日益盛行，土壤酸化程度也在逐渐加剧[2]. 尽管施肥是农田土壤获取养分的重要来源，但是单施无机肥已经不再有助于集约化农业生产的开展；此外，氮肥过量不仅增加生产成本，加速农业面源污染，对农产品产量也没有积极作用[3]. 农业生产中有机无机肥合理配施逐步受到人们的重视. 有机肥不仅能够提供化肥可以提供的植物需要的大量元素，还可以提供微量元素，增加土壤有机物质并改善土壤化学物理性质等[4]，因此是减施化肥、培肥地力、减少农业面源污染的主要途径之一[5]. 而与施肥具有直接关系的因素除了土壤之外，另一大关键因子则是苗木，作为施肥的主要对象，其生长发育除了受光、温、水、气、热等自然因子的影响之外，与土壤肥力更是密切相关. 苗木施肥的目的是在保证苗木正常生长的基础上，不断提高土壤肥力，以满足社会发展对森林资源及其物质产品的需求，达到节本增效和用养结合的目的，从而促进苗木生产的持续快速发展[6]. 随着人类对林木产品需求数量和质量的不断提高、可利用耕地资源的不断减少以及全球气候和环境的不断变化[7]，研究不同施肥制度下获得林木高产的同时，减少对土壤环境的负面影响是未来长期定位研究的热点领域[8].

目前对于农作物的施肥研究已较为完善，而对于林木施肥的研究则相对较少，对珍稀树种苗木的施肥研究更少；此外，前人的研究大多只从单一角度出发，分别探讨施肥对土壤环境的影响[8-9]以及对植物生长的影响[7, 10]，并未系统地分析施肥对林木幼树与土壤理化性质的综合影响. 因此，本研究选择四川特有的珍稀树种——桢楠作为试验材料（四川雅安、都江堰一带均有桢楠天然分布，是组成常绿阔叶天然林的主要树种，但由于历代砍伐利用，致使这一珍稀森林资源近于枯竭），试图同时从土壤和植物两方面入手，综合分析施肥种类、施肥方式对桢楠幼苗生长及土壤肥力的影响，揭示施肥对这两者的综合作用效果，力求在提高苗木生长量的同时维持林地土壤肥力，推动珍稀树种人工林的发展进程，同时为该树种苗木施肥提供理论基础和参考依据.

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地设在四川农业大学教学科研园区内，位于东经102°59′16″、北纬29°58′52″，海拔580 m. 多年平均气温16.2 ℃，≥10 ℃的积温5 231 ℃，月平均最高温29.9 ℃（7月），月平均最低温3.7 ℃（1月），年均日照时数1 039.6 h，无霜期298 d，多年平均降雨量1 774.3 mm，空气平均湿度79%，属于亚热带湿润气候.

1.2 试验材料

1.2.1 栽植土壤与容器 于当地农田中采集土壤，平铺晾置2 d，待用. 土壤基本理化性质为：有机质23.74 g/kg，pH值6.14，全氮1.53 g/kg，铵态氮1.75 mg/kg，全磷1.34 g/kg，全钾27.12 g/kg. 采用规格一致的上口径30 cm、底面直径25 cm、高27 cm的黑色聚丙烯塑料桶作为栽植容器，装入土壤15 kg，土层表面离桶上缘3 cm左右.

1.2.2 幼苗移栽及土壤水分管理 2012年6月25日在四川农业科研园区苗圃内选择当年4月播种、生长健康的桢楠幼苗70株（平均株高10 cm，平均地径1 mm），移栽前2 d将土壤浇透水，及时带土移栽到塑料桶中央并浇适量水，每桶1株. 实验期间，采用HH2土壤水分测定仪（ML2x，GBR）监测土壤水分情况，使土壤体积含水量保持在18%左右（即本试验用土田间持水量的70%-80%）. 培育至次年春供施肥试验.

1.3 试验方案

1.3.1 试验设计 共设置4种肥料处理，分别是：（1）氮肥（NF）：选用尿素（N 46%）；（2）有机肥（OF）：选用油菜饼肥（N 0.816%，P 0.140%，K 1.857%）；（3）复合肥（CF）：选用BB肥（N 29%，P 16%，K 10%）；（4）混合肥（MF）：将氮肥、复合肥、有机肥各单质肥施肥总量的1/3进行混合（N 2.34%，P 1.69%，K 6.13%）. 每个处理3个水平，即低氮、中氮和高氮，CK为各处理共用，每个水平和CK均为5次重复，总共为65桶（4 × 3 × 5 + 5）. 将所有桶编号为1-65，以便于对每株幼苗的生长情况进行观察及记录.

根据1年生苗木全年适宜的施氮量45-90 kg/hm^2 [11-12]（按纯氮计算），确定施肥量处理水平. 以施氮量90 kg/hm^{2}作为1年生苗木的全年施肥量标准，供试验用的桶口面积约为0.07 m^2，按每桶土换算的年施氮量约为0.60 g，故以年施氮量0.60 g/桶作为基本量（中等剂量，即中氮，记作M），并另设0.5倍基本量（低量，0.30 g/桶，即低氮，记作L）和1.5倍基本量（高量，0.90 g/桶，即高氮，记作H）两个施肥水平. 各施肥处理及水平与换算出的1年生苗木年施肥量如表1所示. 将年施氮量平均分为3份，在桢楠幼苗生长发育的旺盛时期分3次施入，即分别于2013年5、7、9月20日进行施肥，观测施肥后桢楠幼苗生长发育的初期响应，特别是试验期间桢楠幼苗的发芽次数以及新梢生长情况，同时观测土壤理化性质的变化动态，以确定在一年中对幼苗合理的施肥次数和施肥量.

表1 试验施肥处理及其年施肥量

Table 1 Fertilizer treatments and their annual fertilization amount

肥料处理 Fertilizer treatment	水平 Level	年施肥量 (*m*/g per pail) Annual fertilization amount
对照 CK	—	0
氮肥 NF	低 L	0.66
	中 M	1.32
	高 H	1.98
有机肥 OF	低 L	36.78
	中 M	73.53
	高 H	110.31
复合肥 CF	低 L	1.02
	中 M	2.07
	高 H	3.09
混合肥 MF	低 L	12.81
	中 M	25.65
	高 H	38.46

CK: control; NF: nitrogen fertilizer; OF: organic fertilizer; CF: compound fertilizer; MF: mixed fertilizer. L: low; M: medium; H: high.

1.3.2 施肥方法 由于试验期间桢楠幼苗刚进入第2年生长状态，如果将氮肥和复合肥配制成溶液进行施肥，有可能会

因为肥效释放太快出现烧苗现象，故采用松土+覆土的方法将颗粒状肥料均匀环施于桶周缘，覆土厚度为5 cm. 有机肥常带有病菌、虫卵和杂草种子，不经过腐熟，对作物生长不利，故先发酵腐熟处理7 d，然后加水稀释后均匀浇在桶周缘.

1.3.3 **取样方法** 于施肥后一个月（由于桢楠幼苗生长发育很缓慢，故取样的时间间隔较长），即6、8、10月的每月20日，用特制土钻在各处理桶内0-20 cm土层取土样约100 g/桶，每处理500 g左右，分别装袋后置于冰盒中带回实验室. 然后手工拣去植物残体、砾石等，过2 mm筛，将一部分土样保存在4 ℃ 冰箱中用于测定土壤酶活性（脲酶和蔗糖酶）和土壤微生物生物量碳、氮，剩余部分风干过1 mm筛和 0.25 mm 筛，测定酸性磷酸酶活性和土壤养分.

1.4 指标测定及方法

1.4.1 **土壤养分** 土壤养分采用常规土壤农化分析方法测定[13]. 土壤有机质：重铬酸钾氧化，外加热法；土壤水解性氮：碱解扩散法；土壤有效磷：盐酸硫酸浸提法；土壤速效钾：乙酸铵浸提，火焰光度计法.

1.4.2 **土壤酶活性** 土壤酶活性的测定参照关松荫的方法[14]. 蔗糖酶活性（μmol g^{-1} h^{-1}）：3,5-二硝基水杨酸比色法；脲酶活性（μmol g^{-1} h^{-1}）：柠檬酸比色法；酸性磷酸酶活性（μmol g^{-1} h^{-1}）：磷酸苯二钠比色法.

1.4.3 **微生物生物量碳、氮** 氯仿熏蒸提取–仪器测定法[15].

1.5 数据处理

采用SPSS 16.0统计分析软件（SPSS Inc., USA）对试验数据进行相关性分析以及单因素方差分析（One-way ANOVA），并用最小显著差数法（LSD法）进行多重比较.

2 结果与分析

2.1 施肥对桢楠幼苗形态指标的影响

由表2可见，各处理桢楠幼苗的生长状况（苗高和地径）在施肥前（2013年5月20日）均无明显差异，此外，苗高和地径的变化趋势对施肥的响应几乎是同步的. 均表明，施氮肥和复合肥的苗高、地径总生长量相对于有机肥和混合肥来说偏低，这可能与化肥容易造成土壤板结有直接关系；无论是促进苗高生长，还是增加地径生长，中氮水平的有机肥（M_{OF}）均是所有处理中效果最显著的，其总生长量分别已达到CK的2倍，而氮素水平过高效果较差；混合肥的3个施肥水平之间波动幅度甚小，这可能是因为有机无机肥配施提高了氮的表观利用率[16]，少量养分供给就能满足幼苗的生长需求，增加施肥量会造成养分的奢侈消耗.

2.2 施肥对桢楠幼苗土壤养分含量的影响

2.2.1 **有机质含量** 图1中，初期（5-6月）施氮肥在一定程度上增加了土壤有机质含量，但随着中期（7-8月）和后期（9-10月）继续施肥，以及氮肥在土壤中残留时间的延长，最终土壤有机质与CK相比无明显变化. 有机肥在整个试验期内均表现出相对于其他肥料的持续优势，且后期对有机质含量的促进作用随施肥水平的增大呈渐增趋势. 施少量和中量复合肥的前期和中期，对土壤有机质含量的提高起到了较明显的作用，但这种微弱的促进作用未能延续到后期. 混合肥对土壤有机质的影响在前期不明显，但在桢楠当年生长旺盛期（中期）急剧升高，及时地提供了充足的有机质，到后期3个施肥处理（L、M、H）之间土壤有机质含量水平相当.

2.2.2 **水解性氮含量** 如图2所示，施用氮肥和有机肥的土壤水解性氮含量在初期（5-6月）表现出随施肥量的增加而增加，但中期（7-8月）和后期（9-10月）呈先升后降的趋势，并以中氮水平促进效应达到最大，与CK相比分别提高了58.50%和108.70%. 而施用复合肥的效果则相反，3次测量数据均表明，施肥量越大水解性氮含量越低，甚至显著低于CK（中期），到后期恢复至正常水平（与CK差异不明显）. 施混合肥在整个观察期内，除中期各施肥水平与CK无显著差异外，其余阶段各水平均能提高土壤水解性氮含量，且中氮水平效果最佳. 就总体表现而言，中氮施肥水平优势明显.

2.2.3 **有效磷含量** 由图3可见，氮肥和复合肥对土壤有

表2 各施肥处理桢楠苗高和地径5-10月总生长量

Table 2 Height and ground diameter increment of *Phoebe zhennan* seedlings after fertilization

肥料 Fertilizer	苗高 Height (*h*/cm)			地径 Ground diameter (*d*/mm)		
	施肥前(5月20日) Before fertilization	总生长量 Total increment	施肥后 After fertilization	施肥前(5月20日) Before fertilization	总生长量 Total increment	施肥后 After fertilization
CK	19.20 ± 4.58 a	18.43 ± 8.24 e	37.63 ± 8.24 c	3.23 ± 0.23 a	5.44 ± 2.12 f	8.67 ± 2.12 g
L_{NF}	19.83 ± 2.84 a	20.43 ± 1.49 d	40.26 ± 1.49 c	3.45 ± 0.37 a	6.07 ± 0.84 def	9.52 ± 0.84 efg
M_{NF}	21.54 ± 3.32 a	28.88 ± 4.59 bc	50.42 ± 4.59 b	3.68 ± 0.66 a	7.38 ± 0.86 bcde	11.05 ± 0.86 bcde
H_{NF}	18.50 ± 3.60 a	27.30 ± 3.68 bcd	45.80 ± 3.68 bc	3.38 ± 0.70 a	6.19 ± 0.67 def	9.57 ± 0.67 efg
L_{OF}	19.00 ± 3.15 a	24.32 ± 3.66 bcd	43.32 ± 3.66 bc	3.29 ± 0.48 a	7.39 ± 1.03 bcd	10.68 ± 1.03 bcdef
M_{OF}	23.20 ± 1.33 a	36.76 ± 6.97 a	59.96 ± 6.97 a	3.74 ± 0.12 a	10.58 ± 0.44 a	14.32 ± 0.44 a
H_{OF}	18.92 ± 2.12 a	21.74 ± 5.49 cd	40.66 ± 5.49 c	3.17 ± 0.35 a	6.88 ± 1.85 cdef	10.05 ± 1.85 cdefg
L_{CF}	20.26 ± 2.25 a	23.26 ± 7.33 cd	43.52 ± 7.33 bc	3.63 ± 0.37 a	6.31 ± 1.44 def	9.94 ± 1.45 defg
M_{CF}	18.50 ± 1.09 a	23.02 ± 6.16 cd	41.52 ± 6.16 c	3.20 ± 0.37 a	6.81 ± 0.49 cdef	10.02 ± 0.49 defg
H_{CF}	19.30 ± 1.63 a	21.48 ± 7.93 cd	40.78 ± 7.93 c	3.40 ± 0.29 a	5.91 ± 1.61 ef	9.32 ± 1.61 fg
L_{MF}	21.18 ± 2.02 a	31.38 ± 4.81 ab	52.56 ± 4.81 ab	3.65 ± 0.15 a	8.07 ± 1.08 bc	11.71 ± 1.08 bc
M_{MF}	23.00 ± 2.61 a	31.12 ± 3.56 ab	54.12 ± 3.56 ab	3.85 ± 0.35 a	8.44 ± 0.62 b	12.30 ± 0.62 b
H_{MF}	20.90 ± 2.97 a	30.48 ± 5.00 ab	51.38 ± 5.00 b	3.48 ± 0.42 a	7.89 ± 0.81 bc	11.37 ± 0.81 bcd

CK：对照；L：低；M：中；H：高. NF：氮肥；OF：有机肥；CF：复合肥；MF：混合肥. 不同小写字母代表不同肥料不同施肥水平处理下的观测值与CK差异达显著水平（$P < 0.05$）.

CK: control; L: low; M: medium; H: high. NF: nitrogen fertilizer; OF: organic fertilizer; CF: compound fertilizer; MF: mixed fertilizer. Different lowercase letters represent significant differences at 0.05 level compared with CK.

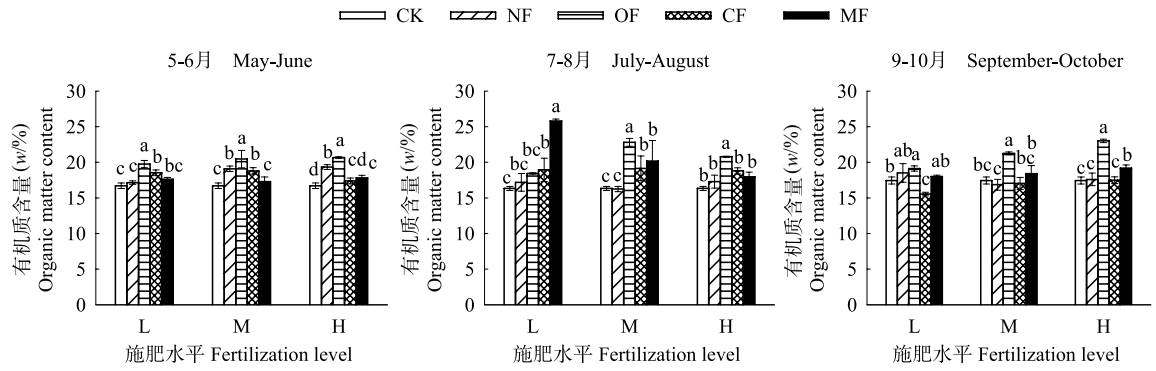

图1 不同施肥处理下的土壤有机质含量. CK：对照；NF：氮肥；OF：有机肥；CF：复合肥；MF：混合肥. L：低；M：中；H：高. 不同小写字母代表不同肥料不同施肥水平处理下的观测值与CK差异达显著水平（$P<0.05$）.

Fig. 1 Organic matter content in soil under different fertilization treatments. CK: control; NF: nitrogen fertilizer; OF: organic fertilizer; CF: compound fertilizer; MF: mixed fertilizer. L: low; M: medium; H: high. Different lowercase letters represent significant differences at 0.05 level compared with CK.

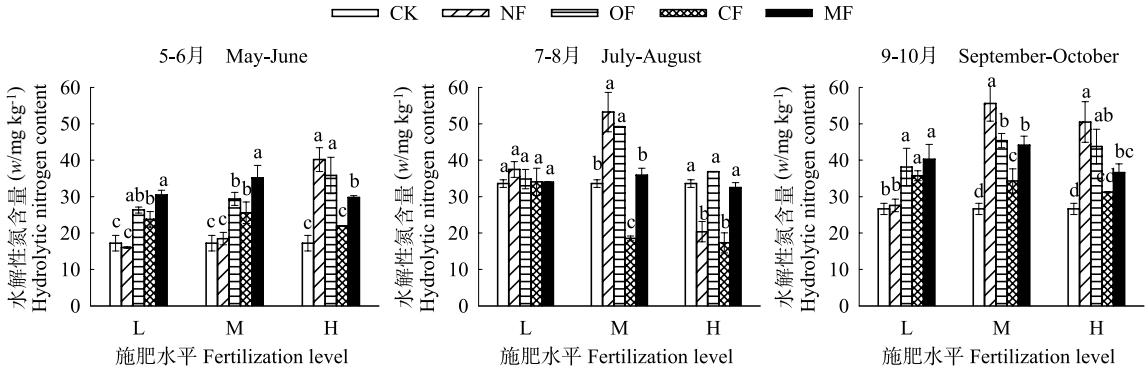

图2 不同施肥处理下的土壤水解性氮含量. CK：对照；NF：氮肥；OF：有机肥；CF：复合肥；MF：混合肥. L：低；M：中；H：高. 不同小写字母代表不同肥料不同施肥水平处理下的观测值与CK差异达显著水平（$P<0.05$）.

Fig. 2 Hydrolytic nitrogen content in soil under different fertilization treatments. CK: control; NF: nitrogen fertilizer; OF: organic fertilizer; CF: compound fertilizer; MF: mixed fertilizer. L: low; M: medium; H: high. Different lowercase letters represent significant differences at 0.05 level compared with CK.

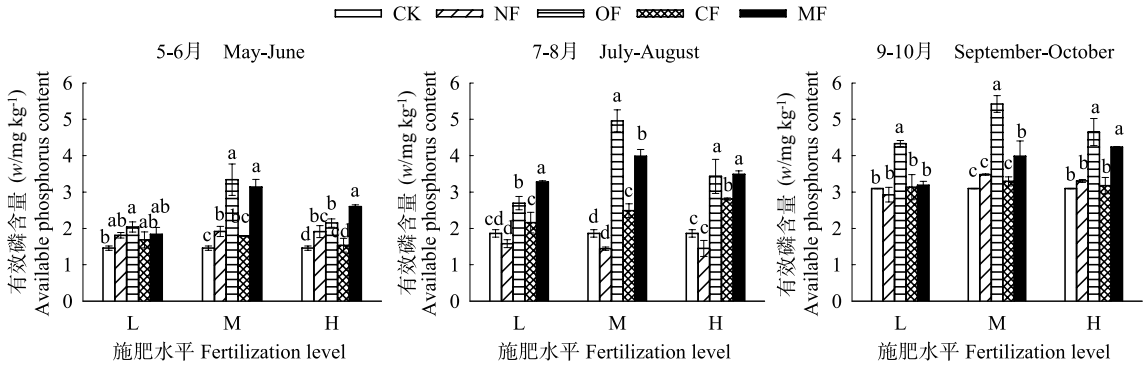

图3 不同施肥处理下的土壤有效磷含量. CK：对照；NF：氮肥；OF：有机肥；CF：复合肥；MF：混合肥. L：低；M：中；H：高. 不同小写字母代表不同肥料不同施肥水平处理下的观测值与CK差异达显著水平（$P<0.05$）.

Fig. 3 Available phosphorus content in soil under different fertilization treatments. CK: control; NF: nitrogen fertilizer; OF: organic fertilizer; CF: compound fertilizer; MF: mixed fertilizer. L: low; M: medium; H: high. Different lowercase letters represent significant differences at 0.05 level compared with CK.

效磷含量的作用效果远远不如有机肥和混合肥，且有效磷含量在施肥后期（9-10月）与CK处于同一水平. 有机肥和混合肥在桢楠整个生长阶段都发挥了显著地促进效应，其中有机肥对有效磷的促进作用随着施肥水平的增加先增加后减小，中氮水平处理达最大值，增加幅度分别为128.89%、166.24%和75.11%；而混合肥的施肥效果在初期（5-6月）和中期（7-8月）与有机肥变化趋势相同，但后期却明显上升. 总的来说，在桢楠生长最旺盛阶段（中期）有机肥和混合肥的

施肥优势十分明显，且中氮水平的有机肥无论是从促进桢楠生长还是提高土壤养分角度考虑，都是最优选择.

2.2.4 **速效钾含量** 施氮肥、复合肥的初期（5-6月）和中期（7-8月），土壤速效钾含量与CK相比几乎无明显变化，到后期（9-10月）施肥促进效应才逐渐开始有所体现，但复合肥各施肥水平之间差异甚微（图4）. 而施有机肥对速效钾含量有显著促进作用，且随着施肥量的增加不断升高，此外，有机肥相对于其余3种肥料的施肥优势随着施肥时间延长日益凸显，尤其是桢楠生长最旺盛时期（中期）. 土壤速效钾含量在施用高量混合肥（H_{MF}）的初期和中期得到了明显的提高，而在施肥后期，3个施肥水平均表现出稳定的促进效应（49.96%、44.73%和53.00%），即水平之间波动幅度较小.

2.3 施肥对桢楠幼苗土壤微生物生物量碳和微生物生物量氮的影响

在试验期间，施氮肥和复合肥对土壤微生物生物量碳、氮的影响均较小，但高量处理的复合肥始终抑制土壤微生物生物量碳，且在施肥后期（9-10月），NF处理下的微生物生物量碳也显著低于CK（表3）. 有机肥对于土壤微生物生物量碳、氮的增加具有显著的促进作用，且持续性强，是4种肥料中肥效最好的，其中，中量水平促进效应最大，且这种优势在后期也有所体现. 施混合肥后，初期（5-6月）微生物生物量碳变化不大，后期有明显增大，但3个水平之间始终无较大波动；而土壤微生物生物量氮一直保持明显升高的趋势，且后期处理之间的差异凸显出来，其差异性表现为施肥量越大微生物生物量氮越高.

2.4 施肥对桢楠幼苗土壤酶活性的影响

2.4.1 **脲酶活性** 高量混合肥，即1/3（H_{NF}+H_{OF}+H_{CF}），相当于（L_{NF}+L_{OF}+L_{CF}），是在低量氮肥的基础上增施低量有机肥. 图5显示，H_{MF}与氮肥施用量相同的低量氮肥相比，在施肥初期（5-6月）和中期（7-8月）均明显提高了土壤脲酶活性，且这两个处理之间差异不明显；但低量氮肥后期（9-10月）脲酶活性已下降至CK水平，而H_{MF}的促进作用却仍然能持续，这

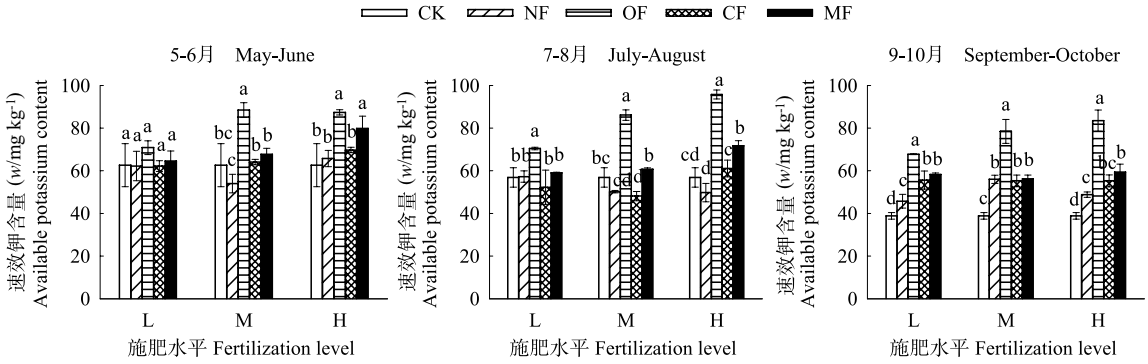

图4 不同施肥处理下的土壤速效钾含量. CK：对照；NF：氮肥；OF：有机肥；CF：复合肥；MF：混合肥. L：低；M：中；H：高. 不同小写字母代表不同肥料不同施肥水平处理下的观测值与CK差异达显著水平（$P < 0.05$）.

Fig. 4 Available potassium content in soil under different fertilization treatments. CK: control; NF: nitrogen fertilizer; OF: organic fertilizer; CF: compound fertilizer; MF: mixed fertilizer. L: low; M: medium; H: high. Different lowercase letters represent significant differences at 0.05 level compared with CK.

表3 不同施肥处理下的土壤微生物生物量碳（MBC）和微生物生物量氮（MBN）

Table 3 Microbial biomass carbon (MBC) and nitrogen (MBN) in soil under different fertilization treatments

肥料 Fertilizer	MBC (w/g kg^{-1})			MBN (w/g kg^{-1})		
	5-6月 May-June	7-8月 July-August	9-10月 September-October	5-6月 May-June	7-8月 July-August	9-10月 September-October
CK	0.68 ± 0.01 de	0.60 ± 0.01 ef	0.23 ± 0.00 de	29.40 ± 2.89 d	31.18 ± 0.93 f	11.68 ± 1.49 h
L_{NF}	0.62 ± 0.03 ef	0.60 ± 0.00 ef	0.19 ± 0.02 fg	31.02 ± 4.78 d	31.25 ± 0.71 f	12.37 ± 1.10 gh
M_{NF}	0.86 ± 0.05 a	0.61 ± 0.01 e	0.19 ± 0.02 fg	35.52 ± 5.24 cd	30.68 ± 3.03 f	12.68 ± 1.00 fgh
H_{NF}	0.69 ± 0.02 cde	0.62 ± 0.01 de	0.14 ± 0.02 h	32.68 ± 4.99 cd	25.06 ± 1.07 g	12.67 ± 3.57 fgh
L_{OF}	0.87 ± 0.01 a	0.69 ± 0.02 b	0.24 ± 0.01 cd	54.02 ± 5.22 ab	34.22 ± 0.81 e	17.55 ± 0.73 c
M_{OF}	0.89 ± 0.03 a	0.93 ± 0.02 a	0.31 ± 0.01 a	58.13 ± 1.93 a	59.35 ± 1.53 a	24.41 ± 1.65 a
H_{OF}	0.77 ± 0.04 b	0.71 ± 0.04 b	0.28 ± 0.02 ab	48.74 ± 3.79 b	50.04 ± 1.29 b	15.25 ± 0.98 de
L_{CF}	0.62 ± 0.05 ef	0.48 ± 0.01 g	0.21 ± 0.01 ef	35.68 ± 6.84 cd	31.59 ± 2.03 f	13.79 ± 1.42 efgh
M_{CF}	0.60 ± 0.04 f	0.58 ± 0.01 f	0.20 ± 0.04 ef	39.35 ± 4.86 c	29.64 ± 0.56 f	12.01 ± 0.53 h
H_{CF}	0.56 ± 0.04 f	0.46 ± 0.02 g	0.16 ± 0.03 gh	34.07 ± 4.60 cd	24.51 ± 0.82 g	14.35 ± 0.63 efg
L_{MF}	0.71 ± 0.06 bcd	0.60 ± 0.01 ef	0.27 ± 0.01 bc	53.12 ± 0.55 ab	39.47 ± 1.58 d	14.89 ± 0.08 ef
M_{MF}	0.76 ± 0.06 bc	0.67 ± 0.02 c	0.28 ± 0.02 ab	53.88 ± 7.64 ab	42.93 ± 1.26 c	17.49 ± 0.56 cd
H_{MF}	0.69 ± 0.06 cde	0.65 ± 0.02 cd	0.28 ± 0.02 ab	48.28 ± 4.56 b	34.09 ± 1.39 e	21.51 ± 0.93 b

CK：对照；L：低；M：中；H：高. NF：氮肥；OF：有机肥；CF：复合肥；MF：混合肥. 不同小写字母代表不同肥料不同施肥水平处理下的观测值与CK差异达显著水平（$P < 0.05$）.

CK: control; L: low; M: medium; H: high. NF: nitrogen fertilizer; OF: organic fertilizer; CF: compound fertilizer; MF: mixed fertilizer. Different lowercase letters represent significant differences at 0.05 level compared with CK.

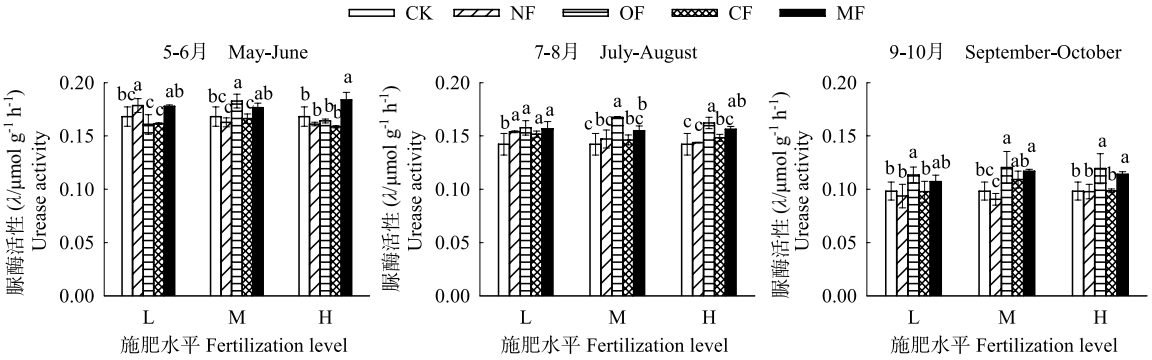

图5 不同施肥处理下的土壤脲酶活性. CK：对照；NF：氮肥；OF：有机肥；CF：复合肥；MF：混合肥. L：低；M：中；H：高. 不同小写字母代表不同肥料不同施肥水平处理下的观测值与CK差异达显著水平（$P<0.05$）.

Fig. 5 Urease activity in soil under different fertilization treatments. CK: control; NF: nitrogen fertilizer; OF: organic fertilizer; CF: compound fertilizer; MF: mixed fertilizer. L: low; M: medium; H: high. Different lowercase letters represent significant differences at 0.05 level compared with CK.

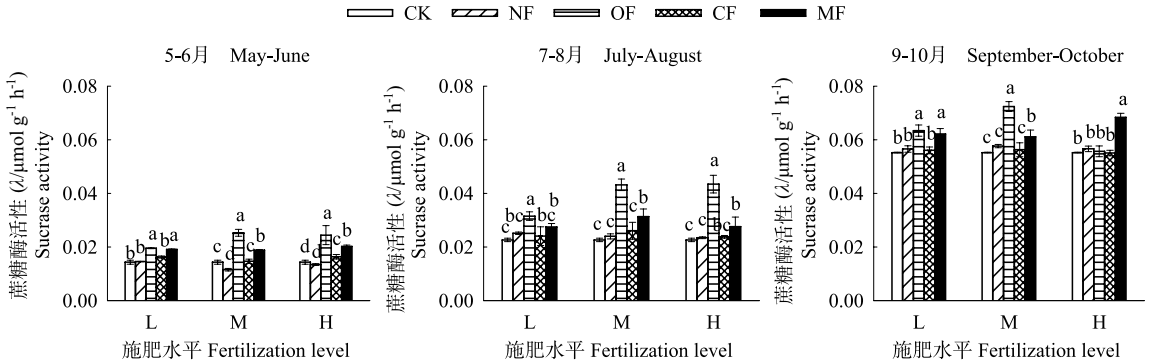

图6 不同施肥处理下的土壤蔗糖酶活性. CK：对照；NF：氮肥；OF：有机肥；CF：复合肥；MF：混合肥. L：低；M：中；H：高. 不同小写字母代表不同肥料不同施肥水平处理下的观测值与CK差异达显著水平（$P<0.05$）.

Fig. 6 Sucrase activity in soil under different fertilization treatments. CK: control; NF: nitrogen fertilizer; OF: organic fertilizer; CF: compound fertilizer; MF: mixed fertilizer. L: low; M: medium; H: high. Different lowercase letters represent significant differences at 0.05 level compared with CK.

体现出无机肥配施有机肥后，可以更有效地长时间提高脲酶活性. 施用有机肥对土壤脲酶活性促进作用显著，而其中又以中氮水平有机肥的效果最为明显，可以提高整个施肥期间的脲酶活性. 但施用复合肥对土壤脲酶活性的影响始终不大.

2.4.2 **蔗糖酶活性** 由图6可见，整个试验期内，在土壤中施氮肥和复合肥对土壤蔗糖酶活性几乎无明显影响，与CK水平相当. 施有机肥显著提高了土壤蔗糖酶活性，且酶活性随施肥水平的增加总体呈先增后减的趋势，中期（7-8月）的施肥优势特别突出，而后期（9-10月）高量有机肥处理已降至与CK无明显差异. 虽然施混合肥对于土壤蔗糖酶活性的增加幅度小于有机肥，但随着施肥时间的推移这种差距逐渐缩小，且后期高水平混合肥（H_{MF}）对土壤蔗糖酶活性的促进效应显著高于其余各处理.

2.4.3 **酸性磷酸酶活性** 由图7可以看出，在施肥初期（5-6月），复合肥处理下的土壤酸性磷酸酶活性略有升高，而从后期（9-10月）的效果来看，施氮肥和复合肥并不能显著提高土壤酸性磷酸酶活性. 与有效磷含量的变化规律一致，施有机肥后，土壤酸性磷酸酶活性随施肥量增大而先升后降，中氮水平达最大；此外，有机肥的肥效在后期凸显，与CK相比酶活性依次提高了45.18%、75.01%和67.48%. 尽管混合肥的施用对于初期（5-6月）和中期（7-8月）酸性磷酸酶活性的促进效应不明显，但是后期（9-10月）却得到了明显的改善，且3个水平之间无显著差异.

2.5 生长指标和土壤肥力主要指标的相关性分析

相关分析（表4）表明，土壤有机质与有效磷、速效钾、脲酶和酸性磷酸酶活性相关系数达极显著水平，且与土壤微生物生物量碳、氮也存在显著相关的关系. 3种土壤酶活性（脲酶、蔗糖酶和酸性磷酸酶）与土壤微生物生物量碳、氮之间表现出极显著相关，且这3种土壤酶彼此之间的相关性亦极显著. 1年生桢楠幼苗的苗高生长量主要取决于蔗糖酶活性（0.814**）、微生物生物量氮（0.727**）、水解性氮（0.633*）和有效磷含量（0.563*）. 而地径生长量却受到多种因素的综合影响，其中与蔗糖酶活性（0.881**）、微生物生物量氮（0.843**）的关系最为密切，其次还包括有效磷、酸性磷酸酶和微生物生物量碳（均呈极显著相关）.

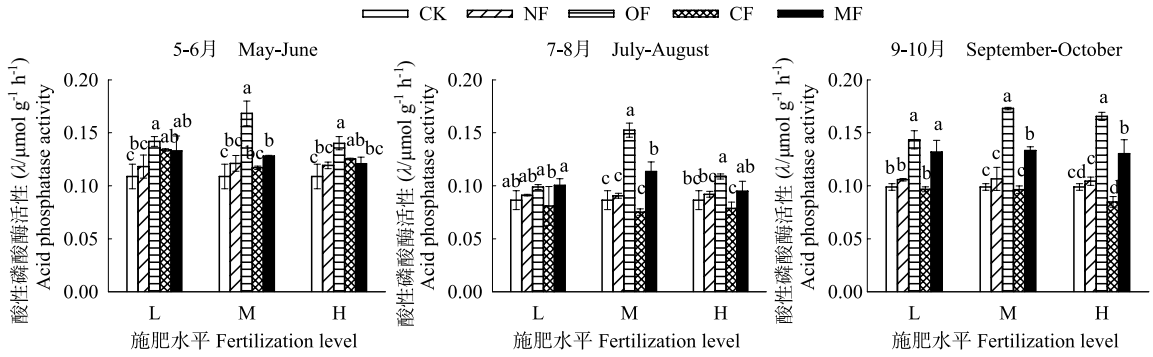

图7 不同施肥处理下的土壤酸性磷酸酶活性. CK：对照；NF：氮肥；OF：有机肥；CF：复合肥；MF：混合肥. L：低；M：中；H：高. 不同小写字母代表不同肥料不同施肥水平处理下的观测值与CK差异达显著水平（$P < 0.05$）.

Fig. 7 Acid phosphatase activity in soil under different fertilization treatments. CK: control; NF: nitrogen fertilizer; OF: organic fertilizer; CF: compound fertilizer; MF: mixed fertilizer. L: low; M: medium; H: high. Different lowercase letters represent significant differences at 0.05 level compared with CK.

表4 桢楠幼苗生长指标和土壤肥力主要指标相关性分析表（10月）

Table 4 Correlation analysis of growth of *P. zhennan* seedlings and main soil fertility indices (October)

指标 Index	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9	X10
X2	0.179									
X3	0.805**	0.392								
X4	0.786**	0.405	0.856**							
X5	0.660*	0.074	0.745**	0.627*						
X6	0.567*	0.210	0.853**	0.634*	0.748**					
X7	0.732**	0.137	0.828**	0.751**	0.844**	0.743**				
X8	0.429	0.237	0.739**	0.483	0.703**	0.935**	0.631*			
X9	0.869**	0.376	0.901**	0.841**	0.843**	0.742**	0.828**	0.684**		
X10	0.226	0.633*	0.563*	0.400	0.516	0.727**	0.458	0.814**	0.551	
X11	0.466	0.474	0.773**	0.624*	0.737**	0.843**	0.681*	0.881**	0.758**	0.906**

**相关性达极显著水平（$P < 0.01$），*相关性达显著水平（$P < 0.05$）. X1-X11分别代表有机质、水解性氮、有效磷、速效钾、微生物生物量碳、微生物生物量氮、脲酶、蔗糖酶、酸性磷酸酶、苗高、地径.

** indicates extremely significant differences at 0.01 level; * indicates a significant correlation at 0.05 level. X1: organic matter; X2: hydrolytic nitrogen; X3: available phosphorus; X4: available potassium; X5: microbial biomass C; X6: microbial biomass N; X7: urease; X8: sucrose; X9: acid phosphatase; X10: height; X11: ground diameter.

3 讨论

3.1 施肥对桢楠幼苗土壤养分状况的影响

土壤不仅是植物吸收养分的载体和媒介，同时也是一系列生理生化反应发生的重要场所，而土壤养分受外界环境影响较大，尤其是受肥料的影响[8]. 本研究结果显示，氮肥、复合肥对土壤养分含量的提高远不如有机肥和混合肥显著，其中，施氮肥对土壤中的水解性氮和速效钾含量稍有促进作用，而施复合肥只影响速效钾含量. 这与肥料种类不同对土壤结构的影响不同有密切关系. 相关研究表明，单施化肥，土壤颗粒未形成结构体，孔隙少；施用有机肥或有机无机肥配施，土壤粗颗粒数量显著增加，结构疏松，孔隙量大[17]，从而可以提高土壤的保肥能力和缓冲性能[18]，此外还可以提高0-15 cm土层土壤的蓄水能力，降低CO_2的排放[19]. 有机肥在4种肥料中成效最为显著（尤其是肥料适量的情况下），其土壤有机质、有效磷、速效钾含量均显著高于单施氮肥[20]，这与有机肥料营养均衡，养分完全，可以改善土壤理化性质及营养循环，增加土壤养分含量有直接关系；但施肥量过高会导致水解性氮、有效磷含量增加幅度减小. 而混合肥中由于添加了有机肥，补充了有机物质成分，土壤养分状况得到明显改善. 报道指出，不同施肥制度对氮的利用率影响较大，单施氮肥，氮的表观利用率仅0.51 %，同时造成土壤NO_3^--N大量累积和淋洗[21]；配施有机肥，氮的表观利用率高达50 %，可以有效地缓解土壤对NO_3^--N的积累[16].

3.2 施肥对桢楠幼苗土壤微生物生物量的影响

土壤微生物是土壤中物质转化和养分循环的驱动者[22]，是象征土壤肥力以及评价土壤健康的重要指标之一[23]. 土壤微生物生物量包含2%-5%的土壤碳以及1%-5%的土壤氮[24]，前人大量研究表明，施肥可以不同程度地提高土壤微生物生物量[25]，但添加有机肥的处理明显高于化肥[26]，这与本研究结果相同，即有机肥的促进作用最显著. 一般来说，有机肥含有丰富的有机物质以及大量的微量元素[27]，故可直接向土壤提供有机质，增加微生物所需要的营养和能源物质，促进其生长和繁殖，从而丰富土壤微生物种类，提高土壤微生物性能[28]. 此外，有机肥还可以间接地通过促进根系伸展来增加碳的固定[29]. 从以上的研究可以推断，有机肥对于土壤微生物环境的改善与有机肥的肥效持久性有直接关系；此外，

微生物生物量氮与幼苗生长极显著相关性，亦间接体现出有机肥对促进桢楠生长至关重要. 而施氮肥最终表现是土壤微生物生物量碳降低，这与前人的研究结论[30]一致. 有关报道称，长期施用化肥可能导致土壤微生物氨氧化作用加强，硝态氮淋溶造成地下水污染[31]；且极易降低土壤微生物群落多样性，导致微生物功能丧失[32]. 在本研究中，与单施化肥的土壤相比，施混合肥的微生物生物量氮明显更高，且随着施肥量的增加有不断升高的趋势. 研究发现，在有机无机肥配施的土壤中，土壤微生物数量明显增加[33]，其中包括自生固氮菌、好氧细菌、放线菌[34]等，说明有机无机肥配施可增加土壤有益微生物的数量，有利于固氮.

3.3 施肥对桢楠幼苗土壤酶活性的影响

土壤酶在生态系统的有机质分解和养分循环所必需的催化反应中起着重要作用[35]，象征着为保持土壤质量而进行的生物化学过程的土壤潜力[36]. 土壤酶与微生物的关系密切，因为土壤酶主要来源于植物残体、根系分泌和微生物活动[37]，其活性大小能反映出土壤微生物活动程度，常作为评价微生物活性和土壤肥力的重要参数[38]. 在本研究中，从施肥后期（9-10月）的试验结果来看，氮肥和复合肥对脲酶、蔗糖酶和酸性磷酸酶活性均无明显影响，但氮肥、复合肥与有机肥搭配形成的混合肥能显著提高土壤酶活性. 刘骅也发现，长期单施化肥对灰漠土中大多数酶活性影响不明显；但化肥配施秸秆则显著增加了转化酶、脲酶、蛋白酶、中性与碱性磷酸酶活性[39]. 本研究中有机肥以及混合肥的效果高于单一化肥，从土壤酶的角度看，首先，可能是由于有机肥料中本身含有丰富的酶，施入土壤后有直接的“加酶”作用[40]；其次，有机肥料的投入增加土壤有机质含量，从而增加了土壤酶的保护性位点[41]；作为土壤微生物的碳源，有机质的增加促进了微生物繁殖，刺激了酶活性提高[42]；而作为土壤酶的底物，有机质的施入可能直接诱导土壤酶活性提高，并且通过改善土壤环境，加速有机物的分解，为土壤酶提供了更多的底物[43]. 当然，并不是有机物质越多酶活性越高，施肥过量也会产生负效应，施加高量有机肥使得蔗糖酶活性骤降至CK水平.

3.4 施肥对桢楠幼苗生长状况的影响

从提高土壤肥力来看，有必要增加土壤对氮的固持，而从植物营养角度出发，土壤中的氮素需不断矿化以保证植物的生长发育[44]. 本研究发现，在所有施肥处理中，中氮水平的有机肥对于桢楠生长的促进效应最大. 如上所述，有机肥能增加土壤微生物数量，从而增加土壤微生物固定的氮，有效防止氮被淋洗、挥发而流失，经过一段时间之后，通过对最初固定的氮的再矿化，形成一种为植物持续提供有效营养的方式[45]. 此外，这些土壤微生物还能分泌生长活性物质，如生长素、细胞分裂素、玉米素等，促进植物生长[46]. 因此，无论是提供土壤养分，还是促进植物生长发育，有机肥的效果都优于单施化肥. 高量混合肥是在低量氮肥的基础上添加了低量有机肥，其对桢楠生长的促进作用远远大于低量氮肥，表明配施有机肥可通过改善土壤环境最终促进受体植物的生长. 有研究显示，当单施氮肥对苏格兰松林的促进效应已经消失时，在施氮基础上增施木材灰仍能促进松树体积的增长，且这种促进作用至少可以持续23年[47]. 通过生长指标与土壤肥力指标的相关性分析得出，1年生桢楠幼苗在次年的生长过程中，其发育状况（苗高、地径生长）均与土壤蔗糖酶活性、微生物生物量氮呈极显著正相关，反映出这两个指标对于桢楠生长状况具有直接指示作用.

综上所述，通过本研究试验4种肥料的3个施氮水平之间的比较分析说明，在力求施肥以促进桢楠幼苗生长的同时维持并尽可能提高土壤肥力，中氮水平的有机肥无疑是首选. 此外，在施氮肥的基础上配合施用有机肥不仅可以改善土壤肥力状况，还能显著促进桢楠幼苗生长，故可以作为施肥过程中一个及时有效的改进措施.

参考文献 [References]

1 闫湘, 金继运, 何萍, 梁鸣早. 提高肥料利用率技术研究进展[J]. 中国农业科学, 2008, **41** (2): 450-459 [Yan X, Jin JY, He P, Liang MZ. Recent advances in technology of increasing fertilizer use efficiency[J]. *Sci Agric Sin*, 2008, **41** (2): 450-459]

2 Bouman OT, Curtin D, Campbell CA, Biederbeck VO, Ukrainetz H. Soil acidification from long-term use of anhydrous ammonia and urea [J]. *Soil Sci Soc Am J*, 1995, **59** (5): 1488-1494

3 Sifola MI, Postiglione L. The effect of nitrogen fertilization on nitrogen use efficiency of irrigated and non-irrigated tobacco (*Nicotiana tabacum* L.) [J]. *Plant Soil*, 2003, **252**: 313-323

4 Bhandari AL, Ladha JK, Pathak H, Padre AT, Dawe D, Gupta RK. Yield and soil nutrient changes in a long-term rice-wheat rotation in India [J]. *Soil Sci Soc Am J*, 2002, **66** (1): 162-170

5 李玲玲, 李书田. 有机肥氮素矿化及影响因素研究进展[J]. 植物营养与肥料学报, 2012, **18** (3): 749-757 [Li LL, Li ST. A review on nitrogen mineralization of organic manure and affecting factors [J]. *Plant Nutr Fertil Sci*, 2012, **18** (3): 749-757]

6 周林, 马以秀, 潘勇, 唐登松, 韦正秀. 杨树林带施肥效应及其收获量[J]. 防护林科技, 2008 (5): 57 -58 [Zhou L, Ma YX, Pan Y, Tang DS, Wei ZX. Fertilization effect of Poplar forest belt and its yield [J]. *Prot For Sci Technol*, 2008 (5): 57 -58]

7 聂胜委, 黄绍敏, 张水清, 郭斗斗, 张巧萍, 张玉亭, 宝德俊, 陈源泉. 长期定位施肥对作物效应的研究进展[J]. 土壤通报, 2012, **43** (3): 979-987[Nie SW, Huang SM, Zhang SQ, Guo DD, Zhang QP, Zhang YT, Bao DJ, Chen YQ. Advances in research on effects of long-term located fertilization on crops [J]. *Chin J Soil Sci*, 2012, **43** (3): 979-987]

8 聂胜委, 黄绍敏, 张水清, 郭斗斗, 张巧萍, 张玉亭, 宝德俊, 陈源泉. 长期定位施肥对土壤效应的研究进展[J]. 土壤, 2012, **44** (2): 188-196 [Nie SW, Huang SM, Zhang SQ, Guo DD, Zhang QP, Zhang YT, Bao DJ, Chen YQ. Effects of long-term located fertilization on soils: a review [J]. *Soils*, 2012, **44** (2): 188-196]

9 包耀贤, 徐明岗, 吕粉桃, 黄庆海, 聂军, 张会民, 于寒青. 长期施肥下土壤肥力变化的评价方法[J]. 中国农业科学, 2012, **45** (20): 4197-4204 [Bao YX, Xu MG, Lv FT, Huang QH, Nie J, Zhang HM, Yu HQ. Evaluation method on soil fertility under long-term fertilization [J]. *Sci Agric Sin*, 2012, **45** (20): 4197-4204]

10 王静, 王渭玲, 徐福利, 曹鲜艳, 石福高, 张晓虎. 桔梗N、P、K施肥效应与施肥模式研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2012, **18** (1): 196-202 [Wang J, Wang WL, Xu FL, Cao XY, Shi FG, Zhang XH. Effects and models of nitrogen, phosphorus and potassium fertilization for *Platycodon grandiflorum* [J]. *Plant Nutr Fertil Sci*, 2012, **18** (1): 196-

202]
11 沈国舫. 森林培育学[M]. 北京: 中国林业出版社, 2001 [Shen GF. Silvicuture [M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 2001]
12 陈宜木. 山茶属3种食用油植物苗期施肥效应研究[D]. 福建福州: 福建农林大学, 2012 [Chen YM. Three kinds of edible oil plants of *Camellia* seedlings effect of fertilization [D]. Fujiang: Fujiang Agriculture and Forestry University, 2012]
13 李酉开. 土壤农业化学常规分析方法[M]. 北京: 科学出版社, 1984 [Li QK. The conventional analytical methods for soil agriculture chemistry [M]. Beijing: Science Press, 1984]
14 关松荫. 土壤酶及其研究法[M]. 北京: 农业出版社, 1983 [Guan SY. Soil Enzyme and Its Research Methods [M]. Beijing: Agriculture Press, 1983]
15 李振高, 骆永明, 滕应. 土壤与环境微生物研究法[M]. 北京: 科学出版社, 2008 [Li ZG, Luo YM, Teng Y. Research methods of soil environmental microorganism [M]. Beijing: Science Press, 2008]
16 Yang SM, Li FM, Suo DR, Guo TW, Jin SL. Effect of long-term fertilization on soil productivity and nitrate accumulation in Gansu Oasis [J]. *Agric Sci China*, 2005, **5** (1): 57-67
17 秦鱼生, 涂仕华, 王正银, 冯文强, 孙锡发. 长期定位施肥下紫色土土壤微形态特征[J]. 生态环境学报, 2009, **18** (1): 352-356 [Qin YS, Tu SH, Wang ZY, Feng WQ, Sun XF. Micro-morphological features of a purple soil under different long-term fertilizer treatments [J]. *Ecol Environ Sci*, 2009, **18** (1): 352-356]
18 Kautz T, Lopez-fando C, Ellmer F. Abundance and biodiversity of soil microarthropods as influenced by different types of organic manure in a long-term field experiment in Central Spain [J]. *Appl Soil Ecol*, 2006, **33** (3): 278-285
19 Fan TL, Stewart BA, Wang Y, L JJ, Guang Y. Long-term fertilization effects on grain yield, water-use efficiency and soil fertility in the dryland of Loess Plateau in China [J]. *Agric Ecosyst Environ*, 2005, **106** (4): 313-329
20 朱新玉, 董志新, 况福虹, 朱波. 长期施肥对紫色土农田土壤动物群落的影响[J]. 生态学报, 2013, **33** (2): 464-474 [Zhu XY, Dong ZX, Kuang FH, Zhu B. Effects of fertilization regimes on soil faunal communities in cropland of purple soil, China [J]. *Acta Ecol Sin*, 2013, **33** (2): 464-474]
21 刘树堂, 刘培利, 迟睿, 王锋, 魏志刚. 长期定位施肥对无石灰性潮土0-100 cm 土层NO_3^--N动态变化的影响[J]. 水土保持研究, 2005, **12** (5): 153-155 [Liu ST, Liu PL, Chi R, Wang F, Wei ZG. Effects of long-term located fertilization on dynamic changes of NO_3^--N in 0-100 cm layer of the Non-calcareous Fluro-aquic soil [J]. *Res Soil Water Conserv*, 2005, **12** (5): 153-155]
22 Henrot K, Robertson GP. Vegetation removal in two soils of the humid tropics: effect on micr obial biomass [J]. *Soil Biol Biochem*, 1994, **26**: 111-116
23 Zhang NN, Sun YM, Li L, Wang ET, Chen WX, Yuan HL. Effects of intercropping and Rhizobium inoculation on yield and rhizosphere bacterial community of faba (*Vicia faba* L.) [J]. *Biol Fertil Soils*, 2010, **46**: 625-639
24 Lohmus K, Truu M, Truu J, Ostonen I, Kaar E, Vares A, Uri V, Alama S, Kanal A. Functional diversity of culturable bacterial communities in the rhizosphere in relation to fine-root and soil parameters in alder stands on forest, abandoned agricultural, and oil-shale mining areas [J]. *Plant Soil*, 2006, **283** (1): l-l0
25 马晓霞, 王莲莲, 黎青慧, 李花, 张树兰, 孙本华, 杨学云. 长期施肥对玉米生育期土壤微生物量碳氮及酶活性的影响[J]. 生态学报, 2012, **32** (17): 5502-5511 [Ma XX, Wang LL, Li QH, Li H, Zhang SL, Sun BH, Yang XY. Effects of long-term fertilization on soil microbial biomass carbon and nitrogen and enzyme activities during maize growing season [J]. *Acta Ecol Sin*, 2012, **32** (17): 5502-5511]
26 Goyal SC, Mundra MC, Kapoor KK. Influence of inorganic fertilizers and organic amendments on soil organic matter and soil microbial properties under tropical conditions [J]. *Biol Fertil Soils*, 1999, **29**: 196-200
27 Cayuela ML, Sinicco T, Mondini C. Mineralization dynamics and biochemical properties during initial decomposition of plant and animal residues in soil [J]. *Appl Soil Ecol*, 2008, **41**: 118-127
28 Belay A, Classens AS, Wehner FC, Beer JM. Influence of residual manure on selected nutrient elements and microbial composition of soil under long-term crop rotation [J]. *South Afr J Plant Soil*, 2001, **18** (1): 1-6
29 Yan XY, Gong W. The role of chemical and organic fertilizers on yield, yield variability and carbon sequestration- results of a 19-year experiment [J]. *Plant Soil*, 2010, **331**: 471-480
30 Nohrstedt H-Ö, Arnebrant K, Bååth E, Söderström B. Change in carbon content, respiration rate, ATP content, and microbial biomass in nitrogen-fertilized pine forest soils in Sweden [J]. *Can J For Res*, 1989, **19**: 323-328
31 Papatheodorou EM, Efthimiadou E, Stamou GP. Functional diversity of soil bacteria as affected by management practices and phenological stage of *Phaseolus vulgaris* [J]. *Eur J Soil Biol*, 2008, **44** (4): 429-436
32 Lupwayi NZ, Rice WA, Clayton GW. Soil microbial diversity and community structure under wheat as influenced by tillage and crop rotation [J]. *Soil Biol Biochem*, 1998, **30** (13): 1733-1741
33 Dinesh R, Dubey RP, Ganeshamurthy AN, Prasad GS. Organic manuring in rice-based cropping system: effects on soil microbial biomass and selected enzyme activities [J]. *Curr Sci*, 2000, **79** (12): 1716-1720
34 Lee J. Effect of application methods of organic fertilizer on growth, soil chemical properties and microbial densities in organic bulb onion production[J]. *Sci Horticult*, 2010, **124**: 299-305
35 Allison VJ, Condron LM, Peltzer DA, Richardson SJ, Turner BL. Changes in enzyme activities and soil microbial community composition along carbon and nutrient gradients at the Franz Josef chronosequence, New Zealand [J]. *Soil Biol Biochem*, 2007, **39** (7): 1770-1781
36 Moscatelli MC, Fonck M, Angelis PD, Larbi H, Macuz A, Rambelli A, Grego S. Mediterranean natural forest living at elevated carbon dioxide: soil biological properties and plant biomass growth [J]. *Soil Use Manage*, 2001, **17**: 195-202
37 袁玲, 杨帮俊, 郑兰君, 刘学成. 长期施肥对土壤酶活性及氮磷养分的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 1997, **3** (4): 300-304 [Yuan L, Yang BJ, Zheng LJ, Liu XC. Effects of long-term fertilization on enzymatic activities and transformation of nitrogen and phosphorus in soil [J]. *Plant Nutr Fertil Sci*, 1997, **3** (4): 300-304]
38 Yuan L, Bao DJ, Jin Y, Yang YH, Huang JG. Influence of fertilizers on nitrogen mineralization and utilization in the rhizosphere of wheat [J]. *Plant Soil*, 2011, **343**: 187-193
39 刘骅, 林英华, 张云舒, 谭新霞, 王西和. 长期施肥对灰漠土生物群落和酶活性的影响[J]. 生态学报, 2008, **28** (8): 3898-3904 [Liu H, Lin YH, Zhang YS, Tan XX, Wang XH. Effects of long-term fertilization on

biodiversity and enzyme activity in grey desert soil [J]. *Acta Ecol Sin*, 2008, **28** (8): 3898-3904]

40 王树起, 韩晓增, 乔云发, 王守宇. 长期施肥对东北黑土酶活性的影响[J]. 应用生态学报, 2008, **19** (3): 551-556 [Wang SQ, Han XZ, Qiao YF, Wang SY. Effects of long-term fertilization on enzyme activities in black soil of Northeast China [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2008, **19** (3): 551-556]

41 Martens DA, Johanson JB, Frankerberger WT. Production and persistence of soil enzymes with repeated addition of organic residues [J]. *Soil Sci*, 1992, **153**: 53-61

42 尤彩霞, 陈清, 任华中, 郝洁, 林志超, 袁承前. 不同有机肥及有机无机配施对日光温室黄瓜土壤酶活性的影响[J]. 土壤学报, 2006, **43** (3): 521-523[You CX, Chen Q, Ren HZ, Hao J, Lin ZC, Yuan CQ. Effect of organic manure with and without urea-dressing on soil enzyme activities in greenhouse growth cucumber [J]. *Acta Pedol Sin*, 2006, **43** (3): 521-523]

43 Timo K, Cristina LF, Frank E. Abundance and biodiversity of soil microathropods as influenced by different types of organic manure in a long-term field experiment in Central Spain [J]. *Appl Soil Ecol*, 2006, **33**: 278-285

44 刘仁君, 曹彦圣, 田玉华, 尹斌. 不同施肥措施对稻田土壤氮矿化的影响[J]. 土壤, 2012, **44** (3): 389-394 [Liu RJ, Cao YS, Tian YH, Yin B. Effects of different fertilization practices on nitrogen mineralization of paddy soils [J]. *Soils*, 2012, **44** (3): 389-394]

45 Yevdokimov I, Gattinger A, Buegger F, Munch JC, Schloter M. Changes in microbial community structure in soil as a result of different amounts of nitrogen fertilization [J]. *Biol Fertil Soils*, 2008, **44** (8): 1103-1106

46 Katarina H. Soil microbial community structure in relation to vegetation management on former agricultural land [J]. *Soil Biol Biochem*, 2002, **34** (9): 1299-1307

47 Saarsalmi A, Kukkola M, Moilanen M, Arola M. Long-term effects of ash and N fertilization on stand growth, tree nutrient status and soil chemistry in a Scots pine stand [J]. *For Ecol Manage*, 2006, **235**: 116-128