

DOI: 10.13718/j.cnki.xdzk.2025.01.015

杜洋文, 周倩, 杜拾平, 等. 配方施肥对薄壳山核桃生长及土壤性状的影响 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2025, 47(1): 178-188.

配方施肥对薄壳山核桃生长及土壤性状的影响

杜洋文¹, 周倩², 杜拾平¹, 程军勇¹, 张荣洋³

1. 湖北省林业科学研究院, 武汉 430075; 2. 湖北省林木种苗管理总站 武汉 430079;

3. 京山市虎爪山林场, 湖北 荆门 431815

摘要: 为探索薄壳山核桃幼林生长发育的适宜施肥配方, 采用氮、磷、钾 3 因素 4 水平 16 个处理的正交试验设计, 探究不同施肥配方对薄壳山核桃幼林生长、土壤酶活性、土壤养分含量及叶片矿质养分含量的影响。结果表明: 影响幼林树高和茎粗增长量大小的肥料主次顺序为: 尿素、氯化钾、过磷酸钙, 最优水平组合为: 尿素 0.45 kg/株 + 过磷酸钙 1.71 kg/株 + 氯化钾 0.28 kg/株; 影响叶片氮、磷、钾含量高低的肥料主次顺序为: 氯化钾、尿素、过磷酸钙, 最优水平组合为: 尿素 0.11 kg/株 + 过磷酸钙 0.85 kg/株 + 氯化钾 0.46 kg/株; 影响土壤有效氮、磷、钾及有机质含量高低的肥料主次顺序为: 尿素、氯化钾、过磷酸钙, 最优水平组合为: 尿素 0.33 kg/株 + 过磷酸钙 1.28 kg/株 + 氯化钾 0.28 kg/株; 影响土壤酶活性高低的肥料主次顺序为: 尿素、过磷酸钙、氯化钾, 最优水平组合为: 尿素 0.22 kg/株 + 过磷酸钙 0.85 kg/株 + 氯化钾 0.28 kg/株。树高和茎粗增长量与叶片全氮和全磷含量存在显著负相关, 土壤蔗糖酶与土壤有效氮、磷、钾存在显著正相关。总体上, 对薄壳山核桃幼林生长发育影响的肥料主次顺序为: 尿素、氯化钾、过磷酸钙, 最优施肥水平组合为尿素 0.45 kg/株 + 过磷酸钙 0.85 kg/株 + 氯化钾 0.28 kg/株。

关键词: 配方施肥; 薄壳山核桃; 生长; 土壤酶; 土壤养分;

叶片养分

中图分类号: S664.1; P934

文献标志码: A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):

文章编号: 1673-9868(2025)01-0178-11



Effects of Formula Fertilization on the Growth and Soil Characteristics of *Carya illinoensis*

DU Yangwen¹, ZHOU Qian², DU Shiping¹,
CHENG Junyong¹, ZHANG Rongyang³

1. Hubei Academy of Forestry, Wuhan 430075, China;

2. Hubei Provincial Forest Tree Seed and Seedling Administration, Wuhan 430079, China;

3. Jingshan Huzhao Mountain Forest Farm, Jingmen Hubei 431815, China

收稿日期: 2024-02-20

基金项目: 中央财政林业科技推广示范资金项目(鄂[2023]TG13号); 湖北省林业科学院科技攻关项目(2021YGG02); 湖北省重点研发计划项目(2022BBA153)。

作者简介: 杜洋文, 硕士, 副研究员, 主要从事经济林良种培育与高效优质栽培技术研究。

通信作者: 程军勇, 研究员。

Abstract: To explore the suitable fertilization formulas for the growth and development of the *Carya illinoensis* young forest, a N, P, K 3 factors with 4 levels in 16 treatments of orthogonal experiment was designed to explore the effects of different fertilization formulas on the growth, soil enzyme activity, soil nutrient content and the nutrient content of leaf mineral. The order of fertilizer affecting the young forest tree height and stem thickness growth reducing as: urea, potassium chloride, calcium superphosphate and the optimal level combination was: $0.45 \text{ kg} \cdot \text{plant}^{-1}$ urea + $1.71 \text{ kg} \cdot \text{plant}^{-1}$ calcium perphosphate + $0.28 \text{ kg} \cdot \text{plant}^{-1}$ potassium chloride. The order of fertilizer affecting the content of leaf nitrogen, phosphorus and potassium reducing as: potassium chloride, urea, calcium superphosphate and the optimal level combination was: $0.11 \text{ kg} \cdot \text{plant}^{-1}$ urea + $0.85 \text{ kg} \cdot \text{plant}^{-1}$ calcium superphosphate + $0.46 \text{ kg} \cdot \text{plant}^{-1}$ potassium chloride. The order of fertilizer that affected the effective content of soil nitrogen, phosphorus, potassium and organic matter reducing as: urea, potassium chloride, calcium superphosphate and the optimal level combination was: $0.33 \text{ kg} \cdot \text{plant}^{-1}$ urea + $1.28 \text{ kg} \cdot \text{plant}^{-1}$ calcium perphosphate + $0.28 \text{ kg} \cdot \text{plant}^{-1}$ potassium chloride. The order of fertilizer that affected the level of soil enzyme activity reducing as: urea, calcium superphosphate, potassium chloride and the optimal level combination was: $0.22 \text{ kg} \cdot \text{plant}^{-1}$ urea + $0.85 \text{ kg} \cdot \text{plant}^{-1}$ calcium superphosphate + $0.28 \text{ kg} \cdot \text{plant}^{-1}$ potassium chloride. The growth of tree height and stem diameter were significantly negatively correlated with leaf total N and P contents. There was a significant positive correlation between soil sucrase and soil effective N, P and K. The order of fertilizer affecting the growth and development of young forest reducing as: urea, potassium chloride, calcium superphosphate and the optimal level of fertilization combination was $0.45 \text{ kg} \cdot \text{plant}^{-1}$ urea + $0.85 \text{ kg} \cdot \text{plant}^{-1}$ calcium perphosphate + $0.28 \text{ kg} \cdot \text{plant}^{-1}$ potassium chloride.

Key words: formula fertilization; *Carya illinoensis*; growth; soil enzymes; soil nutrients; leaf nutrients

薄壳山核桃 (*Carya illinoensis*) 为胡桃科 (Juglandaceae) 山核桃属 (*Carya* Nutt.)^[1-3], 又名美国山核桃、长山核桃, 是世界著名的干果油料树种之一。果实种仁富含脂肪酸和蛋白质, 种仁含油率 51.57% ~ 69.47%, 是集社会、经济和生态三大效益于一体的优良经济树种^[4]。目前, 我国薄壳山核桃种植面积在迅速扩大, 但由于林农在薄壳山核桃幼林期缺乏管理, 施肥不合理, 导致树体生长缓慢, 进入挂果期等待时间较长, 不利于产业的健康发展。合理的配比施肥能促进植物快速生长和干物质积累, 不同配比的氮磷钾施肥也会对作物的生长和产量产生影响^[5], 程勇等^[6]研究表明, 氮磷钾配比施肥能显著促进青冈栎的幼苗生长, 且氮肥和磷肥起主要作用; 张明月等^[5]研究表明, 不同氮磷钾配比施肥对罗汉松幼苗的高生长和地径生长影响显著, 其中氮肥的影响最大, 磷肥次之, 钾肥影响最小; 张秀志等^[7]研究表明, 有机肥配施后能显著增加土壤有机质, 速效氮、磷、钾质量分数, 提高土壤肥力。

土壤速效氮、磷、钾是能够被植物根系直接吸收利用的养分, 能够促进植物生长发育^[8]。氮磷钾无机肥能够快速补充土壤养分元素, 提高土壤肥力^[9]。土壤酶直接参与土壤中物质的转化、养分释放和固定过程, 与土壤供肥密切相关^[10], 两者存在一定的相关关系^[11]。土壤酶的活性是土壤肥力的重要指标^[12-13], 土壤酶通过催化土壤基质转化进程释放出大量可溶性养分, 直接或间接参与土壤养分循环过程^[14], 提供植物积累干物质所需的元素与能量, 影响着整个根际生态系统的稳定性^[15]。施肥增加了土壤外源养分投入, 改善了土壤结构和养分状况, 促进土壤养分循环转化, 从而提高土壤有效养分含量^[16], 改善了土壤微生物活动环境, 促进土壤微生物活动和繁殖, 进而提高土壤酶活性, 也会导致土壤有效氮磷钾养分的流失^[17]; 马群等^[18]研究表明, 生物炭与有机无机肥配施可显著提高土壤养分含量和土壤蛋白酶与蔗糖酶活性; 余高等^[19]研究了不同施肥对幼龄柑橘园土壤养分和酶活性的影响; 余春和

等^[20]研究了土壤养分和酶活性间的相关性。已有相关施肥研究^[21-23]主要针对薄壳山核桃苗期生长的影响,但关于薄壳山核桃幼林施肥后对土壤养分及土壤酶活性的影响鲜有报道,本研究通过正交设计研究不同施肥配方对薄壳山核桃幼林植株生长发育、叶片养分积累、土壤养分含量及酶活性的影响,探索影响幼林生长发育的主要肥料种类及最优施肥水平组合,为幼林快速生长发育提供合理施肥配方,促进幼林快速成林并进入挂果期。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地位于京山市虎爪山林场,处于鄂中丘陵至江汉平原的过渡地带。地理坐标为:112°43′—113°29′E,30°42′—31°27′N。属北亚热带季风气候区,年平均气温 16.3 °C,极端最高气温 40.3 °C,极端最低气温 -6.2 °C。无霜期 223~243 d,年均太阳辐射总量 108~110 kcal/cm²,日照总时数 1 970.5 h,日照百分率 46%。年平均降水量 117 mm,夏季降水量约占全年的 41%~45%,冬季占 7%~8%,春季占 28%~32%,秋季占 18%~20%,年降水日数 104~130 d,主要集中在春季和梅雨季节。试验地为低丘岗地,以砂壤土为主,土壤养分质量分数分别为:碱解氮 90 mg/kg,有效磷 6.28 mg/kg,速效钾 186 mg/kg,有机质 17.1 g/kg,pH 值为 5.52。

1.2 试验材料

以薄壳山核桃‘波尼’品种为供试材料,该试验林 2017 年 3 月按株行距 6 m×8 m 栽植,从试验林中选择 3.0~3.5 cm 茎粗、2.0~2.5 m 树高、(2.0~2.5) m×(2.0~2.5) m 冠幅基本一致的幼树 32 株。林地日常管理主要采取除杂、施肥、灌溉及病虫害防治等措施。

1.3 试验方法

采用 3 因素 4 水平 $L_{16}(3)^4$ 正交试验设计,共 16 个处理,各因素各水平具体如表 1 所示。每处理 3 株,共 48 株。试验采用的肥料种类及规格为:尿素含 N 46.9%、过磷酸钙含 P₂O₅ 12%、氯化钾含 K₂O 60%,按 $L_{16}(3)^4$ 正交设计配制 16 个处理所需肥料,每个处理 2 份。2022 年 3 月上旬布置试验,施肥时在树冠两侧沟施,沟深 30 cm,沟宽 20 cm,沟长 1.5 m,肥料充分混匀,均匀撒施,覆土比土面略低。

表 1 正交表头设计

水平因素	尿素/(kg·株 ⁻¹)	过磷酸钙/(kg·株 ⁻¹)	氯化钾/(kg·株 ⁻¹)
1	0.11	0.85	0.28
2	0.22	1.28	0.37
3	0.33	1.71	0.46
4	0.45	2.14	0.56

1.4 测定指标

试验施肥前测定供试植株树高和茎粗,2022 年 11 月上旬再次测定树高和茎粗;树木落叶前采集各试验处理叶片,每个处理采取双株混合叶片;土壤取离树体主干 30 cm 处 0~20 cm 土层样本 1 kg,清除表层落叶、石砾等杂质,用以测定土壤碱解氮、有效磷、速效钾、有机质及土壤酶活性。树高和茎粗增长量为前后两次测量差值,叶片全氮、全磷、全钾采用《森林植物与森林枯枝落叶层全氮、磷、钾、钠、钙、镁的测定》(LY/T 1271—1999)测定,土壤酶活性参照文献[24]中的方法进行测定,其中脲酶活性采用苯酚钠一次氯酸钠比色法测定,蔗糖酶活性采用 3,5-二硝基水杨酸比色法测定,酸性磷酸酶活性采用磷酸苯二钠比色法测定,土壤过氧化氢酶活性采用高锰酸钾滴定法测定。土壤水解性氮测定采用《森林土壤氮的测定》(LY/T 1228—2015)标准,有效磷测定采用《森林土壤磷的测定》(LY/T 1232—2015)标准,速效钾测定采用《森林土壤钾的测定》(LY/T

1234—2015)标准, 有机质测定采用《森林土壤有机质的测定及碳氮比的计算》(LY/T 1237—1999)标准。

1.5 数据与分析

采用正交试验的极差分析法, 确定因素主次及各因素最优水平组合。

2 结果与分析

2.1 不同施肥配方对薄壳山核桃幼林生长的影响

由表 2 可知, 16 个施肥配方处理后树高增长量较大的是处理 6、7、11、14 和 16, 增长量为 1.52~1.78 m, 影响树高增长量大小的肥料主次顺序为: 尿素、氯化钾、过磷酸钙; 茎粗增长量较大的是处理 1、7、14、15、16、6 和 12, 增长量为 20.26~24.42 mm, 影响茎粗增长量大小的肥料主次顺序为: 尿素、氯化钾、过磷酸钙。综上可知, 3 种肥料对树高增长量和茎粗增长量影响主次顺序均为: 尿素、氯化钾、过磷酸钙, 最优水平组合均为: 尿素 0.45 kg/株+过磷酸钙 1.71 kg/株+氯化钾 0.28 kg/株。

表 2 不同施肥配方对薄壳山核桃幼林树高和地径增长影响

处理	A 尿素	B 过磷酸钙	C 氯化钾	树高增长量/m	茎粗增长量/mm
1	1	1	1	1.41	24.42
2	1	2	2	1.08	15.87
3	1	3	3	0.94	10.80
4	1	4	4	0.70	9.82
5	2	1	2	0.85	16.28
6	2	2	1	1.52	22.01
7	2	3	4	1.78	23.99
8	2	4	3	1.14	14.87
9	3	1	3	0.97	14.93
10	3	2	4	0.86	12.07
11	3	3	1	1.61	17.18
12	3	4	2	1.19	20.26
13	4	1	4	1.38	18.53
14	4	2	3	1.84	23.67
15	4	3	2	1.34	22.88
16	4	4	1	1.57	22.69
R_{H1}	2.06	2.30	3.05		
R_{H2}	2.64	2.65	2.23		
R_{H3}	2.31	2.83	2.44		
R_{H4}	3.06	2.29	2.36		
$R_{\max-\min}$	1.01	0.54	0.82		
因素主次: A>C>B			最优水平组合: A ₄ B ₃ C ₁		
R_{D1}	30.45	37.07	43.15		
R_{D2}	38.57	36.81	37.64		
R_{D3}	32.21	37.42	32.13		
R_{D4}	43.88	33.81	32.20		
$R_{\max-\min}$	13.43	3.61	11.02		
因素主次: A>C>B			最优水平组合: A ₄ B ₃ C ₁		

注: H 为树高, D 为茎粗。

2.2 不同施肥配方对薄壳山核桃幼林叶片养分质量分数的影响

由表 3 可知, 16 个施肥配方处理后薄壳山核桃幼林植株叶片养分全氮质量分数以处理 8、9、3、4 和 10 较高, 其中处理 8 叶片全氮质量分数最高, 达 22.2 g/kg, 影响叶片全氮质量分数高低的肥料主次顺序为: 氯化钾、尿素、过磷酸钙; 叶片全磷质量分数以处理 3、4、8、15 和 13 较高, 其中处理 3 最高, 达 1.27 g/kg, 影响叶片全磷质量分数高低的肥料主次顺序为: 尿素、氯化钾、过磷酸钙; 叶片全钾质量分数以处理 6、13、1 和 3 较高, 其中处理 6 最高, 达 15.9 g/kg, 影响叶片全钾质量分数高低的肥料主次顺序为: 氯化钾、过磷酸钙、尿素。综上可知, 对叶片全氮、全磷、全钾质量分数影响的肥料主次顺序为: 氯化钾、尿素、过磷酸钙, 最优水平组合为: 尿素 0.11 kg/株+0.85 过磷酸钙 kg/株+氯化钾 0.46 kg/株。

表 3 不同施肥配方对薄壳山核桃幼林叶片养分含量影响

处理	A 尿素	B 过磷酸钙	C 氯化钾	TN/(g · kg ⁻¹)	TP/(g · kg ⁻¹)	TK/(g · kg ⁻¹)
1	1	1	1	12.0	0.72	11.8
2	1	2	2	14.6	0.85	7.9
3	1	3	3	17.4	1.27	10.1
4	1	4	4	17.4	1.23	9.2
5	2	1	2	12.5	0.54	9.1
6	2	2	1	12.7	0.84	15.9
7	2	3	4	11.2	0.57	5.6
8	2	4	3	22.2	1.04	3.6
9	3	1	3	17.9	0.82	5.9
10	3	2	4	16.3	0.75	7.5
11	3	3	1	13.4	0.79	7.2
12	3	4	2	13.2	0.75	4.4
13	4	1	4	13.5	1.00	13.0
14	4	2	3	10.4	0.60	6.5
15	4	3	2	13.5	1.01	5.5
16	4	4	1	10.1	0.52	7.9
R_{TN1}	15.35	13.98	12.05	11.4	0.66	8.9
R_{TN2}	14.65	13.50	13.45			
R_{TN3}	15.20	13.88	16.98			
R_{TN4}	11.88	15.73	14.60			
$R_{max-min}$	3.48	2.23	4.93			
因素主次: C>A>B				最优水平组合: A ₁ B ₄ C ₃		
R_{TP1}	1.02	0.77	0.71			
R_{TP2}	0.75	0.76	0.79			
R_{TP3}	0.78	0.91	0.93			
R_{TP4}	0.78	0.88	0.89			
$R_{max-min}$	0.27	0.15	0.22			
因素主次: A>C>B				最优水平组合: A ₁ B ₃ C ₃		
R_{TK1}	9.75	9.94	10.70			
R_{TK2}	8.53	9.46	6.71			
R_{TK3}	6.27	7.11	6.52			
R_{TK4}	8.22	6.26	8.84			
$R_{max-min}$	3.49	3.68	4.18			
因素主次: C>B>A				最优水平组合: A ₁ B ₁ C ₁		

注: TN 为全氮, TP 为全磷, TK 为全钾。

2.3 不同施肥配方对薄壳山核桃幼林土壤养分质量分数的影响

由表 4 可知, 16 个配方施肥后薄壳山核桃幼林土壤有效氮质量分数较高的是处理 11 和 12, 有效氮质量分数达 112.0 mg/kg, 影响有效氮质量分数高低的肥料主次顺序为: 尿素、氯化钾、过磷酸钙; 土壤有效磷质量分数较高的是处理 1、10、11、12 和 16, 其中处理 1 最高, 达 24.6 mg/kg, 影响有效磷质量分数高低的肥料主次顺序为: 氯化钾、尿素、过磷酸钙; 土壤有效钾质量分数较高的是处理 1、2、10、11 和 16, 其中处理 11 最高, 达 481.0 mg/kg, 影响有效钾质量分数高低的肥料主次顺序为: 氯化钾、尿素、过磷酸钙; 土壤有机质质量分数较高的是处理 1、7、9、10、11 和 12, 其中处理 10 最高, 达 37.5 g/kg, 影响有机质质量分数高低的肥料主次顺序为: 尿素、氯化钾、过磷酸钙。综上可知, 影响土壤有效氮、磷、钾及有机质质量分数高低的肥料主次顺序为: 尿素、氯化钾、过磷酸钙, 最优水平组合为: 尿素 0.33 kg/株 + 过磷酸钙 1.28 kg/株 + 氯化钾 0.28 kg/株。

表 4 不同施肥配方对薄壳山核桃幼林土壤养分含量影响

处理	A	B	C	AN/ (mg · kg ⁻¹)	AP/ (mg · kg ⁻¹)	AK/ (mg · kg ⁻¹)	AO/ (g · kg ⁻¹)
1	1	1	1	102.0	24.6	327.0	25.7
2	1	2	2	83.9	10.8	393.0	19.7
3	1	3	3	78.9	2.5	148.0	17.7
4	1	4	4	52.3	0.6	281.0	12.9
5	2	1	2	95.5	5.9	281.0	20.6
6	2	2	1	81.4	9.7	192.0	22.2
7	2	3	4	103.0	8.2	263.0	25.3
8	2	4	3	74.7	2.2	166.0	15.2
9	3	1	3	91.3	3.8	246.0	28.9
10	3	2	4	99.6	11.2	409.0	37.5
11	3	3	1	112.0	13.5	481.0	29.9
12	3	4	2	112.0	10.1	186.0	26.5
13	4	1	4	73.9	1.7	127.0	13.2
14	4	2	3	63.1	1.3	191.0	16.8
15	4	3	2	88.8	4.1	286.0	19.5
16	4	4	1	99.6	11.6	350.0	22.6
R_{AN1}	79.28	90.68	98.75				
R_{AN2}	88.65	82.00	95.05				
R_{AN3}	103.73	95.68	77.00				
R_{AN4}	81.35	84.65	82.20				
$R_{\max-\min}$	24.45	13.68	21.75				
因素主次: A>C>B				最优水平组合: A ₃ B ₃ C ₁			
R_{AP1}	9.62	8.99	14.85				
R_{AP2}	6.51	8.24	7.72				
R_{AP3}	9.65	7.06	2.43				
R_{AP4}	4.65	6.12	5.42				
$R_{\max-\min}$	5.00	2.87	12.42				

续表 4

处理	A	B	C	AN/ (mg · kg ⁻¹)	AP/ (mg · kg ⁻¹)	AK/ (mg · kg ⁻¹)	AO/ (g · kg ⁻¹)
因素主次: C>A>B				最优水平组合: A ₃ B ₁ C ₁			
R _{AK1}	287.25	245.25	337.50				
R _{AK2}	225.50	296.25	286.50				
R _{AK3}	330.50	294.50	187.75				
R _{AK4}	238.50	245.75	270.00				
R _{max-min}	105.00	51.00	149.75				
因素主次: C>A>B				最优水平组合: A ₃ B ₂ C ₁			
R _{AO1}	19.00	22.10	25.10				
R _{AO2}	20.83	24.05	21.58				
R _{AO3}	30.70	23.10	19.65				
R _{AO4}	18.03	19.30	22.23				
R _{max-min}	12.68	4.75	5.45				
因素主次: A>C>B				最优水平组合: A ₃ B ₂ C ₁			

注: AN 为有效氮, AP 为有效磷, AK 为有效钾, AO 为有机质。

2.4 不同施肥配方对薄壳山核桃幼林土壤酶活性的影响

由表 5 可知, 16 个配方施肥后薄壳山核桃幼林土壤磷酸酶活性较高的是处理 6、7 和 9, 其中处理 7 最高, 达 43.2 U/g, 影响土壤磷酸酶活性高低的肥料主次顺序为: 尿素、过磷酸钙、氯化钾; 土壤脲酶活性较高的是处理 2、3 和 9, 其中处理 3 最高, 达 805.0 U/g, 影响土壤脲酶活性高低的肥料主次顺序为: 尿素、过磷酸钙、氯化钾; 土壤蔗糖酶活性较高的是处理 1、5 和 11, 其中处理 5 最高, 达 50.9 U/g, 影响土壤蔗糖酶活性高低的肥料主次顺序为: 尿素、过磷酸钙、氯化钾; 土壤过氧化氢酶活性最高的是处理 8, 达 37.3 mg/g, 影响土壤过氧化氢酶活性高低的肥料主次顺序为: 尿素、氯化钾、过磷酸钙。综上所述可知, 影响土壤酶活性高低的肥料主次顺序为: 尿素、过磷酸钙、氯化钾, 最优水平组合为: 尿素 0.22 kg/株 + 过磷酸钙 0.85 kg/株 + 氯化钾 0.28 kg/株。

表 5 不同施肥配方对薄壳山核桃幼林土壤酶活性影响

处理	A	B	C	PHO/ (U · g ⁻¹)	URE/ (U · g ⁻¹)	SUC/ (U · g ⁻¹)	CAT/ (mg · g ⁻¹)
1	1	1	1	36.5	334.0	47.1	34.0
2	1	2	2	14.2	398.0	33.9	32.7
3	1	3	3	19.0	805.0	27.3	31.3
4	1	4	4	19.3	296.0	17.0	32.0
5	2	1	2	37.3	293.0	50.9	33.2
6	2	2	1	41.9	206.0	27.3	31.4
7	2	3	4	43.2	254.0	32.6	30.7
8	2	4	3	35.2	204.0	24.9	37.3
9	3	1	3	41.2	392.0	28.1	32.8
10	3	2	4	20.2	343.0	27.6	32.4

续表 5

处理	A	B	C	PHO/ ($U \cdot g^{-1}$)	URE/ ($U \cdot g^{-1}$)	SUC/ ($U \cdot g^{-1}$)	CAT/ ($mg \cdot g^{-1}$)
11	3	3	1	21.4	299.0	44.8	32.1
12	3	4	2	24.8	139.0	18.0	30.1
13	4	1	4	21.2	133.0	12.1	28.1
14	4	2	3	20.2	186.0	10.6	30.4
15	4	3	2	13.6	261.0	24.2	32.3
16	4	4	1	19.7	326.0	16.3	32.8
R_{PHO1}	458.25	288.00	291.25				
R_{PHO2}	239.25	283.25	272.75				
R_{PHO3}	293.25	404.75	396.75				
R_{PHO4}	226.50	241.25	256.50				
$R_{max-min}$	231.75	163.50	140.25				
因素主次: A>B>C				最优水平组合: A ₁ B ₃ C ₃			
R_{URE1}	22.25	34.05	29.88				
R_{URE2}	39.40	24.13	22.48				
R_{URE3}	26.90	24.30	28.90				
R_{URE4}	18.68	24.75	25.98				
$R_{max-min}$	20.73	9.93	7.40				
因素主次: A>B>C				最优水平组合: A ₂ B ₁ C ₁			
R_{SUC1}	31.33	34.55	33.88				
R_{SUC2}	33.93	24.85	31.75				
R_{SUC3}	29.63	32.23	22.73				
R_{SUC4}	15.80	19.05	22.33				
$R_{max-min}$	18.13	15.50	11.55				
因素主次: A>B>C				最优水平组合: A ₂ B ₁ C ₁			
R_{CAT1}	32.50	32.03	32.58				
R_{CAT2}	33.15	31.73	32.08				
R_{CAT3}	31.85	31.60	32.95				
R_{CAT4}	30.90	33.05	30.80				
$R_{max-min}$	2.25	1.45	2.15				
因素主次: A>C>B				最优水平组合: A ₂ B ₄ C ₃			

注: PHO 为磷酸酶, URE 为脲酶, SUC 为蔗糖酶, CAT 为过氧化氢酶。

2.5 指标相关性分析

薄壳山核桃幼林施肥后树高增长量, 茎粗增长量, 土壤有效氮、有效磷、有效钾、有机质, 叶片氮, 叶片磷, 叶片钾, 土壤磷酸酶、脲酶、蔗糖酶和过氧化氢酶活性间存在一定的相关性(表 6)。树高增长量与茎粗增长量正相关极有统计学意义, 树高增长量、茎粗增长量都与叶片全氮、全磷质量分数负相关极有统计学意义, 土壤有效氮质量分数与叶片磷质量分数负相关极有统计学意义, 土壤全氮、全磷、全钾与土壤蔗糖酶活性正相关极有统计学意义, 叶片全氮质量分数与土壤过氧化氢酶正相关极有统计学意义。

表 6 相关性分析

指标	D	AN	AP	AK	AO	TN	TP	TK	PHO	URE	SUC	CAT
H	0.844**	0.214	0.24	-0.005	0.021	-0.665**	-0.499*	0.022	0.117	-0.396	-0.127	-0.280
D	1	0.332	0.398	-0.046	0.051	-0.765**	-0.614*	0.049	0.233	-0.494	-0.016	-0.191
AN		1	0.687**	0.478	0.776**	-0.342	-0.562*	-0.222	0.220	-0.022	0.526*	0.044
AP			1	0.580*	0.590*	-0.397	-0.457	0.206	0.178	-0.001	0.576*	0.197
AK				1	0.588*	-0.196	-0.340	-0.138	-0.243	0.089	0.510*	0.255
AO					1	-0.131	-0.473	-0.178	0.202	0.064	0.401	0.065
TN						1	0.696**	-0.254	0.030	0.285	-0.050	0.517*
TP							1	0.141	-0.330	0.378	-0.260	0.030
TK								1	0.131	0.097	0.102	-0.321
PHO									1	-0.184	0.398	0.250
URE										1	0.249	0.132
SUC											1	0.415

注: **表示在 0.01 水平(双侧)上有统计学意义, *表示在 0.05 水平(双侧)上有统计学意义。

3 讨论与结论

3.1 讨论

施肥对大多数树种生长有促进作用^[25], 黄梅等^[26]研究表明, 多次注射施肥可促进薄壳山核桃树体生长, 肖良俊等^[27]对 4 年生薄壳山核桃树体施肥后, 茎粗增长量最大达 4.33 cm, 树高增长量最大达 1.58 m。本研究中, 16 个施肥配方对薄壳山核桃幼林植株树高生长和茎粗生长都有较大的促进作用, 其中处理 14 树高增长量达 1.84 m、茎粗增长量达 23.67 mm; 处理 7 树高增长量达 1.78 m、茎粗增长量达 23.99 mm, 对其生长起主要作用的是尿素和氯化钾, 最优施肥水平组合为: 尿素 0.45 kg/株+过磷酸钙 1.71 kg/株+氯化钾 0.28 kg/株, 肖良俊等^[27]研究结果显示, 对树高生长起主要作用的是磷肥和氮肥, 两者存在一定差异, 但本研究与周樊等^[21]研究结果一致, 可能是由于钾肥对苗木生长有催化和协调作用, 磷肥影响效果不显著。相关性分析也表明, 幼林植株树高增长量和茎粗增长量与土壤有效氮、磷存在正相关, 与有效钾存在负相关。

合理的氮、磷、钾配比施肥不仅能提升土壤肥力, 为植物生长提供适宜的养分, 还能提高果实、枝、叶的矿质养分含量^[28-29]。本研究结果表明, 对薄壳山核桃幼林植株叶片氮磷钾养分含量高低影响的肥料主次总体为氯化钾和尿素, 过磷酸钙次之, 最优施肥水平组合为: 尿素 0.11 kg/株+过磷酸钙 0.85 kg/株+氯化钾 0.46 kg/株, 表明增施尿素配施氯化钾能更大程度促进树体对氮磷钾养分的吸收利用, 使植株叶片矿质养分大量积累, 过磷酸钙对叶片钾的积累有一定促进作用, 但对叶片氮和磷的积累效果不明显, 这与周维^[30]研究结果中叶片养分含量随氮磷钾施入的提高而提高有一定差别, 可能原因是土壤中磷已经足量, 植株叶片磷元素积累达到峰值, 增施磷肥效果不明显; 对幼林土壤有效氮磷钾和有机质含量影响肥料主次总体为尿素和氯化钾, 过磷酸钙次之, 表明增施尿素和氯化钾能促进土壤有效氮磷钾养分含量提高, 在幼林阶段过磷酸钙可少量施入或不施, 最优施肥水平组合为: 尿素 0.33 kg/株+过磷酸钙 1.28 kg/株+氯化钾 0.28 kg/株; 对幼林土壤磷酸酶、脲酶、蔗糖酶和过氧化氢酶活性影响肥料主次总体为尿素和过磷酸钙, 氯化钾次之, 最优施肥水平组合为: 尿素 0.22 kg/株+过磷酸钙 0.85 kg/株+氯化钾 0.28 kg/株。李桃祯等^[31]对刨花润楠配方施肥研究表明, 氮肥和磷肥对土壤脲酶、磷酸酶和蔗糖酶活性影响极显著, 钾肥对脲酶和蔗糖酶活性影响较小, 两者结论一致。陈彩虹等^[32]研究表明, 土壤酶活性与土壤养分间存在极显著或

显著的相关关系,也有研究表明脲酶及蛋白酶活性与土壤中磷、钾的循环呈负相关^[33]。本研究表明土壤脲酶与土壤有效氮及磷存在负相关,与前人研究^[34]存在一定差异,这可能与树种、土壤环境等因素有关,土壤酶活性与土壤养分存在空间异质性,在不同土层、不同季节酶活性存在显著差异;土壤蔗糖酶与土壤有效氮、磷、钾存在显著正相关,这与余春和等^[20]、罗亚进^[35]的研究结果一致。由于本研究缺少对施肥后植株根际土壤微生物变化的探讨,未能更进一步揭示土壤酶活性变化的原因。

3.2 结论

不同配方施肥对薄壳山核桃生长起主要作用的是尿素和氯化钾,最优施肥水平组合为:尿素 0.45 kg/株+过磷酸钙 1.71 kg/株+氯化钾 0.28 kg/株,树高增长量达 1.78~1.84 m、茎粗增长量达 23.67~23.99 mm;对薄壳山核桃幼林植株叶片氮、磷、钾养分质量分数影响的肥料主次顺序为:氯化钾、尿素、过磷酸钙,最优施肥水平组合为:尿素 0.11 kg/株+过磷酸钙 0.85 kg/株+氯化钾 0.46 kg/株,全氮质量分数最高达 22.2 g/kg,全磷质量分数最高达 1.27 g/kg,全钾质量分数最高达 15.9 g/kg;对幼林土壤有效氮、磷、钾和有机质质量分数影响的肥料主次顺序为:尿素、氯化钾、过磷酸钙,最优施肥水平组合为:尿素 0.33 kg/株+过磷酸钙 1.28 kg/株+氯化钾 0.28 kg/株,有效氮质量分数为 112.0 mg/kg,有效磷质量分数为 24.6 mg/kg,有效钾质量分数为 481.0 mg/kg,有机质质量分数为 37.5 g/kg;对幼林土壤磷酸酶、脲酶、蔗糖酶和过氧化氢酶活性影响的肥料主次顺序为:尿素、过磷酸钙、氯化钾,最优施肥水平组合为:尿素 0.22 kg/株+过磷酸钙 0.85 kg/株+氯化钾 0.28 kg/株。

总体来说,对薄壳山核桃幼林植株生长、叶片养分积累、土壤酶及土壤有效养分质量分数影响的肥料主次顺序为:尿素、氯化钾、过磷酸钙,最优施肥水平组合为:尿素 0.45 kg/株+过磷酸钙 0.85 kg/株+氯化钾 0.28 kg/株,由于过磷酸钙影响最小,选择最小施肥量。

参考文献:

- [1] 陈芬,姚小华,高焕章,等. 薄壳山核桃不同无性系开花物候特性观测和比较 [J]. 林业科学研究, 2015, 28(2): 209-216.
- [2] 李川,姚小华,王开良,等. 薄壳山核桃无性系果实性状指标简化研究 [J]. 江西农业大学学报, 2011, 33(4): 696-700.
- [3] BENTLEY N, GRAUKE L J, KLEIN P. Genotyping by Sequencing (GBS) and SNP Marker Analysis of Diverse Accessions of Pecan (*Carya Illinoensis*) [J]. Tree Genetics and Genomes, 2019, 15(1): 8-11.
- [4] 张日清,吕芳德. 美国山核桃在原产地分布、引种栽培区划及主要栽培品种分类研究概述 [J]. 经济林研究, 2002, 20(3): 53-55.
- [5] 张明月,黄相玲,朱栗琼,等. 不同施肥比对罗汉松幼苗生长的影响 [J]. 广西林业科学, 2018, 47(3): 285-289.
- [6] 程勇,吴际友,刘球,等. 氮磷钾施肥比对青冈栎幼苗生长的影响 [J]. 中南林业科技大学学报, 2018, 38(6): 71-74.
- [7] 张秀志,郭甜丽,焦学艺,等. 商品有机肥配施对果园土壤肥力和“蜜脆”苹果果实品质的影响 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2022, 44(1): 65-74.
- [8] 郜永博,王世显,魏珉,等. 氮磷钾用量对基质培茄子产量、根系形态和根际微生物数量与酶活性的影响 [J]. 中国农业科学, 2021, 54(21): 4623-4634.
- [9] 聂胜委,黄绍敏,张水清,等. 长期定位施肥对土壤效应的研究进展 [J]. 土壤, 2012, 44(2): 188-196.
- [10] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法 [M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2000.
- [11] BÖHME L, LANGER U, BÖHME F. Microbial Biomass, Enzyme Activities and Microbial Community Structure in Two European Long-Term Field Experiments [J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2005, 109(1/2): 141-152.
- [12] RAO M A, VIOLANTE A, GIANFREDA L. Interaction of Acid Phosphatase with Clays, Organic Molecules and Orga-

- no-Mineral Complexes: Kinetics and Stability [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2000, 32(7): 1007-1014.
- [13] EIVAZI F, BAYAN M R, SCHMIDT K. Select Soil Enzyme Activities in the Historic Sanborn Field as Affected by Long-Term Cropping Systems [J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2003, 34(15/16): 2259-2275.
- [14] 朱长伟, 孟威威, 石柯, 等. 不同轮耕模式下小麦各生育时期土壤养分及酶活性变化特征 [J]. *中国农业科学*, 2022, 55(21): 4237-4251.
- [15] SCHIMEL J, BECERRA C A, BLANKINSHIP J. Estimating Decay Dynamics for Enzyme Activities in Soils from Different Ecosystems [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2017, 114: 5-11.
- [16] 蒲全明, 杨鹏, 邓榆川, 等. 不同施肥方式对冬春茬甘蓝根际土壤酶活性、土壤养分及品质的影响 [J]. *中国农业科技导报*, 2020, 22(7): 130-139.
- [17] 周南, 陈懿, 叶婵, 等. 生物炭基产品对土壤碳氮矿化特性的影响 [J]. *江苏农业科学*, 2018, 46(11): 238-242.
- [18] 马群, 刘铭, 周玉玲, 等. 生物炭与有机无机肥配施对土壤质量的影响 [J]. *西南大学学报(自然科学版)*, 2024, 46(7): 115-126.
- [19] 余高, 陈芬, 卢心, 等. 不同施肥对幼龄柑橘园土壤养分及酶活性变化的影响 [J]. *江苏农业科学*, 2023, 51(20): 218-223.
- [20] 余春和, 曾珠, 韦秋思, 等. 不同林龄光皮桦林土壤养分含量与酶活性相关关系 [J]. *湖北农业科学*, 2023, 62(5): 54-58.
- [21] 周樊, 陈文静, 曹凡, 等. 配比施肥对薄壳山核桃幼苗生长和生理特性的影响 [J]. *中南林业科技大学学报*, 2020, 40(9): 96-103.
- [22] 潘平平, 窦全琴, 汤文华, 等. 缓释肥用量对薄壳山核桃容器苗生长及养分含量的影响 [J]. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2019, 43(5): 163-168.
- [23] 季艳红, 汤文华, 窦全琴, 等. 施肥对薄壳山核桃容器苗生长及养分积累的影响 [J]. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2021, 45(6): 47-56.
- [24] 关松荫. 土壤酶及其研究法 [M]. 北京: 农业出版社, 1986.
- [25] CHANDLER J W, DALE J E. Nitrogen Deficiency and Fertilization Effects on Needle Growth and Photosynthesis in Sitka Spruce (*Picea sitchensis*) [J]. *Tree Physiology*, 1995, 15(12): 813-817.
- [26] 黄梅, 杨水平, 姚小华, 等. 一次和多次注射施肥对薄壳山核桃生长及品质的影响 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2023, 29(4): 767-776.
- [27] 肖良俊, 王曼, 宁德鲁, 等. 配方施肥对美国山核桃树体生长的影响 [J]. *西部林业科学*, 2012, 41(3): 98-101.
- [28] 潘丽珊, 任春光, 杨瑞, 等. 增施有机肥和菌肥对猕猴桃果实品质的影响 [J]. *经济林研究*, 2021, 39(2): 140-147.
- [29] 李艳丽, 何潇, 张琳. 不同有机肥配比对中秋酥脆枣光合作用及果实品质的影响 [J]. *中南林业科技大学学报*, 2021, 41(1): 45-51.
- [30] 周维. 氮磷钾配比施肥对格木幼苗生长及光合特性影响的研究 [D]. 南宁: 广西大学, 2016.
- [31] 李桃祯, 邹清涛, 侯小青, 等. 配方施肥对刨花润楠土壤养分、微生物生物量及酶活性的影响 [J]. *广西林业科学*, 2019, 48(1): 67-73.
- [32] 陈彩虹, 叶道碧. 4 种人工林土壤酶活性与养分的相关性研究 [J]. *中南林业科技大学学报*, 2010, 30(6): 64-68.
- [33] 于德良, 雷泽勇, 张岩松, 等. 沙地樟子松人工林土壤酶活性及其影响因子 [J]. *干旱区研究*, 2019, 36(3): 621-629.
- [34] 刘捷豹, 陈光水, 郭剑芬, 等. 森林土壤酶对环境变化的响应研究进展 [J]. *生态学报*, 2017, 37(1): 110-117.
- [35] 罗亚进. 不同林龄桉树人工林土壤微生物及土壤酶活性的研究 [D]. 桂林: 广西师范大学, 2014.

责任编辑 包颖

崔玉洁