

土壤环境调控对板栗细根形态和产量的影响

王芳芳^{1,2}, 郭素娟^{1,2*}, 廖逸宁^{1,2}, 马雅莉^{1,2}

¹北京林业大学省部共建森林培育与保护教育部重点实验室, 北京 100083;

²板栗产业国家创新联盟, 北京 100083)

摘要:【目的】为解决河北迁西地区板栗园干旱缺水和不合理施肥导致的土壤肥力下降等问题, 依据当地实际情况提出一个优化的土壤管理模式, 并进行效果验证, 为其改进和推广提供理论依据。【方法】以8年生板栗燕山早丰(*Castanea mollissima* ‘Yanshanzaofeng’)为研究对象, 采用裂区试验设计, 主处理为行间覆草(GC)和清耕(CT), 副处理为4个施肥处理, 即无机肥(F)、有机肥(M)、有机肥和无机肥配施(F+M)、不施肥(CK), 于2019和2020年连续2 a(年)研究覆草-施肥模式对板栗园土壤状况和细根形态以及单株产量的影响。【结果】行间覆草处理的土壤平均含水量显著高于清耕处理, 覆草区0~20 cm和20~40 cm土层平均含水量分别比清耕区相应土层高18.76%、17.62%; 而且行间覆草还具有高温时节降温、低温时节保温的作用; 各施肥处理均能降低0~40 cm土层的土壤容重, 增加总孔隙度。覆草和施肥处理可显著提高板栗园根际土壤有机质和速效养分含量, 对板栗细根养分含量和形态特征也产生了显著的影响, 而且各指标均表现为GC>CT, 其中GC(F+M)和CT(F+M)处理的增量最为显著; GC(F+M)处理的单株产量最高, 不同覆草-施肥模式增产幅度为4.95%~45.21%。聚合增强树分析表明, 不同土壤理化指标对板栗单株产量的贡献程度由大到小依次为AN>AK>AP>SWC>TEM>OM>pH>TP>SBD, 土壤速效养分和含水量对单株产量的贡献率最高, 分别为52.21%、13.91%。【结论】在迁西地区板栗栽培中, 行间覆草结合有机肥和无机肥配施是该地区板栗增产的较适宜的土壤管理方式, 建议广泛推广。

关键词: 板栗; 覆草; 施肥; 土壤理化性质; 细根; 产量

中图分类号: S664.2

文献标志码: A

文章编号: 1009-9980(2021)07-1123-13

Effects of interrow grass mulching and fertilization on morphology of fine roots and yield of Chinese chestnut

WANG Fangfang^{1,2}, GUO Sujuan^{1,2*}, LIAO Yining^{1,2}, MA Yali^{1,2}

¹The Ministry of Education Key Laboratory of Forest Cultivation and Protection, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; ²Chinese Chestnut Industry Innovation Alliance, Beijing 100083, China)

Abstract:【Objective】To analyze the effects of interrow grass mulching combined with different fertilization treatments on soil physical and chemical properties, root system configuration, nutrient content and productivity in chestnut orchards, Qianxi, Hebei province, where drought, water shortage and problems of unscientific fertilization are serious. 【Methods】Eight-year-old trees of *Castanea mollissima* ‘Yanshanzaofeng’ were taken as the research object, and a split zone experiment design was adopted. The main treatment included interrow mulching with grass and clean tillage, and the secondary treatments were 4 fertilization treatments including single application of inorganic fertilizer (F), single application of organic fertilizer (M), combined application of organic fertilizer and inorganic fertilizer (F+M) and no fertilization (CK). In 2019 and 2020, we studied the effect of mulching and fertilization on water, fertilizer, gas and heat status in the soil, fine root growth, and fine root nutrient content in chestnut orchard. The most suitable soil management model was selected based on fruit productivity. 【Results】

收稿日期: 2021-03-18 接受日期: 2021-04-15

基金项目: 国家重点研发计划(2019YFD1001604); 林业与草原科技成果国家级推广项目(2020133118)

作者简介: 王芳芳, 女, 在读硕士研究生, 主要从事经济林(果树)培育与利用研究工作。E-mail: 1059840944@qq.com

*通信作者 Author for correspondence. E-mail: gwangzs@263.net

During the growing period (April-October), the average water contents in the soil layers of 0–20 cm and 20–40 cm were significantly higher in the mulching treatments than those in the clean tillage treatment. The average water contents in the soil layers of 0–20 cm and 20–40 cm in the mulched soils were 18.76% and 17.62% higher than those in the cleaned soils, respectively. Interrow mulching in the chestnut orchard significantly reduced the range of diurnal soil temperature change. The variation range of soil temperature in under interrow mulching in summer and autumn was 1.56 °C and 1.10 °C smaller than that in the clean tillage treatment. Mulching had obvious cooling effect in hot season and helped heat preservation in low temperature seasons. Different fertilization treatments significantly reduced the soil bulk density in 0–40 cm soil layer, increased the total porosity of soil, and reduced soil pH value. The influence of interrow mulching on the 0–20 cm soil layer was greater than on the 20–40 cm soil layer. The contents of organic matter and available nutrients in rhizosphere soil of the chestnut orchard were significantly increased by grass mulching and fertilization. Different treatments had a significant impact on the nutrient content in fine roots. The order of N, P and K contents in different treatments were F+M>F>M>CK, and that of organic carbon content was F+M>M>F>CK. The effect of mulching and fertilization on fine roots in the 20-40 cm soil layer was significant. Compared with CK, the fertilization treatments increased the root surface area, root volume, root length density, specific root length and total root length of fine roots. Besides, all the indexes in GC were higher than in CT, and the increments in GC(F+M) and CT(F+M) were the highest. Interrow grass mulching and fertilization directly affected tree roots and indirectly affected the reproductive growth, in this study, the average yield per plant of different fertilization treatments in grass mulching area was significantly higher than that in clear tillage area, and the yield per plant of organic and inorganic fertilizer combined application was the highest, and the increase range of different treatments could reach 4.95%–45.21%. Results of aggregated boosted trees analysis showed that the contribution degree of different soil physical and chemical indexes to yield per plant was Avail. N>Avail. K>Avail. P>Soil water content>Temperature>Organic matter>pH>Total porosity>Soil bulk density, among which the contribution rates of available nutrients and soil water content to yield per plant were the highest, being 52.21% and 13.91%, respectively. 【Conclusion】Based on the comprehensive analysis, it is concluded that the combination of organic fertilizer and inorganic fertilizer is the optimal fertilization mode for chestnut cultivation in Qianxi region, and is recommended for extensive application in production of chestnut.

Key words: Chestnut; Mulching; Fertilization; Physical and chemical properties of soil; Fine root; Production

板栗 (*Castanea mollissima* Blume) 属壳斗科 (Fagaceae) 栗属 (*Castanea* Mill.) 植物, 适应性强, 在我国分布极其广泛, 多个省份将其作为重要的经济栽培树种^[1], 具有较高的经济效益与生态效益^[2]。河北迁西县是我国板栗优势产区之一, 当地板栗产业已成为促进区域经济发展的支柱产业, 但由于大多数板栗分布于降水量少且季节分布不均的山区, 再加上板栗园长期不合理施肥, 已造成土壤生态环境的恶化, 严重影响当地板栗产业的经济效益。所以在干旱缺水的板栗产区急需一项蓄水保墒措施来调节板栗根系土壤微环境, 从而提高根系养分、水

分等吸收能力, 增加板栗产量^[2]。

干旱缺水和养分流失一直是山区经济林发展的两大限制因素^[3-5]。近年来, 地表覆盖作为一项蓄水保湿措施在干旱地区农业中已经广泛应用, 在经济林的生产实践中, 也结合当地实际情况不断总结创新, 创造出一些独具特色的果园土壤管理方式, 典型代表有地膜覆盖^[6]、砂石覆盖^[7]、生草覆盖^[8]和秸秆覆盖^[9]等。大量研究表明, 地表覆盖能够明显改善土壤的水、肥、气、热状况, 改善果树根域环境, 达到调整根系组成、生长分布, 提高根系生理功能的目的, 进而影响树体营养与生殖生长的平衡及

贮藏养分的积累^[10-12]。土壤水分是影响果树产量的重要因子,而合理施肥是保持土壤肥力和提升产量品质的重要环节^[13],因此,干旱地区果园达到最佳水肥条件是果树高产优质的重要基础,同时还可实现水肥资源的高效利用,避免过量施肥导致的土壤酸化和板结。

对于经济林来说,根系是果树吸收水分和养分的重要器官,具有较强的可塑性,是果树栽培的基础^[14]。而直径 $\leq 2\text{ mm}$ 的根,由于其吸收表面积大、生理活性强等特点^[15],是植物体从土壤中获取物质和能量的主要器官,也是植物地下最活跃、对土壤环境影响反应最敏感的部分^[12]。近年来,水肥条件对植物细根分布特征和养分含量的影响已成为研究的热点问题。已有很多学者研究地表覆盖和施肥相结合对土壤养分和作物根系的影响^[16-17],但是目前对于板栗树种根系的研究只局限于施肥^[18]或覆膜^[19],而对于板栗园地表覆草和施肥相结合的

研究较少。鉴于此,笔者在河北迁西县以板栗燕山早丰(*Castanea mollissima* ‘Yanshanzaofeng’)为研究对象,采用裂区设计,研究行间覆草-施肥模式对板栗园土壤微环境变化以及细根生长和养分含量的影响,旨在为干旱地区板栗园高产、高效、绿色环保型的土壤管理方式提供理论依据。

1 材料和方法

1.1 研究区概况

试验地位于河北省迁西县北京林业大学经济林(板栗)育种与栽培试验基地,东经 $118^{\circ}12'17''$,北纬 $40^{\circ}21'57''$,该地气候属于暖温带大陆性季风气候,日照充足,年平均相对湿度59%,年平均无霜期176 d,土壤类型为微酸性、壤砂、褐土,其基本理化性质见表1。2019年和2020年板栗生育期(4—10月)试验区日降水量及温度变化如图1所示。

1.2 试验材料

表1 试验地土壤理化性质

Table 1 Physical and chemical properties of the soils at the experiment site

土层深度 Soil depth/cm	容重 Volume weight/ ($\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)	总孔隙度 Total porosity/%	pH	w(有机质) OM content/ ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	w(碱解氮) Avail. N content/ ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	w(有效磷) Avail. P content/ ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	w(速效钾) Avail. K content/ ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)
0~20	1.39	47.55	6.78	10.33	56.07	20.10	128.11
20~40	1.33	49.81	6.82	6.83	48.28	16.67	109.60

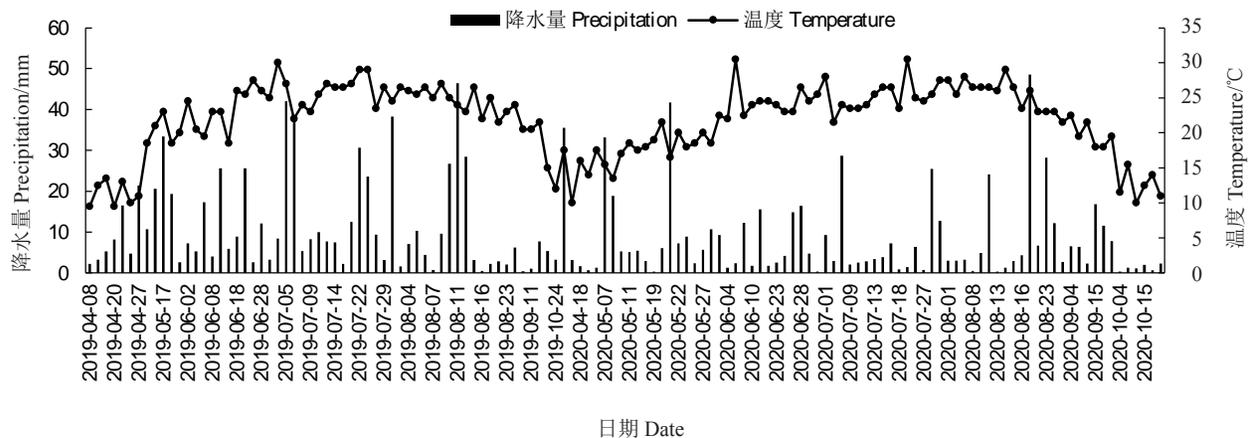


图1 板栗生育期日降水量和温度

Fig. 1 Daily precipitation and temperature during the growth period of Chinese chestnut

选取生长一致、无病虫害的8年生板栗燕山早丰(*Castanea mollissima* ‘Yanshanzaofeng’)为试验材料,平均树高2.7 m,冠幅为2.3 m \times 2.3 m,采用常规修剪措施,修剪时间为每年2月底。

试验覆草属于杂草,是2018年板栗园人工锄草

所收集,处于半腐熟状态;供试肥料包括有机肥——鸡粪(有机质质量分数为55.67%,N 1.52%, P_2O_5 1.96%, K_2O 1.53%),产于石家庄养殖总场;无机肥——施可丰板栗专用复合肥(N 20%, P_2O_5 10%, K_2O 10%),产于施可丰化工股份有限公司,可

缓释5个月;过磷酸钙(P_2O_5 16%)产于云南云天化股份有限公司;硫酸钾(K_2O 50%)产于河北高盛化肥有限公司。

1.3 试验设计

试验于2019年3月开始进行,采用裂区设计,主处理为覆草区(GC)和清耕区(CT);副处理为4个施肥处理,分别为无机肥(F)、有机肥(M)、有机肥与无机肥配施(F+M)和不施肥(CK),每个副处理选择

1行10株冠幅相近的作为1个处理,随机排列,即共8个处理,分别为GC(F)、GC(M)、GC(F+M)、GC(CK)、CT(F)、CT(M)、CT(F+M)和CT(CK),且每处理3次重复,共24个小区,且各小区均设有保护行,其他田间管理措施统一按常规方法进行。具体试验设计见图2。

覆草处理:用当地板栗园风干杂草均匀覆盖于行间地面,覆盖厚度约10 cm(约12 000 $kg \cdot hm^{-2}$),且

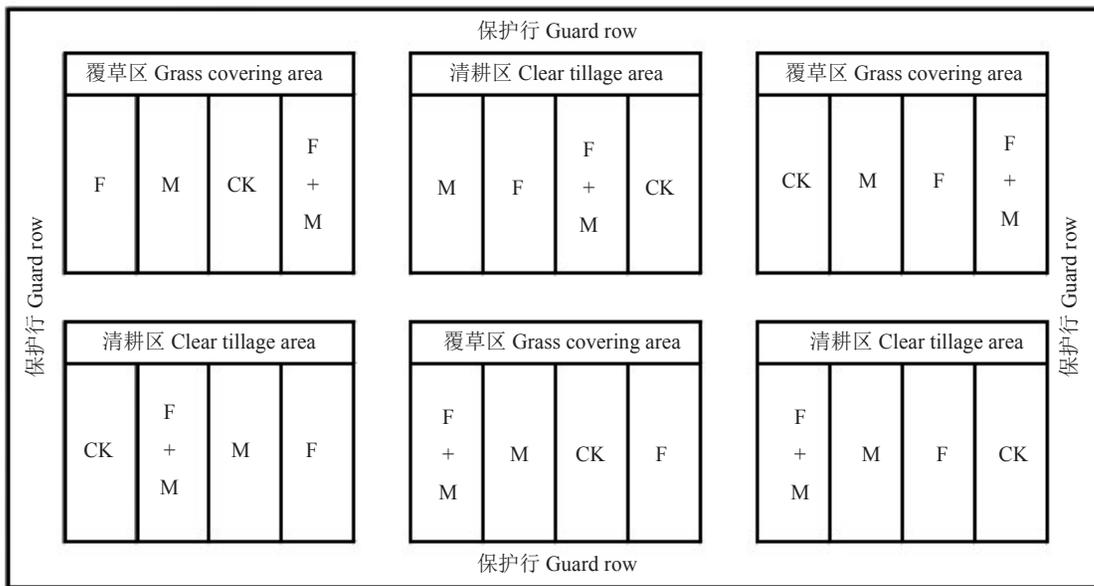


图2 试验设计

Fig. 2 Distribution of experiment design

于2020年春季补充干杂草至原厚度。施肥处理:每年所有施肥处理均以等氮量1.123 $kg \cdot 株^{-1}$ 施入^[20],不足的磷和钾用过磷酸钙和硫酸钾补足。采用环状沟施方式,沿每棵树树冠投影下方开沟,沟宽30 cm、深30 cm,将有机肥和无机肥与土壤混拌,然后均匀平铺至沟内,填土,一次性全部以基肥施入。

1.4 样品采集与测定

1.4.1 样品采集 根系和土壤样品采集:于2019年和2020年10月底,板栗生长期末,每个处理选取10株长势一致的板栗树,采用根钻法,横向距离树干0~100 cm内每20 cm为一个取样段,纵向土层20~40 cm内(前人研究表明20~40 cm土层是板栗根系富集区,也是吸收土壤水分和养分的主要区域^[21]),每棵树在东南西北4个方向等距离挖取根系,抖落根际土后用清水冲洗干净,将根际土另外保存,用于测定速效养分和有机质含量。

1.4.2 测定指标与方法 土壤物理性质测定:于

2019年6月30日和10月30日测定土壤温度日变化。在水平方向距树干60 cm处,采用超长探针式温度计测定行间0~20 cm和20~40 cm深处的土壤温度,从8:00开始,每隔2 h测定1次,20:00结束,以2个土层温度平均值作为实验值。土壤含水量于2019年和2020年板栗生育期间(4—10月)每月30日采用烘干法测定,遇雨天后延;各处理小区按S形采样,用环刀法测定土壤容重和土壤孔隙度。

细根生长指标测定:将取回的根系洗净后,用根系扫描仪Epson Perfection V750 Pro扫描获取图像^[14]。根据传统根系分类标准^[22],将直径 $L \leq 2$ mm的根系作为细根,用根系分析软件WinRHIZO分析不同处理细根的总根长、根表面积、根体积、根长密度、比根长和细根占比等。然后挑选出细根,采用烘干法在105 $^{\circ}C$ 杀青5 min,然后在80 $^{\circ}C$ 恒温烘干至恒重,研磨过筛后测定细根养分含量。根长密度(root length density, RDL, $m \cdot m^{-3}$)和比根长(specific

root length, SRL, $m \cdot g^{-1}$)的计算公式如下:

$$RDL = FRL / VS; \quad (1)$$

$$SRL = FRL / FRB. \quad (2)$$

式中, FRL 、 FRB 、 VS 分别表示细根总根长(m)、细根生物量(g)和土壤体积(m^3),其中土钻内径8 cm;土层深度20 cm。

养分含量测定:土壤养分指标包括有机质、碱解氮、有效磷、速效钾含量,参照鲍士旦^[23]的方法进行测定。有机质含量采用 $K_2Cr_2O_7-H_2SO_4$ 氧化法测定,碱解氮含量采用 NaOH 碱解扩散法测定,有效磷含量采用钼锑抗比色法测定,速效钾含量采用醋酸铵浸提火焰光度法测定。细根养分指标包括 N、P、K 和有机碳含量,全 N、全 P 含量采用 Smart Chem 450 全自动间断化学分析仪测定,全 K 含量采用火焰光度计法测定,有机碳含量的测定方法同土壤有机质。

单株产量测定方法:于板栗成熟期8月底统计各处理树体的总栗苞个数,然后每个处理按东、南、西、北4个方向,每个方向25个刺苞,随机采集共100个无病虫害的板栗刺苞,用电子天平分别称量

每个刺苞中所有坚果单粒质量,并计算平均单株产量。

1.5 数据统计与分析

用 Microsoft Excel 2019 和 Origin 2018 进行数据处理和作图分析,采用 SPSS 25.0 软件进行 Duncan's 差异显著性分析和独立样本 T 检验 ($p < 0.05$)。聚合增强树分析(ABT)是一种对研究变量中的不同环境因子进行准确预测和解释的统计方法^[24],采用 R 2.7 中的“gbmplus”包,研究不同土壤理化指标对板栗单株产量的贡献程度。

2 结果与分析

2.1 行间覆草对板栗园土壤含水量的影响

由图3可知,试验区2019年和2020年板栗生育期降水量分别为668.7 mm和599.5 mm,但是2019年降水主要集中在7、8月份,月降水量分别为221.0、161.5 mm,而2020年降水主要分布于5月(153.9 mm)和8月(143.3 mm)。试验区板栗园各处理下不同土层的土壤含水量变化趋势总体与自然降水变化趋势一致,但是覆草区的土壤含水量明显

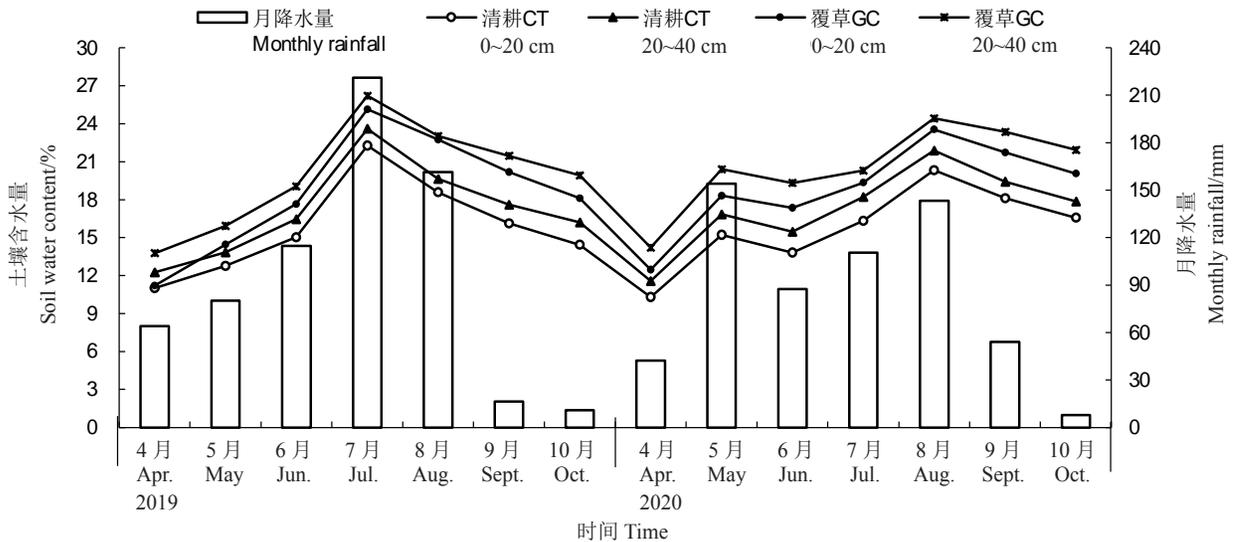


图3 2019—2020年试验期间月降水量与土壤含水量

Fig. 3 Monthly precipitation and soil water content during the experiment period from 2019 to 2020

高于清耕区,覆草区0~20 cm和20~40 cm土层平均含水量分别比清耕区相应土层高18.76%、17.62%。而且无论覆草区还是清耕区,0~20 cm土层含水量均低于20~40 cm土层。

2.2 行间覆草对板栗园土壤温度日变化的影响

不同地表管理方式对板栗园0~40 cm土层土壤温度日变化的影响见图4。夏季覆草区的土壤温度

日变化始终低于清耕区,而当气温下降后,地表覆草又具有保温作用,除14:00,秋季覆草区土壤温度均高于清耕区。板栗园行间覆草可以减小温度日变化幅度,夏季覆草区温度日变化幅度(2.31 $^{\circ}C$)较清耕区(3.87 $^{\circ}C$)低1.56 $^{\circ}C$,秋季覆草区增幅(3.81 $^{\circ}C$)较清耕区(4.91 $^{\circ}C$)少1.10 $^{\circ}C$,且夏季行间覆草土壤温度达到峰值的时间比清耕滞后约2 h。

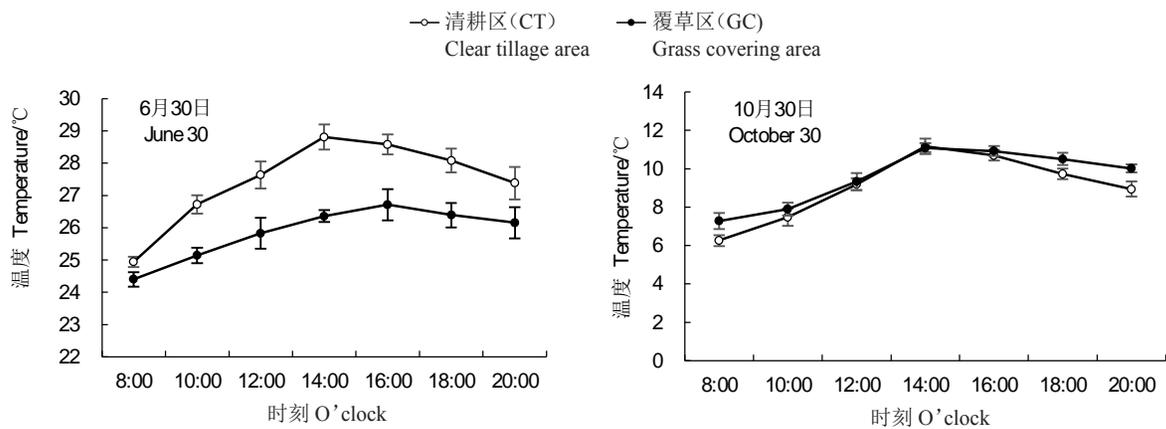


图4 行间覆草对板栗园0~40 cm 土层平均温度日变化的影响

Fig. 4 Influence of interrow mulching on diurnal variation of average temperature in 0-40 cm soil layer in the chestnut orchard

可见板栗园行间覆草较清耕具有明显的夏季降温、秋冬季保温作用。

2.3 覆草-施肥模式对板栗园土壤理化性质的影响

从表2可以看出,板栗园经过连续2 a 的地表覆草和不同施肥处理,覆草区土壤容重显著低于清耕区,行间覆草对0~20 cm 土层影响较大,比清耕区低3.17%,而20~40 cm 土层较清耕区低2.40%。当主

处理相同时,不同施肥比例均可降低土壤容重,无论覆草区还是清耕区,均为F+M 处理降低土壤容重最明显,显著低于其他施肥处理。综合分析0~20 cm 和20~40 cm 土层容重,各处理均低于CT (CK),分别较CT(CK)处理降低了1.53%~10.83%、0.76%~13.79%。土壤总孔隙度的变化趋势与土壤容重刚好相反,地表覆草显著增加了土壤总孔隙

表2 覆草-施肥模式对板栗园土壤理化性质的影响

Table 2 Effects of mulching and fertilization on soil physical and chemical properties in the chestnut orchard

处理 Treatment	土壤容重 Soil bulk density/(g·cm ⁻³)		总孔隙度 Total porosity/%		pH	
	0~20 cm	20~40 cm	0~20 cm	20~40 cm	0~20 cm	20~40 cm
GC(F)	1.28±0.03 ab	1.30±0.06 a	51.65±1.24 b	50.83±2.14 b	6.65±0.02 ab	6.79±0.02 ab
GC(M)	1.27±0.04 ab	1.23±0.05 ab	52.17±1.69 ab	53.59±1.88 ab	6.61±0.01 b	6.68±0.00 c
GC(F+M)	1.20±0.08 b	1.16±0.01 b	54.79±3.19 a	56.12±0.50 a	6.64±0.01 ab	6.76±0.01 b
GC(CK)	1.30±0.03 a	1.30±0.09 a	50.81±1.19 b	50.77±3.39 b	6.68±0.03 a	6.81±0.03 a
CT(F)	1.31±0.03 ab	1.31±0.00 ab	50.58±1.25 ab	50.73±0.14 ab	6.81±0.02 a	6.79±0.02 a
CT(M)	1.29±0.03 ab	1.30±0.00 ab	51.24±1.14 ab	50.80±0.13 ab	6.71±0.02 b	6.74±0.01 b
CT(F+M)	1.25±0.08 b	1.16±0.10 b	52.90±3.11 a	56.06±3.90 a	6.77±0.03 ab	6.78±0.01 ab
CT(CK)	1.33±0.00 a	1.32±0.12 a	49.91±0.08 b	50.05±4.51 b	6.82±0.04 a	6.80±0.02 a
GC(mean)	1.26±0.06 B	1.25±0.08 B	52.25±2.18 A	52.83±3.01 A	6.65±0.03 B	6.76±0.03 A
CT(mean)	1.30±0.05 A	1.28±0.09 A	51.17±1.80 B	52.00±3.74 B	6.78±0.04 A	6.79±0.05 A

注:不同小写字母表示主处理相同时不同施肥处理间差异显著($p < 0.05$),不同大写字母表示主处理之间差异显著($p < 0.05$)。下同。

Note: Different small letters indicated significant difference between different fertilization modes within the same primary treatment ($p < 0.05$), while different capital letters indicated significant difference between GC and CT ($p < 0.05$). The same below.

度,0~20 cm 和20~40 cm 土层分别增加2.11%和1.60%,其中20~40 cm 土层GC(F+M)和CT(F+M)处理的总孔隙度显著高于其他处理,分别较同一土层的GC(CK)和CT(CK)高10.54%、12.01%。行间覆草能显著降低0~20 cm 土层的pH 值,比清耕区低1.95%;当主处理相同时,M 处理可以显著降低pH

值,而F+M 处理后表层(0~20 cm)和亚表层(20~40 cm)土壤pH 值偏高于M 处理;综合分析发现,不同施肥处理均可不同程度地降低土壤pH 值,单施有机肥比单施化肥影响更显著,但是有机无机肥配施能缓解土壤的酸化。

2.4 覆草-施肥模式对板栗园根际土壤和细根养分

含量的影响

植物根际土壤的养分含量与土体条件密切相关,其中,植物根际养分含量与状况反映了土壤养分(包括碱解氮、有效磷、速效钾以及有机质等在内的多种营养元素形态)的可利用效率,它们对植物生长有着至关重要的作用^[25]。如图5所示,覆草-施肥模式对板栗树根际土壤的速效养分和有机质含量的影响差异显著($p < 0.05$)。当主处理相同时,不同施肥处理的根际土壤碱解氮、有效磷、速效钾含量从大到小依次为F+M>F>M>CK,有机质

含量表现为F+M>M>F>CK,其中GC(F+M)处理的各项指标较其他处理最为显著,其碱解氮、有效磷、速效钾、有机质含量分别比CT(CK)高88.42%、75.10%、52.80%和24.47%。综上,覆草区根际土壤速效养分和有机质含量均显著高于清耕区。

细根(直径 $\leq 2\text{ mm}$)作为树体吸收水分和养分的主要功能器官,其养分含量不仅间接反映了土壤养分供应状况,而且还决定了地上部分的生长和生态功能的发挥^[26-27]。本研究细根养分含量如图5所示,行间覆草处理的细根养分N、P、K和C均高于清

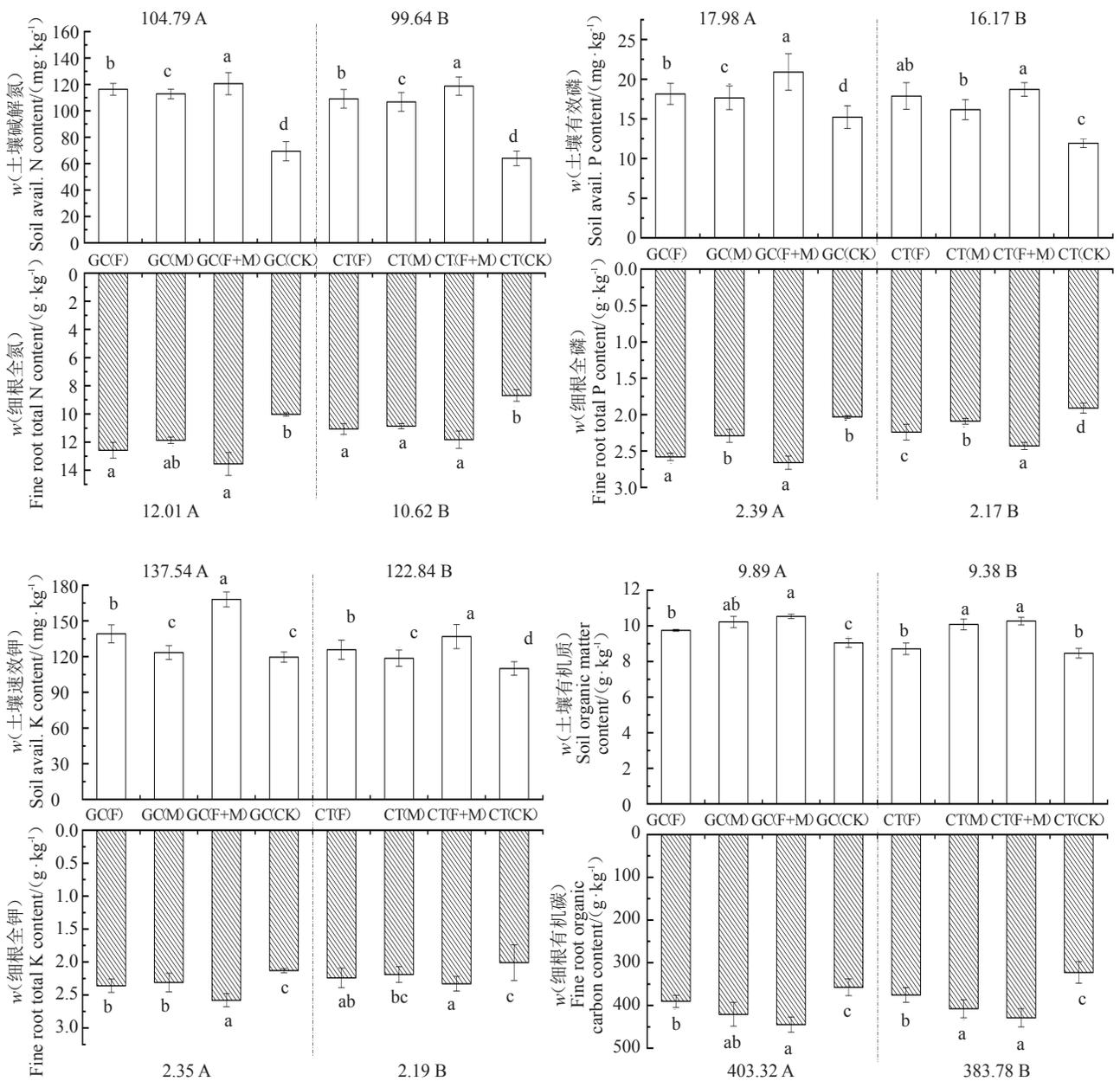


图5 覆草-施肥模式对板栗园根际土壤和细根养分的影响

Fig. 5 Effects of mulching and fertilization on rhizosphere soil and fine root nutrients in the chestnut orchard

耕区,分别比清耕区高13.12%、10.27%、6.96%和5.09%。无论覆草区还是清耕区,细根N、P和K含量从大到小依次为F+M>F>M>CK,而细根有机碳含量与根际土壤有机质含量变化相一致,均为F+M>M>F>CK。

2.5 覆草-施肥模式对板栗细根形态特征的影响

由表3可知,覆草-施肥模式对板栗20~40 cm土层细根根系生长的影响显著。当主处理相同时,与CK处理相比,不同施肥方式都能增加根表面积、根

体积、根长密度、比根长和细根根长等,而且各指标都表现为GC>CT。GC(F+M)和CT(F+M)处理的增量最为显著,其中根表面积、根体积和细根根长分别较GC(CK)、CT(CK)高36.49%、41.46%、19.05%和43.86%、61.76%、35.23%。不同施肥比例下覆草区和清耕区的比根长、根长密度、细根根长和细根根长占比变化趋势均表现为F+M>M>F>CK。

2.6 覆草-施肥模式对板栗产量的影响

由图6可知,不同水热状况、土壤肥力对板栗园

表3 覆草-施肥模式对板栗细根生长的影响

Table 3 Effect of mulching and fertilization on the growth of fine roots of Chinese chestnut

处理 Treatment	根表面积 Root surface area/cm ²	根体积 Root volume/cm ³	根长密度 Root length density/(m·m ³)	比根长 Specific root length/(m·g ⁻¹)	细根根长 Fine root length/cm	细根占比 Fine root ratio/%
GC(F)	58.59±3.72 b	0.51±0.07 ab	4 645.80±176.15 ab	6.22±0.12 b	466.81±17.69 ab	89.43±0.90 b
GC(M)	60.05±2.59 ab	0.47±0.02 ab	4 729.60±126.53 ab	7.27±0.17 ab	475.23±12.71 ab	92.82±0.75 a
GC(F+M)	65.64±6.03 a	0.58±0.04 a	5 137.14±197.80 a	7.59±0.19 a	516.18±19.80 a	94.43±0.53 a
GC(CK)	48.09±4.56 c	0.41±0.08 b	4 315.29±177.16 b	5.85±0.09 bc	433.60±17.84 b	88.40±0.45 b
CT(F)	57.63±8.05 b	0.48±0.02 ab	4 247.21±231.05 b	5.93±0.23 b	426.76±23.26 b	87.99±0.78 bc
CT(M)	59.31±6.65 ab	0.43±0.08 b	4 416.60±175.49 b	6.81±0.04 ab	443.78±17.62 b	91.60±0.52 ab
CT(F+M)	62.68±3.61 a	0.55±0.03 a	5 038.32±148.00 a	7.34±0.15 a	506.25±15.94 a	93.55±0.63 a
CT(CK)	43.57±1.39 c	0.34±0.06 c	3 725.72±126.77 c	5.51±0.19 c	374.36±12.72 c	85.63±0.38 c
GC(mean)	58.09 A	0.49 A	4 701.01 A	6.73 A	472.96 A	91.27 A
CT(mean)	55.80 B	0.45 A	4 356.99 B	6.39 B	437.79 B	89.69 B

的增产效果有差异。覆草区各施肥处理的平均单株产量显著高于清耕区,比清耕区增产9.94%;当主处理相同时,增产效果均表现为F+M>F>M>CK;地表覆草条件下,F+M和F处理的板栗单株产量差异不显著,分别比M和CK高19.10%、31.68%和13.48%、25.47%;在清耕区,同CK相比,各施肥处理(F、M、F+M)分别增产23.29%、14.38%、30.14%。可以看出,无论行间覆草还是清耕,均为有机无机肥配施的单株产量最高。

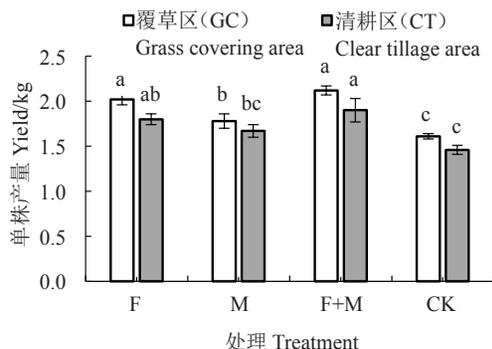


图6 覆草-施肥模式对板栗产量的影响

Fig. 6 Effect of mulching and fertilization on yield of chestnut

2.7 不同土壤理化指标与板栗细根和单株产量的相互关系

2.7.1 不同土壤理化指标与板栗细根指标的相关性分析 利用相关性分析研究土壤含水量、夏季土壤温度、容重、孔隙度、pH、碱解氮含量、有效磷含量、速效钾含量和有机质含量与细根全氮含量、全磷含量、全钾含量、有机碳含量、根表面积、根体积、根长密度、比根长和细根根长共9项指标之间的相关关系,使用Pearson相关系数表示相关关系的强弱。由表4可知,细根各项指标与土壤含水量、孔隙度、速效养分和有机质含量呈不同程度的正相关,而与夏季土壤温度、容重和土壤pH则呈负相关,除土壤温度和pH之外,其他指标间的相关性均达到显著或极显著差异水平。与细根根长相关性最强的土壤因子是含水量,其次为有效磷含量;与比根长相关性最强的是有机质含量,其次为土壤孔隙度;与根长密度相关性最强的土壤因子是含水量,其次为土壤孔隙度。

2.7.2 不同土壤因子对板栗单株产量的贡献程度 聚合增强树分析结果(图7)表明,不同土壤理化

表4 土壤环境因子与板栗细根指标的相关性分析

Table 4 Correlation analysis between soil environmental factors and fine root indexes of chestnut

	土壤含水量 Soil water content	土壤温度(夏季) Temperature (summer)	容重 Soil bulk density	孔隙度 Total porosity	pH	碱解氮含量 Avail. N	有效磷含量 Avail. P	速效钾含量 Avail. K	有机质含量 OM
细根全氮含量 Total N in fine root	0.922**	-0.709*	-0.765*	0.768*	-0.600	0.894**	0.959**	0.883**	0.801*
细根全磷含量 Total P in fine root	0.847**	-0.624	-0.742*	0.745*	-0.428	0.839**	0.910**	0.909**	0.690
细根全钾含量 Total K in fine root	0.912**	-0.675	-0.838**	0.842**	-0.541	0.833*	0.953**	0.949**	0.776*
有机碳含量 SOC	0.872**	-0.555	-0.866**	0.866**	-0.629	0.879**	0.882**	0.721*	0.948**
根表面积 Root surface area	0.803*	-0.469	-0.771*	0.777*	-0.510	0.969**	0.935**	0.742*	0.852**
根体积 Root volume	0.826*	-0.527	-0.835**	0.839**	-0.356	0.879**	0.974**	0.890**	0.735*
根长密度 Root length density	0.928**	-0.657	-0.917**	0.913**	-0.572	0.815*	0.910**	0.815*	0.903**
比根长 Specific root length	0.835**	-0.510	-0.907**	0.907**	-0.640	0.765*	0.763*	0.654	0.953**
细根根长 Fine root length	0.928**	-0.657	-0.917**	0.913**	-0.572	0.815*	0.910**	0.815*	0.903**

注:*代表在 $p < 0.05$ 水平显著相关,**代表在 $p < 0.01$ 水平极显著相关。

Note: * represents significant correlation at $p < 0.05$, ** represents extremely significant correlation at $p < 0.01$.

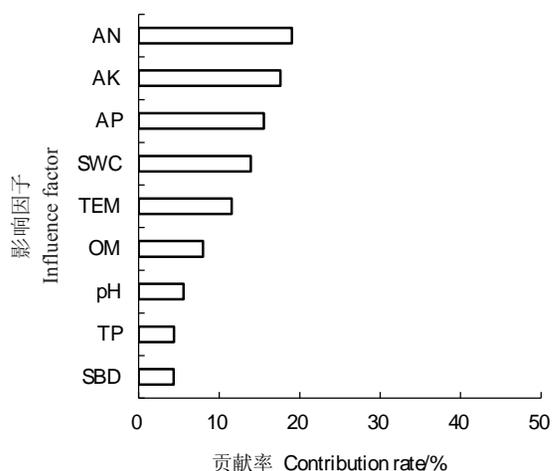
指标对板栗单株产量的影响程度由大到小依次为 AN>AK>AP>SWC>TEM>OM>pH>TP>SBD, 可见速效养分对产量贡献率较高,共高达52.21%,其次为土壤含水量(SWC)的贡献率(13.91%),土壤温度(TEM)贡献率为11.55%,最后是土壤孔隙度(TP)和土壤容重(SBD),贡献率分别为4.41%、4.38%,由此可知本研究中土壤速

效养分含量和土壤含水量对板栗单株产量影响更大。

3 讨论

3.1 覆草-施肥模式对板栗园土壤理化性质的影响

土壤是物质和能量交换的重要场所,是植物生长重要的基质,土壤水、肥、气、热状况直接影响植物的生长发育^[28]。土壤温度是影响果树根系生长、微生物活性、土壤养分有效性的最重要因素之一^[29]。果园覆草具有平缓土壤温度剧烈变化的作用,维持土壤温度的相对稳定^[30],本试验结果表明,覆草区0~40 cm土层温度日变化幅度小于清耕区1.10~1.56℃。地表覆盖处理能够改变自然降水入渗的过程,增加地表水下渗,提高土壤含水量^[31]。本研究中0~20 cm土层覆草区的土壤含水量最高可达25.14%,同时20~40 cm土层含水量也最大(26.20%),分别比相同时期清耕区高12.84%和11.02%。而且经过连续2 a的行间覆盖杂草,自然降水会更加有效地变为有效土壤水分,供树木吸收利用,这可能是因为杂草分解后改善了土壤的持水性能,一方面减少土壤表面的无效蒸发,另一方面提高了蓄水保湿的效率。已有研究表明,草具有较强的吸水保水作用,饱和吸水率为自身质量的200%~400%,这种强吸水性增加了地表水分的滞留时间,能有效蓄集降水下渗到作物根区,提高降水资源的利用率,减缓



AN. 碱解氮; AK. 速效钾; AP. 有效磷; SWC. 土壤含水量; TEM. 土壤温度; OM. 有机质; TP. 总孔隙度; SBD. 容重; pH. pH 值。

AN. Avail. N; AK. Avail. K; AP. Avail. P; SWC. Soil water content; TEM. Temperature; OM. Organic matter; TP. Total porosity; SBD. Soil bulk density; pH. pH value.

图7 不同土壤理化性质对板栗单株产量的贡献率

Fig. 7 Contribution rate of different soil physical and chemical properties to yield per plant of chestnut

了地表径流损失^[32],与本研究结果一致。土壤容重和孔隙度是反映土壤物理性状的主要指标,其不仅影响土壤水、肥、气、热状况,而且也影响矿质养分供应及果树根系生长,进而影响果树生长发育^[33]。本研究中,行间覆草和不同施肥处理均可降低土壤容重、增加土壤孔隙度,均以覆草区有机无机肥配施处理变化最为明显。土壤和植物是生态系统中的重要组成部分,二者相辅相成,互相影响。根际土壤是植物根系及其分泌物与土壤直接接触的区域^[34]。根际土壤作为植物碳、氮、磷和钾等养分的直接来源,其含量的变化直接影响作物的生理代谢过程,进而影响地上部分的生长^[35]。本试验结果表明,覆草和不同施肥处理明显增加了根际土壤有机质和速效养分含量,因为杂草通过腐化分解补充部分营养物质给土壤,增加土壤有机质含量,同时土壤有机质分解产生的酸性物质可以削弱土壤对磷、钾的固定作用,从而提高土壤有效磷和速效钾含量,与杨龟等^[36]的研究结果相同。由此可见行间覆草的地表管理方式对于干旱期间树木生长发育方面具有重要意义。

3.2 覆草-施肥模式对板栗细根生长和产量的影响

植物根系是直接连接土壤环境与树体的功能器官,也是树木吸收水分和养分的主要器官,根系在土壤中的机械穿插改变了土壤的通透性,在影响土壤结构的同时^[37],土壤的水分、肥力特性也会影响根系的分布和养分含量。Vogt等^[38]的研究表明,在植物生长季中,细根(直径 ≤ 2 mm)的变化较粗根更明显,果园改土、灌溉、施肥等引起土壤生态因子变化的栽培措施都会影响根系的生长分布及对养分水分的吸收能力^[39-40],进而决定地上部分的生长和生态功能的发挥^[26-27]。细根最能反映根系生长发育状态,细根根量占总根量比例的大小是衡量植株生活力强弱的标志^[41-42]。比根长是指细根单位质量的根长,反映根系中物质的分配及根系生长扩张的能力^[43];根长密度是指每 cm^3 土壤中根长的厘米数,二者均是衡量根系吸收水分和养分能力的重要指标,细根直径越小,比根长和根长密度越大,此时植物吸收表面增加,土壤输送距离缩短,有利于水分和养分吸收。笔者在本研究中发现,行间覆草结合有机无机肥配施明显增加根表面积、根体积、根长密度、比根长和细根根长等指标,不同施肥比例下覆草区和清耕区的比根长、根长密度、细根根长和

细根根长占比变化趋势均表现为 $F+M>M>F>CK$,说明有机肥的使用会显著增加细根占比,促进根系中细根的生长和分化,这与前人研究相似^[44-45]。

果实的品质、单粒质量和产量是影响人们消费取向和经济效益的重要决定因素,已有大量研究表明,有机肥与化肥配施可以显著增加果实的果形指数、维生素C含量、可溶性固形物含量,改善果实的外观品质、提高单果质量和产量等指标^[46-47]。笔者通过连续2 a的田间试验,发现当主处理相同时,即在覆草区或清耕区内,不同的施肥处理得出平均单株产量顺序均为 $F+M>F>M>CK$,增产幅度为4.95%~45.21%,可能由于行间覆草和肥料的投入能明显改善根际土壤微环境,在整个生长期更有利于根系的生长发育,进而提高果实的产量品质^[12,48];同时笔者在本研究中也发现,当使用单一肥料时,无机肥的增产能力比有机肥高,如果将有机肥和无机肥配合施用可达到理想的增产效果,与前人研究结果相似^[49],但是由于本试验只有2个板栗生长周期,而且两年自然降水量均偏少,肥效可能未充分发挥作用,导致板栗单株产量未达到理想值,所以后续可通过延长试验时间来减少大小年以及自然条件带来的误差。

4 结 论

在板栗整个生育期内,行间覆草结合有机无机肥配施模式显著减小0~40 cm土层温度日变化幅度范围,增加土壤含水量,降低0~20 cm和20~40 cm土层的土壤容重,加大土壤孔隙度,增加土壤有机质和速效养分含量;不同覆盖-施肥模式通过增加板栗细根的根表面积、根体积等形态指标,来吸收土壤中碳、氮、磷和钾等养分和水分含量,进而促进板栗果实膨大和养分积累,提升板栗单株产量,其中最大增产幅度可达45.21%。通过聚合增强树分析,表明当地板栗产量的限制因素首先是土壤速效养分含量,其次为土壤含水量,二者对单株产量的贡献率分别为52.21%、13.91%,所以研究区板栗园土壤中水分和速效养分含量是限制高产的主要因素。因此,对于干旱地区无灌溉条件的板栗园,建议当地栗农收集板栗园杂草以及农业废弃物资源,经过堆积腐熟后,将其均匀铺撒在板栗园行间,具体覆盖厚度根据当地实际情况而定,并定期适量增加,同时结合有机肥和无机肥配施,不仅经济环保,

而且还可以高效利用山区有限的降水资源,调节板栗根系生长的微环境,达到增产优质的目的,可大力推广应用。

参考文献 References:

- [1] 孙慧娟,郭素娟,张丽,谢明明,宋影.修剪与施氮对板栗叶片N、P营养及产量的影响[J].核农学报,2019,33(4):816-822.
SUN Huijuan, GUO Sujuan, ZHANG Li, XIE Mingming, SONG Ying. Effect of pruning and nitrogen rate on nitrogen and phosphorus contents in leaves and yield of *Castanea mollissima* Bl.[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2019, 33(4): 816-822.
- [2] 郭素娟,谢明明,张丽,孙慧娟,宋影.板栗细根碳、氮、磷化学计量时间变异特征[J].植物营养与肥料学报,2018,24(3):825-832.
GUO Sujuan, XIE Mingming, ZHANG Li, SUN Huijuan, SONG Ying. Temporal variation of C, N, P stoichiometric in fine roots of *Castanea mollissima* Bl.[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2018, 24(3): 825-832.
- [3] 刘小勇,李红旭,李建明,王玮,赵明新,孙定虎.不同覆盖方式对旱地果园水热特征的影响[J].生态学报,2014,34(3):746-754.
LIU Xiaoyong, LI Hongxu, LI Jianming, WANG Wei, ZHAO Mingxin, SUN Dinghu. The effects of different mulching way on soil water thermal characteristics in pear orchard in the arid area[J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(3): 746-754.
- [4] ZHANG T, PENG J, LIANG W, YANG Y T, LIU Y X. Spatial-temporal patterns of water use efficiency and climate controls in China's Loess Plateau during 2000 to 2010[J]. Science of The Total Environment, 2016, 565: 105-122.
- [5] CHANG R Y, FU B J, LIU G H, YAO X L, WANG S. Effects of soil physicochemical properties and stand age on fine root biomass and vertical distribution of plantation forests in the Loess Plateau of China[J]. Ecological Research, 2012, 27(4): 827-836.
- [6] 付威,樊军,胡雨彤,赵晶,郝明德.施肥和地膜覆盖对黄土旱塬土壤理化性质和冬小麦产量的影响[J].植物营养与肥料学报,2017,23(5):1158-1167.
FU Wei, FAN Jun, HU Yutong, ZHAO Jing, HAO Mingde. Effects of fertilization and film mulching on soil physical and chemical properties and winter wheat yield on the Loess Plateau[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2017, 23(5): 1158-1167.
- [7] 张义,谢永生,郝明德,摄晓燕.不同地表覆盖方式对苹果园土壤性状及果树生长和产量的影响[J].应用生态学报,2010,21(2):279-286.
ZHANG Yi, XIE Yongsheng, HAO Mingde, SHE Xiaoyan. Effects of different patterns surface mulching on soil properties and fruit trees growth and yield in an apple orchard[J]. Acta Ecologica Sinica, 2010, 21(2): 279-286.
- [8] 秦秦,宋科,孙丽娟,孙雅菲,王峻,江建兵,薛永.猕猴桃园行间生草对土壤养分的影响及有效性评价[J].果树学报,2020,37(1):68-76.
QIN Qin, SONG Ke, SUN Lijuan, SUN Yafei, WANG Jun, JIANG Jianbing, XUE Yong. Effect of inter-row planting grass on the contents and availability of soil nutrient in kiwifruit orchard[J]. Journal of Fruit Science, 2020, 37(1): 68-76.
- [9] 闫宗正,陈素英,张喜英,牛君仿,邵立威.秸秆覆盖时间和覆盖量对冬小麦田温度效应及地上地下生长的影响[J].中国生态农业学报,2017,25(12):1779-1791.
YAN Zongzheng, CHEN Suying, ZHANG Xiying, NIU Junfang, SHAO Liwei. Effects of amount and time of straw mulching on soil temperature, root growth and yield of winter wheat[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2017, 25(12): 1779-1791.
- [10] 孙文泰,刘兴禄,董铁,尹晓宁,牛军强,马明.陇东旱塬苹果园不同覆盖措施对土壤性状、根系分布和果实品质的影响[J].果树学报,2015,32(5):841-851.
SUN Wentai, LIU Xinglu, DONG Tie, YIN Xiaoning, NIU Junqiang, MA Ming. Root distribution, soil characteristics, root distribution and fruit quality affected by different mulching measures in apple orchard in the dry area of eastern Gansu[J]. Journal of Fruit Science, 2015, 32(5): 841-851.
- [11] 孙文泰,马明,董铁,刘兴禄,赵明新,尹晓宁,牛军强.陇东旱塬苹果根系分布规律及生理特性对地表覆盖的响应[J].应用生态学报,2016,27(10):3153-3163.
SUN Wentai, MA Ming, DONG Tie, LIU Xinglu, ZHAO Mingxin, YIN Xiaoning, NIU Junqiang. Response of distribution pattern and physiological characteristics of apple roots grown in the dry area of eastern Gansu to ground mulching[J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 27(10): 3153-3163.
- [12] 孙文泰,董铁,刘兴禄,赵明新,尹晓宁,牛军强,马明.覆盖处理苹果细根分布与土壤物理性状响应关系研究[J].干旱地区农业研究,2016,34(2):88-95.
SUN Wentai, DONG Tie, LIU Xinglu, ZHAO Mingxin, YIN Xiaoning, NIU Junqiang, MA Ming. The relationship between root distribution of apple and soil physical properties by different ground covering approaches[J]. Agricultural Research in Arid Areas, 2016, 34(2): 88-95.
- [13] 宋影,郭素娟,谢明明,张丽,孙慧娟.有机-无机配施比例对板栗叶片氮磷营养、产量及品质的影响[J].东北农业大学学报,2017,48(9):28-35.
SONG Ying, GUO Sujuan, XIE Mingming, ZHANG Li, SUN Huijuan. Effect of different application ratios of inorganic and organic fertilizers on nitrogen and phosphorus contents of leaves, yield and quality of *Castanea mollissima* Bl. [J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2017, 48(9): 28-35.
- [14] 谢明明,郭素娟,宋影,张丽,孙慧娟.板栗细根的空间分布格局及季节动态[J].浙江农林大学学报,2018,35(1):60-67.
XIE Mingming, GUO Sujuan, SONG Ying, ZHANG Li, SUN Huijuan. Spatial distribution and seasonal dynamics of fine roots of *Castanea mollissima* Bl. [J]. Journal of Zhejiang A & F University, 2018, 35(1): 60-67.
- [15] 张小全,吴可红,DIETER M. 树木细根生产与周转研究方法评述[J].生态学报,2000,20(5):875-883.

- ZHANG Xiaoquan, WU Kehong, DIETER M. Review on research methods of fine root production and turnover of trees[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2000, 20(5): 875-883.
- [16] 马阳, 吴敏, 刘晓明, 李赞虹, 张世卿, 王亚玲, 孙坤雁, 彭正萍. 夏玉米根系活性、养分吸收和产量对不同施肥方式的响应[J]. *中国土壤与肥料*, 2020(5): 95-100.
- MA Yang, WU Min, LIU Xiaoming, LI Yunhong, ZHANG Shiqing, WANG Yaling, SUN Kunyan, PENG Zhengping. Responses of root activity, nutrient uptake and yield of summer maize to different fertilization methods[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2020(5): 95-100.
- [17] 及利, 卢艳, 杨雨春, 王君, 杨阳, 陆志民. 施肥方式对核桃楸容器苗生长及根系养分累积的影响[J]. *西北林学院学报*, 2020, 35(4): 76-83.
- JI Li, LU Yan, YANG Yuchun, WANG Jun, YANG Yang, LU Zhimin. Effects of fertilization methods on the growth and root nutrient accumulation of *Juglans mandshurica* container seedlings[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2020, 35(4): 76-83.
- [18] 洪艺嘉. 切根与施肥对板栗幼苗生长和生理的影响[D]. 北京: 北京林业大学, 2018.
- HONG Yijia. Effects of root cutting and fertilization on growth and physiology of chestnut seedlings[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2018.
- [19] 马天爽. 板栗根系及土壤环境对地膜覆盖的响应[D]. 北京: 北京林业大学, 2020.
- MA Tianshuang. Response of root system and soil environment of chestnut to plastic film mulching[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2020.
- [20] 刘正民, 郭素娟, 徐丞, 秦天天, 孙小兵. 基于饱和 D-最优设计的燕山早丰施肥研究[J]. *北京林业大学学报*, 2015, 37(1): 70-77.
- LIU Zhengmin, GUO Sujuan, XU Cheng, QIN Tiantian, SUN Xiaobing. Optimal fertilization for *Castanea mollissima* 'Yanshanzaofeng' based on the saturated D-optimal design[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2015, 37(1): 70-77.
- [21] 田寿乐, 沈广宁, 许林, 孙晓莉. 不同节水灌溉方式对干旱山地板栗生长结实的影响[J]. *应用生态学报*, 2012, 23(3): 639-644.
- TIAN Shoule, SHEN Guangning, XU Lin, SUN Xiaoli. Effects of different water-saving irrigation modes on chestnut growth and fruiting in drought hilly land[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 23(3): 639-644.
- [22] RMA B, KCJV R, KNIGHT J D. A review of fine root dynamics in populus plantations[J]. *Agroforestry Systems*, 2006, 67(1): 73-84.
- [23] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000: 284-289.
- BAO Shidan. Soil agricultural chemical analysis [M]. 3rd edition. Beijing: China Agricultural Press, 2000: 284-289.
- [24] DE'ATH G. Boosted trees for ecological modeling and prediction[J]. *Ecology*, 2007, 88(1): 243-251.
- [25] 杨波. 硫酸钾用量对烤烟根际养分有效性及微生物区系的影响[D]. 北京: 中国农业科学院, 2015.
- YANG Bo. Effects of potassium sulfate dosage on nutrient availability and microflora in the rhizosphere of flue-cured tobacco[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2015.
- [26] 杨洪强, 范伟国. 苹果根系构型及其调控研究进展[J]. *园艺学报*, 2012, 39(9): 1673-1678.
- YANG Hongqiang, FAN Weiguo. Advances in apple root architecture and its regulation[J]. *Acta Horticulturae Sinica*, 2012, 39(9): 1673-1678.
- [27] 甘卓亭. 渭北旱塬苹果园根系分布格局及其土壤水分生态特征研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院(教育部水土保持与生态环境研究中心), 2007.
- GAN Zhuoting. Root distribution pattern and soil moisture ecological characteristics of apple orchards in Weibei dry tableland[D]. Beijing: Graduate School of Chinese Academy of Sciences (Research Center for Soil and Water Conservation and Ecological Environment, Ministry of Education), 2007.
- [28] 唐洁, 汤玉喜, 杨艳, 李永进, 吴敏. 洞庭湖区杨树人工林不同龄林土壤养分特征研究[J]. *中国农学通报*, 2016, 32(25): 5-9.
- TANG Jie, TANG Yuxi, YANG Yan, LI Yongjin, WU Min. Soil nutrient characteristics of different age poplar artificial forests in Dongting lake area[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2016, 32(25): 5-9.
- [29] 胥生荣, 张恩和, 马瑞丽, 王琦, 刘青林, 黄钰芳. 覆盖对枸杞根系土壤环境和水分利用的影响[J]. *草业学报*, 2019, 28(2): 12-22.
- XU Shengrong, ZHANG Enhe, MA Ruili, WANG Qi, LIU Qinglin, HUANG Yufang. Effects of mulching on soil environment and water use of root system of *Lycium barbarum*[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2019, 28(2): 12-22.
- [30] 程丽, 赵通, 黄华梨, 张露荷, 朱燕芳, 贾旭梅, 郭爱霞, 王延秀. 不同耕作方式对枣园土壤温度、养分和果实品质的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2019, 37(3): 200-207.
- CHENG Li, ZHAO Tong, HUANG Huali, ZHANG Luhe, ZHU Yanfang, JIA Xumei, GUO Aixia, WANG Yanxiu. Effect of different tillage methods on soil temperature, nutrient, and fruit quality in jujube orchard[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2019, 37(3): 200-207.
- [31] 胡实, 谢小立, 王凯荣. 覆被对桔园旱季土壤水分变化和利用的影响[J]. *生态学报*, 2009, 29(2): 976-983.
- HU Shi, XIE Xiaoli, WANG Kairong. Effects of straw mulching and sodding culture on soil water use and variation in citrus orchard in dry season[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(2): 976-983.
- [32] 刘春生, 杨吉华, 马玉增, 郑永明. 对板栗园树盘土壤双重覆盖的效应研究[J]. *农业工程学报*, 2004, 20(1): 69-71.
- LIU Chunsheng, YANG Jihua, MA Yuzeng, ZHENG Yongming. Effects of dual mulches on chestnut orchard soil[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2004, 20(1): 69-71.
- [33] 李会科, 张广军, 赵政阳, 李凯荣. 生草对黄土高原旱地苹果园土壤性状的影响[J]. *草业学报*, 2007, 16(2): 32-39.

- LI Huike, ZHANG Guangjun, ZHAO Zhengyang, LI Kairong. Effects of interplanted herbage on soil properties of non-irrigated apple orchards in the Loess Plateau[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2007, 16(2): 32-39.
- [34] SHI S J, NUCCIO E, HERMAN D J, RIJKERS R, ESTERA K, LI J B, DA ROCHA U N, HE Z L, PETT R J, BRODIE E L, ZHOU J Z, FIRESTONE M. Successional trajectories of rhizosphere bacterial communities over consecutive seasons[J]. *Mbio*, 2015, 6(4): 500-503.
- [35] ZHANG C, LIU G B, XUE S, WANG G L. Soil bacterial community dynamics reflect changes in plant community and soil properties during the secondary succession of abandoned farmland in the Loess Plateau[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2016, 97: 40-49.
- [36] 杨崑, 杨丽娟, 常青, 郭艳君, 宋夏夏, 黄晓杰. 不同秸秆用量对保护地黄瓜产量及土壤养分的影响[J]. *北方园艺*, 2011(6): 46-48.
- YANG Min, YANG Lijuan, CHANG Qing, GUO Yanjun, SONG Xiaxia, HUANG Xiaojie. Effect of different straw reapplication on yields of cucumber and soil fertility[J]. *Northern Horticulture*, 2011(6): 46-48.
- [37] 侯晓娟, 李志, 崔诚, 李凯, 余飞, 袁颖丹, 郭晓敏, 牛德奎. 武功山芒根系垂直分布及其与土壤养分的关系[J]. *草业科学*, 2017, 34(12): 2428-2436.
- HOU Xiaojuan, LI Zhi, CUI Cheng, LI Kai, YU Fei, YUAN Yingdan, GUO Xiaomin, NIU Dekui. Vertical distribution of root system and its relationship with soil nutrients in Wugong Mountain[J]. *Pratacultural Science*, 2017, 34(12): 2428-2436.
- [38] VOGT K A, VOGT D J, PALMIOTTO P A, BOON P, O'HARA J, ASBJORNSEN H. Review of root dynamics in forest ecosystems grouped by climate, climatic forest type and species[J]. *Plant and Soil*, 1996, 187(2): 159-219.
- [39] 张万锋, 杨树青, 娄帅, 靳亚红, 刘鹏. 耕作方式与秸秆覆盖对夏玉米根系分布及产量的影响[J]. *农业工程学报*, 2020, 36(7): 117-124.
- ZHANG Wanfeng, YANG Shuqing, LOU Shuai, JIN Yahong, LIU Peng. Effects of tillage methods and straw mulching on the root distribution and yield of summer maize[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2020, 36(7): 117-124.
- [40] 胥生荣, 张恩和, 马瑞丽, 王琦, 刘青林, 王鹤龄. 不同覆盖措施对枸杞根系生长和土壤环境的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2018, 26(12): 1802-1810.
- XU Shengrong, ZHANG Enhe, MA Ruili, WANG Qi, LIU Qinglin, WANG Heling. Effects of mulching patterns on root growth and soil environment of *Lycium barbarum*[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2018, 26(12): 1802-1810.
- [41] 王迪海, 赵忠, 李剑. 土壤水分对黄土高原主要造林树种细根表面积季节动态的影响[J]. *植物生态学报*, 2010, 34(7): 819-826.
- WANG Dihai, ZHAO Zhong, LI Jian. Impact of soil moisture on the seasonal dynamics of fine root surface area of major afforestation tree species on China's Loess Plateau[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 34(7): 819-826.
- [42] 杨素苗. 灌溉方式对红富士苹果根系水分生理特性影响的研究[D]. 保定: 河北农业大学, 2011.
- YANG Sumiao. Effects of irrigation methods on root water physiological characteristics of red Fuji apple[D]. Baoding: Hebei Agricultural University, 2011.
- [43] ZAMORA D S, JOSE S, NAIR P K R. Morphological plasticity of cotton roots in response to interspecific competition with pecan in an alley cropping system in the southern United States[J]. *Agroforestry Systems*, 2007, 69(2): 107-116.
- [44] 黄萍. 地面覆盖和钻孔通气对苹果根系和植株生长发育的影响[D]. 泰安: 山东农业大学, 2018.
- HUANG Ping. Effects of ground cover and borehole ventilation on the growth and development of apple roots and plants[D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2018.
- [45] 范宏伟. 山地栗园稻草覆盖综合效益研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2006.
- FAN Hongwei. Study on comprehensive benefit of straw mulching in mountain chestnut orchard[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2006.
- [46] 李涛涛. 生草覆盖条件下长期不同施肥对苹果园土壤肥力及果树生长发育的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2013.
- LI Taotao. Effects of long-term fertilization on soil fertility and growth of fruit trees in apple orchard under grass cover[D]. Yangling: Northwest A & F University, 2013.
- [47] 何学涛, 牛俊义, 刘建华. 不同施肥水平对苹果产量及品质的影响[J]. *甘肃农业大学学报*, 2010, 45(2): 83-86.
- HE Xuetao, NIU Junyi, LIU Jianhua. Effects of the different fertilizer application level on the yield and quality of apple[J]. *Journal of Gansu Agricultural University*, 2010, 45(2): 83-86.
- [48] 尹晓宁, 刘兴禄, 董铁, 牛军强, 孙文泰, 马明. 苹果园不同覆盖材料对土壤与近地微域环境及树体生长发育的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2018, 26(1): 83-95.
- YIN Xiaoning, LIU Xinglu, DONG Tie, NIU Junqiang, SUN Wentai, MA Ming. Effects of different mulching materials on soil and near-surface environment and of apple orchard tree growth[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2018, 26(1): 83-95.
- [49] 卢海蛟, 翟丙年, 刘玲玲, 李涛涛, 蔡俊卿, 赵政阳. 生草覆盖条件下不同施肥模式对红富士苹果生长发育、产量及品质的影响[J]. *北方园艺*, 2012(10): 5-8.
- LU Haijiao, ZHAI Bingnian, LIU Lingling, LI Taotao, CAI Junqing, ZHAO Zhengyang. The effects of different fertilization pattern on growth, yield and quality of Fuji apple under grass cover in orchard[J]. *Northern Horticulture*, 2012(10): 5-8.