

滴喷灌施肥方式对土壤养分空间分异及茶苗根系生长的影响

刘子君, 叶贇, 王丽, 张遥, 齐永波, 穆静, 章力干

(农田生态保育与污染防治安徽省重点实验室, 安徽农业大学资源与环境学院, 合肥 230036)

摘要: 探究滴灌和喷灌对土壤理化和生物学性状及茶苗根系生长的影响, 为科学灌溉施肥提供理论依据。土壤培养设置土施(SA)、喷施(FA)和滴施(DA)3种施肥方式, 15, 30, 45, 60天后, 选取培养钵表土中心点为参照, 根据距中心点水平和垂直方向距离差异, 将培养土壤划分3个空间区域, 观测pH、电导率、养分和生物学性质; 茶树盆栽试验设置2个氮水平和土施、喷施、滴施3种施肥方式共6个处理, 观测茶苗根系生长和形态。土培试验结果表明, FA与SA处理不同空间土壤区域无明显差异, 而DA与FA之间差异明显, 60天后离中心点水平5cm、垂直0—10cm的土壤区域内, 其电导率、pH、碱解N、速效K和速效P含量DA较FA分别增加35.6%、30.7%、40.6%、34.3%和74.8%, 区域内细菌、真菌和放线菌分别增加174.6%、167.0%和289.0%, 脲酶和酸性磷酸酶活性呈相反变化, DA较FA分别降低42.5%和31.4%。盆栽试验结果表明, 茶树根系生长整体表现为FA>SA>DA, FA较DA的茶苗根鲜重、根总长、根体积、根尖数、分支数和交叉数均明显提高, 不同N水平之间的促根效应差异不明显。综上, 施肥方式对土壤养分空间分布、土壤生物学特性及茶苗根系生长影响明显。DA滴头中心点微域土壤的电导率、养分含量和微生物数量较SA和FA增加显著, 存在明显的微域集聚效应, 而脲酶、酸性磷酸酶活性降低。DA施肥方式明显抑制茶苗根系生长, 而FA则显著促进茶苗根系生长和形态建成。

关键词: 水肥一体化; 滴施; 喷施; 土壤养分; 酶活性; 微生物菌群

中图分类号: S157.4⁺1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2022)06-0330-10

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2022.06.040

Effects of Drip Irrigation and Spray Irrigation Fertilization on Spatial Differentiation of Soil Nutrients and Root Growth of Tea Seedlings

LIU Zijun, YE Yun, WANG Li, ZHANG Yao, QI Yongbo, MU Jing, ZHANG Ligan

(Anhui Key Laboratory of Farmland Ecological Conservation and Pollution Prevention,
College of Resources and Environment, Anhui Agricultural University, Hefei 230036)

Abstract: This research investigated the effects of drip and spray irrigation on the physical, chemical and biological properties of the soil and root growth of tea seedlings, and could provide a theoretical basis for scientific irrigation and fertilization. Three types of fertilizer application were set up, soil application (SA), spray application (FA) and drip application (DA). After 15, 30, 45 and 60 days, the soil was divided into three spatial zones according to the difference in horizontal and vertical distance from the center of the topsoil of the culture bowl, and pH, conductivity, nutrients and biological properties were observed. In the pot experiment of tea seedlings, six treatments were set up, including two nitrogen levels and three fertilization methods of soil application, spraying and dropping. The root growth and morphology of tea seedlings were observed. The results of the soil culture showed that there was no significant difference between FA and SA treatments in different spatial soil regions, while there were significant differences between DA and FA. After 60 days, in the soil region 5 cm horizontally and 0—10 cm vertically from the center point, compared with FA, the conductivity, pH, content of alkali-hydrolyzed N, available K and available P of DA increased by 35.6%, 30.7%, 40.6%, 34.3% and 74.8%, respectively, and bacterial, fungal and actinomycetes in the

收稿日期: 2022-04-15

资助项目: 国家果菜茶有机肥替代化肥委托项目(qmZC2019C003-2); 国家重点研发计划项目(2016YFD0200402-3)

第一作者: 刘子君(1996—), 女, 硕士研究生, 主要从事水肥一体化技术与应用研究。E-mail: 1023920430@qq.com

通信作者: 章力干(1965—), 男, 副教授, 主要从事新型肥料与高效施肥技术研究。E-mail: zhligan@ahau.edu.cn

region of DA increased by 174.6%, 167.0% and 289.0%, respectively. The activities of urease and acid phosphatase in the soil region of DA showed opposite trend, decreased by 42.5% and 31.4%, respectively, compared with FA. The results of pot experiment showed that the overall root growth of tea trees followed the order of FA>SA>DA, and the root fresh weight, total root length, root volume, root tip number, branch number and cross number of tea seedlings in the FA treatment were significantly higher than those of DA, while there was no significant difference in the root promoting effect among different N levels. In summary, fertilization methods had significant effects on the spatial distribution of soil nutrients, soil biological properties and root growth of tea seedlings. Compared with SA and FA, the conductivity, nutrient content and microbial population in the micro domain at the center of the DA drip head increased significantly, and there was a significant micro domain aggregation effect, while the urease and acid phosphatase activities decreased. DA significantly inhibited the root growth of tea seedlings, while FA significantly promoted the root growth and morphological establishment of tea seedlings.

Keywords: integration of water and fertilizer; drip irrigation; spray irrigation; soil nutrients; enzyme activity; microbial community

滴灌施肥和喷灌施肥是目前施肥利用率较高的2种灌溉施肥方式,养分随水分供给,能够精准调控水分和养分供应,实现水肥高效吸收利用^[1-3]。滴灌施肥通过滴管将水肥直接灌入作物根部附近,实现根际施肥,湿润面积小且水分和养分损失少,降低田间空气湿度削弱杂草滋生,从而降低除草剂施用^[4-5];长期不合理的滴灌施肥造成的土壤盐渍化对作物产生抑制作用时有发生^[6-7]。喷灌施肥湿润比相对滴灌施肥明显提高,水量可控性和均匀性高于滴灌施肥^[8-9];喷灌施肥遇强风,会降低喷灌均匀性,影响喷灌效果,存在一定的局限性^[10-11]。施肥方式不同,明显影响养分在土壤中运移和空间分布,进而影响土壤性质和作物生长^[12-13]。因此,研究滴灌和喷灌施肥方式对土壤养分空间分布及植物生长具有重要理论意义和实际价值。

滴、喷灌施肥的相关研究^[14-16]发现,滴灌施肥的养分主要聚集在滴头附近,可快速提高局域土壤养分含量,且在垂直方向上,养分含量会随土层深度的加深出现降低现象,合理滴灌施肥,明显促进作物生长和增加作物产量。喷灌施肥养分分布均匀,但施肥浓度对养分分布的影响尤为明显^[17-19]。当前,滴灌施肥和喷灌施肥对土壤中氮磷钾的分布特征、移动性、空间变异特性的研究^[20-23]很多,关于滴、喷灌不同施肥方式间的比较研究鲜见报道,作为需氮高、以采摘鲜叶为主的茶树作物,未见供氮浓度及不同施肥方式的效应报道。

本研究通过土培和盆栽试验,研究不同空间变化的土壤养分含量和茶苗根系生长对滴、喷灌施肥方式的响应,分析土壤理化性质、酶活性、微生物菌群数量的变化特征及作物生长情况,探讨滴、喷灌不同施肥方式土壤养分的空间差异及其对茶树生长的影响,为

茶树灌溉施肥方式的选择和茶树氮素营养调控提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料与试验设计

试验用土采自安徽省黄山市祁门县高山茶园(117°61'E,29°73'N)。土壤类型为红壤,质地中黏,田间持水量为29.77%,容重为1.31 g/cm³,pH为4.53,有机质含量3.14 g/kg,全氮含量1.27 g/kg,碱解氮、有效磷和速效钾含量分别为99.80,1.27,52.00 mg/kg。茶苗品种为“龙井43号”。供试基肥为羊粪腐熟有机肥(N、P₂O₅和K₂O含量分别为1.76%,0.86%和1.16%)。试验用氮、磷、钾肥分别为尿素、磷酸二氢钾和硫酸钾。

土培试验于2020年11月1日至12月31日在安徽农业大学农萃园试验场进行。土培试验基施有机肥模拟区域茶园田间施用量,与供试土壤均匀混合。追肥设置土施(SA)、喷施(FA)和滴施(DA)3个处理,重复3次。试验桶直径32 cm,高28 cm,每桶装土16 kg。肥料施用量为:有机肥6.81 g/kg干土,氮肥0.61 g/kg干土,磷肥0.27 g/kg干土和钾肥0.11 g/kg干土,每15天取样并追施N、P、K肥,分3次平均追肥,分别在第15,30,45,60天取样分析。追肥时,SA处理是与FA和DA处理等量水浇灌后将肥料均匀撒在土壤表面;FA处理是将肥与水混匀后,用喷壶均匀喷在土壤表面;DA处理是将肥与水混匀后缓慢匀速滴在桶中心点。试验过程中,用称重法保持土壤含水率为田间持水量的60%~70%,2~3天调整1次试验桶位置,避免由于光照不均等自然因素对试验造成的误差。

盆栽试验于2020年11月1日至2021年6月1日在安徽农业大学农萃园试验场进行。盆栽试验追肥设

置土施(SA)、喷施(FA)和滴施(DA)3种方式,追施氮素设高氮和低氮2个水平,试验共6个处理,重复3次。高氮处理施肥量为:有机肥 6.81 g/kg 干土,氮肥 0.52 g/kg 干土,磷肥 0.27 g/kg 干土和钾肥 0.11 g/kg 干土;低氮处理施肥量为:有机肥施用量 6.81 g/kg 干土,氮肥施用量 0.43 g/kg 干土,磷肥施用量 0.27 g/kg 干土和钾肥 0.11 g/kg 干土。磷、钾肥扣除有机肥中养分后作为基肥一次性施入,40%氮肥做基肥,60%氮肥分2次进行平均追肥。试验用桶及操作同土培。盆栽试验于2020年11月装盆移栽茶苗,进行2次追肥,第1次追肥于移栽后120天,第2次追肥于移栽后180天,然后于210天取茶苗根系样品进行分析。

1.2 样品采集与测定

在每个试验桶内设置3个采集点,分别距中心点水平5 cm/垂直0—10 cm(5 H,10 V)、水平5 cm/垂直10—20 cm(5 H,20 V)和水平10 cm/垂直0—10 cm(10 H,10 V)。具体取样点位及取样方式见图1。

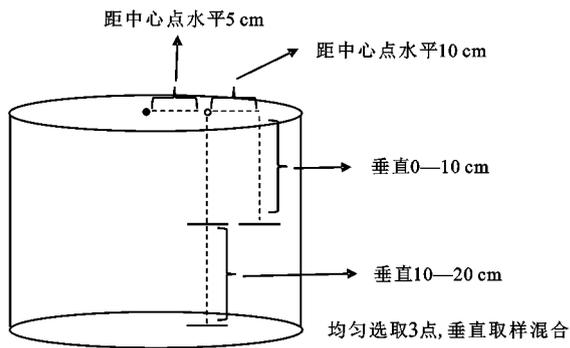


图1 土壤取样示意

用取土器均匀选取3点取样,混合后分为2份,鲜土样品用于测定土壤脲酶、过氧化氢酶、酸性磷酸酶活性及微生物生物量碳、氮含量;其余土壤自然风干后研磨分别过20,100目筛,用于分析土壤理化性质。

土壤测定方法参照《土壤农化分析》^[24],土壤含水率采用烘干法;土壤容重、田间持水量采用环刀法;土壤pH采用1:2.5土水比,使用PHS-3G型pH计测定;电导率(EC)采用浸提法(土:水为1:5),使用DDSJ-308A型电导率仪测定;阳离子交换量(CEC)采用BaCl₂-MgSO₄(强迫交换法);土壤有机质(SOM)含量采用高温外加热重铬酸钾氧化-容量法测定;土壤全氮(TN)含量采用凯氏定氮法测定;碱解氮含量采用碱解扩散法测定;有效磷(AP)含量采用NaHCO₃浸提-钼锑抗比色法测定;速效钾含量用中性NH₄OAc浸提-火焰光度法;微生物生物量碳、氮含量采用氯仿熏蒸法-TOC仪器进行测定;土壤脲酶(S-UE测试盒)、过氧化氢酶(S-CAT测试盒)、酸性磷酸酶(S-ACP测试盒)测定。

1.3 数据统计与分析

采用SPSS 19.0软件进行数据统计分析,Duncan法检验处理间差异,采用Origin 9.0软件作图。

2 结果与分析

2.1 不同处理对土壤电导率、pH的影响

不同施肥方式对土壤电导率影响显著(图2)。SA、FA、DA处理在垂直及水平方向电导率随追肥次数及追肥积累量增加,整体均呈递增趋势,且在完成第3次追肥,即培养至60天,以DA(5 H,10 V)土层表现最显著,电导率值从0.18增长至0.80 dS/m($p < 0.05$)。SA与FA相比,无论水平还是垂直方向两者均无明显差异。DA与FA和SA相比差异显著,培养60天,5 H/10 V土层DA较FA、SA均提高35.6%;5 H/20 V土层DA较FA、SA分别提高13.1%,10.6%;而10 H/10 V土层DA较FA、SA分别降低20.3%,19.0%。说明随追肥次数增加,电导率均呈现增加趋势,DA处理滴头附近增幅更显著,远离滴头区域增幅缓慢,10 H/10 V土层电导率反而低于SA和FA处理。

不同施肥方式对土壤pH影响显著(图3)。SA、FA、DA处理随追肥次数及追肥量增加,各土层整体均呈递增趋势,培养至60天,以DA(5 H,10 V)土层表现最显著,pH由5.23增至7.46($p < 0.05$)。培养至60天,DA处理无论水平还是垂直方向pH均高于FA及SA处理,5 H/10 V土层DA较FA、SA分别提高30.7%,28.0%;5 H/20 V、10 H/10 V 2个土层DA有增加,但增幅不明显。SA与FA相比,整体上无明显差异,此现象与电导率变化表现一致。说明DA相对FA及SA而言造成滴头附近土壤pH显著上升。

2.2 不同处理土壤养分含量的影响

不同施肥方式对土壤养分影响显著(表1)。SA与FA相比,各土层指标均无明显差异。土壤有机质,SA、FA、DA处理随追肥积累量及培养时间增加无论是水平还是垂直方向均无变化。阳离子交换量、全N、碱解N、速效P和速效K含量随追肥次数增加,SA、FA、DA处理各土层均呈递增趋势,以DA(5 H,10 V)土层增幅最为显著,至培养结束时各指标分别达到13.17 cmol/kg,2.43 g/kg,958.00 mg/kg,80.37 mg/kg和622.00 mg/kg($p < 0.05$)。DA与FA相比差异显著,培养60天,5 H/10 V土层DA较FA各指标含量分别提高5.4%,18.0%,40.7%,70.8%和34.2%;5 H/20 V土层DA较FA增幅不明显;而10 H/10 V土层DA较FA各指标含量分别降低4.0%,12.7%,29.4%,57.5%和30.4%。不同施肥方式对土壤铵、硝态氮的影响处理间无明显差异,各处理均表现为追

肥后较追肥前铵、硝态氮含量在 5 H/10 V、10 H/10 V 2 个土层均呈现规律性递增趋势,在 5 H/20 V 土层

无变化。说明 DA 相对 FA 及 SA 而言造成滴头附近土壤养分含量升高。

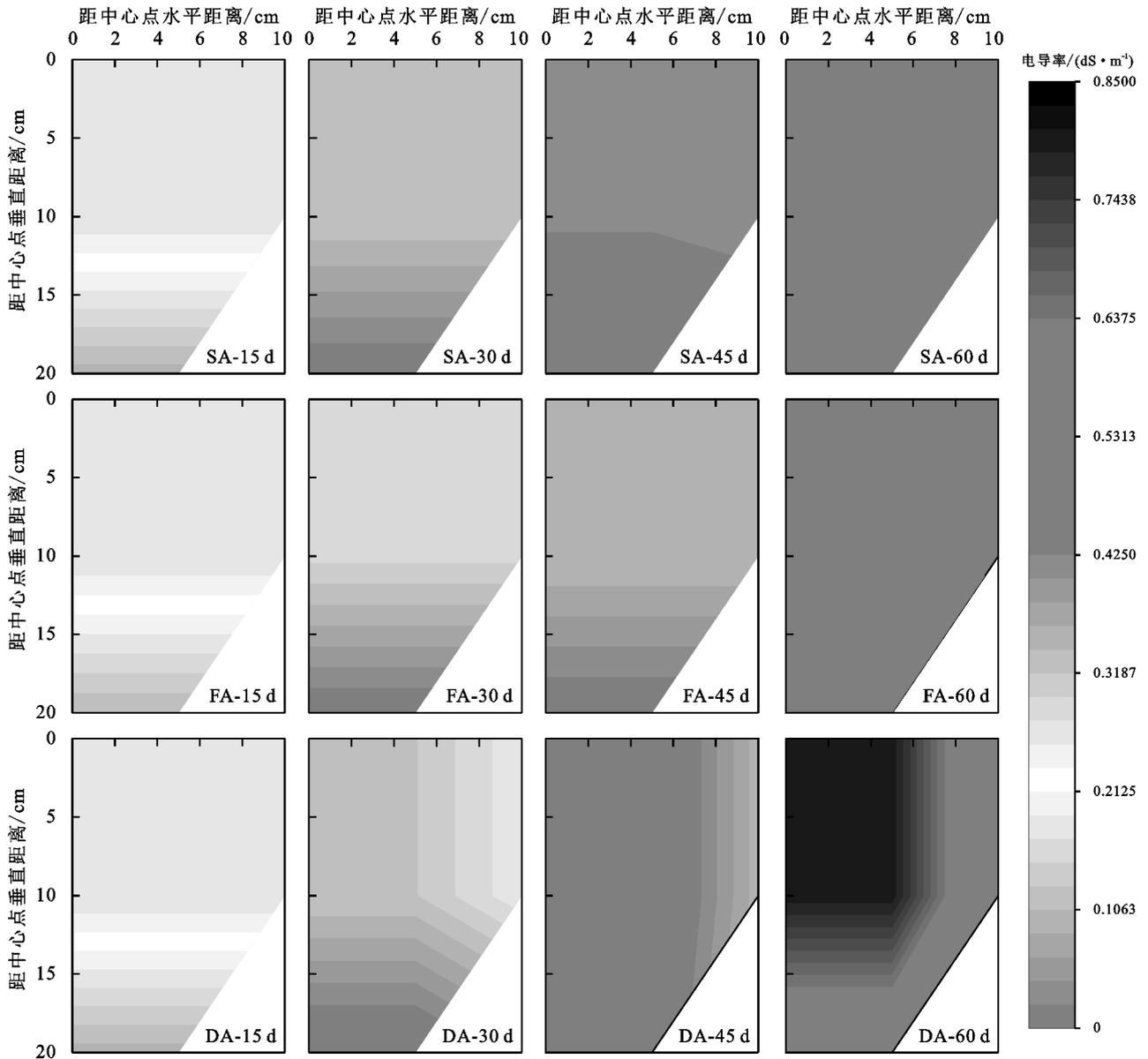


图 2 不同处理土壤电导率变化特征

2.3 不同处理土壤酶活性的变化特征

不同施肥方式对土壤中酶活性有显著影响(图 4~图 6)。与 N 循环相关的脲酶随追肥次数增加,SA、FA、DA 处理除 5 H/20 V 土层,其他土层整体上呈降低趋势,以 DA(5 H,10 V)土层降低趋势最显著($p < 0.05$),由 $362.54 \mu\text{g}/(\text{d} \cdot \text{g})$ 降低至 $176.18 \mu\text{g}/(\text{d} \cdot \text{g})$ (图 4)。FA 与 SA 相比,各土层无显著差异。DA 与 FA 和 SA 相比,培养 60 天,5 H/10 V 土层 DA 较 FA、SA 分别降低 42.5%,38.9%,而 10 H/10 V 土层 DA 较 FA、SA 分别提高 11.0%,17.7%。酸性磷酸酶活性随着追肥次数增加,SA、FA、DA 处理各土层整体上均呈降低趋势,以 DA(5 H,10 V)土层降低趋势最显著($p < 0.05$),由 $27.72 \mu\text{mol}/(\text{d} \cdot \text{g})$ 降低至 $14.56 \mu\text{mol}/(\text{d} \cdot \text{g})$,DA (10 H,10 V)土层降低幅度最小(图 5)。FA 与 SA

相比,各土层间无明显规律性变化。DA 与 FA 和 SA 相比,培养 60 天,5 H/10 V 土层 DA 较 FA、SA 分别降低 31.6%,27.2%;5 H/20 V 土层 DA 处理降幅不明显;而 10 H/10 V 土层 DA 较 FA、SA 分别增加 16.6%,26.7%。

过氧化氢酶活性随追肥次数增加,仅在 DA(5 H,10 V)土层呈递增趋势,从 $25.49 \mu\text{mol}/(\text{d} \cdot \text{g})$ 增长至 $37.57 \mu\text{mol}/(\text{d} \cdot \text{g})$ (图 6),其他处理各土层均无明显规律性变化。DA 与 FA 和 SA 相比,培养至 60 天,5 H/10 V 土层 DA 较 FA、SA 分别提高 45.2%,94.8%。说明 DA 处理在滴头附近抑制脲酶、酸性磷酸酶活性,但可以提高过氧化氢酶活性;FA 与 SA 相比,5 H/10 V 土层,土施降低过氧化氢酶活性,喷施可以提高过氧化氢酶活性。

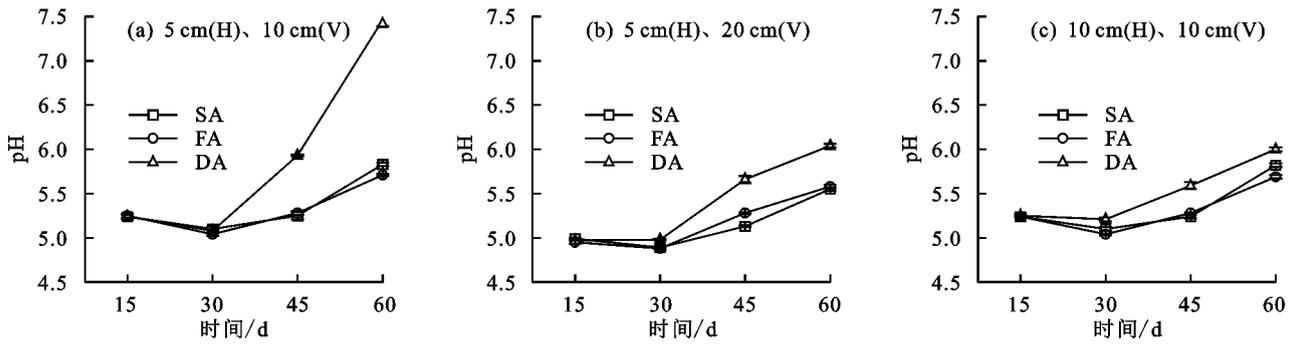
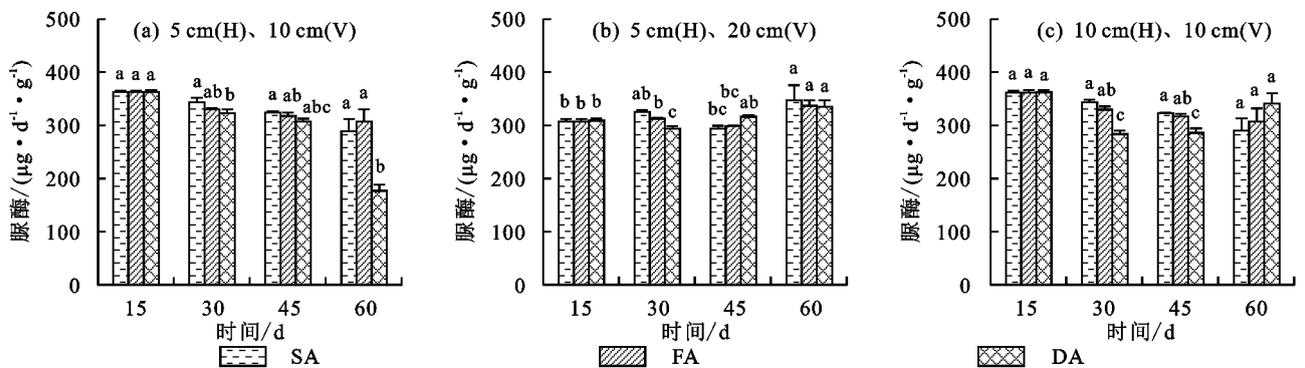


图 3 不同处理土壤 pH 变化特征

表 1 不同处理土壤养分含量

培养时间/d	处理	有机质含量/ (g · kg ⁻¹)	阳离子交换量/ (cmol · kg ⁻¹)	全 N/ (g · kg ⁻¹)	碱解 N/ (mg · kg ⁻¹)	速效 P/ (mg · kg ⁻¹)	速效 K/ (mg · kg ⁻¹)	铵态 N/ (mg · kg ⁻¹)	硝态 N/ (mg · kg ⁻¹)
15	SA1	19.42a	11.72a	1.36b	233.60b	45.92ab	256.10b	170.18b	5.12b
	SA2	19.82a	11.69a	1.41a	252.10a	49.02a	306.33a	195.58a	22.00a
	SA3	19.40a	11.70a	1.37b	232.43b	44.96ab	255.70b	169.82b	5.02b
	FA1	19.42a	11.69a	1.37b	232.78b	43.71b	253.33b	169.95b	4.70b
	FA2	19.8a	11.70a	1.42a	253.75a	49.78ab	307.33a	196.35a	22.36a
	FA3	19.41a	11.68a	1.37b	233.25b	45.03b	256.03b	170.08b	4.90b
	DA1	19.43a	11.68a	1.37b	233.25b	45.94ab	253.57b	170.38b	5.14b
	DA2	19.86a	11.71a	1.41a	253.05a	50.03a	308.33a	196.35a	23.13a
	DA3	19.42a	11.69a	1.36b	232.54b	44.98ab	254.67b	171.32b	5.04b
60	SA1	20.96a	12.63b	2.06b	778.26b	55.61b	483.00b	223.35a	18.56c
	SA2	20.74a	11.86d	1.58e	352.61e	21.96d	339.33cd	217.85b	31.45a
	SA3	21.00a	12.64b	2.07b	774.30b	55.21b	479.67b	222.98a	18.69c
	FA1	21.04a	12.50b	2.06b	681.46c	45.98c	463.33b	222.28a	20.06c
	FA2	21.39a	11.90cd	1.59e	348.53e	19.57d	330.00cd	215.92b	31.75a
	FA3	21.08a	12.47b	2.05b	679.83c	44.69c	462.43b	222.45a	20.04c
	DA1	20.09a	13.17a	2.43a	958.00a	80.37a	622.00a	222.68a	19.70c
	DA2	20.24a	12.08c	1.66d	459.20d	22.51d	366.67c	217.42ba	33.71a
	DA3	20.617a	11.97cd	1.79c	479.82d	18.99d	322.00d	221.72a	24.15b

注:SA1、FA1、DA1 为各处理距中心点水平 5 cm/垂直 0—10 cm 土层;SA2、FA2、DA2 为各处理距中心点水平 5 cm/垂直 10—20 cm 土层;SA3、FA3、DA3 为各处理距中心点水平 10 cm/垂直 0—10 cm 土层;同列数据后不同字母表示不同处理间差异显著($p < 0.05$)。



注:图中不同字母表示不同处理间差异显著($p < 0.05$)。下同。

图 4 不同处理土壤脲酶变化特征

2.4 不同处理对微生物菌群数量的影响

不同施肥方式对土壤微生物菌群数量影响显著(表 2),细菌种群数量随追肥次数增加,SA、FA、DA 处理在 5 H/10 V、10 H/10 V 2 个土层呈递增趋势,以 DA(5 H, 10 V)土层增加最显著,从 72.33×10^5 cfu/g 增长至 262.67×10^5 cfu/g($p < 0.05$),且在这 2

个土层内各处理表现为 $DA > SA > FA$,但在 5 H/20 V 土层 $FA > SA > DA$ 。DA 与 FA 和 SA 相比,培养 60 天,5 H/10 V 土层 DA 较 FA、SA 分别提高 174.6%,56.7%;10 H/10 V 土层 DA 较 FA、SA 分别提高 90.9%,6.2%;而 5 H/20 土层 DA 较 FA、SA 分别降低 53.7%,28.6%。FA 与 SA 相比,在 5 H/10 V、10 H/10 V 2 个

土层,FA 较 SA 分别降低 42.9%,44.4%,在 5 H/20 V 土层提高 54.1%。真菌、放线菌数量随追肥次数增加,SA、FA、DA 处理仅在 5 H/10 V 土层呈递增趋势,均以 DA(5 H,10 V)土层增加最显著,真菌从 0.67×10^4 cfu/g 增长至 1.67×10^4 cfu/g,放线菌从 6.00×10^4 cfu/g 增长至 11.67×10^4 cfu/g ($p < 0.05$),且均表现为 DA>SA>FA。DA 与 FA 相比,培养至 60 天,

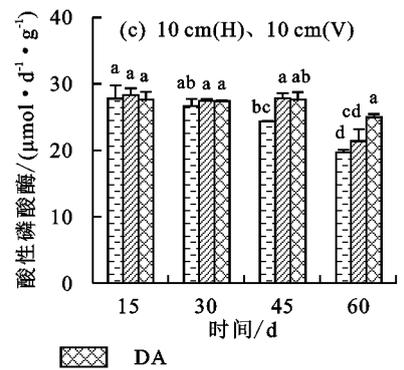
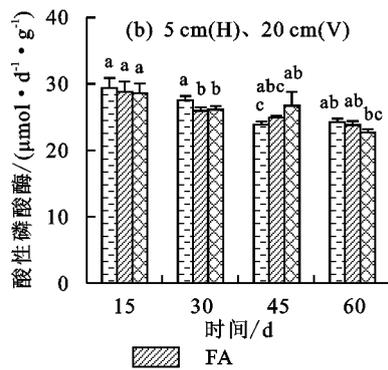
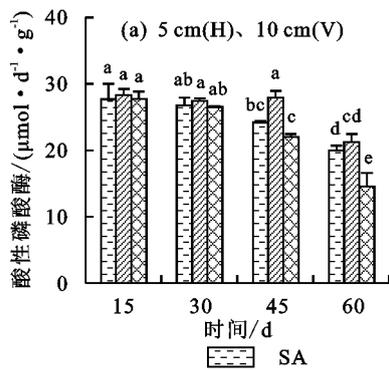


图 5 不同处理土壤酸性磷酸酶变化特征

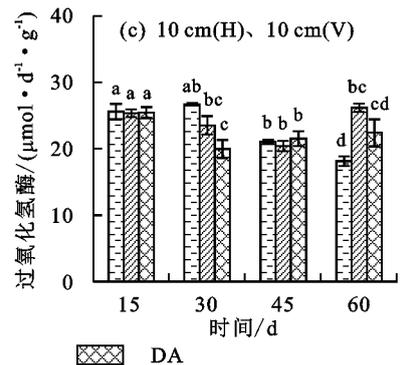
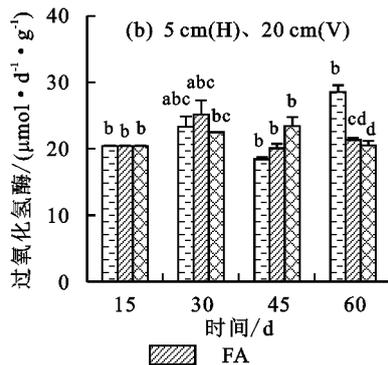
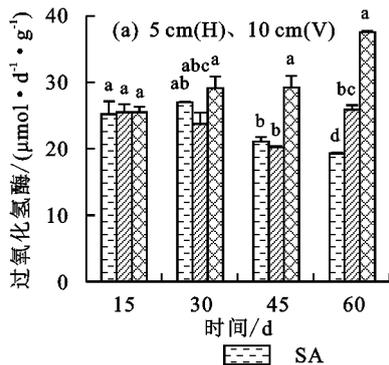


图 6 不同处理土壤过氧化氢酶变化特征

2.5 不同处理对茶苗根系生长的影响

不同施肥方式对茶苗根系形态产生显著影响(图 7)。施肥方式与 2 个施氮水平相比,SA、FA、DA 3 种施肥处理 2 个氮水平浓度对茶苗根系生长影响不明显,总体表现为 FA>SA>DA。与 SA 相比,FA 处理 2 个施氮水平均显著增加茶苗的根鲜重、根总长、根表面积、根尖数、分支数和交叉数;DA 处理 2 个施氮水平均显著降低茶苗的根鲜重、根总长、根体积、平均直径、根尖数和分支数。FA 与 SA 相比,高氮水平条件下,FA 较 SA 的茶苗根鲜重、根总长、根表面积、根尖数、分支数和交叉数分别提高 2.5%,72.2%,12.3%,78.7%,58.2%和 90.4%;低氮水平条件下,FA 较 SA 的茶苗根鲜重、根总长、根表面积、根体积、根尖数、分支数和交叉数分别提高 26.8%,35.1%,90.0%,38.0%,12.1%,18.1%和 36.7%。DA 与 SA 相比,高氮水平条件下,DA 较 SA 的茶苗根鲜重、根总长、根体积、平均直径、根尖数、分支数和交叉数分别降低 57.3%,55.9%,78.5%,32.2%,48.8%,67.2%和 25.1%。低氮水平条件下,DA 较 SA 的茶苗根鲜重、根总长、根表面积、根体

在 5 H/10 V 土层,真菌、放线菌的 DA 较 FA 分别提高 167.0%,289.0%。FA 与 SA 随培养时间增加无规律性变化,微生物总量变化趋势与细菌表现一致。说明不同施肥处理对细菌量影响显著,DA 相对 FA 及 SA 而言造成滴头附近土壤细菌、真菌、放线菌数量显著上升,FA 处理垂直 0—10 cm 土层细菌、真菌、放线菌数量均最低。

积、平均直径、根尖数、分支数和交叉数分别降低 53.6%,54.4%,55.4%,62.0%,6.2%,60.0%,55.2%和 46.7%。说明 FA 处理对茶苗根系生长有促进作用,DA 处理对根系生长有显著的抑制作用。

3 讨论

3.1 不同施肥方式对土壤养分的影响

试验结果表明,3 种不同施肥方式对土壤电导率、pH 和土壤肥力影响非常明显。DA 与 FA 和 SA 相比,在 5 H/10 V 区域内电导率、pH 和土壤养分含量均随追肥积累量及培养时间增加,出现明显增加趋势。有研究^[25]发现,电导率变化与 pH 之间存在相关性,本研究发现电导率的升高与 pH 的升高有关;也有研究^[26]报道,尿素施用在土壤中转化形成硝酸盐,土壤电导率的升高与处理导致的硝酸盐含量升高呈正相关性。本研究发现,尿素通过 3 种施肥方式施入对土壤铵、硝态氮含量无明显影响,DA 处理土壤电导率升高与尿素不同施用方式无直接相关。此外,本研究中土壤阳离子交换量、全 N、碱解 N、速效 K 和速效 P 等测定结果显

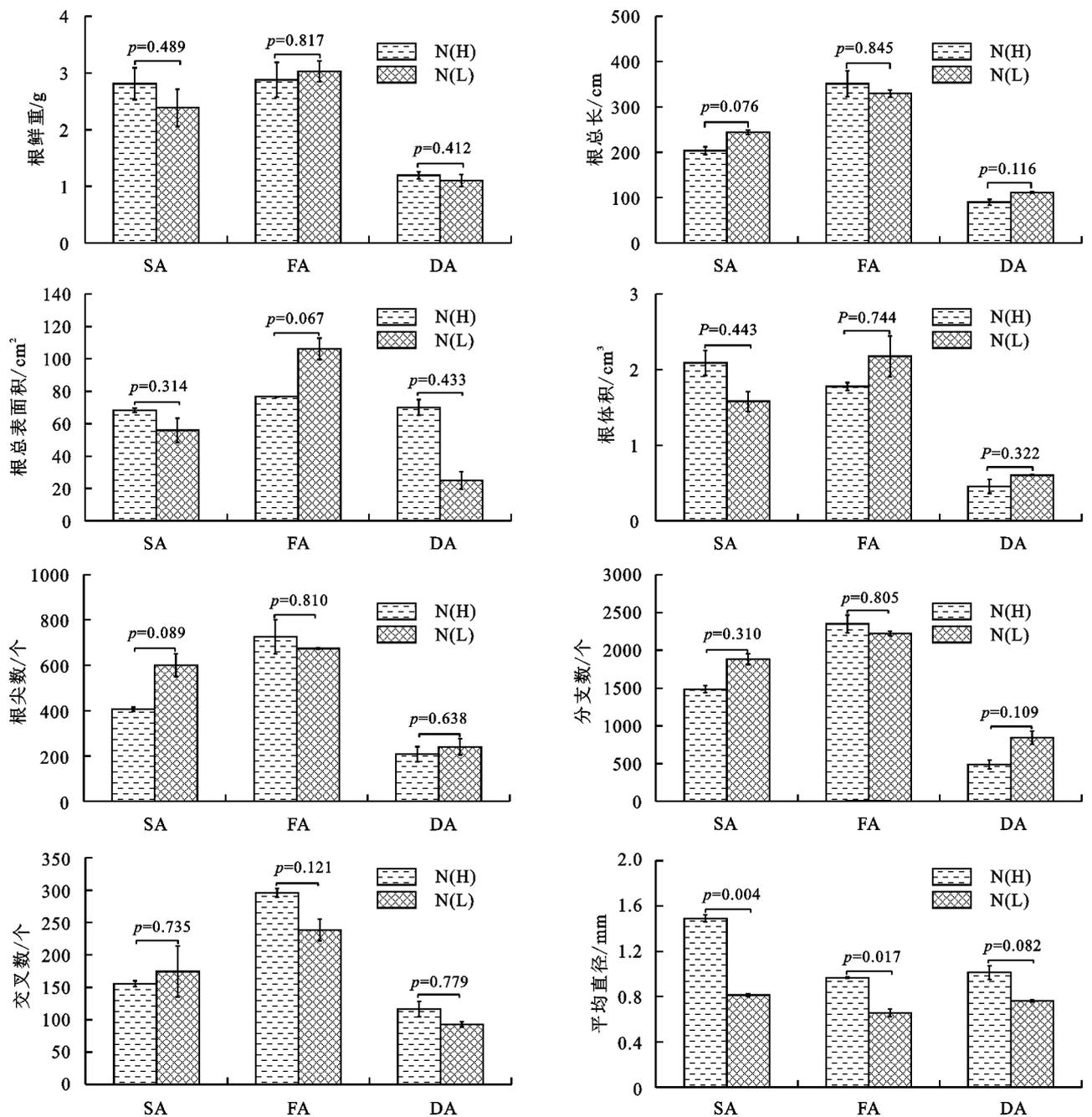
示,随培养时间增加,SA 与 FA 处理的 3 个土层间土壤各养分含量无明显差异,且土壤肥力分布均匀,总体表现为垂直方向 0—10 cm 土层 > 10—20 cm 土层,但在 5 H/10 V 区域内土壤养分含量 DA 处理均显著高于 SA 和 FA 处理,存在土壤肥力的局部聚集现象,这与电导率和 pH 变化趋势基本一致,即随着培养的时间延长和施肥次数的增加逐渐递增,且均以 DA(5 H, 10 V) 土层增幅最显著,本试验中电导率升高与 pH 变化及养分在滴头附近聚集有直接关系,这与曹舰艇

等^[27] 研究结果表现一致。红壤属于中黏土,土壤容重达 1.31 g/cm^3 ,水分渗透慢,持水性好,田间持水量高达 29.77%,易导致水肥不易扩散,因而造成养分的聚集现象。DA 处理养分在滴头附近的聚集造成土壤肥力上升,从而引起养分指标的微域聚集,此现象表示不同施肥方式导致的电导率以及养分含量的升高可能与土壤属性和施肥方式导致的水肥运移和分布不均匀有关,有关施肥方式与不同土壤属性的关系及其养分分布规律亟待开展系统研究。

表 2 不同处理土壤微生物区系差异

培养时间/d	处理	细菌/ ($\times 10^5 \text{ cfu} \cdot \text{g}^{-1}$)	真菌/ ($\times 10^4 \text{ cfu} \cdot \text{g}^{-1}$)	放线菌/ ($\times 10^4 \text{ cfu} \cdot \text{g}^{-1}$)	微生物总数/ ($\times 10^5 \text{ cfu} \cdot \text{g}^{-1}$)
15	SA1	73.00b	1.00a	6.67a	80.67b
	SA2	114.00a	0a	3.33b	117.33a
	SA3	71.67b	0.67a	6.33a	78.67b
	FA1	71.00b	1.00a	6.00a	78.00b
	FA2	112.67a	0a	3.00b	115.67a
	FA3	73.67b	1.00a	6.33a	81.00b
	DA1	72.33b	0.67a	6.00a	79.00b
	DA2	113.00a	0a	3.33b	116.33a
	DA3	72.33b	1.00a	6.67a	80.00b
30	SA1	111.67b	0.67a	2.67abc	115.01b
	SA2	39.00f	0.33a	4.67a	44.00e
	SA3	112.00b	1.00a	3.00abc	116.00b
	FA1	69.67e	0a	3.33abc	73.00d
	FA2	125.67a	0.33a	4.33ab	130.33a
	FA3	67.67e	0a	3.00abc	70.67d
	DA1	83.33cd	1.00a	2.67abc	87.00c
	DA2	74.67de	1.00a	2.00bc	77.67cd
	DA3	85.00c	0a	1.67c	86.67c
45	SA1	139.33a	0b	5.67abc	145.00a
	SA2	75.00b	0.33b	1.33c	76.66b
	SA3	142.67a	0.33b	5.33abc	148.33a
	FA1	52.00bc	0.33b	5.00bc	57.33bc
	FA2	29.00c	0.33b	4.67ab	34.00c
	FA3	52.33bc	0b	4.67bc	57.00bc
	DA1	54.67bc	1.33b	5.33abc	61.33bc
	DA2	56.00bc	0.33b	9.67a	66.00bc
	DA3	36.33c	0.33b	6.00ab	42.66c
60	SA1	167.67b	1.00a	11.33a	180.00b
	SA2	44.33e	0a	4.33b	48.66e
	SA3	171.33b	1.00a	11.00a	183.33b
	FA1	95.67c	0a	3.00b	98.67c
	FA2	68.33d	0.33a	10.00a	78.66d
	FA3	95.33c	0a	3.33b	98.66c
	DA1	262.67a	1.67a	11.67a	276.01a
	DA2	31.67e	0a	9.00a	40.67e
	DA3	182.00b	0a	3.00b	185.00b

注:SA1、FA1、DA1 为各处理距中心点水平 5 cm/垂直 0—10 cm 土层;SA2、FA2、DA2 为各处理距中心点水平 5 cm/垂直 10—20 cm 土层;SA3、FA3、DA3 为各处理距中心点水平 10 cm/垂直 0—10 cm 土层。



注: N(H)高氮水平; N(L)为低氮水平。

图 7 不同处理茶苗根系生长情况

土壤酶可催化土壤中生物及化学反应的进行,是土壤生态系统的重要组成部分^[28],有研究^[29]表明,土壤酶很大程度上来源于土壤微生物,故土壤酶活性高低在一定程度上能反映土壤生物活性、生化反应强度及微生物参与土壤物质循环、转化的能力^[30]。其中与 N 循环相关的脲酶,在本研究中主要是用来水解尿素,使其分解成铵,随后铵被硝化微生物氧化为硝态氮^[26];与 P 循环相关的酸性磷酸酶主要用于将有机磷矿化为无机磷后被植物利用^[31];与 O 循环有关的过氧化氢酶活性与微生物活动息息相关,能够反映土壤呼吸强度及氧化过程强弱^[32]。本研究结果中过氧化氢酶及微生物菌群数量变化趋势与电导率及

养分含量变化相一致,均以 DA(5 H, 10 V)土层增幅最大;脲酶、酸性磷酸酶活性在培养至 60 天后,DA(5 H, 10 V)土层出现突然降低的趋势,与电导率和养分含量呈相反的变化。有研究^[33-35]报道,土壤酶活性与有机质、全 N、速效 N、速效 P 含量等指标呈现出显著或极显著正相关性。本研究的结果显示,DA 较 FA 和 SA 产生明显的滴头附近 5 H/10 V 区域养分聚集,此微域土壤微生物的数量和过氧化氢酶活性均明显增加,但脲酶和酸性磷酸酶活性却明显降低,这与上述报道不完全相同。这种不同的酶活性变化趋势可能与 DA 处理追施 N、P、K 肥造成氮、磷在微域空间 5 H/10 V 区域的聚集满足土壤微生物的氮磷需求有

关,这种氮磷集聚的生物学反馈调节机制导致土壤微域脲酶和酸性磷酸酶活性的降低。DA 与 FA 不同施肥方式对微域土壤养分聚集以及对土壤生物学过程影响与作物生长的相关性,需进一步深入研究。

3.2 不同施肥方式对茶苗根系生长的影响

根系作为植物生长发育过程中一个重要器官,对植物有着其他器官不可取代的重要作用,一方面植物通过根系来运输水分和吸收养分;另一方面,根系又能够保证植物地上部分的正常形态^[36]。本研究盆栽试验结果表明,茶苗供 N 水平对根系生长影响程度无明显差异,而不同施肥方式对茶苗根系生长及形态建成影响显著。与 SA 和 DA 相比,FA 对茶苗根鲜重、根总长、根表面积、根尖数、分支数和交叉数都表现出促进作用;DA 处理对茶苗根鲜重、根总长、根体积、根尖数和交叉数都表现出明显的抑制作用,茶树是喜酸性的植物,茶园土壤 pH 一般在 4.0~5.0 范围内^[37],而本研究中 DA(5 H, 10 V)土层即茶苗根系附近的 pH 高达 7.46,不利于茶树的生长;同时有研究^[29]报道,高浓度的可溶性盐抑制植物根系生长和形态建成,严重时导致植物受到损伤或造成植物根系的死亡,可知茶苗根系各指标的抑制效应与 DA 处理微域范围内电导率和 pH 的增加有关,对茶苗根系生长而言,试验条件下 FA 处理更适合茶苗根系形态建成和发育。

相对 SA 来说,DA 可以提高根系附近微域土壤中养分含量,提高养分供应强度,促进作物养分吸收,提高水肥利用效率,同时还具备省时、省工、省力等优势,但 DA 处理长期不合理的施肥导致养分集聚和土壤局域次生盐渍化,对作物生长产生明显的抑制效应。FA 虽不能明显提高根际局域土壤养分浓度,但其可以通过叶面养分吸收调控根系生长发育,有利于健康根系形态构建,从而间接促进土壤养分的吸收利用,提高水肥利用效率。另外,FA 还具备调节茶树生长田间小气候的作用,有利于茶叶生长和品质提升,但 FA 设施投入较高,能耗较大,受风力影响明显。本试验条件下,DA 对茶苗根系的抑制效应需要结合灌溉施肥制度进行更深入的验证和研究。

总之,DA 和 FA 都是节水节肥和提高养分吸收利用效率的高效施肥技术,实际生产应用中需要结合立地条件、作物生长发育特点、水肥需求规律和其他栽培技术的要求,合理选择施肥方式,尤其是需要设计与之相匹配的灌溉施肥制度,才能发挥各自优势,提高水肥一体化技术的效果,有关模拟试验的结果需要进一步在田间开展试验验证。

4 结论

(1)不同施肥方式对土壤理化性质、酶活性、微生物量及茶苗根系生长都有显著影响。DA 与 SA 和 FA 相比,在 5 H/10 V 区域内显著提高土壤电导率、pH、阳离子交换量和土壤养分含量,形成微域养分集聚的高值区,高值区微生物种群数量增加,过氧化氢酶活性高,但土壤脲酶和酸性磷酸酶活性低;FA 与 SA 相比,处理各土层空间均无显著差异。

(2)不同施肥方式对茶苗根系生长和形态建成影响明显。FA 较 DA 和 SA 明显促进茶苗根系生长和根总长、根表面积、根体积、平均直径、根尖数、分支数和交叉数;而滴施条件下根系生长受到明显抑制,根系形态学参数均低于 SA 和 FA。

(3)DA 可提高微域土壤养分含量,提高养分供应强度,对茶苗生长而言需要优化滴灌施肥制度,避免滴灌养分集聚对茶苗根系生长的抑制效应。试验条件下,FA 更有利于茶苗根系生长发育和形态建成。

参考文献:

- [1] Kafkafi U, Tarchitzky J. A tool for efficient fertilizer and water management [M]. Paris: International Fertilizer Industry Association International Potash Institute, 2011.
- [2] 李帅,卫琦,徐俊增,等.水肥一体化条件下控灌稻田土壤氮素及水稻生长特性研究[J].灌溉排水学报,2021,40(10):79-86.
- [3] Drechsel P, Heffer P, Magen H, et al. Managing water and fertilizer for sustainable agricultural intensification [M/OL]. 2015. DOI: 10.22004/ag.econ.208412.
- [4] 杨安,李燕青,李壮,等.氮磷钾肥不同滴灌撒施组合对富士草¹⁵N 吸收分配及利用率的影响[J].果树学报,2022,39(4):564-573.
- [5] Wang H, Wu L, Cheng M, et al. Coupling effects of water and fertilizer on yield, water and fertilizer use efficiency of drip-fertigated cotton in northern Xinjiang, China[J].Field Crops Research,2018,219:169-179.
- [6] 黄丽,范兴科.磷肥和钾肥不同配施方式对其养分在土壤中迁移的影响[J].水土保持学报,2018,32(2):184-190.
- [7] 牟洪臣,虎胆·吐马尔白,苏里坦,等.干旱地区棉田膜下滴灌盐分运移规律[J].农业工程学报,2011,27(7):18-22.
- [8] 李树亮,梁斌,丁兆堂,等.微喷灌施用专用水溶肥在幼龄茶树上的试验研究[J].中国农学通报,2014,30(25):252-256.
- [9] 赵伟霞,张萌,李久生,等.尿素浓度对喷灌夏玉米生长和产量的影响[J].农业工程学报,2020,36(4):98-105.
- [10] 贾国燊,骆洪义,褚屿,等.不同灌溉方式下水肥一体化对玉米养分吸收规律的影响[J].节水灌溉,2022(2):40-47.
- [11] 朱忠锐,范永申,段福义,等.喷灌条件下河西走廊春小

- 麦土壤硝态氮动态分布及产量关系[J].节水灌溉,2018(4):26-32.
- [12] 陈康,邓兰生,涂攀峰,等.不同水肥调控措施对马铃薯种植土壤养分运移的影响[J].广东农业科学,2011,38(20):51-54.
- [13] 张川,张亨年,闫浩芳,等.微喷灌结合滴灌对温室高温环境和作物生长生理特性的影响[J].农业工程学报,2018,34(20):83-89.
- [14] 孙玮皓,申孝军, Kader M H A,等.滴灌施肥时序对不同质地土壤水氮分布的影响[J].灌溉排水学报,2022,41(3):47-53.
- [15] 郭丙玉,高慧,唐诚,等.水肥互作对滴灌玉米氮素吸收、水氮利用效率及产量的影响[J].应用生态学报,2015,26(12):3679-3686.
- [16] 苏木德.不同水肥调控措施对马铃薯种植土壤养分运移的影响[J].福建农业,2015(2):137.
- [17] 王海廷,赵营,罗健航,等.喷灌施肥对露地菜心产量及土壤氮素淋失的影响[J].中国瓜菜,2021,34(8):68-73.
- [18] 涂琴,易萌,李红,等.施肥浓度对摇臂式喷头喷灌施肥均匀性的影响[J].排灌机械工程学报,2020,38(11):1180-1188.
- [19] 满建国,王东,于振文,等.不同带长微喷带灌溉对土壤水分分布与冬小麦耗水特性及产量的影响[J].应用生态学报,2013,24(8):2186-2196.
- [20] 孙富斌,尹娟,魏小东,等.滴灌施肥条件下土壤硝态氮空间分布规律室内模拟研究[J].四川农业大学学报,2021,39(6):807-813.
- [21] 王冲,秦亚旭,张珂,等.渭北旱塬矮化苹果园滴灌下土壤剖面水分和养分时空分布特征[J].水土保持学报,2020,34(5):343-348.
- [22] 朱忠锐,范永申,段福义,等.喷灌灌水与施肥对春小麦水分动态及产量的影响[J].排灌机械工程学报,2019,37(2):174-178.
- [23] 臧小平,王甲水,周兆禧,等.微喷灌施肥对芒果产量、品质和养分吸收利用的影响[J].灌溉排水学报,2016,35(增刊2):1-4.
- [24] 鲁如坤.土壤农业化学分析方法[M].北京:中国农业科技出版社,1999.
- [25] 李刚,卢楠.蓄水条件下土壤 pH 与电导率的空间分布与关系的研究[J].节水灌溉,2017(12):94-96.
- [26] 孙治强,张楠,赵卫星,等.氮肥施用量对生菜产量、硝酸盐积累及土壤 EC 值、pH 值的影响[J].江西农业学报,2007,19(4):44-45.
- [27] 曹舰艇,杨红,彭艳,等.藏东南不同种植年限蔬菜大棚土壤 pH 及养分的变化特征[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2019,47(8):117-126.
- [28] 曲成闯,陈效民,韩召强,等.施用生物有机肥对黄瓜不同生育期土壤肥力特征及酶活性的影响[J].水土保持学报,2017,31(6):279-284.
- [29] 王理德,姚拓,何芳兰,等.石羊河下游退耕区次生草地自然恢复过程及土壤酶活性的变化[J].草业学报,2014,23(4):253-261.
- [30] 曹群,丁文娟,赵兰凤,等.生物有机肥对冬瓜枯萎病及土壤微生物和酶活性的影响[J].华南农业大学学报,2015,36(2):36-42.
- [31] Rrdersma S, Grierson P F. Phosphorus mobilization in agroforestry: Organic anions, phosphatase activity and phosphorus fractions in the rhizosphere[J]. Plant and Soil, 2004, 259(1):209-219.
- [32] 樊军,郝明德,黄土高原旱地轮作与施肥长期定位试验研究 I. 长期轮作与施肥对土壤酶活性的影响[J].植物营养与肥料学报,2003,9(1):9-13.
- [33] 薛冬,姚槐应,何振立,等.红壤酶活性与肥力的关系[J].应用生态学报,2005,16(8):1455-1458.
- [34] 张孝存,郑粉莉,安娟,等.黑土区坡耕地土壤酶活性与土壤养分关系研究[J].干旱区资源与环境,2013,27(11):106-110.
- [35] 焦晓光,魏丹,隋跃宇.长期施肥对黑土和暗棕壤土壤酶活性及土壤养分的影响[J].土壤通报,2011,42(3):698-703.
- [36] Inukai Y, Ashikari M, Kitano H, et al. Function of the root system and molecular mechanism of crown root formation in rice[J]. Plant and Cell Physiology, 2004, 45:S17.
- [37] 林诚,陈子聪,吴一群,等.林地转变为茶园的土壤 pH 及养分变化特征[J].茶叶科学,2020,40(2):186-193.