赵俊波,胡兵辉.水肥调控对茶树土壤酶及土壤养分的影响[J].山西农业大学学报(自然科学版),2024,44(2):130-140.
Zhao J B, Hu B H.Effects of water and fertilizer regulation on soil enzymes and soil nutrients of tea plants[J].Journal of Shanxi Agricultural University(Natural Science Edition), 2024,44(2):130-140.
doi: 10.13842/j.cnki.issn1671-8151.202309032

水肥调控对茶树土壤酶及土壤养分的影响

赵俊波,胡兵辉*

(西南林业大学 生态与环境学院,云南 昆明 650224)

摘　要:[目的]探究茶树土壤酶活性、土壤养分和茶树地上部分对水肥调控的响应,揭示水肥调控下土壤酶活性和土壤养分的变化规律,可为基肥施用和灌水互作下对土壤理化性质和幼龄茶树生长影响提供理论依据。[方法]采用盆栽实验方法,设置了施肥量和灌水量2个因素。基肥施肥量设C0(0 kg·盆$^{-1}$)、C1(0.05 kg·盆$^{-1}$)、C2(0.1 kg·盆$^{-1}$)、C3(0.15 kg·盆$^{-1}$)4个梯度。灌水量设W1(90 mL·盆$^{-1}$)、W2(140 mL·盆$^{-1}$)、W3(190 mL·盆$^{-1}$)、W4(240 mL·盆$^{-1}$)、W5(290 mL·盆$^{-1}$)5个梯度。[结果](1)在C2W3处理下土壤蔗糖酶活性最高,在C3W4处理下的过氧化氢酶活性最高;冬季时C2W4处理下土壤养分含量最大;春季时速效钾和有效磷在C2基肥施肥下含量最高,C3基肥施肥下的碱解氮和有机质含量最大;(2)在C3处理下速效钾、碱解氮对冬春季蔗糖酶和过氧化氢酶活性影响最大;其它养分在通过速效钾影响后,多个因素共同影响不同时期的蔗糖酶和过氧化氢酶活性;(3)结合茶树地上生长指标可知,茶树在C2基肥下株高、地径增长量最大,在W4灌水时叶分枝数增长量最大。[结论]随着越冬期的结束,钾元素不需要追肥补充,而茶树因生长需要须进行氮、磷元素的追肥补充;在240 mL·株$^{-1}$的灌水处理下茶树地上生长指标达到最大。

关键词:基肥施肥量; 灌水量; 土壤酶; 土壤养分; 追肥补充

中图分类号:S573.9　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1671-8151(2024)02-0130-11

大叶茶[*Camellia sinensis*(L.)Kuntzevar. assamica(Hook.)Steenis,大叶种、普洱茶]是山茶科(*Theaceae*)山茶属(*CamelliaL.*)植物[1],作为叶用栽培作物,为满足茶树秋、冬季根系活动和次年春茶物质基础提供,必须对茶树施加基肥和定时需水补给。在茶园管理过程中,为获得高产高质的茶叶,普遍采取的农艺措施都是科学合理的水肥调控,以此最大限度发挥施肥效应、改良土壤、提高土壤肥力,从而满足茶树生育需要。然而茶农长期的经验性施肥,从茶园施加基肥开始就出现水肥过量、水肥利用效率低等问题,从而降低了茶园的生产收益。基肥施加量不当不仅无法满足幼龄茶苗的生长,过量施肥还会造成土壤养分不平衡、土壤酸化土壤面源污染[2-3],而高灌水量会增加养分淋失,降低土壤养分含量[4]。合理的基肥施用和灌水可通过提高土壤酶活性促进养分释放[5],从而提高土壤肥力,对茶园提质增产具有重要意义。

基肥连续施用3年增加了土壤有机质和氮、磷、钾和镁等营养元素含量[5],连续5年施配有机肥和磷肥作为一次性基肥改良了土壤酸度和升高了有机质含量[6]。李昌娟等[7]研究认为与不施加基肥相比,生物炭基肥显著提升了茶园土壤速效养分含量;李俊强等[8]、吴志丹等[9]认为与不施肥相比,施肥提高了茶园土壤的基本肥力状况;土壤水分和养分含量是植株生长的基础,在栽培管理过程中合理的水肥管理措施能显著促进植株生长[10],而增加有机肥不仅可以增强土壤中C、N、P、K含量以及土壤酶的活性,还能改良土壤肥力和理化性质[11];在水分亏缺方面,有研究认为不同水分亏缺处理下,土壤收获后速效氮、速效磷、速效钾含量差异显著,轻中度水分亏缺有利于土壤速效磷和速效钾的吸收利用[12];在研究不同土壤肥力梯度下酶活性对水分变化的响应中发现,土壤肥力缓冲了水分对酶活性的负面影响,肥力较高的

收稿日期:2023-09-25　　**修回日期**:2023-12-23
作者简介:赵俊波(ORCID:0009-0004-2766-172X),硕士,研究方向:农业生态,E-mail:928905273@qq.com
*通信作者:胡兵辉,副教授,博士,研究方向:农业生态系统调控与农业资源优化配置。E-mail:hubinghui1980@126.com

土壤对水分变化的响应较低肥力的土壤稳定[13]。

上述研究可以看出,已有的研究主要集中在针对不同施肥模式和施肥量对土壤酶和土壤肥力的影响的研究,由于幼龄茶树水肥调控与成龄茶树在水肥管理上存在一定差异,不能完全照搬成年茶树栽培管理经验进行幼龄茶树的水肥管理,且针对幼龄茶树基肥施用量和灌水对土壤酶和速效养分及有机质含量影响的研究还较少。本研究通过采用设定灌水量和施肥量梯度的交互处理方式,测定幼龄茶树土壤的蔗糖酶、过氧化氢酶、速效钾、碱解氮、有效磷、有机质化学性质和地上部分指标的变化,旨在为明确幼龄茶树的最佳基肥施用量和灌水量提供科学依据。

1　材料与方法

1.1　试验地及试验材料

试验于2021年8月-2022年3月间在西南林业大学温室大棚内进行。当地日照时间长,霜期较短,年平均气温15 ℃。供试品种为一年生云南临沧冰岛大叶种茶树苗,平均株高30.6 cm,平均地径0.32 cm,平均叶片数7片。供试基肥为滇乐思福牌有机肥(有机质≥45%,养分N+P_2O_5+K_2O≥5%)。供试土壤为红壤土,基本肥力状况为有机质17.43 g·kg^{-1}、碱解氮19.72 mg·kg^{-1}、速效磷17.85 mg·kg^{-1}、速效钾99.23 mg·kg^{-1}、pH值5.56;盆栽花盆统一规格(上口径25 cm、底径18 cm、高17 cm)。

1.2　试验设计

2021年8月25日在西南林业大学温室大棚内将有机肥与供试土壤搅拌混合均匀,把长势较为一致的茶树苗移栽至花盆,每盆移栽1株茶树苗,保持所有盆重4.0 kg。在移栽后进行统一水量的充分灌水,后期按照每7 d进行1次灌水,待缓苗期过后选取长势较为一致的茶树植株作为供试苗,1个月后进行数据采集。试验为有机肥和灌水量2因素交互盆栽试验,共20个处理,进行3次生物学重复,总共设置60个试验样本。按照幼龄茶树每年基肥施入量为有机肥6.67 kg·hm^{-1},有机肥设置C0(0 kg·hm^{-1},即0 kg·盆$^{-1}$)、C1(3.3 kg·hm^{-1},即0.05 kg·盆$^{-1}$)、C2(6.67 kg·hm^{-1},即0.1 kg·盆$^{-1}$)、C3(10 kg·hm^{-1},即0.15 kg·盆$^{-1}$)4个处理;按照茶树年总需水量200 mm,即9.8 kg·盆$^{-1}$,灌水处理设置5个梯度:W1(0.09 kg·盆$^{-1}$)、W2(0.14 kg·盆$^{-1}$)、W3(0.19 kg·盆$^{-1}$)、W4(0.24 kg·盆$^{-1}$)、W5(0.29 kg·盆$^{-1}$)。

1.3　测定方法及项目

(1)采样方法:土样采集时间严格与采茶周期保持一致,在秋茶、冬茶、春茶期间完成数据采集,每次取样后将备用土等质量回填整平。第1次供试土壤取样时间为2021年9月25日(记为0 d),2021年12月13日(记为80 d)进行第2次供试土壤取样,2022年3月3日(记为160 d)进行第3次供试土壤取样。

(2)2021年9月25日,记录叶片数和分枝数,利用游标卡尺测定距离盆栽土层10 cm处的地径参数,并用皮尺测量土层表面至茶树苗芽顶的直线距离。每次取土样时重复测定上述指标。

(3)采用3,5-二硝基水杨酸比色法测定土壤蔗糖酶的活性,采用高锰酸钾滴定法测定土壤过氧化氢酶活性。

(4)火焰光度法测定速效钾含量,碱解扩散法测定碱解氮含量,钼酸铵-钼锑抗分光光度法测定土壤中的有效磷含量,重铬酸钾容量法测定有机质含量。

1.4　统计分析

本试验用Excel 2019处理原始数据,制作图表,采用Spss 22.0软件进行各指标间相关性分析和通径分析,和不同处理间的差异显著性分析,不同施肥灌水处理之间采用双因素方差分析。

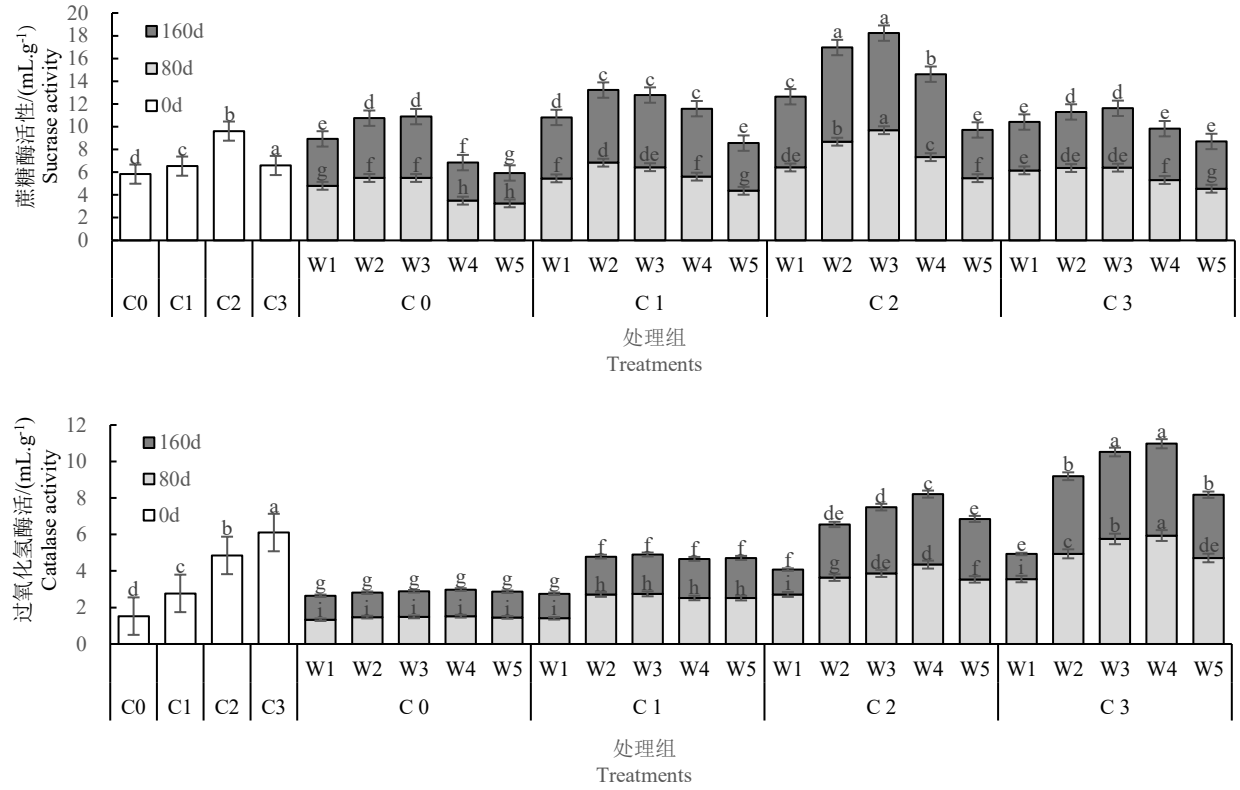
2　结果与分析

2.1　水肥调控对茶树土壤酶活性的影响

如图1所示,0 d时相较于无基肥组,蔗糖酶活性在C2最高,增幅达12%,过氧化氢酶活性在C3最高,增幅达82%;冬、春季时的C2W3处理下蔗糖酶活性均最高,在相同灌水下过氧化氢酶活性随着施肥量的增加而增加,并在C3W4水肥处理下过氧化氢酶活性最高;在同一基肥量下,土壤酶活性呈现出单峰曲线趋势,即随着灌水量的增加先升高到峰值后又下降。

2.2　水肥调控对茶树土壤养分的影响

由表1、表2可见,相较于无基肥组,0 d时其余施肥组均显著提高土壤速效养分及有机质的含量,且在C3处理下达到最大值;80 d时C2W4处理下速效钾、碱解氮、有效磷、有机质含量最高,分别



C0为0 kg·盆$^{-1}$,C1为0.05 kg·盆$^{-1}$,C2为0.1 kg·盆$^{-1}$,C3为0.15 kg·盆$^{-1}$;W1为90 mL·盆$^{-1}$,W2为140 mL·盆$^{-1}$,W3为190 mL·盆$^{-1}$,W4为240 mL·盆$^{-1}$,W5为290 mL·盆$^{-1}$

C0 is 0 kg•pot^{-1}, C1 is 0.05 kg•pot^{-1}, C2 is 0.1 kg•pot^{-1}, and C3 is 0.15 kg•pot^{-1}; W1 is 90 mL•pot^{-1}, W2 is 140 mL•pot^{-1}, W3 is 190 mL•pot^{-1}, W4 is 240 mL•pot^{-1}, and W5 is 290 mL•pot^{-1}

图1 水肥调控对土壤酶活性的影响

Fig. 1 Effect of water and fertilizer regulation on soil enzyme activity

为122.31、33.95、43.35、19.59 mg·kg^{-1};160 d时,C2W4处理下速效钾含量最大为115.24 mg·kg^{-1},C3W2处理下碱解氮含量最大为29.5 mg·kg^{-1},C3W3处理下有效磷含量最大为34.43 mg·kg^{-1},有机质含量最大为22.56 mg·kg^{-1}。双因素方差分析表明,水肥调控下对土壤养分含量有极显著影响,且水肥交互作用下对土壤养分影响显著;施肥量与灌水量相比,施肥量对土壤养分的影响更显著(表3)。

2.3 茶树土壤酶与土壤养分的关系分析

前人研究表明,土壤酶是衡量土壤肥力的一项重要指标,土壤酶活性与土壤养分密切相关,反映土壤养分转化的强弱,表征土壤肥力[14]。而土壤酶易受土壤养分的影响,对土壤中变化非常敏感,常作为反映土壤养分高低的指标[15]。通过探讨茶树土壤酶活性与土壤养分水平的关系,将其作为土壤肥力指标具有可行性。但简单相关性分析存在多变量中重叠信息的交叉影响的结果,因此采用偏相关系数能更准确、真实地反映变量之间的相关关系。

2.3.1 水肥调控对茶树土壤酶与土壤养分间的相关性

由表4、表5可见,80 d时土壤蔗糖酶与土壤速效钾、碱解氮、有效磷及有机质之间均呈显著正相关($P<0.01$);过氧化氢酶与碱解氮、有机质呈极显著正相关($P<0.01$),与有效磷显著正相关($P<0.05$),与速效钾相关不显著;160 d时土壤蔗糖酶与土壤速效钾、有效磷呈极显著正相关($P<0.01$),与碱解氮显著正相关($P<0.05$),与有机质相关不显著;过氧化氢酶与速效钾、碱解氮、有效磷、有机质均呈显著正相关($P<0.01$);2个不同时期蔗糖酶与过氧化氢酶均相关不显著,速效养分之间均存在显著相关关系。

表1　0 d时不同基质施肥后土壤养分差异

Table 1　The variation of soil nutrients after fertilizing with different substrates at 0 d　　单位:mg·kg^{-1}

处理 Treatment	速效钾 Available phosphorus	碱解氮 Available nitrogen	有效磷 Available phosphorus	有机质 Organic matter
C0	82.50±0.618d	18.63±0.447d	14.63±0.411d	16.48±0.602c
C1	108.34±0.693c	29.93±0.137c	43.72±0.546c	22.77±2.076b
C2	180.78±3.020b	38.99±0.028b	55.76±0.097b	23.18±1.734b
C3	207.38±0.685a	43.73±2.490a	70.98±5.248a	27.12±1.891a

注:同一列不同小写字母表示差异显著($P<0.05$)。处理与图1相同

Note: Different lowercase letters in the same column indicate significant differences ($P<0.05$). Treatments are the same as in Figure 1

2.3.2　通径分析

通径分析结果显示(表6、表7),80 d时土壤速效钾和碱解氮对土壤蔗糖酶活性的直接通径系数较大,分别是0.565、0.336,且都有直接正效应,通过有效磷和有机质对蔗糖酶活性的间接通径系数较大,可见土壤有效磷和有机质对蔗糖酶的影响主要体现在间接影响上;土壤速效钾、碱解氮和有机质对过氧化氢酶活性有较强的负效应和正效应,说明土壤速效钾、碱解氮和有机质的直接作用是影响过氧化氢酶活性变化的主要方式。160 d时土壤各因子对蔗糖酶活性影响(按绝对值大小)的大小顺序为:速效钾(1.060)>碱解氮(−0.551)>有效磷(0.367)>有机质(−0.270);土壤各因子对过氧化氢酶活性影响(按绝对值大小)的大小顺序为:碱解氮(1.457)>速效钾(−0.642)>有效磷(−0.1)>有机质(−0.017)。

2.4　水肥调控对茶树生长的影响

由表8可知,相较于0 d,160 d时的茶树苗在株高、地径增长量,着叶数和茶树分枝增加量方面均有提高。株高增长量在C2W4处理下茶树增长量、地径增长量最高,C3W4处理下着叶数增加量最大。通过双因方差分析可知,株高增长量和地径增长量在单一施肥、单一增水和水肥共同作用下均呈显著增加,着叶数仅在单一施肥处理下呈显著增加,分枝增加数则在单一增水处理下呈显著增加。

3　讨论

在实际水肥管理中,水肥施用量并不与土壤肥力呈现线性增加,长期使用高水分施肥以及不适当的水和养分管理会导致水和养分利用效率低[16]。冬季大棚内的茶树苗,地上部分虽逐渐停止生长但根系生长异常活跃,土壤中仍残留着基肥的反应底物和有效基质,因施肥增强的土壤基础呼吸和已形成的微生物群落结构,以及在酶促作用的产物和微生物活动的共同作用下土壤酶活性出现了一定的上升。与陈思静等[17]和Gao等[18]研究结果一致,认为在不同水肥处理下,随着灌水量的增加,土壤过氧化氢酶活性得到显著提高;当在相同灌溉水平下,增加施肥量促进了土壤酶活性的增加,而过高的水肥比会降低酶活性[19]。还有前人研究认为,冬季的低温使喜热微生物死亡,死亡生物细胞破裂释放出营养物质,供低温下幸存微生物吸收利用,从而提高了酶活性[20]。而过氧化氢酶具有低温适应性,冬季维持的过氧化氢酶活性能为土壤有机物质的合成与转化提供有利条件[21],基肥肥效使得过氧化氢酶随着施肥量的增加而活性增强。春季时地上部分长势增强,养分转化能力、茶树根际土壤微生物活动增强,促进土壤微生物不断分泌酶[22],从而影响植物根系的生长发育。

土壤水分和养分是作物生长必不可少的需求,二者相互作用,相互制约[23],所以在农艺措施中,肥料被用来增加土壤养分的积累,以提高土壤向作物提供养分的能力[24]。在同一基肥量的不同灌水处理下,随着灌水量的增加呈现先升高后降低的趋势,可能是灌水量的增加促进了速效养分的溶解和水分迁移,以及速效养分被茶树根系的吸收。之后,随着灌水的增加土壤水分对速效养分的淋溶加剧,灌水水平过高会导致速效养分及有机质的吸收减少。同一灌水量的不同施肥量处理下,随着施肥量的增加速效养分呈“几字形”变化规律。这和唐海龙等[25]研究结论一致,说明水分过高或过低会改变土壤环境,改变水分对土壤养分运移和根系吸收能力,对土壤微生物产生胁迫。在水肥交互作用下,不同时期的各速效养分

表2 水肥调控对土壤养分的影响

Table 2 Effects of water and fertilizer regulation on soil nutrients 单位:mg·kg^{-1}

时间 Days	处理 Treatments	速效钾 Available phosphorus	碱解氮 Available nitrogen	有效磷 Available phosphorus	有机质 Organic matter
80 d	C0W1	60.29±2.240f	8.08±0.086i	9.96±0.558kl	14.04±0.025g
	C0W2	60.43±0.306f	15.94±0.221h	11.52±0.335jkl	14.04±0.133g
	C0W3	58.92±0.087f	6.70±0.104i	12.21±0.317jkl	14.44±0.575g
	C0W4	53.54±0.794g	8.57±0.340i	12.48±0.593jk	14.05±0.255g
	C0W5	41.57±1.142i	7.65±0.184i	9.42±0.654l	12.86±0.294h
	C1W1	67.64±0.830e	14.82±0.337h	26.99±0.227gh	15.71±0.380ef
	C1W2	70.80±1.770e	19.93±0.104fg	29.51±1.281fg	15.69±069ef
	C1W3	86.86±0.401d	21.07±0.875efg	31.39±0.989ef	15.74±0.625ef
	C1W4	98.27±2.495b	22.88±0.870de	32.49±1.521e	14.37±0.150g
	C1W5	46.96±4.642h	13.55±0.483h	25.86±0.087h	11.41±0.919i
	C2W1	102.33±1.514b	19.29±0.986f	32.44±0.282e	16.35±0.348def
	C2W2	119.69±1.265a	27.70±1.395b	35.44±0.722cd	17.17±0.956cd
	C2W3	121.71±0.978a	33.88±0.871a	39.46±0.748b	18.64±0.340b
	C2W4	122.31±0.824a	33.95±3.272a	43.35±0.531a	19.59±0.317a
	C2W5	46.20±1.397h	18.17±0.946hi	21.96±1.538i	11.67±0.894i
	C3W1	102.59±0.460b	25.09±0.650cd	35.85±0.971c	17.74±0.788c
	C3W2	101.95±0.407b	26.87±0.082bc	32.47±1.341e	17.96±1.445bc
	C3W3	92.23±0.629c	22.91±0.488ef	33.06±1.023de	17.52±0.302c
	C3W4	71.20±0.779e	20.83±0.457efg	22.89±0.207i	16.60±0.295de
	C3W5	44.99±2.982i	7.37±0.910i	14.37±3.363j	15.60±0.370f
160 d	C0W1	56.80±0.906j	7.04±0.130h	11.30±0.734jk	13.21±0.718fg
	C0W2	56.28±0.416j	12.39±2.920g	12.98±0.206jk	13.26±0.259fg
	C0W3	55.25±1.498j	7.37±0.525h	14.46±0.881jk	13.32±0.301fg
	C0W4	47.30±0.538k	8.74±0.091h	12.72±1.570j	13.30±0.155fg
	C0W5	38.93±1.571l	6.54±0.434h	7.47±0.483l	11.19±0.098g
	C1W1	69.62±3.826h	15.63±0.669ef	23.70±1.453h	16.07±0.026cde
	C1W2	70.68±0.637h	16.61±1.295def	25.65±0.850gh	16.36±0.156cde
	C1W3	80.73±1.165g	19.48±0.974cde	28.03±1.248efg	16.30±0.298de
	C1W4	86.73±0.738f	18.69±1.038efg	28.78±0.499fg	15.62±1.233e
	C1W5	48.54±0.103k	14.57±0.288fg	10.37±0.631kl	13.57±0.422f
	C2W1	102.36±1.240de	20.47±0.307c	30.27±0.980cdef	16.71±1.189bcde
	C2W2	107.95±0.485c	25.54±0.767b	31.42±2.880bcde	16.74±0.370bcde
	C2W3	110.87±3.216b	28.18±0.530a	32.79±2.426bc	17.62±2.079bcde
	C2W4	115.24±1.549a	24.80±1.076b	36.50±2.634a	18.41±0.266bcd
	C2W5	57.38±1.494j	17.56±0.057de	28.72±0.440efgh	11.25±1.789g
	C3W1	103.59±1.312de	25.28±1.093b	31.47±1.000bcde	18.58±0.371bc
	C3W2	104.25±1.544de	29.50±0.402a	32.04±0.932bcd	18.88±0.100b
	C3W3	105.2±1.093cd	29.48±0.151a	34.43±1.034ab	22.56±1.131a
	C3W4	101.79±1.149e	29.29±2.259a	27.47±0.695fg	17.60±0.358bcde
	C3W5	61.25±0.763f	18.98±0.614cd	18.40±0.550i	16.39±0.326cde

注:同一列不同小写字母表示差异显著($P<0.05$)。处理与图1相同

Note: Different lowercase letters in the same column indicate significant differences ($P<0.05$). Treatments are the same as in Figure 1

表3 双因素方差分析(F值检验)

Table 3 Two－factor analysis of variance (F value analysis)

项目 Item	80 d				160 d			
施肥水平C	2 033.8**	834.7**	1 312.7**	306.8**	5 310.8**	452.3**	3 725.7**	1 046.8**
灌水水平W	1 505.0**	267.7**	202.6**	229.6**	2 042.9**	49.6**	759.0**	372.7**
基肥水平×灌水水平C*W	234.7**	72.8**	65.5**	42.7**	160.8**	6.5**	101.4**	58.7**

表4　80 d时土壤酶与土壤速效养分及有机质间的相关性

Table 4　Correlation between soil enzymes and soil available nutrients and organic matter at 80 d

项目 Item	蔗糖酶 Sucrase	过氧化氢酶 Catalase	速效钾 Available phosphorus	碱解氮 Available nitrogen	有效磷 Available phosphorus
过氧化氢酶	0.373				
速效钾	0.866**	0.417			
碱解氮	0.827**	0.562**	0.892**		
有效磷	0.774**	0.517*	0.870**	0.915**	
有机质	0.756**	0.584**	0.837**	0.738**	0.702**

注:*表示显著相关($P<0.05$),**表示极显著相关($P<0.01$)

Note: * represents significant correlation ($P<0.05$), ** represents extremely significant correlation ($P<0.01$)

表5　160 d时土壤酶与土壤速效养分及有机质间的相关性

Table 5　Correlation between soil enzymes and soil available nutrients and organic matter at 160 d

	蔗糖酶 Sucrase	过氧化氢酶 Catalase	速效钾 Available phosphorus	碱解氮 Available nitrogen	有效磷 Available phosphorus
过氧化氢酶	0.228				
速效钾	0.668**	0.568**			
碱解氮	0.498*	0.776**	0.902**		
有效磷	0.641**	0.579**	0.909**	0.875**	
有机质	0.441	0.596**	0.845**	0.846**	0.766**

注:*表示显著相关($P<0.05$),**表示极显著相关($P<0.01$)

Note: * represents significant correlation ($P<0.05$), ** represents extremely significant correlation ($P<0.01$)

表6　80 d时土壤酶与土壤速效养分及有机质间的通径系数

Table 6　Path coefficients between soil enzymes and available nutrients and organic matter in soil at 80 d

土壤酶 Soil enzyme		通径系数 Path coefficients				间接通径系数之和 Sum of indirect path
		X_1	X_2	X_3	X_4	
蔗糖酶	X_1	0.565*	0.300	－0.084	0.086	0.302
	X_2	0.492	0.336*	－0.089	0.076	0.479
	X_3	0.492	0.307	－0.097*	0.072	0.871
	X_4	0.473	0.248	－0.068	0.103*	0.653
过氧化氢酶	X_1	－1.210*	0.684	0.247	0.696	1.627
	X_2	－1.079	0.767*	0.260	0.613	－0.206
	X_3	－1.053	0.702	0.284*	0.538	0.232
	X_4	－1.013	0.566	0.199	0.831*	－0.248

注:X_1,速效钾;X_2,碱解氮;X_3,有效磷;X_4,有机质。*表示直接通径系数,其余为间接通径系数

Note: X_1, Available K; X_2, Available N; X_3, Available P; X_4, Organic matter. * means direct path coefficient and the others represent the indirect path coefficients

表7 160 d时土壤酶与土壤速效养分及有机质间的通径系数

Table 7 Path coefficients between soil enzymes and available nutrients and organic matter in soil at 160d

土壤酶 Soil enzyme		通径系数 Path coefficients				间接通径系数之和 Sum of indirect path
		X_1	X_2	X_3	X_4	
蔗糖酶	X_1	1.060*	−0.497	0.334	−0.228	−0.391
	X_2	0.956	−0.551*	0.321	−0.228	1.049
	X_3	0.964	−0.361	0.367*	−0.207	0.396
	X_4	0.896	−0.466	0.281	−0.270*	0.711
过氧化氢酶	X_1	−0.642*	1.314	−0.091	−0.014	1.209
	X_2	−0.579	1.457*	−0.088	−0.014	−0.681
	X_3	−0.584	1.275	−0.100*	−0.013	0.678
	X_4	−0.542	1.233	−0.023	−0.017*	0.668

注:X_1,速效钾;X_2,碱解氮;X_3,有效磷;X_4,有机质。*表示直接通径系数,其余为间接通径系数

Note: X_1, Available K; X_2, Available N; X_3, Available P; X_4, Organic matter. * means direct path coefficient and the others represent the indirect path coefficients

因子间的差异性依然显著。所有灌水和施肥都呈现出交互显著性,这也和张婵婵等[26]关于人工灌溉施肥等因素的影响对土壤中速效养分含量具有明显的特征的结果相似。冬季时,速效钾和有效磷在不同施肥量下发生显著变化,随着茶树越冬结束后,施肥量、灌水量和水肥交互作用均对速效钾含量影响最密切,水肥交互作用对有效磷含量也影响密切。可能是随着气温的回升和越冬期结束,茶树光合作用能力加强,钾可提高茶树的光合作用和抗逆能力[27],并促进茶树根系生长,从而对土壤速效钾的影响最为显著。另外,前人研究认为土壤水分条件显著影响养分的吸收、淋失和流失[28],所以在水肥交互作用下,肥料在土壤水分中进行迁移,进而保持速效养分稳定释放,从而提高土壤中的速效养分及有机质含量。

通过相关性分析和通径分析表明,水肥调控下土壤蔗糖酶、过氧化氢酶的活性与土壤养分含量存在密切的相关性。不同季节下土壤酶与速效钾、碱解氮、有效磷都呈现显著相关性,这说明土壤酶类相互协作可提高土壤养分[29],不同时期土壤酶和速效养分积极参与有机质转化分解的过程[30]。前人研究认为,土壤肥力中的养分、酶活性等条件能相互影响,彼此促进或制约,所以土壤肥力的改善是多方面原因作用的结果[31]。速效钾和碱解氮是促进茶树根系生长、提高光合效率的元素,在冬季时二者对土壤蔗糖酶活性都有直接显著影响;有效磷和有机质对蔗糖酶活性也会产生影响,但由于有机质的累积和分解是一个缓慢的过程,有效磷与有机质密切相关,所以有效磷和有机质对蔗糖酶活性的影响主要通过速效钾对蔗糖酶的影响;土壤速效钾对过氧化氢酶活性虽然具有强烈的负效应,但是此时速效钾的间接正效应也异常强烈,将速效钾的直接负效应中和,说明冬季时土壤中累积的碱解氮和有机质的含量对过氧化氢酶活性有显著影响。春季时,蔗糖酶活性增强主要原因是速效钾和有效磷促进茶树器官的生长发育和增强了茶树的呼吸作用,酶促反应加强;碱解氮是影响过氧化氢酶的直接因素,速效钾的含量影响其它速效养分和有机质含量共同促进过氧化氢酶的活性,这与王静等[32]研究结果类似。

本研究发现茶树株高和株茎会随着增水和增肥的梯度而增加,可能是由于水分和肥料是影响土壤质量的重要因素,合理的施肥和灌水可以增强土壤肥力,为株高和株茎的生长发育提供可吸收和利用的有效养分。付晓凤等[33],王宁等[34]分别在对扁桃幼苗和油茶施肥试验中也呈现了相似的结果。而着叶数和分枝增加量分别仅在增肥和增水的处理下显著生长,是因为植物的生长过程中受光照、降水、温度和土壤肥力等多种因素的影响,在适宜的环境下植被吸收养分的能力增强,施肥可以有效促进着叶数的增长。而水分可能为分枝增加量的限制因子,在充足的水分下,分枝可以有效吸收土壤当中的养分进而得到有效增长。

4 结论

通过对不同时期的水肥调控对土壤酶和土壤

表8　水肥调控对茶树生长的影响

Table 8　Effects of water and fertilizer regulation on tea tree growth

处理 Treatments	株高增长量/cm Height increase	地径增长量/cm Ground diameter growth	着叶数增加量 ncrease in number of attached leaves	分枝增加数(单轴) Branch increase (single axis)
C0W1	1.103±0.556d	0.201±0.001h	10±1.000f	1±0.577bc
C0W2	1.129±0.011cd	0.235±0.003efg	11±1.528ef	1±0.000c
C0W3	1.202±0.019abc	0.236±0.001efg	13±1.732cdef	3±1.000abc
C0W4	1.240±0.022bcd	0.239±0.002efg	13±1.155bcdef	5±1.000a
C0W5	1.250±0.004bcd	0.236±0.003efg	12±2.646def	2±1.000bc
C1W1	1.182±0.011bcd	0.229±0.011fgh	13±1.000cdef	2±0.000bc
C1W2	1.270±0.029abc	0.240±0.004efg	13±1.732cdef	2±1.000bc
C1W3	1.323±0.021abcd	0.268±0.005bcde	14±2.000bcdef	3±1.000abc
C1W4	1.524±0.044ab	0.278±0.008bcd	15±3.000abcdef	4±1.000ab
C1W5	1.236±0.029bcd	0.248±0.001defg	15±1.732abcdef	2±0.000bc
C2W1	1.170±0.010bcd	0.253±0.002cdefg	16±2.000abcde	2±0.000bc
C2W2	1.376±0.016abcd	0.267±0.001bcde	16±0.000abcde	3±1.000abc
C2W3	1.510±0.012abc	0.286±0.003bc	17±1.000abcd	5±1.000a
C2W4	1.649±0.037a	0.372±0.003a	17±0.000abcd	4±1.000ab
C2W5	1.440±0.020abcd	0.255±0.051gh	18±1.000abc	2±1.000bc
C3W1	1.200±0.010bcd	0.257±0.001bcdefg	14±1.000bcdef	2±1.000bc
C3W2	1.388±0.004abcd	0.263±0.010bcdef	17±3.000abcd	3±1.000abc
C3W3	1.450±0.030abcd	0.268±0.020bcde	18±1.000ab	4±1.000ab
C3W4	1.547±0.025ab	0.290±0.000b	19±2.000a	4±1.732ab
C3W5	1.460±0.040abcd	0.254±0.035cdefg	17±1.732abcd	2±1.000bc
双因素方差分析(F值检验) Two－factor analysis of variance (F value analysis)				
基肥水平C	114.351**	188.297**	9.682**	1.047
灌水水平W	102.956**	134.407**	2.236	8.886**
基肥水平×灌水水平C*W	7.913**	27.466*	0.239	0.535

注:同一列不同小写字母表示差异显著($P<0.05$)。处理与图1相同

Note: Different lowercase letters in the same column indicated significant differences($P<0.05$). Treatments were the same as those listed in Figure 1

养分的影响进行分析,本研究认为:

茶树在每盆0.1 kg基肥和190 mL灌水处理下蔗糖酶活性最高,在每盆0.15 kg基肥和240 mL处理下过氧化氢酶活性最高。冬季每盆0.1 kg基肥和240 mL灌水处理下速效钾、碱解氮、有效磷、有机质含量最大;春季除速效钾在0.1 kg·盆$^{-1}$基肥处理下含量最大外,其余速效养分以及有机质均在0.15 kg·盆$^{-1}$基肥处理下含量最大。速效钾、碱解氮同为影响冬春季蔗糖酶和过氧化氢酶活性的主导因子,而冬季过氧化氢酶活性受有机质直接作用影响,到春季蔗糖酶活性受有效磷直接作用影响。速效钾通过影响其它速效养分及有机质含量,多个因素共同影响不同季节蔗糖酶和过氧化氢酶活性。0.1 kg·盆$^{-1}$基肥处理和240 mL·盆$^{-1}$灌水处理时茶树株高、地径增长量达到最高,着叶增加数在0.15 kg·盆$^{-1}$基肥处理时达到最大,分枝增加数在190 mL·盆$^{-1}$灌水处理时达到最大。

参　考　文　献

[1]赵东伟. 大叶茶(*Camellia sinensis* var. *assamica*)的命名、模式及自然分布[J]. 茶叶科学,2022,42(4):491-499.
Zhao D W. Nomenclature, typification, and natural distribution of *Camellia sinensis* var. *assamica* (Theaceae)[J]. Journal of Tea Science, 2022,42(4): 491-499.

[2]陈鸿飞,庞晓敏,张仁,等. 不同水肥运筹对再生季稻根际土壤

酶活性及微生物功能多样性的影响[J]. 作物学报,2017,43(10):1507-1517.
Chen H F,Pang X M,Zhang R,et al. Effects of different irrigation and fertilizer application regimes on soil en-zyme activities and microbial functional diversity in rhizosphere of ratoon-ing rice [J]. Acta Agronomica Sinica,2017,43(10):1507-1517.

[3]樊战辉,唐小军,郑丹,等. 茶园土壤酸化成因及改良措施研究和展望[J]. 茶叶科学,2020,40(1):15-25.
Fan Z H, Tang X J, Zheng D, et al. Study and prospect of soil acidification causes and improvement measures in tea plantation [J]. Journal of Tea Science,2020,40(1):15-25.

[4]余海英,李廷轩,周健民. 设施土壤次生盐渍化及其对土壤性质的影响[J]. 土壤,2005,37(6):581-586.
Yu H Y,Li T X, Zhou J M. Secondary salinization of greenhouse soil and its effects on soil properties[J]. Soils, 2005, 37(6):581-586.

[5]黄海涛,郑旭霞,敖存,等. 不同种类基肥连续施用对茶园土壤理化性质的影响研究[J]. 中国农学通报, 2015, 31(34):248-252.
Huang H T, Zheng X X, Ao C, et al. Effects of continuous application of different kinds of basic fertilizers on tea plantation soil physicochemical properties[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2015, 31(34): 248-252.

[6]吴志丹, 江福英, 尤志明, 等. 连续5年配施有机肥茶园土壤活性铝含量变化状况[J]. 土壤, 2019, 51(6): 1070-1077.
Wu Z D, Jiang F Y, You Z M, et al. Variation of active aluminum content in tea garden soil with manure applied for 5 years [J]. Soils, 2019, 51(6): 1070-1077.

[7]李昌娟,杨文浩,周碧青,等. 生物炭基肥对酸化茶园土壤养分及茶叶产质量的影响[J]. 土壤通报,2021,52(2):387-397.
Li C J, Yang W H, Zhou B Q, et al. Effects of biochar based fertilizer on soil nutrients, tea output and quality in an acidified tea field[J]. Chinese Journal of Soil Science. 2021,52(2):387-397.

[8]李俊强,林利华,张帆, 等. 施肥模式对茶树根际土壤微生物数量及酶活性的影响[J]. 水土保持研究,2019,26(3):22-28.
Li J Q, Lin L H, Zhang F, et al. Effect of fertilization regime on soil microbial quantity and enzyme activity in rhizosphere of tea[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2019,26(3): 22-28.

[9]吴志丹,尤志明,江福英, 等. 配施有机肥对茶园土壤性状及茶叶产质量的影响[J]. 土壤,2015,47(5):874-879.
Wu Z D, You Z M, Jiang F Y, et al. Effects of combined application of organic manure and chemical fertilizer on properties of tea garden soil and the yield and quality of tea[J]. Soils, 2015, 47(5):874-879.

[10]Wang Y, Fu D L, Pan L L, et al. The coupling effect of water and fertilizer on the growth of tea plants [*Camellia sinensis* (L.) O. Kuntz][J]. Journal of Plant Nutrition, 2016, 39(5): 620-627.

[11]韦泽秀, 梁银丽, 井上光弘, 等. 水肥处理对黄瓜土壤养分、酶及微生物多样性的影响[J]. 应用生态学报, 2009, 20(7): 1678-1684.
Wei Z X, Liang Y L, Inouem I, et al. Effects of different water and fertilizer supply on cucumber soil nutrient content, enzyme activity, and microbial diversity[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2009, 20(7): 1678-1684.

[12]He X C, Wang Y C. Effects of regulated deficit irrigation on soil nutrient, microorganism and enzyme activity of Isatis indigotica[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2021, 632(2): 022025.

[13]Li W T, Wu M, Liu M, et al. Responses of soil enzyme activities and microbial community composition to moisture regimes in paddy soils under long-term fertilization practices[J]. Pedosphere, 2018, 28(2): 323-331.

[14]马嵩科,霍克,张冬霞,等. 玉米秸秆还田配施氮肥对豫西旱地小麦土壤酶活性和氮肥利用效率的影响[J]. 草业学报, 2023, 32(6): 120-133.
Ma S K, Huo K, Zhang D X, et al. Effects of maize straw return combined with nitrogen on soil enzyme activity and nitrogen fertilizer use efficiency in western dryland wheat fields of Henan Province[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2023, 32(6): 120-133.

[15]夏国栋,朱四喜,李武江,等. 喀斯特煤矿区土地利用类型对土壤养分、酶活性及化学计量特征的影响[J]. 中国无机分析化学, 2022, 12(6)67-76.
Xia G D, Zhu S X, Li W J, et al. Effects of land use types on soil nutrients, enzyme activities and stoichiometric characteristics in Karst coal mining areas[J]. Chinese Jorunal of Inorganic Analytical Chemistry, 2022, 12(6)67-76.

[16]Ning P, Li S, Yu P, et al. Post-silking accumulation and partitioning of dry matter, nitrogen, phosphorus and potassium in maize varieties differing in leaf longevity[J]. Field Crops Research, 2013, 144: 19-27.

[17]陈思静,杜爱林,李伏生. 不同滴灌施肥处理对种植马铃薯土壤有机碳组分和酶活性的影响[J]. 华南农业大学学报, 2022, 43(3): 34-41.
Chen S J, Du A L, Li F S. Effects of different drip fertigation treatments on organic carbon fraction and enzyme activity in potato-planting soil [J]. Journal of South China Agricultural University, 2022, 43(3): 34-41.

[18]高志香, 李希来,张静, 等. 不同施肥处理对高寒矿区渣山改良土酶活性和理化性质的影响[J]. 草地学报, 2021, 29(8): 1748.
Gao Z X, Li X L, Zhang J, et al. Effects of different fertilization treatments on soil enzyme activities in coal mining residuals of alpine mining area[J]. Acta Agrestia Sinica, 2021, 29(8): 1748.

[19]Tuo Y F, Wang Z Y, Zheng Y, et al. Effect of water and fertilizer regulation on the soil microbial biomass carbon and nitrogen, enzyme activity, and saponin content of Panax notoginseng [J]. Agricultural Water Management, 2023, 278:

108145.

[20]高钰,雍少宁,王俊峰. 增温对青藏高原高寒沼泽草甸不同时期土壤酶活性的影响[J]. 生态科学, 2023, 42(1): 1-10.
Gao Y, Yong S N, Wang J F. Effects of experimental warming on soil enzyme activities in different seasons of the alpine swamp meadow ecosystem on the Qinghai-Tibet Plateau[J]. Ecological Science, 2023, 42(1): 1-10.

[21]谭波,吴福忠,杨万勤,等. 川西亚高山/高山森林土壤氧化还原酶活性及其对季节性冻融的响应[J]. 生态学报,2012(21): 6670-6678.
Tan B, Wu F Z, Yang W Q, et al. Activities of soil oxidordeuctase and their response to seasonal freeze-thaw in the subalpine/alpine forests of western Sichuan[J]. Acta Ecologica Sinica,2012(21): 6670-6678.

[22]李俊强,林利华,张帆,等. 施肥模式对茶树根际土壤微生物数量及酶活性的影响[J]. 水土保持研究, 2019, 26(3): 22-28.
Li J Q, Lin L H, Zhang F, et al. Effect of fertilization regime on soil microbial quantity and enzyme activity in rhizosphere of tea[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2019, 26(3): 22-28.

[23]梁香寒, 张克斌, 乔厦. 半干旱黄土区柠条林土壤水分和养分与群落多样性关系[J]. 生态环境学报, 2019, 28(9): 1748-1756.
Liang X H, Zhang K B, Qiao X. Relationship between soil moisture and nutrients and plant diversity of *Caragana microphylla* community in semi-arid loess region [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2019, 28(9): 1748-1756.

[24]Ma Y B, Li J M, Li X Y, et al. Phosphorus accumulation and depletion in soils in wheat - maize cropping systems: modeling and validation[J]. Field Crops Research, 2009, 110(3): 207-212.

[25]唐海龙, 龚伟, 王景燕, 等. 水肥处理对竹叶花椒土壤养分和微生物的影响[J]. 浙江农林大学学报, 2019, 36(2): 318-325.
Tang H L, Gong W, Wang J Y, et al. Nutrients and microbes in soils of *Zanthoxylum armatum* with water and fertilizer treatments[J]. Journal of Zhejiang A&F University, 2019, 36(2): 318-325.

[26]张婵婵,张瑞芳,张建恒, 等. 高阳县农田土壤速效养分空间变异特征研究[J]. 中国生态农业学报, 2013, 21(6): 758-764.
Zhang C C, Zhang R F, Zhang J H, et al. Spatial variability of available nutrients contents in cropland soils in Gaoyang County of Hebei Province, China[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2013, 21(6): 758-764.

[27]Ruan J Y, Ma L F, Shi Y Z. Potassium management in tea plantations: its uptake by field plants, status in soils, and efficacy on yields and quality of teas in China[J]. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 2013, 176(3): 450-459.

[28]Hu A Y, Yu Z Y, Liu X H, et al. The effects of irrigation and fertilization on the migration and transformation processes of main chemical components in the soil profile[J]. Environmental Geochemistry and Health, 2019, 41(6): 2631-2648.

[29]夏皖豫,陈彦云,柴忠良,等. 宁南山区膜下滴灌对马铃薯土壤酶活性、土壤养分及产量的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2021, 39(1):57-64.
Xia W Y, Chen Y Y, Chai Z L, et al. Effects of drip irrigation under mulch on soil enzyme activities, soil nutrients and yield of potatoes in Ningnan mountainous area[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2021, 39(1):57-64.

[30]陈佳,姚成硕,林勇明,等. 武夷山林地土壤酶活性差异及土壤肥力质量评价[J]. 山地学报,2021,39(2):194-206.
Chen J, Yao C S, Lin Y M, et al. Soil enzyme activity difference in woodlands, and soil fertility quality evaluation in mount Wuyi, China[J]. Mountain Research, 2021, 39(2):194-206.

[31]张成君,康文娟,张翠梅,等. 基于主成分-聚类分析评价不同轮作模式对土壤肥力的影响[J]. 水土保持学报,2020, 34(1): 292-300.
Zhang C J, Kang W J, Zhang C M, et al. Evaluation of the effects of different rotation patterns on soil fertility based on principal component-cluster analysis[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2020, 34(1): 292-300.

[32]王静,呼丽萍,李昶,等. 种植年限对樱桃园土壤养分和酶活性的影响[J]. 水土保持通报, 2013, 33(4): 155-158, 165.
Wang J, Hu L P, Li C, et al. Effects of planting period on soil nutrient and soil enzyme activities in cherry orchards[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2013, 33(4): 155-158, 165.

[33]付晓凤,朱原,黄杰,等. 氮磷钾配比施肥对扁桃幼苗生长及叶片养分含量的影响[J]. 四川农业大学学报, 2019, 37(5): 629-635.
Fu X F, Zhu Y, Huang J, et al. Effects of N, P and K fertilization treatments on the growth and nutrient contents in leaves of *Mangifera persiciformis* C. seedlings[J]. Journal of Sichuan Agricultural University, 2019, 37(5): 629-635.

[34]王宁,刘玉春,姜长松,等. 不同灌水方式和施肥量对青贮玉米生长和产量的影响[J]. 中国农村水利水电,2020(5):4-9.
Wang N, Liu Y C, Jiang C S, et al. Effects of different irrigation methods and fertilization amount on growth and yield of silage corn[J]. China Rural Water and Hydropower. 2020(5):4-9.

Effects of water and fertilizer regulation on soil enzymes and soil nutrients of tea plants

Zhao Junbo, Hu Binghui*

(*School of Ecology and Environment, Southwest Forestry University, Kunming 650224, China*)

Abstract: [Objective] The objective of this research was to explore the response of soil enzyme activities, soil nutrients, and the above-ground parts of tea plants to water and fertilizer regulation, and to reveal the changing patterns of soil enzyme activities and soil nutrients under water and fertilizer regulation, providing theoretical basis for basal fertilizer application and irrigation - water interaction in soil physicochemical properties and growth of young tea trees. [Method] Pot experiment method was adopted with two factors: fertilizer application amount and irrigation amount. The fertilizer application amount was set at four levels: C0(0 kg·pot^{-1}), C1(0.05 kg·pot^{-1}), C2(0.1 kg·pot^{-1}), and C3(0.15 kg·pot^{-1}). The irrigation amount was set at five irrigation gradients: W1 (90 mL· pot^{-1}), W2 (140 mL· pot^{-1}), W3 (190 mL· pot^{-1}), W4 (240 mL·pot^{-1}), and W5 (290 mL·pot^{-1}). [Results] (1) The soil sucrase activity is highest under C2W3 treatment, and the catalase activity is the highest under C3W4 treatment; soil nutrient content is the highest under C2W4 treatment in winter; in spring, the contents of available potassium and available phosphorus are the highest under C2 base fertilizer fertilization, and C3 base fertilizer fertilization The content of alkali hydrolyzed nitrogen and organic matter is the largest under. (2) Under the C3 treatment, available potassium and alkaline nitrogen had the greatest impact on sucrase and catalase activities in winter and spring; after the influence of available potassium, other nutrients jointly affected the activity of sucrose and catalase at different periods. (3) Combined with the above-ground growth indicators of tea trees, it was found that under C2 base fertilizer application treatment, the plant height and ground diameter growth were the largest, and the number of leaf branches increased the most under W4 irrigation. [Conclusion] With the end of the overwintering period, potassium element does not need supplementary fertilizer, while tea trees need nitrogen and phosphorus supplementary fertilization due to their growth needs; Under the irrigation treatment of 240 mL·pot^{-1}, the above ground growth indicators of tea tree reached the maximum.

Keywords: Amounts of basal-dressing, Irrigation amount, Soil enzymes, Soil nutrients, Topdressing supplement

(编辑:郭玥微)