

李慧永, 刘小刚, 张文慧, 等. 遮阴下滴灌施肥对小粒种咖啡土壤质量和水分利用的影响 [J]. 华南农业大学学报, 2022, 43(2): 57-67.
LI Huiyong, LIU Xiaogang, ZHANG Wenhui, et al. Effects of drip fertigation under shade on soil quality and water use of *Coffea arabica*[J]. Journal of South China Agricultural University, 2022, 43(2): 57-67.

遮阴下滴灌施肥对小粒种咖啡土壤 质量和水分利用的影响

李慧永, 刘小刚, 张文慧, 孙文艳, 吴 朗, 张 朔, 杨启良, 熊国美
(昆明理工大学 农业与食品学院, 云南 昆明 650500)

摘要:【目的】探究遮阴下不同水肥耦合模式对小粒种咖啡根区土壤质量及水分利用的影响。【方法】以小粒种咖啡为研究对象, 在 30% 遮阴度下, 试验设 2 因素 (灌水和施肥)3 水平完全设计, 共 9 个处理。3 个灌水水平: 高水 (W_H : 1.2 Ep)、中水 (W_M : 1.0 Ep) 和低水 (W_L : 0.8 Ep); 3 个施肥水平: 高肥 (F_H : 530.00 kg·hm⁻²)、中肥 (F_M : 353.33 kg·hm⁻²) 和低肥 (F_L : 176.67 kg·hm⁻²)。分析小粒种咖啡根区土壤养分、微生物数量、酶活性、干物质量及灌溉水分利用效率对水肥调控的响应规律, 通过隶属函数和因子分析相结合对土壤质量进行综合评价, 再以 TOPSIS 法综合分析, 找出小粒种咖啡最佳水肥耦合模式。【结果】灌水水平和施肥水平对小粒种咖啡根区土壤养分、微生物数量、酶活性 (除秋季过氧化氢酶)、根干物质量、树干干物质量、总干物质量和灌溉水分利用效率影响显著。 $F_H W_L$ 处理的确态氮、速效磷和速效钾含量季均值最高; $F_M W_H$ 处理的土壤微生物数量和酶活性季均值最高。与 $F_L W_L$ 处理相比, $F_H W_L$ 处理的土壤确态氮、速效磷和速效钾含量季均值分别增加 72.61%、154.01% 和 7.37%, $F_M W_H$ 处理的土壤细菌、真菌和放线菌数量季均值分别增加 121.81%、61.73% 和 41.43%, 且脲酶、过氧化氢酶和磷酸酶活性季均值分别增加 46.67%、42.74% 和 22.55%。土壤确态氮含量与过氧化氢酶活性存在显著正相关; 土壤细菌、真菌和放线菌数量分别与脲酶、过氧化氢酶和磷酸酶活性存在显著正相关。隶属函数和因子分析相结合的方法表明, $F_M W_H$ 处理土壤质量指数最高 (0.75)。 $F_M W_H$ 处理的总干物质量 (38 011.50 kg·hm⁻²) 最大, $F_M W_L$ 处理的灌溉水分利用效率 (7.88 kg·m⁻³) 最大。TOPSIS 法表明, $F_M W_M$ 处理的土壤质量、干物质和灌溉水分利用效率综合效益排名第 1, 其次是 $F_M W_H$ 处理。【结论】在 30% 遮阴度下, $F_M W_M$ 处理为改善土壤质量且促进小粒种咖啡高效生产的最佳水肥耦合模式。

关键词: 小粒种咖啡; 滴灌施肥; 土壤质量; 干物质量; 灌溉水分利用效率

中图分类号: S275.6; S571.2

文献标志码: A

文章编号: 1001-411X(2022)02-0057-11

Effects of drip fertigation under shade on soil quality and water use of *Coffea arabica*

LI Huiyong, LIU Xiaogang, ZHANG Wenhui, SUN Wenyan, WU Lang,

ZHANG Shuo, YANG Qiliang, XIONG Guomei

(Faculty of Agriculture and Food, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China)

Abstract: 【Objective】To explore the effects of different coupling modes of water-fertilizer on root zone soil quality and water use of *Coffea arabica* under shade. 【Method】*C. arabica* was chosen as test material, under

收稿日期: 2021-03-04 网络首发时间: 2021-08-30 11:59:41

网络首发地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/44.1110.S.20210830.0924.002.html>

作者简介: 李慧永, 硕士研究生, 主要从事节水灌溉与新技术研究, Email: 1252677365@qq.com; 通信作者: 刘小刚, 教授, 博士, 主要从事节水灌溉与新技术研究, Email: liuxiaogangjy@126.com

基金项目: 国家自然科学基金 (51979133, 51769010, 51469010); 云南省教育厅科学研究基金 (2021Y116); 云南省大学生创新训练项目 (202010674115)

30% shading degree, three irrigation levels (W_H : 1.2 Ep, W_M : 1.0 Ep, W_L : 0.8 Ep) and three fertilization levels (F_H : 530.00 kg·hm⁻², F_M : 353.33 kg·hm⁻², F_L : 176.67 kg·hm⁻²) were completely designed with a total of nine treatments. The response laws of soil nutrient, microbial quantity, enzyme activities, dry mass and irrigation water use efficiency in root zone of *C. arabica* to water-fertilizer regulation were analyzed, and soil quality was comprehensively evaluated by combining membership function with factor analysis, and then the optimal water-fertilizer coupling mode of *C. arabica* was found by TOPSIS comprehensive analysis. 【Result】Irrigation level and fertilization level had significant effects on soil nutrient, microbial quantity, enzyme activities (except catalase in autumn), root dry mass, stem dry mass, total dry mass and irrigation water use efficiency of *C. arabica* root zone. The average seasonal values of nitrate nitrogen, available phosphorus and available potassium contents in F_HW_L treatment were the highest. The average seasonal values of soil microorganism quantity and enzyme activities were the highest in F_MW_H treatment. Compared with F_LW_L treatment, F_HW_L treatment increased the average seasonal values of soil nitrate-nitrogen, available phosphorus and available potassium contents by 72.61%, 154.01% and 7.37%, respectively; F_MW_H treatment increased the average seasonal values of soil bacteria, fungi and actinomycetes number by 121.81%, 61.73% and 41.43%, respectively, and increased the average seasonal values of urease, catalase and phosphatase activities by 46.67%, 42.74% and 22.55%, respectively. There was a significant positive correlation between soil nitrate nitrogen content and catalase activity. The number of soil bacteria, fungi and actinomycetes were significantly positively correlated with the activities of urease, catalase and phosphatase, respectively. The combination of membership function and factor analysis showed that soil quality index of F_MW_H treatment was the highest (0.75). The total dry mass (38 011.50 kg·hm⁻²) of F_MW_H treatment was the highest, and the irrigation water use efficiency (7.88 kg·m⁻³) of F_MW_L treatment was the highest. However, TOPSIS method showed that the comprehensive benefit (soil quality, dry matter and irrigation water use efficiency) of F_MW_M treatment ranked the first, followed by F_MW_H treatment. 【Conclusion】Under 30% shading degree, F_MW_M treatment was the best coupling mode of water-fertilizer for improving soil quality and promoting efficient production of *C. arabica*.

Key words: *Coffea arabica*; Drip fertigation; Soil quality; Dry mass; Irrigation water use efficiency

小粒种咖啡 *Coffea arabica* 是云南优势特色农产品, 其种植面积及产量均占我国种植面积及产量的 98% 以上^[1]。目前小粒种咖啡水肥管理粗放, 水肥供给不匹配, 直接影响小粒种咖啡的高效生产, 有关小粒种咖啡水肥一体化的研究成果报道较少。灌溉能影响作物土壤环境、生理机制以及生长特性^[2-4]。合理灌溉能够有效提高土壤水分含量, 改善土壤水肥环境并维持其稳定状态^[3, 5], 从而促进作物根系对水分的吸收, 以维持作物组织器官正常运行及良好发育^[6-7]。有研究表明, 轻度亏缺灌溉对小粒种咖啡土壤细菌和放线菌数量影响较小, 而中度和重度亏缺灌溉显著降低土壤微生物数量^[3]。低水灌溉抑制小粒种咖啡根系对土壤养分的吸收利用, 限制干物质累积, 但提高水分利用效率; 相反, 增加灌水量可以提高根系对养分的吸收, 促进小粒种咖啡干物质累积, 但降低水分利用效率^[2]。施肥对土壤环境及作物生长影响显著^[8-11]。适量施肥改变土壤的理化性质及养分元素比例, 促进土壤微生物繁殖

和土壤酶活性转化, 为作物根系提供易于吸收的无机养分元素和有机腐殖质养分^[12-14]。咖啡幼苗在连作酸化土壤中配施石灰+牛粪有机肥可改善土壤理化性质, 有效提高土壤脲酶活性, 增加干物质质量^[13]; 而按质量比施用 5% 以上的咖啡果皮有机肥可显著提高土壤养分含量以及脲酶和酸性磷酸酶活性, 但会抑制咖啡幼苗生长及干物质累积^[12]。然而, 前人研究主要集中在单一灌水或施肥对咖啡土壤理化性质、干物质累积和氮肥利用率的影响^[12-13, 15], 以及水肥耦合对小粒种咖啡光合特性、生理指标及产量的影响等方面^[16-18]。而有关综合考虑土壤环境质量、干物质累积及灌溉水分利用效率, 以寻求适度遮阴下小粒种咖啡适宜的滴灌施肥模式还鲜有报道。本研究在遮阴下探索不同滴灌施肥模式对小粒种咖啡土壤养分、微生物数量、酶活性、干物质累积及灌溉水分利用效率的影响, 并运用隶属函数结合因子分析的方法评价土壤质量, 采用 TOPSIS 法对土壤质量、干物质质量和灌溉水分利用效率进行综合

评价,以期找到适度遮阴下小粒种咖啡的最佳滴灌施肥模式,为小粒种咖啡合理水肥管理和科学栽培提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验地点及材料

试验于 2017 年 2 月至 2018 年 12 月在云南省昆明理工大学智能控制温室 (102°45'E, 24°42'N, 海拔 1 778.9 m) 内进行,温室内相对湿度为 50%~85%,温度为 12~35 ℃。2017 年 2 月 13 日选择长势一致的 4 年生小粒种咖啡‘卡蒂姆 P7963’移栽到温室内,株行距 1.4 m×1.0 m。种植土槽长 10 m,宽 0.6 m,深 0.8 m,间距 0.8 m,底部和两侧铺设塑料薄膜,防止水分渗漏。采用黑色遮阴网 (30% 遮阴度) 为小粒种咖啡提供适宜遮阴^[19]。供试土壤为红褐土,有机质 15.05 g·kg⁻¹、硝态氮 57.48 mg·kg⁻¹、速效磷 12.61 mg·kg⁻¹ 和速效钾 85.53 mg·kg⁻¹。

1.2 试验设计

试验设置灌水和施肥 2 因素 3 水平完全组合试验,共 9 个处理。每个处理 3 个重复 (即每个处理 3 株小粒种咖啡树),共 27 株小粒种咖啡树。3 个灌水水平:高水 (W_H: 1.2 E_p, E_p 为灌水间隔内直径 20 cm 标准蒸发皿的水面蒸发量)、中水 (W_M: 1.0 E_p) 和低水 (W_L: 0.8 E_p); 3 个施肥水平 (结合前人的研究^[17,20] 和施肥习惯): 高肥 (F_H: 530.00 kg·hm⁻²)、中肥 (F_M: 353.33 kg·hm⁻²) 和低肥 (F_L: 176.67 kg·hm⁻²)。供试肥料为赛固特生物科技有限公司的大量元素水溶肥 (N、P₂O₅、K₂O 质量分数均为 20%), 试验中,对于养分 N、P₂O₅、K₂O 的施入量, F_H 均为 106.00 kg·hm⁻², F_M 均为 70.67 kg·hm⁻², F_L 均为 35.33 kg·hm⁻²。温室中央设置直径 20 cm 标准蒸发皿,测定温室的水面蒸发量,以确定小粒种咖啡灌水量^[21]。定植后从 2017 年 5 月 22 日开始正式灌水,灌水间隔 7 d, 试验期间共灌水 81 次, W_H、W_M 和 W_L 单株总灌水量分别为 224.95、187.46 和 149.97 L (即 3 749.20、3 124.33 和 2 499.47 m³·hm⁻²)。灌溉方式采用地表滴灌,滴头流量 2 L·h⁻¹, 滴头设在树两侧、距离树干基部 0.2 m 处, 间距与树距相同,水表计量控制灌水。水溶肥充分溶解后,随灌溉水通过地表滴头流入小粒种咖啡根区,分 6 次等量施入, F_H、F_M 和 F_L 的单株总施肥量分别是 190.8、127.2 和 63.6 g (即 3 180、2 120 和 1 060 kg·hm⁻²), 施肥日期分别为 2017 年 5 月 22 日、2017 年 9 月 6 日、2017 年 12 月 20 日、2018 年 2 月 28 日、2018 年 5 月 27 日和 2018 年 8 月 12 日。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 土壤环境 滴灌施肥后,于 2018 年 3 月 30 日 (春季)、2018 年 6 月 27 日 (夏季) 和 2018 年 9 月 12 日 (秋季),在东南西北 4 个方向上距小粒种咖啡树干基部约 10 cm 处用土钻取 0~40 cm 深度土样,每隔 10 cm 深取样一次,将 0~40 cm 土样混匀,重复 3 次。采集的混合土样除去石砾和作物根系等杂物后,过 1 mm 筛,一部分自然风干后用于测定土壤养分和酶活性,另一部分保存在 4 ℃ 冰箱中,用于测定土壤微生物数量。土壤硝态氮、速效磷和速效钾含量分别采用紫外可见分光光度计、钼锑抗比色法和火焰光度计测定^[22]; 土壤细菌、真菌和放线菌数量测定分别采用牛肉膏蛋白胨琼脂培养基、马丁氏 (Martin)-孟加拉红培养基和改良高氏一号合成培养基,均以平板表面涂抹法计数^[22]; 土壤脲酶、过氧化氢酶和磷酸酶活性分别采用苯酚钠比色法、高锰酸钾滴定法和磷酸苯二钠比色法^[22] 测定。

1.3.2 干物质量 试验结束后,将小粒种咖啡各器官按根、枝、叶和树干分别收集、装袋,放入烘箱内烘烤,保持 105 ℃ 杀青 30 min 后,调至 80 ℃ 干燥至恒质量,用精度为 0.01 g 的天平称其干物质量。

1.3.3 灌水量及灌溉水分利用效率 灌水量 (*I*) 的确定^[21]:

$$I = K_P \times S \times E_P, \tag{1}$$

式中: *I* 为单株作物耗水量, mL; *K_P* 为作物系数,取 1.0; *S* 为灌溉面积; *E_P* 为 2 次灌水间隔内蒸发皿的蒸发量, mm。

灌溉水分利用效率为总干物质量与总灌水量的比值。

1.4 数据处理

采用 Microsoft Excel 2019 和 Origin Pro 2018 软件进行数据整理、处理和制图,用 SPSS 25.0 统计分析软件进行相关性分析和方差分析 (ANOVA), 多重比较采用 Duncan's 法。

1.5 评价方法

1.5.1 综合评价方法 为了直观分析适度遮阴下不同滴灌施肥处理对土壤质量的影响,将土壤各指标用隶属函数与因子分析结合的方法进行处理,得到土壤质量综合评价指数^[23]。隶属函数计算公式如下:

$$F(X_{ij}) = (X_{ij} - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min}), \tag{2}$$

$$F(X_{ij}) = 1 - (X_{ij} - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min}), \tag{3}$$

式中: *X_{ij}* 为第 *i* 个处理下的第 *j* 个指标; *X_{max}* 和 *X_{min}* 分别为第 *j* 个指标中所有处理下该指标的最大

值和最小值; $F(X_{ij})$ 为第 i 个处理下第 j 个指标的隶属函数值。如果土壤指标与土壤质量指数呈正相关, 使用公式 (2); 反之, 使用公式 (3)。

通过对各项土壤指标进行因子分析, 计算出各项指标公因子方差, 得出权重值^[24], 计算土壤质量指数 (Soil quality index, SQI):

$$SQI = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n F(X_{ij}) \times W(X_{ij}), \quad (4)$$

式中: $W(X_{ij})$ 为第 i 个处理下第 j 个指标的权重; n 为正整数。

1.5.2 TOPSIS 法 TOPSIS 法是一种逼近理想解的排序方法, 它具有适用范围广、可以充分利用原始数据、算法简单且对数据样本量及多指标处理无严格限制等优点^[1]。采用多指标计算出正负理想距离, 并通过对综合指数排序判断各处理的优劣。基本步骤如下:

1) 建立评价对象和评价指标的矩阵 $D = (d_{ij})_{m \times n}$: 本试验评价对象 (m) 为 3×3 个 (灌水水平 $\times$ 施肥水平), 3 个评价指标 (n) 为土壤综合质量、干物质和水分利用效率, d_{ij} 为第 i 个评价对象下的第 j 个评价指标, $m=9, n=3$;

2) 对各指标进行归一化处理, 构建规范决策矩阵 $Z = (z_{ij})_{m \times n}$:

$$z_{ij} = d_{ij} \times \left(\sum_{i=1}^m d_{ij}^2 \right)^{-0.5}, \quad (5)$$

式中: z_{ij} 为归一化处理后的第 i 个评价对象下的第 j 个评价指标, $m=9, n=3$;

3) 评价指标权重确定: 先构建矩阵 $B = Z^T = (z_{ji})_{n \times m}$, 再求权重 w_j :

$$w_j = \sum_{i=1}^m \left(b_{ji} / \sum_{k=1}^n b_{ki} \right) \left(\sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^m \frac{b_{ji}}{\sum_{k=1}^n b_{ki}} \right)^{-1}, \quad (6)$$

式中: B, Z^T 是规范决策矩阵 Z 的转置矩阵, b_{ji} 和 b_{ki} 是对应矩阵 B 中的元素, 其分别是第 j 和第 k 个评价指标中的第 i 个评价对象。 k 是 n 个评价指标中的第 k 个评价指标;

4) 确定加权矩阵 Z' :

$$Z' = w_j \cdot z_{ij}; \quad (7)$$

5) 确定正、负理想解:

$$\begin{aligned} z_j^+ &= \max_{1 \leq j \leq m} (z_{1j}, z_{2j}, \dots, z_{nj}), \\ z_j^- &= \min_{1 \leq j \leq m} (z_{1j}, z_{2j}, \dots, z_{nj}); \end{aligned} \quad (8)$$

式中: z_j^+, z_j^- 分别是加权矩阵 Z' 第 j 列正、负理想解。

6) 确定评价指标与正、负理想解的距离 D_i^+ 和 D_i^- :

$$\begin{aligned} D_i^+ &= \sqrt{\sum_{j=1}^m (z'_{ij} - z_j^+)^2}, \\ D_i^- &= \sqrt{\sum_{j=1}^m (z'_{ij} - z_j^-)^2}; \end{aligned} \quad (9)$$

7) 确定各项评价指标与最优方案的接近度 C_i , C_i 值越大表明其接近度越好。

$$C_i = \frac{D_i^-}{D_i^+ + D_i^-}; \quad 0 \leq C_i \leq 1. \quad (10)$$

2 结果与分析

2.1 滴灌施肥对小粒种咖啡根区土壤养分的影响

单因素方差分析结果 (表 1) 表明, 除灌水水平对土壤硝态氮季均值影响不显著 ($P>0.05$) 外, 施肥水平和灌水水平对土壤硝态氮、速效磷、速效钾含量影响极显著 ($P<0.01$)。二因素交互作用对夏季和秋季的硝态氮、春季的速效钾含量影响极显著 ($P<0.01$), 对春季的速效磷、夏季和秋季的速效钾含量影响显著 ($P<0.05$)。由表 1 可知, 土壤硝态氮和速效磷含量排序为: 春季>秋季>夏季, 速效钾含量排序基本为: 秋季>春季>夏季。与 W_L 相比, W_M 减少硝态氮季均值的影响不明显, W_M 分别减少速效磷和速效钾季均值 11.73% 和 24.14%, W_H 分别减少硝态氮、速效磷和速效钾季均值 16.05%、28.45% 和 40.40%。与 F_L 相比, F_M 分别增加硝态氮和速效钾季均值 36.49% 和 25.50%, 但 F_M 增加速效磷季均值不明显, F_H 分别增加硝态氮、速效磷和速效钾季均值 64.88%、186.01% 和 41.59%。硝态氮、速效磷和速效钾季均值在 $F_H W_L$ 时达到最大值, 分别为 78.97、33.25 和 174.55 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 与 $F_L W_L$ 相比分别增加 72.61%、154.01% 和 7.37%。因此, 硝态氮、速效磷和速效钾含量随灌水量增加而减少, 随施肥量增加而增加。

2.2 滴灌施肥对小粒种咖啡根区土壤微生物数量的影响

单因素方差分析结果 (表 2) 表明, 施肥水平和灌水水平对土壤细菌、真菌和放线菌数量 (季均值除外) 均影响极显著 ($P<0.01$), 二因素交互作用对春季细菌数量影响显著 ($P<0.05$)。由表 2 可知, 细菌和放线菌数量夏季最多, 春季次之, 秋季最少; 真菌数量秋季最多, 春季次之, 夏季最少。细菌、真菌和放线菌数量随灌水量的增加而增加, 与 W_L 相比, 其余灌水水平的细菌、真菌和放线菌数量季均值分别增加 25.20%~49.04%、14.14%~27.71% 和 10.14%~18.94%。细菌、真菌和放线菌数量随施肥

表 1 滴灌施肥下小粒种咖啡根区土壤养分的季节变化¹⁾

Table 1 Seasonal changes of soil nutrients in root zone of *Coffea arabica* under drip fertigation

施肥水平 Fertilizer level	灌溉水平 Irrigation level	硝态氮 Nitrate nitrogen				速效磷 Available phosphorus				速效钾 Available potassium			
		春季 Spring	夏季 Summer	秋季 Autumn	季均值 Season average	春季 Spring	夏季 Summer	秋季 Autumn	季均值 Season average	春季 Spring	夏季 Summer	秋季 Autumn	季均值 Season average
F _L	W _L	54.63±2.48e	37.85±3.11f	44.76±2.59f	45.75±8.43b	15.88±1.57cd	11.05±0.83d	12.33±1.46de	13.09±2.50c	120.92±4.53d	122.32±3.07c	137.98±2.18c	127.07±9.47c
	W _M	50.87±4.91e	38.83±2.43f	41.08±2.03g	43.60±6.39b	13.61±0.98e	9.15±0.71d	10.55±0.96e	11.10±2.28cde	99.96±3.55ef	83.88±2.90f	93.17±2.22f	92.34±8.07e
	W _H	43.62±4.07f	39.85±1.91h	36.08±1.69h	39.85±3.77b	9.79±1.03f	6.06±0.38e	7.85±0.81f	7.90±1.87de	73.52±2.88g	67.89±1.43g	80.02±5.09g	73.81±6.07f
F _M	W _L	77.45±1.81c	40.85±3.06c	67.67±2.63cd	61.99±18.95ab	17.50±0.58c	11.28±0.53d	13.56±1.65d	14.11±3.15c	158.39±5.90b	145.97±3.01b	162.21±2.73b	155.52±8.49b
	W _M	75.74±4.01c	41.85±1.40d	64.24±1.67d	60.61±17.23ab	14.25±1.16de	10.06±0.71d	11.28±0.78de	11.86±2.16cd	129.10±3.09c	111.65±2.43d	125.05±2.39d	121.93±9.13c
	W _H	63.97±3.76d	42.85±3.56c	54.41±2.06e	53.74±10.58ab	8.64±0.44f	5.61±0.36e	7.42±0.63f	7.22±1.52e	96.56±1.99f	82.54±1.32f	92.55±4.08f	90.55±7.22e
F _H	W _L	99.13±5.33a	43.85±2.58a	93.92±2.53a	78.97±30.52a	35.03±1.53a	31.60±2.53a	33.12±1.88a	33.25±1.72a	175.65±6.09a	167.45±7.38a	180.54±3.66a	174.55±6.61a
	W _M	88.88±2.56b	44.85±3.60b	78.98±1.98b	70.90±23.1ab	32.41±1.45b	28.50±1.55b	30.29±1.62b	30.40±1.96ab	135.44±4.35c	125.54±3.75c	136.58±1.59c	132.52±6.07c
	W _H	75.27±3.13c	45.85±1.34cd	68.34±1.76c	63.15±15.38ab	30.91±1.63b	25.83±1.84c	27.66±1.10c	28.13±2.57b	106.54±3.37e	102.54±2.25e	115.25±3.33e	108.11±6.50d
P	F	<0.01**	<0.01**	<0.01**	<0.01**	<0.01**	<0.01**	<0.01**	<0.01**	<0.01**	<0.01**	<0.01**	<0.01**
	W	<0.01**	<0.01**	<0.01**	0.47	<0.01**	<0.01**	<0.01**	<0.01**	<0.01**	<0.01**	<0.01**	<0.01**
	F×W	0.06	<0.01**	<0.01**	0.99	0.03*	0.66	0.78	0.90	<0.01**	0.02*	0.01*	0.44

1)同列数据后的不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$, Duncan's法); “*”和“**”分别表示在 $P<0.05$ 和 $P<0.01$ 水平差异显著(单因素方差分析方法)

1)Different lowercase letters in the same column indicate significant differences among different treatments ($P<0.05$, Duncan's method); “*” and “**” indicate significant differences at $P<0.05$ and $P<0.01$ levels respectively (One-way ANOVA test)

表 2 滴灌施肥下小粒种咖啡根区土壤微生物数量的季节变化¹⁾

Table 2 Seasonal changes of soil microbial quantity in root zone of *Coffea arabica* under drip fertigation

施肥水平 Fertilizer level	灌溉水平 Irrigation level	细菌($\times 10^7$ CFU·g ⁻¹) Bacteria				真菌($\times 10^3$ CFU·g ⁻¹) Fungi				放线菌($\times 10^3$ CFU·g ⁻¹) Actinomycetes			
		春季 Spring	夏季 Summer	秋季 Autumn	季均值 Season average	春季 Spring	夏季 Summer	秋季 Autumn	季均值 Season average	春季 Spring	夏季 Summer	秋季 Autumn	季均值 Season average
F _L	W _L	3.64±0.44e	4.27±0.29g	1.72±0.35e	3.21±1.33c	5.61±0.30e	4.49±0.26e	9.35±0.27e	6.48±2.54a	9.57±0.08f	11.38±0.42e	7.57±0.17e	9.51±1.91b
	W _M	4.65±0.10d	5.46±0.34d	2.55±0.33d	4.22±1.50bc	6.42±0.33d	5.46±0.39d	10.49±0.18d	7.46±2.67a	10.77±0.15d	12.51±0.21d	8.51±0.23d	10.60±2.01ab
	W _H	5.55±0.11c	6.52±0.45c	3.59±0.22c	5.22±1.49abc	7.52±0.28c	6.47±0.48c	11.49±0.45c	8.49±2.65a	11.56±0.20c	13.53±0.36c	9.38±0.21c	11.49±2.07ab
F _M	W _L	5.35±0.09c	6.45±0.32c	3.52±0.22c	5.11±1.48abc	7.32±0.30c	6.31±0.15c	11.42±0.13c	8.35±2.71a	11.36±0.24c	13.37±0.41c	9.73±0.33c	11.49±1.82ab
	W _M	6.89±0.05b	7.41±0.35b	4.69±0.18b	6.33±1.44ab	8.32±0.12b	7.52±0.44b	12.49±0.25b	9.44±2.67a	12.71±0.25b	14.37±0.42b	10.56±0.25b	12.55±1.91ab
	W _H	7.42±0.36a	8.50±0.35a	5.45±0.30a	7.12±1.55a	9.47±0.17a	8.50±0.28a	13.47±0.14a	10.48±2.63a	13.48±0.24a	15.30±0.15a	11.57±0.20a	13.45±1.87a
F _H	W _L	4.48±0.13d	5.63±0.41d	2.44±0.20d	4.18±1.62bc	6.26±0.12d	5.44±0.25d	10.61±0.20d	7.44±2.78a	10.50±0.15de	12.62±0.22d	8.58±0.27d	10.57±2.02ab
	W _M	5.30±0.10c	6.35±0.38c	3.64±0.12c	5.10±1.37abc	7.63±0.17c	6.55±0.24c	11.38±0.31c	8.52±2.53a	11.57±0.40c	13.66±0.27c	9.64±0.27c	11.62±2.01ab
	W _H	6.69±0.27b	7.62±0.18b	4.57±0.34b	6.29±1.56ab	8.55±0.12b	7.33±0.27b	12.53±0.20b	9.47±2.72a	12.72±0.20b	14.50±0.33a	10.60±0.20b	12.61±1.95ab
P	F	<0.01**	<0.01**	<0.01**	0.04*	<0.01**	<0.01**	<0.01**	0.32	<0.01**	<0.01**	<0.01**	0.13
	W	<0.01**	<0.01**	<0.01**	0.03*	<0.01**	<0.01**	<0.01**	0.28	<0.01**	<0.01**	<0.01**	0.12
	F×W	0.03*	0.84	0.67	1.00	0.32	0.89	0.78	1.00	0.60	0.96	0.91	1.00

1)同列数据后的不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$, Duncan's法); “*”和“**”分别表示在 $P<0.05$ 和 $P<0.01$ 水平差异显著(单因素方差分析方法)

1)Different lowercase letters in the same column indicate significant differences among different treatments ($P<0.05$, Duncan's method); “*” and “**” indicate significant differences at $P<0.05$ and $P<0.01$ levels respectively (One-way ANOVA test)

量增加呈先增后减的趋势,与 F_L 相比,其余施肥水平的细菌、真菌和放线菌数量季均值分别增加 23.08%~46.72%、13.37%~26.04% 和 10.13%~18.64%。土壤细菌、真菌和放线菌数量季均值在 F_MW_H 处理时达到最大值,分别为 7.12×10^7 、 10.48×10^3 和 13.45×10^5 CFU·g⁻¹,与 F_LW_L 处理相比分别增加了 121.81%、61.73% 和 41.43%。

2.3 滴灌施肥对小粒种咖啡根区土壤酶活性的影响

单因素方差分析结果(表 3)表明,除施肥水平和灌水水平对土壤磷酸酶活性季均值、灌水水平对秋季的过氧化氢酶活性及过氧化氢酶活性季均值

影响不显著($P>0.05$)外,施肥水平和灌水水平对脲酶、过氧化氢酶和磷酸酶活性均影响显著($P<0.05$)。由表 3 可知,脲酶和磷酸酶活性:秋季>春季>夏季;各施肥水平的过氧化氢酶活性: F_L 处理为春季>秋季>夏季、 F_M 处理为春季>夏季>秋季、 F_H 处理为秋季>春季>夏季。脲酶、过氧化氢酶和磷酸酶活性随灌水量增加而增加,与 W_L 相比,其余灌水水平的脲酶、过氧化氢酶和磷酸酶活性季均值分别增加 6.67%~14.29%、1.74%~3.04% 和 5.02%~9.19%。脲酶、过氧化氢酶(秋季除外)和磷酸酶活性随施肥量的增加呈先增后减的趋势,与 F_L 相比,其余施肥水平的脲酶、过氧化氢酶和磷酸

表 3 滴灌施肥下小粒种咖啡根区土壤酶活性季节变化¹⁾

Table 3 Seasonal changes of soil enzyme activity in root zone of <i>Coffea arabica</i> under drip fertigation						mg·g ⁻¹ ·d ⁻¹	
施肥水平 Fertilizer level	灌水水平 Irrigation level	脲酶 Urease				过氧化氢酶 Catalase	
		春季 Spring	夏季 Summer	秋季 Autumn	季均值 Season average	春季 Spring	夏季 Summer
F_L	W_L	0.30±0.02g	0.29±0.01e	0.32±0.01g	0.30±0.02f	1.37±0.03e	1.12±0.02g
	W_M	0.33±0.01f	0.32±0.01d	0.35±0.01f	0.33±0.02e	1.38±0.01e	1.16±0.01f
	W_H	0.36±0.01e	0.34±0.01c	0.37±0.01e	0.36±0.02de	1.39±0.02e	1.19±0.01e
F_M	W_L	0.39±0.01cd	0.36±0.01c	0.39±0.01d	0.38±0.02cd	1.94±0.02b	1.74±0.01b
	W_M	0.41±0.01b	0.40±0.01ab	0.42±0.01b	0.41±0.01ab	1.96±0.02ab	1.77±0.01a
	W_H	0.44±0.01a	0.42±0.02a	0.45±0.02a	0.44±0.02a	1.98±0.02a	1.79±0.02a
F_H	W_L	0.37±0.02de	0.36±0.02c	0.39±0.01de	0.37±0.02d	1.63±0.03d	1.44±0.02d
	W_M	0.39±0.01cd	0.36±0.03c	0.40±0.01cd	0.38±0.02bcd	1.67±0.01c	1.46±0.02d
	W_H	0.40±0.02bc	0.39±0.01b	0.42±0.01bc	0.40±0.02bc	1.68±0.01c	1.49±0.02c
P	F	<0.01**	<0.01**	<0.01**	<0.01**	<0.01**	<0.01**
	W	<0.01**	<0.01**	<0.01**	<0.01**	<0.01**	<0.01**
	F×W	0.41	0.25	0.12	0.59	0.59	0.42

施肥水平 Fertilizer level	灌水水平 Irrigation level	过氧化氢酶 Catalase		磷酸酶 Phosphatase			
		秋季 Autumn	季均值 Season average	春季 Spring	夏季 Summer	秋季 Autumn	季均值 Season average
F_L	W_L	1.24±0.01c	1.24±0.13b	75.73±2.15g	56.33±4.90f	84.56±2.42e	72.21±14.44a
	W_M	1.26±0.01c	1.27±0.11b	80.04±2.26f	59.04±2.72ef	88.88±3.89de	75.99±15.33a
	W_H	1.28±0.02c	1.29±0.10b	83.52±0.91de	62.39±1.21cde	92.39±1.82cd	79.43±15.41a
F_M	W_L	1.55±0.01b	1.74±0.20a	84.81±1.04cde	63.44±1.29cde	93.16±3.11cd	80.47±15.33a
	W_M	1.56±0.01b	1.76±0.20a	88.17±0.41b	67.20±2.49bc	99.78±3.37ab	85.05±16.51a
	W_H	1.55±0.14b	1.77±0.22a	91.53±0.89a	72.70±2.21a	101.25±4.22a	88.49±14.52a
F_H	W_L	1.83±0.02a	1.63±0.20a	82.76±2.33ef	61.77±2.81de	91.77±1.99cd	78.77±15.39a
	W_M	1.86±0.02a	1.66±0.20a	85.92±2.54bcd	65.26±1.30bcd	94.90±1.63bc	82.03±15.20a
	W_H	1.89±0.01a	1.69±0.20a	87.68±1.08bc	68.28±2.46ab	98.42±1.55ab	84.79±15.28a
P	F	<0.01**	<0.01**	<0.01**	<0.01**	<0.01**	0.474
	W	0.35	0.88	<0.01**	<0.01**	<0.01**	0.620
	F×W	0.87	1.00	0.67	0.82	0.86	1.00

1)同列数据后的不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$, Duncan's法); “*” 和 “**” 分别表示在 $P<0.05$ 和 $P<0.01$ 水平差异显著(单因素方差分析方法)

1)Different lowercase letters in the same column indicate significant differences among different treatments ($P<0.05$, Duncan's method); “*” and “**” indicate significant differences at $P<0.05$ and $P<0.01$ levels respectively (One-way ANOVA test)

酶活性季均值分别增加 16.16%~24.24%、31.05%~38.68% 和 7.89%~11.59%。脲酶、过氧化氢酶和磷酸酶活性季均值在 F_MW_H 处理时达到最大值, 分别是 0.44、1.77 和 88.49 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$, 与 F_LW_L 处理相比分别增加 46.67%、42.74% 和 22.55%。

2.4 土壤养分含量、微生物数量和酶活性的相关性分析

由表 4 可知, 土壤硝态氮含量及土壤细菌、真菌和放线菌数量与过氧化氢酶活性呈显著正相关 ($P<0.05$), 土壤细菌、真菌和放线菌数量分别与脲酶

和磷酸酶活性呈极显著正相关 ($P<0.01$)。表明小粒种咖啡根区土壤微生物的生命活动与土壤酶活性之间存在着密切的联系。

2.5 滴灌施肥对小粒种咖啡根区土壤质量的影响

由图 1 可知, 遮阴下不同滴灌施肥处理的土壤质量指数从大到小排序依次为: F_MW_H 、 F_HW_H 、 F_MW_M 、 F_HW_M 、 F_HW_L 、 F_MW_L 、 F_LW_H 、 F_LW_M 和 F_LW_L 。说明适量增加灌水量和施肥量能有效提高土壤质量, 其中以 F_MW_H 处理的效果最佳, 土壤质量指数最高 (0.75)。

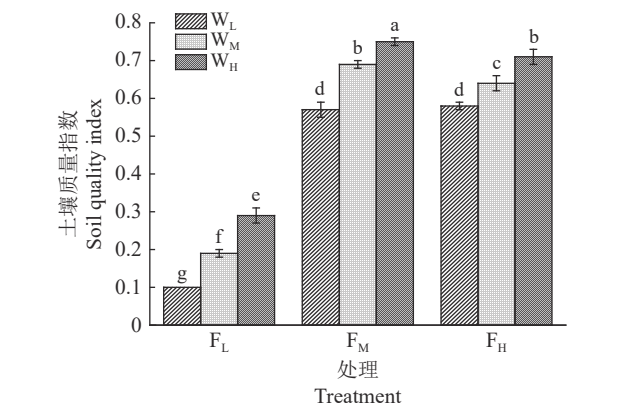
表 4 土壤养分含量、微生物数量和酶活性的相关性分析¹⁾

Table 4 Correlation analysis of soil nutrient content and microbial quantity and enzyme activity

项目 Item	硝态氮 Nitrate nitrogen	速效磷 Available phosphorus	速效钾 Available potassium	细菌 Bacteria	真菌 Fungi	放线菌 Actinomycetes	脲酶 Urease	过氧化 氢酶 Catalase	磷酸酶 Phosphatase
硝态氮 Nitrate nitrogen	1.00								
速效磷 Available phosphorus	0.84**	1.00							
速效钾 Available potassium	0.79*	0.63	1.00						
细菌 Bacteria	0.12	-0.17	-0.36	1.00					
真菌 Fungi	0.13	-0.16	-0.37	0.99**	1.00				
放线菌 Actinomycetes	0.16	-0.13	-0.34	0.99**	0.99**	1.00			
脲酶 Urease	0.40	0.04	-0.07	0.94**	0.95**	0.95**	1.00		
过氧化氢酶 Catalase	0.71*	0.31	0.38	0.71*	0.71*	0.73*	0.87**	1.00	
磷酸酶 Phosphatase	0.33	0.02	-0.19	0.97**	0.98**	0.98**	0.99**	0.83**	1.00

1) “*” 和 “**” 分别表示达0.05和0.01水平的显著相关(双尾检测)

1) “*” and “**” indicate significant correlation at 0.05 and 0.01 levels, respectively (Double tail detection)



柱子上的不同小写字母表示处理间差异显著 ($P<0.05$, Duncan's 法)

Different lowercase letters on the columns indicate significant differences among different treatments($P<0.05$, Duncan's test)

图 1 滴灌施肥下小粒种咖啡根区土壤质量指数

Fig. 1 Soil quality index of *Coffea arabica* root zone under drip fertigation

2.6 滴灌施肥对小粒种咖啡干物质累积及灌溉水分利用效率的影响

单因素方差分析结果(表 5)表明, 施肥水平对根、枝、树干、总干物质质量及灌溉水分利用效率影响显著 ($P<0.05$), 灌水水平对根、树干、总干物质质量及

灌溉水分利用效率影响显著 ($P<0.05$)。由表 5 可知, 与 W_L 相比, 增加灌水量, 根、枝、叶、树干和总干物质质量分别增加 4.51%~8.61%、7.71%~18.67%、5.00%~8.87%、8.80%~13.74% 和 6.04%~11.24%, 而灌溉水分利用效率减少 15.22%~25.88%。总干物质质量和灌溉水分利用效率随施肥量增加呈先增后减的趋势。与 F_L 相比, 增加施肥量, 根、枝、叶、树干、总干物质质量和灌溉水分利用效率分别增加 3.97%~15.71%、23.88%~30.69%、1.47%~13.39%、0.14%~19.69%、5.00%~17.75% 和 5.20%~17.90%。 F_MW_H 处理的根、枝、叶、树干和总干物质质量最大, F_MW_L 处理的灌溉水分利用效率最大, 与 F_LW_L 处理相比, 分别增加 26.53%、59.65%、24.80%、36.82、32.34% 和 18.80%。

2.7 基于 TOPSIS 法的滴灌施肥方案的综合评价

采用基于土壤质量、干物质质量和灌溉水分利用效率的 TOPSIS 法对不同施肥水平、灌水水平各处理进行综合分析评价, 结果列于表 6, 接近度 C_i 值越大表示各指标综合评价越理想。由表 6 可知, 各处理接近度 C_i 值由高到低依次是: F_MW_M 、 F_MW_H 、

表 5 滴灌施肥对小粒种咖啡干物质累积及灌溉水分利用效率的影响¹⁾

Table 5 Effects of drip fertigation on dry mass accumulation and irrigation water use efficiency of <i>Coffea arabica</i>							
施肥水平 Fertilizer level	灌水水平 Irrigation level	干物质量/(kg·hm ⁻²) Dry mass					灌溉水分利用效率/(kg·m ⁻³) Irrigation water use efficiency
		根 Root	枝 Branch	叶 Leaf	树干 Trunk	总干物质量 Total dry mass	
F _L	W _L	8 083.33± 159.00d	3 733.67± 882.33b	10 884.17± 1 886.17a	6 022.17± 570.17d	28 723.33± 2 532.67d	3.83±0.10c
	W _M	8 461.00± 547.83cd	4 207.83± 797.00ab	11 658.83± 2 495.33a	6 533.50± 540.33cd	30 861.17± 2 201.00cd	3.29±0.09d
	W _H	8 917.17± 557.00bcd	4 822.00± 1 694.33ab	11 960.67± 2 049.83a	6 667.00± 606.17cd	32 366.83± 434.33bcd	2.88±0.10e
F _M	W _L	9 411.50± 885.67abc	5 210.17± 390.67ab	12 471.83± 1 042.50a	7 000.83± 687.33bc	34 094.33± 2 868.67abc	4.55±0.09a
	W _M	9 822.33± 497.83abc	5 510.00± 698.00ab	13 067.00± 2 035.67a	7 768.00± 404.17ab	36 167.33± 2 203.67ab	3.86±0.10bc
	W _H	10 228.00± 621.50a	5 960.83± 1 131.33a	13 583.33± 2 441.67a	8 239.33± 178.17a	38 011.50± 3 031.83a	3.38±0.17d
F _H	W _L	8 501.17± 682.5cd	4 922.50± 516.83ab	11 254.83± 2 224.17a	6 038.50± 550.33d	30 717.00± 2 658.33cd	4.10±0.12b
	W _M	8 884.17± 732.83bcd	5 217.00± 1 020.83ab	11 616.67± 1 696.67a	6 438.00± 305.67cd	32 155.83± 1 265.33bcd	3.43±0.15d
	W _H	9 087.83± 315.00bcd	5 672.33± 1 350.00ab	12 138.33± 1 274.83a	6 773.50± 419.50cd	33 672.00± 2 029.83bc	2.99±0.11e
P	F	<0.01**	0.04*	0.22	<0.01**	<0.01**	<0.01**
	W	0.05*	0.22	0.55	<0.01**	0.02*	<0.01**
	F×W	0.99	1.00	1.00	0.85	1.00	0.69

1) 同列数据后的不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$, Duncan's法); “*” 和 “**” 分别表示在 $P<0.05$ 和 $P<0.01$ 水平差异显著(单因素方差分析方法)

1) Different lowercase letters in the same column indicate significant differences among different treatments ($P<0.05$, Duncan's method); “*” and “**” indicate significant differences at $P<0.05$ and $P<0.01$ levels respectively (One-way ANOVA test)

表 6 小粒种咖啡不同滴灌施肥方案的 TOPSIS 综合分析

Table 6 TOPSIS comprehensive analysis of different drip fertigation schemes for <i>Coffea arabica</i>									
施肥水平 Fertilizer level	灌水水平 Irrigation level	评价指标加权归一化 Weighted normalization of evaluation index			正负理想解距离 Positive and negative ideal solution distance		接近度 Proximity (C_i)	排名 Ranking	
		土壤质量 Soil quality	干物质量 Dry matter	灌溉水分利用效率 Irrigation water use efficiency	D_i^+	D_i^-			
F _L	W _L	0.016	0.102	0.121	0.125	0.027	0.176	9	
	W _M	0.034	0.110	0.108	0.109	0.024	0.180	8	
	W _H	0.052	0.115	0.095	0.098	0.038	0.281	7	
F _M	W _L	0.102	0.121	0.144	0.035	0.100	0.742	3	
	W _M	0.123	0.128	0.127	0.022	0.114	0.841	1	
	W _H	0.134	0.135	0.111	0.033	0.124	0.790	2	
F _H	W _L	0.104	0.109	0.130	0.042	0.095	0.691	6	
	W _M	0.113	0.114	0.113	0.043	0.099	0.698	5	
	W _H	0.127	0.119	0.098	0.049	0.113	0.699	4	
权重 Weight		0.295 8	0.352 2	0.352 0					
正理想解 Positive ideal solution		0.134	0.135	0.144					
负理想解 Negative ideal solution		0.016	0.102	0.095					

$F_M W_L$ 、 $F_H W_H$ 、 $F_H W_M$ 、 $F_H W_L$ 、 $F_L W_H$ 、 $F_L W_M$ 和 $F_L W_L$, 其中最优组合是 $F_M W_M(0.841)$, 其次是 $F_M W_H(0.790)$ 。

3 讨论与结论

遮阴下不同灌水水平和施肥水平对土壤养分有效性影响不同, 有效养分含量的高低决定了作物生长的状况^[25-26]。本研究发现, 土壤速效养分含量随灌水量的增加而减少, 主要是增加灌水量缓解水分胁迫对小粒种咖啡的影响, 促进根系对土壤养分的吸收^[4]。土壤速效养分随施肥量的增加而增加, 这与文献^[27]的研究结论(施肥提高土壤速效养分累积量, 促进作物根系分泌物的释放, 提升土壤有机养分含量, 从而提升土壤肥力, 为作物的生长提供充足的养分基础)相一致。

土壤微生物对作物的生长发育至关重要, 同时也是影响土壤环境质量的重要因子, 其繁殖受制于土壤水分和养分状况^[28-29]。本研究发现, 遮阴下灌水水平和施肥水平对土壤微生物(细菌、真菌和放线菌)数量影响显著, 这是由于滴灌可改善土壤结构, 提高土壤有效水量, 促使肥料营养元素矿化和土壤矿质养分扩散运输, 为根区土壤微生物快速繁殖提供良好条件, 从而改善了土壤综合质量^[17]。本研究还发现, F_M 处理的土壤微生物数量大于 F_H 处理, 这主要与过量施肥易使土壤 pH 降低, 破坏土壤结构, 降低土壤碳氮比和土壤养分有效性有关^[30-31]。

土壤酶活性是评价土壤综合质量的重要指标, 且对水肥响应较敏感^[32]。本研究发现, 遮阴下灌水水平和施肥水平对土壤脲酶、过氧化氢酶(除秋季)、磷酸酶活性影响显著。这是由于灌水使土壤含水率增加, 进而使土壤酶(脲酶、过氧化氢酶和磷酸酶)活性提高^[33]。而施肥提高了土壤无机养分含量, 为土壤微生物的生命活动和作物根系呼吸提供了充足的底物, 使土壤酶积极参与其生化反应。有研究表明, 过量施肥会改变土壤理化性质, 破坏土壤通气性, 使土壤氧气含量降低, 抑制土壤呼吸, 而土壤中 90% 的土壤酶来自根系分泌物^[34], 导致土壤酶活性受到一定程度的抑制, 这与本研究中 F_H 处理降低土壤酶活性的结果一致。

土壤养分、微生物数量及酶活性是影响土壤质量的重要因子^[25, 28, 32]。本研究对遮阴下土壤质量指标进行相关性分析, 结果表明土壤养分、微生物数量和酶活性之间存在一定的相关性, 其中硝态氮与

过氧化氢酶呈显著正相关, 说明合理增加施肥量可提高过氧化氢酶活性, 促进过氧化氢水解反应, 防止过氧化氢对小粒种咖啡根系的毒害作用, 提升土壤自净能力。土壤微生物数量和酶活性呈显著或极显著正相关, 说明土壤微生物繁殖与土壤酶活性具有相互促进关系, 对改善土壤质量具有积极的效应^[35]。由于相关性分析只能分析土壤质量指标之间的相互关系, 无法得出土壤质量最佳的滴灌施肥模式, 为了探究遮阴下滴灌施肥对小粒种咖啡土壤质量的最佳滴灌施肥模式, 本研究运用隶属函数结合因子分析的方法对土壤养分、微生物数量及酶活性进行综合评价, 结果表明 $F_M W_H$ 处理最佳, 说明 $F_M W_H$ 处理的水肥一体化模式对土壤质量的改善具有良好的效果。

灌水和施肥是影响作物生长的 2 个重要因素^[7, 36-37], 通过影响土壤理化性状、养分含量、微生物数量及酶活性等, 以及各指标相互影响、制约和促进, 进而协调作物生长发育^[38-39]。本研究发现, 在遮阴下的相同灌水水平, 小粒种咖啡干物质累积量和灌溉水分利用效率均随施肥量的增加呈先增加后减少的趋势, 表明在一定范围内, 适量施肥可以提高土壤有效养分含量, 增加干物质累积量, 而过量施肥对小粒种咖啡干物质累积有一定抑制作用, 这与前人的研究结果基本相似^[6, 36]。小粒种咖啡干物质累积量随灌水量增加而增加, 而灌溉水分利用效率随灌水量增加而减少, 其中 W_H 处理的小粒种咖啡干物质累积量最高, 而 W_L 处理的灌溉水分利用效率最高。说明增加灌水量虽然促进小粒种咖啡生长及各器官有机物质累积, 但会降低灌溉水分利用效率。

$F_M W_H$ 处理的土壤质量和干物质量最佳, 但无法保证灌溉水分利用效率最高。本研究运用 TOPSIS 法对土壤质量、小粒种咖啡干物质量和灌溉水分利用效率这 3 个指标进行综合评价, 结果表明 $F_M W_M$ 处理的综合效益最优。 $F_M W_M$ 处理既能保证土壤质量, 又能促进小粒种咖啡生长和提高灌溉水分利用效率, 为最优的滴灌施肥模式。后期可对不同滴灌施肥模式下土壤微生物群落多样性开展研究, 进一步揭示小粒种咖啡水肥高效利用的生物学机理。

本研究通过试验得出如下结论:

1) 遮阴下灌水水平和施肥水平对小粒种咖啡根区土壤养分、微生物数量、酶活性影响显著 ($P < 0.05$)。 $F_H W_L$ 处理的硝态氮、速效磷和速效钾季均

值最高; $F_M W_H$ 处理的土壤微生物数量和酶活性季均值最高。硝态氮与过氧化氢酶活性存在显著正相关关系 ($P < 0.05$), 细菌、真菌和放线菌数量分别与脲酶和磷酸酶极显著正相关 ($P < 0.01$), 与过氧化氢酶存在显著 ($P < 0.05$) 正相关关系。隶属函数结合因子分析的方法表明, $F_M W_H$ 处理的土壤质量指数 (0.75) 最高。

2) 遮阴下灌水水平和施肥水平对小粒种咖啡根、树干、总干物质量和灌溉水分利用效率影响显著 ($P < 0.05$) 或极显著 ($P < 0.01$)。 $F_M W_H$ 处理的总干物质量 ($38\ 011.50\ \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) 最大, $F_M W_L$ 处理的灌溉水分利用效率 ($4.55\ \text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$) 最大。

3) TOPSIS 法综合评价结果表明, $F_M W_M$ 处理的接近度 C_i (0.841) 最优, 该灌溉水肥处理能协同提高土壤质量、干物质累积和灌溉水分利用效率, 实现绿色生态和节水减肥的目标。因此, $F_M W_M$ 组合为 30% 遮阴度下小粒种咖啡的最佳水肥耦合模式。

参考文献:

- [1] 郝琨, 费良军, 刘小刚, 等. 香蕉树中度荫蔽下充分灌水提高干热区咖啡产量及品质[J]. *农业工程学报*, 2019, 35(12): 72-80.
- [2] 彭有亮, 刘小刚, 韩志慧, 等. 不同蓖麻荫蔽模式下亏缺灌溉对小粒咖啡生长及土壤微生物数量的影响[J]. *生态学杂志*, 2019, 38(10): 2968-2974.
- [3] CAO X, YANG P, ENGEL B A, et al. The effects of rainfall and irrigation on cherry root water uptake under drip irrigation[J]. *Agricultural Water Management*, 2018, 197: 9-18.
- [4] 刘小刚, 张岩, 程金焕, 等. 水氮耦合下小粒咖啡幼树生理特性与水氮利用效率[J]. *农业机械学报*, 2014, 45(8): 160-166.
- [5] 李欢欢, 刘浩, 庞婕, 等. 水氮互作对盆栽番茄生长发育和养分累积的影响[J]. *农业机械学报*, 2019, 50(9): 272-279.
- [6] NISHA S K, SREELATHAKUMARY I. Growth and yield of watermelon *Citrullus lanatus* (Thunb.) with different levels of fertigation and drip irrigation[J]. *Journal of Krishi Vigyan*, 2020, 8(2): 157.
- [7] 王同顺, 孙保平, 冯磊, 等. 不同水分处理对甘蒙怪柳幼苗根系生长特性的影响[J]. *生态学杂志*, 2013, 32(3): 591-596.
- [8] 王伟华, 刘毅, 唐海明, 等. 长期施肥对稻田土壤微生物量、群落结构和活性的影响[J]. *环境科学*, 2018, 39(1): 430-437.
- [9] 陆太伟, 蔡岸冬, 徐明岗, 等. 施用有机肥提升不同土壤团聚体有机碳含量的差异性[J]. *农业环境科学学报*, 2018, 37(10): 2183-2193.
- [10] SAINJU U M. Improving nitrogen balance with irrigation practice and cropping system[J]. *Journal of Soil & Water Conservation*, 2019, 74(16): 622-631.
- [11] TIAN Z, LIU X, GU S, et al. Postponed and reduced basal nitrogen application improves nitrogen use efficiency and plant growth of winter wheat[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2018, 17(12): 2648-2661.
- [12] 赵青云, 邢诒彰, 林兴军, 等. 施用咖啡果皮对咖啡幼苗生长及土壤理化性状的影响[J]. *热带农业科学*, 2017, 37(8): 54-59.
- [13] 赵青云, 邢诒彰, 孙燕, 等. 施用土壤调节剂对咖啡苗生长及连作酸化土壤酶活性的影响[J]. *热带作物学报*, 2017, 38(10): 1868-1873.
- [14] MARJERISON R D, MELKONIAN J, HUTSON J L, et al. Drainage and nitrate leaching from artificially drained maize fields simulated by the precision nitrogen management model[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2016, 45(6): 2044-2052.
- [15] 章宇阳, 刘小刚, 余宁, 等. 不同遮荫条件下施肥量对西南干热区小粒咖啡产量和肥料利用的影响[J]. *应用生态学报*, 2020, 31(2): 515-523.
- [16] 刘小刚, 郝琨, 韩志慧, 等. 水氮耦合对干热区小粒咖啡产量和品质的影响[J]. *农业机械学报*, 2016, 47(2): 143-150.
- [17] 郝琨, 刘小刚, 张岩, 等. 干旱胁迫-复水与氮肥耦合对小粒咖啡生长和水氮生产力的影响[J]. *应用生态学报*, 2017, 28(12): 4034-4042.
- [18] 郝琨, 刘小刚, 韩志慧, 等. 周期性亏缺复水灌溉与氮肥耦合对小粒咖啡生长及光合特性的影响[J]. *排灌机械工程学报*, 2017, 35(7): 616-626.
- [19] 刘小刚, 李义林, 齐韵涛, 等. 干热区小粒咖啡提质增产的灌水和遮荫耦合模式[J]. *应用生态学报*, 2018, 29(4): 1140-1146.
- [20] LIU X, LI F, ZHANG Y, et al. Effects of deficit irrigation on yield and nutritional quality of Arabica coffee (*Coffea arabica*) under different N rates in dry and hot region of southwest China[J]. *Agricultural Water Management*, 2016, 172: 1-8.
- [21] 张鲁鲁, 蔡焕杰, 王健, 等. 不同灌水量对温室甜瓜生长和生理特性的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2009, 27(6): 58-62.
- [22] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [23] 李志刚, 谢应忠. 翻埋与覆盖林木枝条改善宁夏沙化土壤性质[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(10): 174-181.
- [24] 张义, 谢永生, 郝明德, 等. 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.

[25] 赵彩衣, 王媛媛, 董青君, 等. 不同水肥处理对苕子和后茬玉米生长及土壤肥力的影响[J]. 水土保持学报, 2019, 33(4): 161-166.

[26] YANG W, JIAO Y, YANG M, et al. Minimizing soil nitrogen leaching by changing furrow irrigation into sprinkler fertigation in potato fields in the Northwestern China plain[J]. *Water*, 2020, 12(8): 2229.

[27] 关焱, 宇万太, 李建东. 长期施肥对土壤养分库的影响[J]. *生态学杂志*, 2004, 23(6): 131-137.

[28] 王涛, 杨怡钧, 邓琳, 等. 不同固体微生物菌剂对砒砂岩土壤性质和紫花苜蓿生长的影响[J]. *农业工程学报*, 2020, 36(8): 96-102.

[29] 张凯煜, 谷洁, 王小娟, 等. 微生物有机肥对樱桃园土壤细菌群落的影响[J]. *中国环境科学*, 2019, 39(3): 1245-1252.

[30] 蒋朝晖, 曾清如, 皮荷杰, 等. 不同品种尿素施入土壤后 pH 值的变化和氨气释放差异[J]. *环境化学*, 2009, 28(2): 177-180.

[31] 李艳鹏, 贺同鑫, 王清奎. 施肥对杉木林土壤酶和活性有机碳的影响[J]. *生态学杂志*, 2016, 35(10): 2722-2731.

[32] YANG L, LI T, LI F, et al. Fertilization regulates soil enzymatic activity and fertility dynamics in a cucumber field[J]. *Scientia Horticulturae*, 2008, 116(1): 21-26.

[33] GUAN S Y. Soil enzyme and its research methods[M]. Beijing: Agriculture Press, 1986.

[34] GRAMSS G, VOIGT K D, KIRSCHE B. Oxidoreductase enzymes liberated by plant roots and their effects on soil humic material[J]. *Chemosphere*, 1999, 38(7): 1481-1494.

[35] 侯湖平, 王琛, 李金融, 等. 煤矸石充填不同复垦年限土壤细菌群落结构及其酶活性[J]. *中国环境科学*, 2017, 37(11): 4230-4240.

[36] 邓浩亮, 张恒嘉, 李福强, 等. 河西绿洲苕蓝生长、光合特性及品质对膜下滴灌调亏的响应[J]. 水土保持学报, 2018, 32(3): 321-327.

[37] HE Y, XI B, LI G, et al. Influence of drip irrigation, nitrogen fertigation, and precipitation on soil water and nitrogen distribution, tree seasonal growth and nitrogen uptake in young triploid poplar (*Populus tomentosa*) plantations[J]. *Agricultural Water Management*, 2021, 243: 106460.

[38] 张学林, 徐钧, 安婷婷, 等. 不同氮肥水平下玉米根际土壤特性与产量的关系[J]. *中国农业科学*, 2016, 49(14): 2687-2699.

[39] 丁少男, 薛蕙, 刘国彬. 施肥处理对黄土丘陵区农田土壤酶活性和水溶性有机碳、氮的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2015, 34(11): 2146-2154.

【责任编辑 李晓卉】